해양환경안전학회지 제17권 제2호 pp. 105-121, 2011. 06. 30. (ISSN 1229-3431)
Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety

시화호 및 주변해역의 수질 특성

장정익* · 한인섭**† · 김경태*** · 나공태***
*, ** 서울시립대학교 환경공학과 대학원, *** 한국해양연구원 해양환경 · 보전연구부

Characteristics of Water Quality in the Shihwa Lake and Outer Sea

Jeong-Ik Jang* · Ihn-Sub Han**† · Kyung-Tae Kim*** · Kong-Tae Ra***
*, ** Department of Environmental Engineering, Graduate School, University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea
*** Marine Environments & Conservation Research Department, KORDI, Ansan, 426-744, Korea

요 약 : 본 연구에서는 시화호의 수질 관리 정책 연구를 위한 최근의 수질 자료 확보를 목적으로 2010년에 시화호 내·외측 해역에서 수질 조사를 수행하였다. 시화호 표층수 수질항목들의 수평적 농도분포는 하천을 통한 담수 유입과 배수갑문을 통한 외해수 유입의 영향으로 인하여 반월 및 시화 산단 인근 상류지역에서는 높고 배수갑문으로 갈수록 낮아지는 경향을 나타냈다. 시화호 외해에서는 TN 및 TP가 소래포구에 가까운 곳에서 높은 농도를 나타내었으며, 전체적으로 시화호 내해보다는 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 시화호 내측의 경우, 여름철 성층형성 및 저층의 활발한 유기물 분해로 빈산소층이 발달되고 있었다. 수질항목들의 수직적 농도분포의 경우, 용존영양염, TN 및 TP는 표층보다 저층에서 높았지만, COD, 클로로필-*a* 및 POC는 이와 반대로 저층보다 표층에서 높은 분포를 나타냈다. 시화호 표층수에서 염분은 용존영양염과 양호한 음의 상관성을 보여 담수 기원의 영양염 공급이 확인되었고, 이에 의한 식물플랑크톤의 대증식으로 COD 및 POC가 높게 나타났다.

핵심용어 : 시화호, 인공호수, 해수, 수질, 수평 분포, 수직 분포

Abstract : *The operation of tidal power facility may induce severe changes of water quality in Shihwa Lake. Current water quality data are quite important to water quality management policy of Shihwa Lake. Thus, the water quality data of Shihwa Lake and its adjacent sea in 2010 were presented to characterize the temporal and spatial changes of water parameters such as pH, SS, DO, COD, dissolved nutrients, chlorophyll-a, TN and TP. Highest levels of water quality parameters were observed near the Shihwa and Banweol industrial complexes and the levels of water quality parameters were on a decreasing trend to those near the water gate. It suggests that the horizontal distributions of water quality levels are mainly controlled by the supply of fresh water from streams and the inflow of outer seawater by operation of water gate. Although the higher concentrations of TN and TP were observed in the location being affected by Sorae port, the levels of water quality parameters in outer sea of Shihwa Lake were lower than those in Lake. In summer season, hypoxic condition was well developed in bottom water by strong stratification and active decomposition of organic matter. Thus, the vertical distributions of dissolved nutrient, TN and TP concentrations showed the concentrations to be higher in bottom seawater than those in surface seawater whereas the vertical distributions of chlorophyll-a, COD and POC concentrations showed the concentrations to be higher in surface seawater than those in bottom water. Results of Pearson's correlation matrix for surface seawater demonstrated that salinity showed negatively good correlation with not only dissolved nutrients except for ammonium but chlorophyll-a, COD and POC. This result indicates that the supply of dissolved nutrients through several streams might significantly affect phytoplankton bloom and increase of COD concentration in surface seawater.*

Key Words : *Shihwa lake, Artificial lake, Seawater, Water quality, Horizontal distribution, Vertical distribution*

1. 서 론

1960년대 이후 급속한 도시화, 산업화와 더불어 토지 이용에 따른 임야의 잠식으로 국토 가용면적이 한계를 나타내면서 잠식된 농지의 대체, 항만 및 공항 건설, 임해 산업단지 조성 등 다양한 목적의 용지확보 필요성이 증대되었다. 아산호, 간월호, 금강호, 새만금호 및 시화호 등이 대규모 간척사업에 의해 담수호로 만들어졌으나(농어촌진흥공사, 1996) 수질악화 등의 문제로 인하여 새만금호 및 시화호는 해수호 상태를 유지하고 있다.

시화호는 안산시, 시흥시, 화성시의 연안에 위치하며, 경기만내 군자만에 발달되어 있는 조간대를 수도권 인구 분산, 산

* 대표저자 : 정회원, jeongik@korea.kr, 02-504-5372
† 교신저자 : 정회원, ishan@uos.ac.kr, 02-2210-2418

업단지 조성, 농업용지 확보 및 농업용수 공급을 위하여 실시한 대규모 간척사업인 시화지구 개발사업의 일부로 편입시켜 1994년 1월 12.7 ㎞의 시화방조제의 물막이 공사가 완료됨으로써 만들어졌다(한국수자원공사, 1998). 시화호 주변 유역에는 산업단지, 도시 및 목축지 등 오·폐수 유입원과 농경지 등 비점오염물질 유입원이 분포하고 있고, 담수화 과정에 부영양화 및 중금속 오염이 급속히 진행되었으며, 호수 내에는 식물플랑크톤의 대증식으로 연중 적조가 발생하였다(한국해양연구소, 1997). 유역으로부터 들어온 유기물과 표층의 높은 일차생산에 의해 생성된 유기물은 고염의 저층수로 침강되어 분해과정에서 다량의 산소를 소모하고, 환원환경이 발달함에 따라 무기영양염의 재생산을 초래하였으며, 이러한 문제들로 인하여 시화호 수질은 악화되었다(박 등, 1997; 한국해양연구소, 1997; 1998).

방조제 완공이후 담수화 과정 중에 악화된 시화호의 수질 개선 대책의 일환으로 1996년부터 배수갑문을 통한 부정기적인 방류와 외해수 유입을 실시하였다. 1997년 3월 500만 m^3의 시험 방류와 함께 시화호 내·외측의 환경영향조사가 실시되었지만 간헐적인 해수 유통으로는 수질 개선효과가 미미하여 지속적으로 외해수 유입량을 증가시켜 1998년 3월부터는 배수갑문의 상시 조작으로 2,000만 m^3/회까지 방류 및 유입을 실시하였다(한국수자원공사와 농어촌진흥공사, 1996; 한국해양연구소, 1999). 다각적인 수질 개선 노력에도 불구하고 시화호의 담수호로 관리하는 것이 불가능해짐에 따라 2000년 12월 정부는 시화호를 해수호로 관리하기로 결정하였다. 2000년 2월 해양오염방지법을 개정하여 '환경관리해역'제도를 신설하고 시화호 유역을 포함하는 시화호·인천연안을 특별관리해역으로 지정하였다.

외해수의 유입을 통한 해수교환은 시화호의 배수갑문 인접해역에서는 30 psu 내외의 고염분을 나타내면서 성층이 다소 약화되었으나 여전히 계절적 요인에 의해 성층이 나타나고 있으며, 시화호 상류 지역은 외해수와의 교환이 매우 제한되고 있다. 박 등(2003)은 1996년 6월부터 외해수가 상시 교환되는 2001년 10월까지의 수질 변동 연구에서 유기물 오염 및 부영양화의 지속, 저층의 무산소 환경 형성에 따른 고농도의 암모니아 질소 및 인산 인의 용출을 보고하였다.

현재 시화호 수질의 체계적이고 종합적인 개선을 위하여 1단계 시화호 종합관리계획에 이어 2단계 종합관리계획(2007~2011년)이 추진되고 있다. 해수 유통량의 대폭적인 확대를 통한 시화호 수질 개선 목적으로 시화호 중앙부에서 2004년 12월 시설용량 25.4만 kW의 시화호조력발전소의 건설 공사를 착수하였으며, 2011년 6월 준공예정에 있다. 또한 시화호 유역의 개발 압력에 따른 오염물질 부하량 증가 우려 및 시화호의 지속가능한 발전을 담보하기 위하여 마산만에 이어 연안오염총량관리제도의 도입이 추진되고 있으며, 두 차례의 종합관리계획에서 COD 2 ppm(해역별 수질 기준 Ⅱ등급) 달성을 목표로 하였으나 1단계 종합관리계획에서는 이루지 못하였다. 2단계에 속하는 2009년의 경우 시화호 내에 설정된 국가해양환경측정망(3개 정점)의 연평균 COD는 4.07 ppm으로 등급 외의 수질을 나타내었으며(국립수산과학원, 2009), 현재 조력발전소 가동 계획과 시화호에 대한 해양환경정책 추진과정상 주요시점에 놓여 있다. 따라서 기존 환경에 대한 최근의 환경자료 확보는 장래의 환경 개선방안 수립과 함께 그 추진에 따른 변화 분석의 기초자료 확보라는 측면에서 매우 중요한 지위를 차지하므로 본 연구에서는 시화호 및 시화호 외해에서 2010년의 수질 환경의 현황 및 분포특성을 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

시화호 내측 해역의 수질은 2010년 5회(4, 6, 7, 8, 10월)에 걸쳐 12개 정점의 표층 조사와 3개 정점(정점 4, 7, 9)에서 수층별 조사를 실시하였으나 7월에는 표층 조사만 실시하였다(Fig. 1). 시화호 외측 해역의 수질은 2010년 8월에만 21개 정점의 표층과 저층에서 조사를 실시하였다. 표층수는 50 cm 수심에서, 수층별 조사는 2~2.5 m 간격으로 수행하였다. 저층수는 조사 시기에 따라 수심이 약간씩 변하여 채수수심이 다르나 수심을 측정한 후 저층 바닥면으로부터 50 cm 위에서 채수하였다. 수질 측정항목은 수온, 염분, pH, 용존산소량(DO), 화학적 산소요구량(COD), 총질소, 총인, 용존영양염, 부유물질, 클로로필-*a*, 용존유기탄소(DOC) 및 입자성유기탄소(POC)였다.

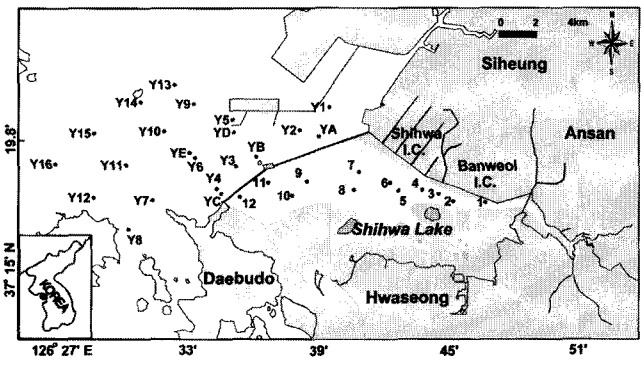

Fig. 1. Map showing sampling stations in the study area.

수온, 염분은 YSI-6600으로 선상에서 측정하였다. pH와 DO는 각각 pH meter(Sension1, HACH, USA)와 Winkler법(국토해양부, 2010a)으로 측정하였다. 용존영양염(질산 질소, 아질산 질소, 인산 인, 규산 규소, 암모니아 질소)은 분할흐름분석기(Segmented flow analysis, O.I. Analytical, USA)로 측정하였으며, 총질소(TN) 및 총인(TP)는 시료를 과황산칼륨 용액으로 산화시킨 후 흐름주입분석기(Flow injection analysis, Lachat Quickchem AE, USA)로 분석하였다(Valderrama, 1981). COD는 해양환경공정시험방법에 따라 분석하였으며(국토해양부, 2010a), 클로로필-a는 90 % 아세톤으로 추출하여 Spectrometer(Milton Roy Spectronic-3000)로 측정하였다.

입자성유기탄소와 입자성유기질소는 부유물질을 측정한 여

과지를 1N 염산(Merck Co.)으로 처리·건조한 후 CHN Analyzer(Flash 2000 series, Thermo Scientific, EU)로 측정하였다. 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon; DOC)는 TOC-V_{CPH}(Shimadzu Co., Japan)로 측정하였다(Sugimura and Suzuki, 1988).

3. 결과 및 고찰

3.1 시화호 내 · 외측 수질의 수평 분포특성

2010년 5회에 걸쳐 수행된 시화호 내·외측 수질 조사에 의한 표층수의 각 시기별 자료를 Table 1에 요약하여 나타내었으며, 주요 항목의 수평 분포를 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6에 제시하였다.

1) 수온

시화호 내측 표층수의 수온은 시기에 따른 변화가 크게 나타났으며 4월에는 9.5~10.0 ℃(평균 9.8 ℃)로 다른 시기보다는 낮은 수온을 나타냈다. 그 외의 시기는 대부분의 정점에서 20 ℃를 상회하였으며, 6월, 7월, 8월로 가면서 수온은 상승하였다. 8월에는 27.2~29.0 ℃(평균 28.3 ℃)로 가장 높은 수온을 나타내었고, 10월에는 20 ℃ 내외를 나타내었다(Table 1). 시화호 내측 표층수의 수온 분포는 배수갑문에 가까운 정점에서 낮고 호수 중앙 및 상류 정점으로 갈수록 높았는데 이는 상대적으로 낮은 수온을 가진 외해수의 영향으로 생각된다. 한편 8월 외해 표층수의 수온은 23.8~25.5 ℃(평균 24.7℃)로 육지에 인접한 곳에서 높았다.

Table 1. Summary of water parameters concentrations ranges and average values in surface seawater of Shihwa Lake and outer sea 2010

Sites	Month	Temp. (℃)	Sal. (psu)	Tr. (m)	pH	DO (mg/L)	DO (%)	SS (mg/L)	COD (mg/L)	PO_4-P (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)
Shihwa Lake	April	9.5-10.0 (9.8)	26.3-29.3 (28.3)	1.5-3.1 (2.2)	7.48-8.08 (7.80)	8.2-9.7 (9.0)	85.6-103 (95.0)	3.1-8.2 (4.7)	3.2-6.1 (4.5)	0.002-0.005 (0.003)	0.005-0.016 (0.008)	0.041-0.115 (0.059)
	June	22.9-25.8 (24.5)	19.1-27.7 (24.7)	0.4-1.7 (1.1)	8.49-9.32 (8.87)	11.4-17.5 (13.5)	156-244 (187)	6.0-29.3 (15.2)	5.8-17.8 (10.5)	0.002-0.024 (0.009)	<0.001-0.001 (0.001)	<0.001-0.002 (0.001)
	July	25.5-28.0 (26.9)	13.2-27.5 (24.2)	-	8.64-9.40 (8.85)	10.1-21.4 (13.1)	144-293 (188)	5.0-32.4 (11.0)	8.2-21.2 (12.0)	0.008-0.079 (0.024)	<0.001-0.042 (0.042)	0.001-0.031 (0.004)
	August	27.2-29.0 (28.3)	5.7-23.4 (18.4)	0.3-1.6 (1.1)	8.37-8.96 (8.62)	6.9-10.3 (8.34)	99.2-143 (119)	3.6-35.1 (10.1)	5.1-9.3 (6.6)	0.002-0.041 (0.007)	<0.001-0.076 (0.021)	<0.001-1.074 (0.182)
	October	19.2-20.9 (20.1)	12.0-18.2 (16.8)	0.4-1.8 (0.9)	9.21-9.79 (9.50)	13.3-16.6 (14.9)	161-203 (182)	7.5-46.0 (20.7)	6.2-24.0 (12.8)	0.003-0.028 (0.009)	<0.001-0.019 (0.010)	<0.001-0.321 (0.054)
	Range (Avr.)	9.5-29.0 (21.9)	5.7-29.3 (22.5)	0.3-3.1 (1.3)	7.48-9.79 (8.73)	6.9-21.4 (11.8)	85.6-293 (154)	3.1-46.0 (12.3)	3.2-24.0 (9.3)	0.002-0.079 (0.010)	<0.001-0.076 (0.016)	<0.001-1.074 (0.060)
Outer Sea	August	23.7-25.5 (24.7)	27.7-29.5 (28.6)	0.7-3.2 (2.0)	7.83-8.25 (8.09)	6.4-9.5 (7.7)	90.9-135 (109)	2.7-18.9 (6.6)	1.6-4.1 (2.6)	0.005-0.123 (0.030)	0.008-0.036 (0.014)	0.027-0.352 (0.105)

Sites	Month	NH_4-N (mg/L)	SiO_2-Si (mg/L)	DIN (mg/L)	TP (mg/L)	TN (mg/L)	Chl-*a* (μg/L)	POC (mg/L)	PON (mg/L)	DOC (mg/L)	TOC (mg/L)
Shihwa Lake	April	0.071-0.236 (0.122)	0.024-0.350 (0.136)	0.116-0.367 (0.189)	0.020-0.052 (0.031)	0.368-0.857 (0.538)	1.0-3.5 (2.5)	0.77-1.58 (1.06)	0.11-0.28 (0.16)	3.11-5.35 (3.73)	4.04-6.17 (4.79)
	June	0.026-0.117 (0.051)	0.404-0.957 (0.643)	0.027-0.117 (0.051)	0.045-0.267 (0.131)	0.515-1.320 (0.847)	12.6-82.9 (33.9)	2.08-13.1 (5.32)	0.24-1.18 (0.53)	3.56-11.7 (5.71)	6.31-18.3 (11.0)
	July	0.007-0.028 (0.016)	0.117-0.568 (0.265)	0.009-0.098 (0.023)	0.056-0.399 (0.136)	0.501-1.888 (0.834)	-	1.32-9.10 (3.16)	0.15-1.71 (0.49)	3.84-10.5 (6.11)	5.31-19.6 (9.27)
	August	0.022-0.336 (0.067)	0.315-1.965 (0.607)	0.022-1.487 (0.182)	0.039-0.405 (0.115)	0.515-1.844 (0.793)	11.9-170 (47.3)	1.39-6.77 (2.77)	0.24-1.13 (0.44)	3.75-7.13 (4.96)	5.33-13.9 (7.73)
	October	0.021-0.047 (0.034)	0.022-0.356 (0.061)	0.021-0.375 (0.061)	0.048-0.409 (0.155)	0.496-2.820 (0.992)	11.6-318 (87.3)	2.33-17.4 (7.66)	0.25-2.27 (0.79)	2.89-4.24 (3.49)	5.22-21.7 (11.2)
	Range (Avr.)	0.007-0.336 (0.058)	0.022-1.965 (0.342)	0.009-1.487 (0.101)	0.020-0.409 (0.114)	0.368-2.820 (0.801)	1.0-318 (42.7)	0.77-17.4 (3.99)	0.11-2.27 (0.48)	2.89-11.7 (4.80)	4.04-21.7 (8.79)
Outer Sea	August	0.057-0.429 (0.154)	0.083-0.629 (0.253)	0.093-0.816 (0.274)	0.016-0.133 (0.046)	0.281-0.913 (0.475)	1.9-14.2 (7.2)	0.34-0.83 (0.57)	0.03-0.09 (0.06)	2.03-6.42 (2.76)	2.41-6.98 (3.33)

2) 염분

표층수의 염분변화는 4월 26.3~29.32 psu(평균 28.3 psu), 6월 19.1~27.7 psu(평균 24.7 psu), 7월 13.2~27.5 psu(평균 24.2 psu), 8월 5.7~23.4 psu(평균 18.4 psu), 10월 12.0~18.2 psu(평균 16.8 psu)로 나타났다(Table 1).

4월 조사에서 반월산단 인근 정점(정점 2)에서는 26.3 psu, 배수갑문 인근 정점 12에서도 29.3 psu로 염분의 차이가 3 psu에 불과하였다(Fig. 2). 6월 조사에서는 정점 2가 19.1 psu로 가장 낮았고(Fig. 3), 배수갑문에 가까운 정점 12에서 27.7 psu로서 2009년의 23.3~30.9 psu(평균 29.0 psu)(국토해양부, 2009)와 다소 차이가 있었다. 7월에는 시화호 내측 정점 1에서는 13.2 psu, 정점 12에서는 27.5 psu로 다른 조사시기에 비해 염분의 차이(14.3 psu)가 큰 것으로 나타났다(Fig. 4).

8월 조사에서는 상류(정점 1)에서 5.7 psu로 조사기간 중에 가장 낮은 염분을 보였으며, 호수 중앙부인 정점 7에서는 20.3 psu로 약간 증가하였고 배수갑문 인근 정점(정점 12)에서도 23.4 psu를 보여 평균적으로 낮은 염분을 나타냈다(Fig. 5). 이는

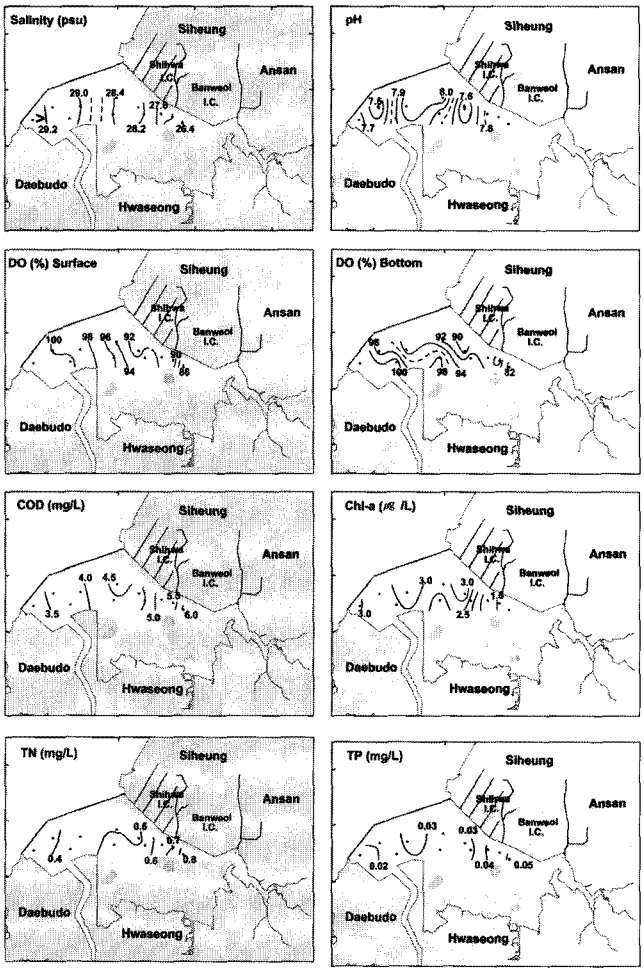

Fig. 2. Horizontal distributions of salinity, pH, COD, Chl-*a*, TN and TP concentrations in surface seawater and DO saturation(%) in surface and bottom seawater of Shihwa Lake in April 2010.

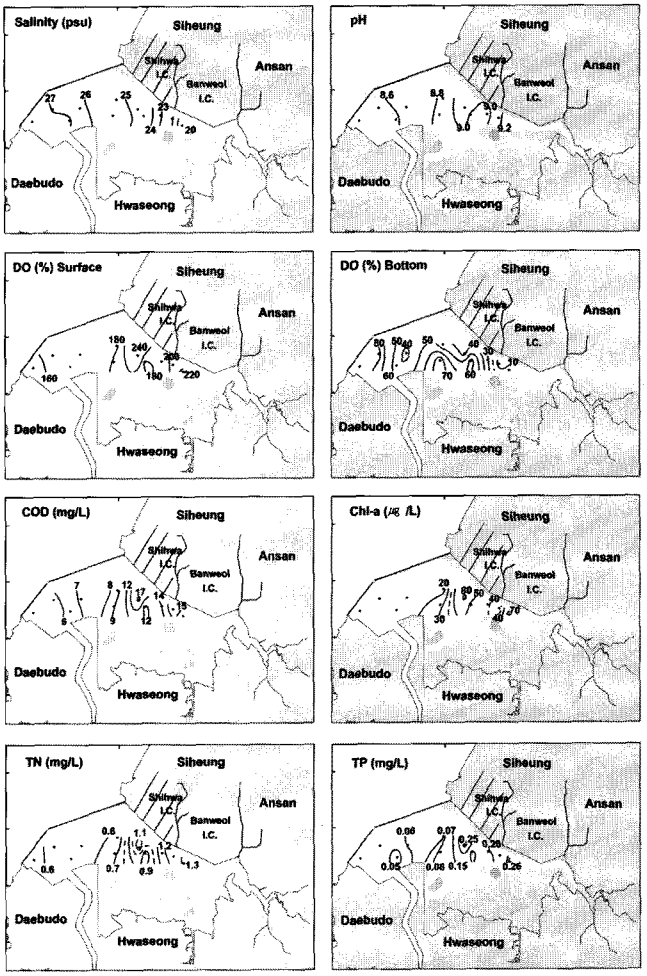

Fig. 3. Horizontal distributions of salinity, pH, COD, Chl-*a*, TN and TP concentrations in surface seawater and DO saturation(%) in surface and bottom seawater of Shihwa Lake in June 2010.

조사전일 23.0 mm, 조사당일 오전까지 9.5 mm의 강우로 인하여(기상청, 2010) 담수의 유입이 성층화된 시화호 표층수에 크게 영향을 미쳤기 때문이다. 2009년 8월 조사에서도 하계에 강우량이 많았는데 반월 및 시화산단 하천수 및 반월산단 토구를 통한 담수의 유입으로 산단 인근 정점인 정점 2에서는 3.1 psu의 염분이 보고된 바가 있다(국토해양부, 2009). 10월의 경우, 산단 인근 정점 1의 염분이 12.0 psu로 가장 낮았으며 중앙부인 정점 7은 16.8 psu, 배수갑문 인접 정점 12는 17.7 psu, 평균 16.8 psu로 다른 조사 시기에 비해 낮았으며, 강우로 인한 담수유입의 영향을 받고 있었다(Fig. 6).

8월에 실시된 시화호 외측조사에서 표층수의 염분은 27.7~29.5 psu(평균 28.9 psu)로 같은 시기 내측 염분 5.7~23.4 psu(평균 18.4 psu)에 비해 평균 약 10 psu 높게 나타났다. 조사당일 많은 양의 강우에도 표층수 염분의 공간분포는 큰 차이를 보이지 않았으며, 소래포구 등의 담수의 유입원이 있는 정점 Y1과 Y2는 각각 28.4 psu와 28.3 psu로 다른 정점에 비해 약간 낮은 것으로 나타났다. 배수갑문의 영향을 받고 있는 정

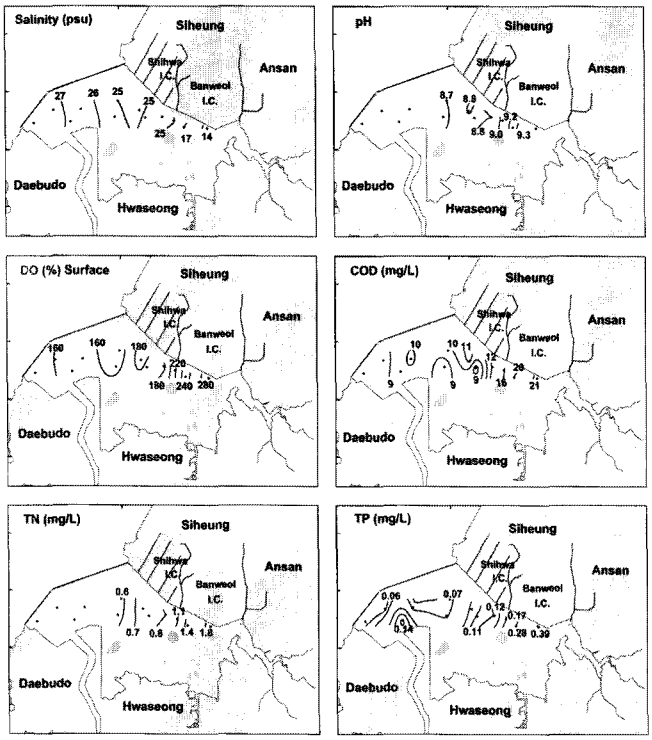

Fig. 4. Horizontal distributions of salinity, pH, DO saturation(%), COD, TN and TP concentrations in surface seawater of Shihwa Lake in July 2010.

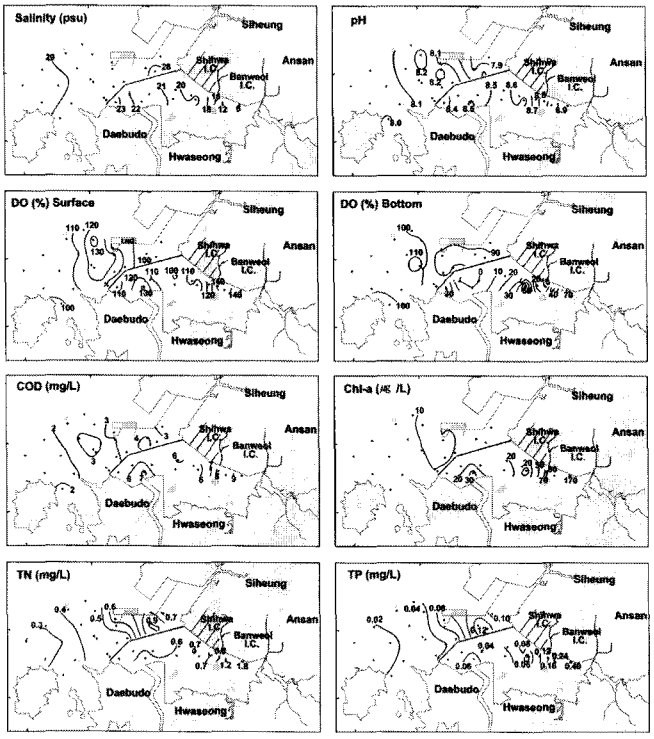

Fig. 5. Horizontal distributions of salinity, pH, COD, Chl-a, TN and TP concentrations in surface seawater and DO saturation(%) in surface and bottom seawater of Shihwa Lake and outer sea in August 2010.

점 Y3과 정점 Y4 역시 염분이 약 28.4 psu로 나타났다.

시화호 표층수 염분의 일반적인 분포는 시화호 상류인 산단 주변에서 낮은 염분을 보이며 배수갑문 지역으로 가면서 증가하는 경향을 보였다. 시화호 내 염분은 조사시기에 따라 큰 변화를 나타냈으며, 염분을 조절하는 주요한 원인은 강우 등을 통한 담수의 영향과 더불어 배수갑문을 통한 외해수의 유입임을 알 수 있었다. 특히 8월과 10월의 경우 시화호 내측 표층수의 평균 염분이 다른 조사시기에 비해 최소 5.8 psu와 최대 11.5 psu를 낮출 정도로 다량의 담수 유입과 강한 성층 형성이 발생한 것으로 판단된다. 시화 호 외측에서의 염분을 조절하는 요인으로는 담수의 유입으로 염분이 낮아진 시화호 내측 해수의 유출 및 소래포구 등 자연적인 담수의 유입원이 있으나 본 조사 범위에서는 큰 영향을 받지 않은 것으로 나타났다.

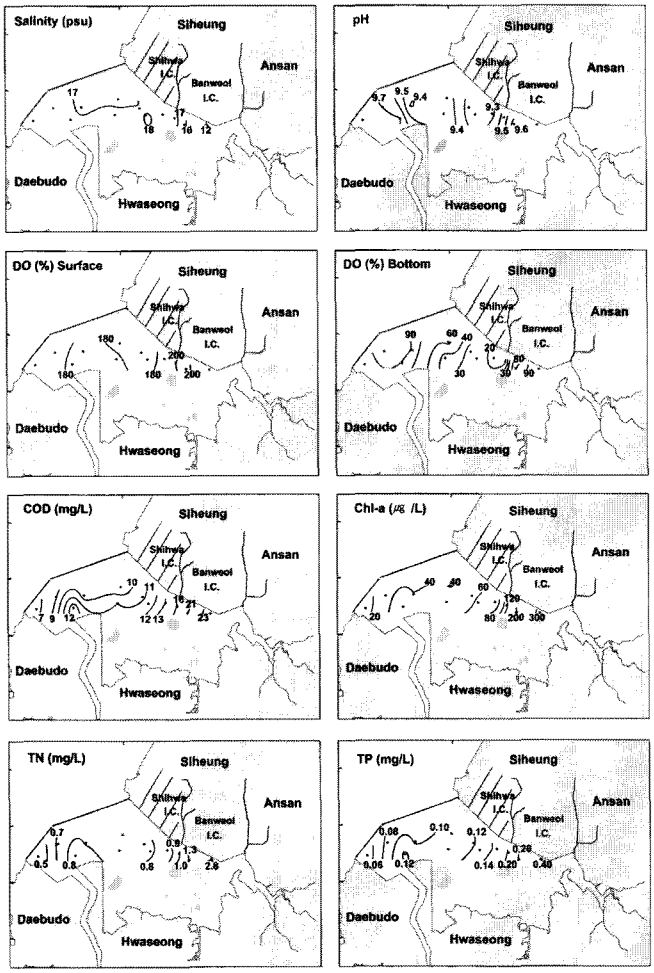

Fig. 6. Horizontal distributions of salinity, pH, COD, Chl-*a*, TN and TP concentrations in surface seawater and DO saturation(%) in surface and bottom seawater of Shihwa Lake in October 2010.

3) pH

시화호 표층수의 pH는 4월 7.48~8.08(평균 7.80), 6월 8.49~9.32(평균 8.87), 7월 8.64~9.40(평균 8.85), 8월 8.37~8.96

(평균 8.62), 10월 9.21~9.79(평균 9.50)으로 나타났다(Table 1). pH의 수평적인 분포는 산단에 인접한 지역에서는 높은 pH 값을 보이고 배수갑문으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였으며(Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5), 예년과 유사한 분포특성을 보였다(국토해양부, 2009). 강우에 의해 염분이 낮았던 10월 조사에서는 산단 인근 지역의 pH가 9.6 이상으로 높았으며, 이후 중앙지역에서는 약간 낮아진 후 배수갑문 지역에서는 다시 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 6). 10월의 매우 높은 pH는 식물플랑크톤의 분류군별 현존량에 있어 다른 시기보다 2.8~6.6 배 높게 나타난 바(국토해양부, 2010b)와 같이 식물플랑크톤의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 시화호 외측 표층수 pH는 표층에서 7.83~8.01(평균 8.09), 저층에서 8.01~8.09(평균 8.04)로 표층과 저층간의 차이가 없었고, 8월 시화호 내측 평균 8.62에 비해 약간 낮았다.

4) 용존산소(DO)

시화호 표층수의 용존산소는 전체 조사기간 동안 6.9~21.4 mg/L로 매우 큰 변동 폭을 보였다(Table 1). 4월에는 9 mg/L 내외로 비교적 균일한 분포를 보였으나(Fig. 2) 그 외의 시기에는 정점간의 차이가 크게 나타났다(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6). 특징적으로는 6월과 7월의 경우 시화호 상류인 반월 산단 주변에서 14 mg/L 이상이었지만 배수갑문쪽으로 갈수록 낮아졌다(Fig. 3 및 Fig. 4). 10월에는 13.3~16.6 mg/L(평균 11.8 mg/L)로 전반적으로 높은 농도를 나타내면서 평균 농도 역시 다른 시기보다 높았다(Fig. 6). 8월 시화호 외측 표층수의 용존산소는 6.4~9.5 mg/L(평균 7.7 mg/L)로 같은 시기의 시화호 내측보다 약간 낮았으며, 공간적으로는 소래포구와 영흥도 주변에서 약 6 mg/L의 낮은 농도를 보였다(Fig. 5).

표층수의 용존산소포화도는 4월 85.6~103 %(평균 95.0 %), 6월 156~244 %(평균 187 %), 7월 144~293 %(평균 188), 8월 99.2~143 %(평균 119 %), 10월 161~203 %(평균 182 %)의 범위였다(Table 1). 4월 조사의 경우 산단에 가까운 정점 2과 3에서의 용존산소포화도는 85.6 %와 91.3 %였으나 배수갑문 인근지역으로 갈수록 증가하여 정점 12에서는 103 %로 가장 높았다(Fig. 2). 6월에는 평균 용존산소포화도가 큰 폭으로 증가하였으며, 산단 인근에서 용존산소포화도가 200 %를 상회하였고, 배수갑문 지역으로 갈수록 감소하는 경향이었다(Fig. 3). 7월 역시 산단 인근 정점에서는 293 %의 용존산소포화도를 보였으며(Fig. 4), 평균은 188 %로 6월과 비슷한 값을 보였으나 4월에 비해 약 2 배 정도 높아진 것으로 나타났다. 강우량이 많았던 8월에는 6월과 7월에 비하여 감소하였으나 산단 인근 정점에서는 여전히 높은 용존산소포화도를 보였다(Fig. 5). 10월 조사에서는 산단 인근 정점 2와 정점 3에서 각각 203 %와 201 %의 높은 포화도를 보였으며 배수갑문 인근 지역에서도 160 %를 넘는 높은 포화도를 나타냈다(Fig. 6).

한편, 저층수의 용존산소포화도는 4월에 90.4~92.6 %의 포화도를 보였으며 표층과의 차이가 크지 않아 표층과 저층이 잘 혼합되어 있는 것으로 나타났다. 6월 조사에서는 정점 4의 저층에서 32.0 %, 중앙부인 정점 7의 저층 41.6 %, 수심이 가장 깊은 정점 9에서 37.8 %로 급격히 감소하는 낮은 포화도를 보였으며 지역에 따른 큰 차이는 보이지 않았다. 수온 상승과 담수유입으로 인한 성층화가 가장 잘 발달된 8월 저층에서의 용존산소 포화도는 정점 4에서 13.5 %, 정점 7에서 14.7 %, 정점 9에서 0 %로 나타나 무산소층이 존재하고 있는 것으로 나타났다. 저층에서의 낮은 용존산소포화도는 2006년 이후 지속적으로 관측되는 현상으로 배수갑문을 통한 외해수의 유입이 저층의 무산소 혹은 저산소층을 소멸시키기에는 부족한 것으로 보인다(Fig. 5). 표층에서 용존산소포화도가 높았던 10월에도 산단 인근 정점 2와 정점 3의 저층에서 각각 7.5 %와 8.1 %로 무산소층이 형성되었으나 호수의 중앙부인 정점 7의 저층에서는 65.1 %로 8월의 14.7 %에 비해 증가하였고, 수심이 깊은 정점 9의 저층 역시 89.4 %로 8월에 비해서는 높았다.

표층에서의 용존산소 포화도의 수평적 분포는 상류지역에서 부영양화에 의한 식물플랑크톤 증가로 인해 높았으며 배수갑문지역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 저층의 경우, 산단에 인접한 상류지역에서는 빈산소 및 무산소층이 발달하였으나 배수갑문 지역으로 갈수록 용존산소 포화도가 증가하여 외해수의 유입에 영향을 받고 있는 것으로 나타났다.

5) 부유물질

시화호 표층에서의 부유물질은 4월의 경우 산단 인근과 호수 중앙부에서 다소 높은 분포였고, 배수갑문에 인접한 정점 12에서 가장 높은 8.2 mg/L를 나타내었다(Fig. 2). 6~8월 조사에서는 반월 및 시화 산단 인근지역에서 30 mg/L 내외로 높고 배수갑문 지역으로 갈수록 감소하는 수평적인 분포를 보였다(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5). 10월의 공간 분포는 다른 시기와 비슷하지만 정점 1에서는 조사기간 중 가장 높은 46.0 mg/L를 나타내었고(Fig. 6) 10월 평균 농도 역시 7월과 8월에 비해서는 2 배, 4월보다는 4 배 정도 높았다. 과거 조사결과(해양수산부, 2006)를 고려하면 하천 및 토구를 통한 부유물질 유입의 영향보다는 시화호 식물플랑크톤 및 부유생태계에 기인한 자체생산이 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다. 시화호 외해의 부유물질 농도는 표층에서 2.7~18.9 mg/L(평균 6.6 mg/L), 저층에서 5.6~70.3 mg/L(평균 22.7 mg/L)로 표층에서는 낮고 저층에서 높은 경향을 보였다. 저층에서 높은 부유물질은 대조차 환경 하에서 조석 영향으로 인한 퇴적물의 재부유가 주요한 원인으로 한강하구 등의 지역에서 유사한 경향을 보인바 있다(한국해양연구원, 2008).

6) 클로로필-*a*

시화호 표층수 중 클로로필-*a*는 4월에는 1.0~3.5 μg/L(평균 4.5 μg/L)로 2009년 4월 평균 8.1 μg/L에 비해 절반 수준이었다(Table 1 및 Fig. 2). 6월에는 12.6~82.9 μg/L(평균 33.9 μg/L)로 수심이 낮은 산단 인근 정점에서 71.5 μg/L로 높은 농도를 보였고, 정점 6의 표층에서 82.9 μg/L로 가장 높은 농도를 보였으며, 배수갑문쪽으로 갈수록 감소하는 경향이었다(Table 1 및 Fig.

3). 8월에서는 11.9~170 μg/L(평균 47.3 μg/L)로 6월에 비해 평균적으로 약 14 μg/L 정도 증가하였으며(Table 1) 10월에는 11.6~318 μg/L(평균 87.3 μg/L)로 4월에 비해 평균적으로 약 20 배 증가한 것으로 나타났다(Table 1). 상류지역인 정점 1과 정점 2에서는 각각 318 μg/L와 211 μg/L의 클로로필-*a* 농도를 보여 식물플랑크톤의 대량번식이 있었음을 시사하였다(Fig. 6).

한편 방조제 건설 이후인 1995~1996년 중의 4 회 조사에서 표층의 경우 46.4~318.3 μg/L의 범위로 5월, 8월, 10월에는 시화호의 상류에서 높고 배수갑문 방향으로 가면서 낮아지는 경향이 뚜렷하였으나 1996년 3월에는 전체해역에서 높은 농도를 보였고, 최대 318.3 μg/L로 매우 높았는데(최 등, 1997) 본 조사를 통해 상류지역에서의 높은 클로로필-*a* 농도는 과거와 유사하였다. 이는 시화호로 유입되는 하천에 강우 등에 의한 다량의 영양염이 유입되어 호수의 중앙부 및 배수갑문 지역에 비해 식물플랑크톤의 증식이 활발하여 클로로필-*a*의 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 배수갑문 인근 지역에서는 외해수 유입 영향으로 클로로필-*a*의 농도가 낮지만, 8월의 경우를 보면 시화호 내측의 배수갑문 및 중앙해역(정점 7~9)에서는 시화호 외해의 1.9~14.2 μg/L보다 전반적으로 높은 11.9~34.3 μg/L를 나타내어(Fig. 5) 내부 생산이 빠르게 진행되었던 것으로 판단된다.

7) 화학적산소요구량(COD)

시화호 표층수의 COD는 4월에 3.2~6.1 mg/L(평균 4.5 mg/L), 6월 5.8~17.8 mg/L(평균 10.5 mg/L), 7월 8.2~21.2 mg/L(평균 12.0 mg/L), 8월 5.1~9.3 mg/L(평균 6.6 mg/L), 10월 6.2~24.0 mg/L(평균 12.8 mg/L)로 정점 및 시기에 따른 차이가 크게 나타났다(Table 1). 평균 농도는 4월과 8월에 상대적으로 낮았으며, 클로로필-a 농도가 높았던 6월, 7월 및 10월에 10 mg/L이상의 높은 평균 농도를 보였다. COD의 수평분포는 4월의 경우 산단에 인접한 상류지역에서 약 6.0 mg/L로 상대적으로 높았으며, 중앙부 및 배수갑문 지역으로 갈수록 감소하는 경향이었다(Fig. 2). 6월에는 상류 뿐 아니라 호수 중앙지역에서도 15 mg/L 내외의 높은 농도였으며, 배수갑문 주변에서는 6 mg/L 정도를 나타내었다(Fig. 3). 강우의 영향을 받은 8월의 경우 전체적인 평균 농도는 7월에 비해 감소하였으나 수평분포는 다른 조사시기와 유사하게 나타났다(Fig. 5). 10월의 경우, 산단 주변에서 최대 24.0 mg/L의 높은 COD를 보였으며 중앙지역에서 약간 높고 배수갑문으로 갈수록 감소하였다(Fig. 6). 8월 시화호 외해에서의 COD는 표층에서는 1.6~4.1 mg/L(평균 2.6 mg/L) 저층에서는 1.4~4.9 mg/L(평균 2.7 mg/L)의 농도범위 및 평균 농도로 표·저층간에 큰 차이가 없었고 시화호 내측 평균(6.6 mg/L)에 비해 1/2 수준이었다. 시화호 외해 표층수의 COD 공간분포는 배수갑문 북측 지역에서 3 mg/L 이상으로 높았으며, 외해로 갈수록 감소하여 상대적으로 외해수가 낮은 COD를 유지하고 있었다. 국가해양환경측정망 자료에서도 2008~2009년에는 시화호 방조제 외측 일부 정점의 COD가 해역별 수질 등급 III 등급을 초과하는 경우가 많이 나타났다. 향후 시화호 조력발전소의 가동에 의하여 외해수의 시화호 유입, 상대적으로 오염된 시화호 내 해수의 외해 유출 등으로 수질의 급격한 해양환경 변화가 나타날 것으로 예상될 뿐 아니라 COD가 연안오염총량관리의 우선 항목으로 고려되므로 COD에 대한 보다 정밀한 수질 감시의 필요성이 있다.

8) 유기탄소

시화호 표층수의 입자성 유기탄소(POC)는 전체적으로 0.77~17.4 mg/L의 농도범위를 나타내었다(Table 1). 시기별 평균 농도는 10월이 가장 높은 7.66 mg/L를 나타내었으며, 10월 산단 인근 정점 1과 정점 2에서는 각각 17.4 mg/L와 14.4 mg/L로 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 6). 2010년 조사기간 중 시화호 표층의 정점별 POC와 클로로필-*a* 농도는 10월 시화호 상류지역에서 높고 배수갑문쪽의 정점 10~12로 갈수록 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 4월의 경우 시화호 전 정점의 평균 유기탄소 농도는 1.06 mg/L로 10월 조사의 1/7 수준으로 매우 낮았는데 클로로필-a의 농도 역시 다른 조사시기보다 4월에 낮은 값을 나타내어 생물기원에 의한 상호 연관성이 있는 것으로 추정된다. 6~8월, 10월 조사에서 POC는 4월과 마찬가지로 정점 6에서 가장 높았으며, 배수갑문 지역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6).

용존유기탄소(DOC)는 전체 조사기간 동안 3.11~11.7 mg/L의 농도범위를 나타내었다. 평균은 POC의 평균 농도가 가장 높은 10월에서 가장 낮은 평균 농도를 보였으며 7월 6.11 mg/L로 가장 높은 평균 농도를 보였다(Table 1).

입자성 유기탄소와 용존유기탄소의 합을 나타내는 총유기탄소(TOC)는 4월 4.04~6.17 mg/L(평균 4.79 mg/L), 6월 6.31~18.3 mg/L(평균 11.0 mg/L), 7월 5.31~19.6 mg/L(평균 9.27 mg/L), 8월 5.33~13.9 mg/L(평균 7.73 mg/L), 10월 5.22~21.7 mg/L(평균 11.2 mg/L)의 농도범위로 6월과 10월에 높은 평균 농도를 나타내었다(Table 1). 총유기탄소 중 용존유기탄소가 차지하는 비율은 4월에는 77.8 %로 가장 높았으며 6월에는 53.8 %, 7월에는 68.3 %, 8월에는 66.4 %, 클로로필-*a* 및 COD의 농도가 가장 높았던 10월에는 35.1 %로 감소하였다(Table 1). 수층내로 유입 또는 생성된 POC는 표층에서 저층으로 떨어져 박테리아에 의해 용존유기탄소로 분해되며 이때 용존산소를 소비하여 저층환경의 저산소 내지 무산소 환경을 일으키는 것으로 보고된바 있다(박 등, 1997).

POC와는 달리 DOC가 정점에 따라 농도가 일정하고, 특정 계절에 증가하는 것은 DOC로 대표되는 용존유기화합물의 구성이 크게 생물기원과 육상기원 두 가지 기원이 있음을 시사하며, 모든 조사시기 시화호 내측에서 두 가지 기원의 용존성 유기물이 동시에 공급되고 있음을 보여주고 있다(손 등, 2003; 해양수산부, 2006). 시화호 내 유기탄소의 주요한 존재형태는 대부분의 조사시기에서는 DOC임을 나타내고 있으나 10월 조사의 경우 식물플랑크톤의 대량번식으로 인하여 POC의 비율이 68 %로 높았다. 대부분의 조사시기에서 유기탄소 내 DOC

의 존재비율은 상류지역보다는 호수의 중앙부에서 더 높은 것으로 나타나 시화호 내 DOC의 공급원은 육상 유입과 함께 시화호 내 생물 번식에 영향을 크게 받는 것으로 보인다.

시화호 외해에서 8월 표층수의 POC와 DOC는 각각 0.34~0.83 mg/L(평균 0.57 mg/L), 2.03~6.42 mg/L(평균 2.76 mg/L)로 DOC가 절대적인 우위를 점하고 있었다(Fig. 5). 같은 시기의 시화호 내·외측 자료를 서로 비교하면 외측의 POC는 내측 POC의 약 1/5이었고, 외측의 DOC는 내측 DOC의 약 1/2이었다(Table 1).

9) 영양염

① 용존영양염

시화호 표층수의 질산 질소는 4월에 0.041~0.115 mg/L(평균 0.059 mg/L)로 2009년 4월에 비해 10 배 증가하였다(국토해양부, 2009). 6월에는 많은 정점에서 검출한계(0.001 mg/L) 이하, 7월에도 정점 1을 제외하면 0.001 mg/L였고 평균 농도는 두 시기가 각각 0.001 mg/L, 0.004 mg/L로 4월보다 낮은 농도를 보였다(Table 1). 8월에는 배수갑문 인근 지역에서 0.001 mg/L이하였으나 상류지역에서는 1.074 mg/L의 높은 농도를 보였다. 10월 조사에서도 상류지역에서는 농도가 높고 배수갑문 지역으로 갈수록 농도가 낮아지는 공간적인 분포를 보이고 있다. 이러한 시화호 상류지역 산단 인근 지역에서의 높은 질산 질소 농도는 강우가 모여드는 하천을 통해 다량의 영양염의 유입이 있음을 시사하고 있으며, 매우 낮은 질산 질소 농도를 나타내는 것은 영양염 공급 정도의 차이와 함께 식물플랑크톤의 증식에 따른 소모가 크게 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

암모니아 질소의 평균 농도는 4월에 0.122 mg/L로 다른 조사시기에 비해 높았으며, 7월이 가장 낮아서 4월의 1/7 수준이었다(Table 1). 공간적인 분포는 산단 인근인 상류지역에서 높고 배수갑문으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다. 암모니아 질소는 육상 공급 뿐 아니라 저층의 환원환경에 의한 직접적인 공급도 수계에서 비중이 큰데(한 등, 1997), 박 등(1997)은 방조제 완공 초기에 높은 암모니아 질소의 농도를 보고하였으며, 질소계 영양염 중에서 부영양화의 주된 요인이라고 하였다. 용존무기질소 중 암모니아 질소가 차지하는 비율은 4월에는 평균 64 %, 6월에는 평균 99 %, 7월에는 86 %, 8월에는 83 %, 10월에는 평균 91 %로 용존무기질소의 대부분이 암모니아 질소인 것으로 나타났다.

인산 인의 평균 농도는 7월에 0.024 mg/L로 가장 높은 것으로 나타났다. 2009년의 경우 4월 평균 인산 인이 0.020 mg/L로 높았으나 2010년의 경우 4월 조사에서 본 조사기간 중 가장 낮은 평균 농도(0.003 mg/L)를 보였다(Table 1). 인산 인의 공간적인 분포특성은 상류지역인 산단 인근지역에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 호수의 중앙부 및 배수갑문 지역으로 갈수록 농도가 낮아지는 경향을 보이고 있었다. 7월 조사 역시 산단 인근지역인 정점 1에서 0.079 mg/L의 최대농도를 보인 후 배수갑문 인근 정점 12에서는 0.008 mg/L로 1/10 수준으로 감소한 것으로 나타났다.

규산 규소는 전체적으로 0.022~1.965 mg/L의 범위였으며, 평균 농도로는 강우에 따른 육상의 담수 유출량 증가로 인하여 8월에 가장 높은 평균 농도(0.607 mg/L)를 보였다. 특히 식물플랑크톤의 대량번식으로 클로로필-a의 평균 농도가 87.3 μg/L로 높았던 10월에는 다른 조사사기에 비해 아주 낮은 규산 규소 농도(0.022~0.356 mg/L, 평균 0.034 mg/L)를 보였다(Table 1). 이는 규조류의 대량번식이 있어 표층에서 규산 규소가 고갈되었을 것이라는 가정이 성립하지만, 부유생태계 조사에서 다른 시기보다 10월에 규조류는 상대적으로 낮은 현존량을 보인 반면 와편모조류의 과다 번식이 있었다(국토해양부, 2010b). 와편모조류는 규산 규소의 주 소비자가 아니므로 다른 종에 의한 소비 또는 육상 및 저층으로부터의 절대적인 공급 제한이 추측된다. 일반적으로 규산 규소는 주로 육상의 암석 풍화 작용에 기인하지만 상당부분은 수계 내 저층환경으로부터 공급되기도 한다(박 등, 1997; Codispoti et al., 1991). 8월 조사에서는 클로로필-a의 평균 농도가 47.3 μg/L로 상대적으로 높았음에도 표층에서의 규산 규소의 평균 농도가 0.607 mg/L이었고 질산 질소의 평균 농도가 조사시기 중 가장 높은 0.182 mg/L로 보인 것은 여름철 집중강우로 인하여 하천을 통한 영양염의 과다 공급이 있었음을 시사하고 있다.

2010년 8월 시화호 외해의 인산 인은 표층에서 0.005~0.123 mg/L(평균 0.030 mg/L), 저층에서 0.011~0.101 mg/L(평균 0.034 mg/L)의 농도 범위였으며(Table 1), 소래포구에 가까운 정점들에서 높은 농도를 보였다. 시화호 내측에 비해 외측 표층수에서의 평균농도는 약 4 배 높았다. 시화호 외해의 질산 질소는 표층에서 0.027~0.352 mg/L(평균 0.105 mg/L), 저층에서 0.049~0.272 mg/L(평균 0.090 mg/L)로 표층에서 약간 높은 값을 보였으며, 시화호 내측 표층수 평균 0.182 mg/L보다 낮았다. 시화호 외해의 규산 규소는 표층에서 0.083~0.629 mg/L(평균 0.253 mg/L), 저층에서 0.141~0.529 mg/L(평균 0.292 mg/L)로 시화호 내측 평균(0.607 mg/L)의 절반 수준이었다.

② 총질소, 총인

시화호 표층수의 총질소는 4월에 0.368~0.857 mg/L(평균 0.538 mg/L), 6월에 0.515~1.320 mg/L(평균 0.847 mg/L), 7월에 0.501~1.888 mg/L(평균 0.834 mg/L), 8월에 0.515~1.844 mg/L(평균 0.793 mg/L), 10월에 0.496~2.820 mg/L(평균 0.992 mg/L)로 10월에 가장 높은 평균 농도를 나타내었다(Table 1). 총질소의 공간적인 분포는 상류지역인 산단 주변 정점에서 높았으며, 배수갑문으로 갈수록 감소하는 전형적인 분포특성을 나타내었다(Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6).

2010년 표층수 중 총인은 4월 0.020~0.052 mg/L(평균 0.031 mg/L), 6월 0.045~0.267 mg/L(평균 0.131 mg/L), 7월 0.056~0.399 mg/L(평균 0.136 mg/L), 8월 0.039~0.405 mg/L(평균 0.115 mg/L), 10월 0.048~0.409 mg/L(평균 0.115 mg/L)의 농도 범위와 평균 농도를 나타냈다(Table 1). 공간적인 분포는 다른 수질항목과 유사하게 상류지역인 산단 인근지역에서는 높았고

배수갑문 지역으로 갈수록 감소하였다(Fig. 2~Fig. 6). COD, 클로로필-*a* 농도가 높았던 10월에서의 총인의 평균 농도는 높았으나 인산 인의 농도가 다른 조사시기에 비해 낮아 식물플랑크톤과 같이 시화호 내 자체 생산된 유기물이 총인 농도에 크게 영향을 미쳤을 것으로 판단되며, 총인 중 용존인산 인이 차지하는 비율 역시 평균 8%로 낮은 것으로 나타났다.

시화호 표층수의 전체 자료에 의한 해역수질 등급은 총질소의 경우 Ⅱ등급(0.3 mg/L 초과 및 0.6 mg/L 이하)~등급외(1.0 mg/L 초과), 총인은 Ⅰ등급(0.03 mg/L 이하)~등급외(0.09 mg/L 초과)를 나타내었다. 각 시기별 평균으로 보면, 총질소는 4월에는 Ⅱ등급, 그 외의 시기에는 Ⅲ등급이었으며, 총인은 4월엔 Ⅱ등급이었지만 그 외에는 등급외의 악화된 수질을 나타내었다.

8월 시화호 외해에서 총인은 표층에서 0.016~0.133 mg/L (평균 0.046 mg/L), 저층에서 0.016~0.115 mg/L(평균 0.053 mg/L)로 정점간의 차이는 있으나 평균적으로 저층에서 약간 높은 값을 보이고 있었다. 시화호 외측 표층에서의 총인의 평균농도는 0.046 mg/L로 같은 시기 시화호 내측의 평균 농도 0.115 mg/L의 절반 수준이었다. 총질소의 경우 시화호 외측 표층에서 0.281~0.913 mg/L(평균 0.475 mg/L), 저층에서 0.287~0.779 mg/L(평균 0.456 mg/L)이었다. 시화호에서 8월의 경우 총질소의 평균이 0.793 mg/L로 총인과 유사하게 외측 해역이 내측의 1/2 정도였다.

시화호에서 총질소 중 용존무기질소가 차지하는 평균 비율은 4월 34%, 6월 6.4%, 7월 2.5%, 8월 14.2%, 10월 5.1%로 조사되었다. 클로로필-*a*의 농도가 높았던 시기인 6월, 7월 및 10월에 용존무기질소가 차지하는 비율은 다른 조사시기에 비하여 상당히 낮아 총질소의 대부분이 식물플랑크톤 기원이었음을 시사한다. 여름철과 같이 강우에 의한 담수 유입량이 많은 시기에 용존무기질소가 14.2%로 증가한 것은 시화호 내측 총인과 총질소의 농도에 영향을 주는 요인은 하천 및 토구를 통한 담수의 유입과 더불어 호수의 내부생산에 기인한 영향이 큰 것을 알 수 있었다.

3.2 시화호 수질의 수직 분포 특성

2010년 4회에 걸쳐 시화호의 3개 정점에서 수행된 수층별 수질 조사결과 일반수질 및 영양염 등 주요 항목에 대한 수직 분포는 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 나타내었으며, 각 정점별 특성을 살펴보면 아래와 같다.

1) 정점 4

정점 4는 반월산단과 시화산단의 경계면에 위치하고 있으며, 이들 지역과 가장 인접한 정점으로 강우 혹은 비강우시 하천수 혹은 반월산단 토구를 통하여 다양한 오염물질의 영향을 직접적으로 받는 지역이다.

수온과 염분의 경우 4월에는 수층간 차이가 각각 0.6 ℃와 1.3 psu로 비교적 균일하였다. 6월 조사에서는 표·저층간 염분차이가 6.4 psu로 4월에 비해 커졌고, 2 m 수심에서는 표층보다 약 5 psu 증가하였다. 강우의 영향을 있었던 8월과 10월 표층에서의 염분은 각각 18.1 psu와 17.6 psu를 보여 강우를 통한 담수의 유입이 표층에 크게 영향을 미쳤으며, 수심 증가에 따라 염분이 증가하였다(Fig. 7).

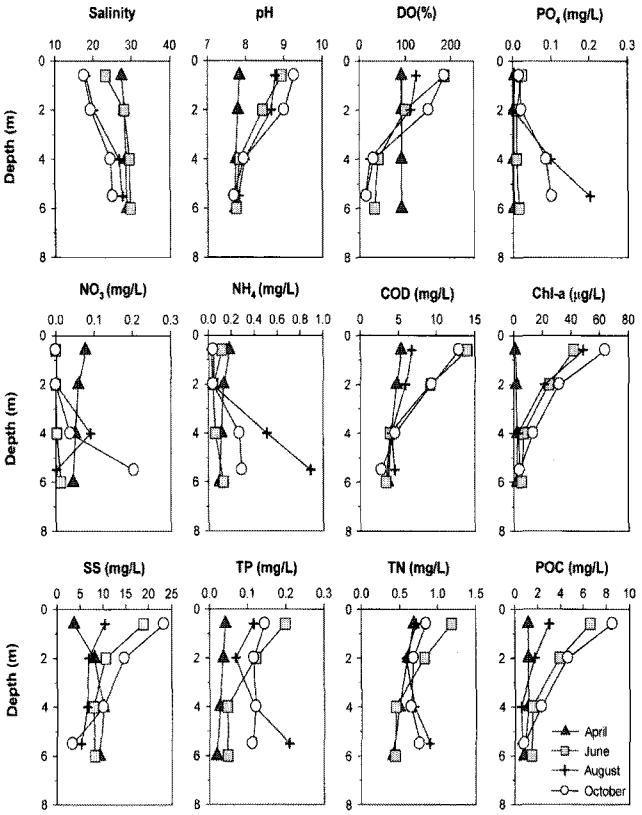

Fig. 7. Vertical distributions for water parameters of Shihwa Lake at St. 4 in 2010.

pH는 4월 조사에서는 표층에서의 pH는 7.84이었으며 수심 증가에 따라 약간 감소하여 저층(6 m)에서는 7.71로 낮아졌다. 그 외 조사시기(6월, 8월, 10월)에도 시기별로 pH의 차이는 존재하나 일반적으로 표층에서는 pH가 9 내외로 높고 저층으로 갈수록 급격히 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 7). 표층에서 특이하게 높은 pH의 출현은 식물플랑크톤의 과다번식에 따른 수중의 CO_2 감소에 의한 것이며, 저층수의 낮은 pH는 다량의 유기물 분해에 의한 CO_2 방출에 기인한다(이와 양, 2002).

용존산소포화도는 4월의 경우 전 수심에서 90~91%로 균일하게 분포하였으며, 6월 조사에서는 표층의 용존산소포화도가 184%로 4월에 비해 약 2배 증가하였고, 수심 2 m에서 69.3%, 수심 4 m에서 28.4%, 저층(수심 6 m)에서 16.8%로 수심의 증가에 따라 급격히 감소하였다. 8월과 10월에 용존산소포화도는 표층에서 각각 124%와 177%로 높았으나 수심증가에 따라 급격히 감소하여 저층에서는 각각 6.2%와 10.3%의 낮은 포화도를 보였다(Fig. 7). 여름철에는 수온상승 및 담수유입으로 인하여 성층이 발달되어 표층으로부터 저층으로의 산소공급이 원활하지 않고 표층에서 생산된 유기물질이 침강

되어 저층에서 분해하여 산소를 소비하기 때문에 빈산소 혹은 무산소 환경이 지속적으로 발생하였다(국토해양부, 2009).

인산 인은 4월과 6월에 상대적으로 농도가 낮았고 표층에서 저층까지 비교적 균일한 농도를 보이고 있었다. 8월과 10월에는 역시 표층에서는 비교적 낮았으나 4 m 수심 이후 급격히 증가하여 저층에서는 각각 0.202 mg/L와 0.101 mg/L의 높은 농도를 보였다(Fig. 7). 질산 질소는 6월의 평균 농도가 4월에 비해 높았으나 두 계절 모두 수직적으로 균일한 경향을 보이고 있었다. 10월에는 표층과 2 m 수심에서는 0.001 mg/L 이하의 고갈된 상태를 보인 뒤 수심증가에 따라 급격히 증가하여 저층에서는 0.204 mg/L의 농도를 보였다(Fig. 7). 이는 표층 및 아표층에서 식물플랑크톤의 대량번식으로 인하여 질산 질소가 고갈되었기 때문이다. 암모니아 질소는 4월과 6월에 수층간에 균일하거나 중층에서 다소 낮은 분포를 나타내었으나 8월과 10월에는 표층과 2 m 수심에서 0.05 mg/L 이하였지만 4 m 수심부터 급격히 상승하여 두 시기 모두 저층에서 최고농도를 보였다(Fig. 7). 8월에 그 경향이 뚜렷하였으며 저층에서 0.892 mg/L의 높은 농도를 나타내었는데, 이는 다른 질소계 영양염 농도가 고갈된 것과 대비되는 현상으로 저층의 유기물 분해시 혐기성 분해로 암모니아가 생성되었으나 산소부족으로 산화가 미미하기 때문이다(박 등, 1997; Lewis and Landing, 1991).

COD는 4월에 표층에서 5.3 mg/L로 저층으로 갈수록 감소하여 저층에서는 3.6 mg/L를 보였다. 6월과 10월의 경우 표층에서는 각각 14.0 mg/L와 13.0 mg/L로 높고 수심 증가에 따라 급격히 감소하는 경향을 나타내었는데, 모든 조사시기에서 4 m 수심 및 최저층은 2.8~4.6 mg/L의 범위내에 분포하였다(Fig. 7).

클로로필-*a*는 4월에 표층에서 1.0 μg/L였으나 저층에서 2.2 μg/L로 증가하였다. 6월에는 식물플랑크톤의 대번식으로 인하여 표층에서 41.9 μg/L로 4월에 비해 약 20 배 높았고, 2 m 수심에서도 24.5 μg/L로 여전히 높은 농도로 존재하였다. 이후 급격히 감소하여 저층에서는 5.5 μg/L의 농도를 보였다. 8월과 10월에도 표층에서 각각 48.7 μg/L과 64.0 μg/L로 높았고 수심증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있었다(Fig. 7). 2009년의 경우 10월을 제외하고는 표층에서의 클로로필-*a* 농도가 높지 않았으며 수심별로 큰 차이가 없었던 것으로 나타났다(국토해양부, 2009).

총인은 표층에서 저층으로 갈수록 4월과 10월에는 약간 감소하였지만 6월에는 큰 감소 경향을 보였으며, 강우의 영향을 많이 받았던 8월에는 2 m 수심에서 가장 낮았지만 저층으로 가면서 증가하여 저층에서 0.209 mg/L로 표층에 비해 약 2 배 증가하였다. 10월의 평균 농도가 4월에 비해 약 2~3 배 높은 것으로 나타났다(Fig. 7). 총질소의 수직적 분포는 8월을 제외하고는 표층에서 높고 수심증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있었다(Fig. 7). POC의 수직적 분포 역시 COD 및 클로로필-*a*와 유사한 분포를 나타내었는데(Fig. 7), 이는 표층에서 식물플랑크톤의 대량 번식으로 인하여 생물기원의 유기물과 입자성유기탄소의 농도가 매우 높게 나타나지만 이후 수심 증가에 따른 광량 감소에 따라 생물학적 생산이 급격히 감소하기 때문이다(최 등, 1997).

2) 정점 7

시화호의 중앙부에 위치한 정점 7에서 염분은 각 시기별로 수층간의 차이가 4월에 0.7 psu, 6월 4.7 psu, 8월 8.0 psu, 10월 9.5 psu로 수심에 따른 염분구배가 10월에 가장 컸으며, 표층에서는 낮고 수심 증가에 따라 상승하는 경향을 보였다. 표층에서와 달리 저층에서는 시기에 따른 차이가 크지 않았다(Fig. 8).

pH의 경우 4월에는 표층보다 중, 저층에서 약간 높았지만 그 외의 시기에는 표층에서 높고 저층으로 갈수록 감소하는 경향을 보였다. 표층의 pH는 10월에 9.45로 가장 높았고, 6월과 8월에 각각 8.82, 8.54로 비교적 높은 값을 나타내었으며, 정점 4에서의 pH에 근접하는 값으로 생물학적 영향을 많이 받고 있음을 시사하고 있다(Fig. 8).

용존산소포화도 역시 pH와 유사한 수직적 분포를 보였으며, 4월 조사에서는 정점 4와 마찬가지로 수직적으로 균일한 분포를 보이고 있었다. 6월의 용존산소포화도의 수직적 분포는 표층의 169 %에서 2 m 수심에서는 102 %로 감소하였고 4 m 수심에서 62.2 %, 저층에서는 33.3 %로 급격히 감소하였다. 용존산소포화도는 일반적으로 표층에서 높고 저층에서는 대기를 통한 공급의 제한 및 유기물 분해과정에서의 산소의 소비

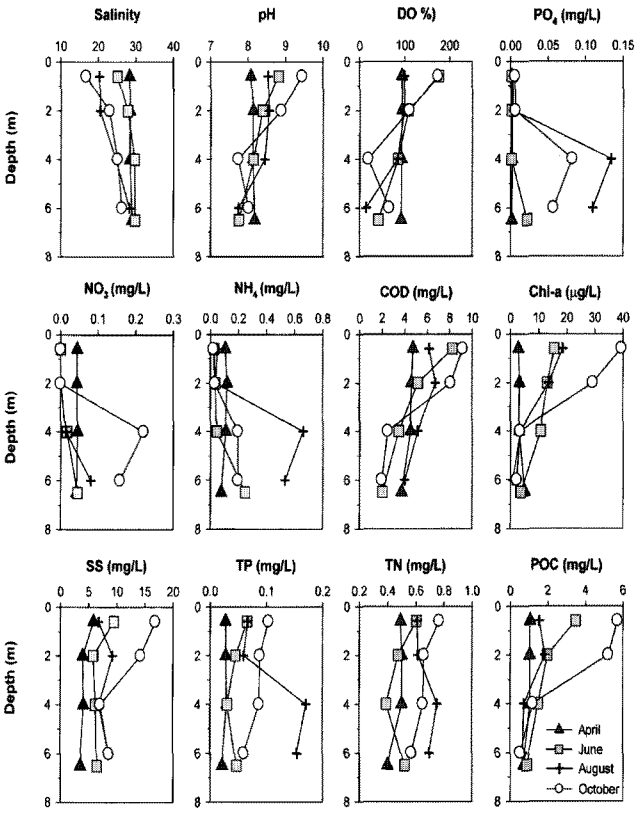

Fig. 8. Vertical distributions for water parameters of Shihwa Lake at St. 7 in 2010.

로 인해 감소하는 경향을 나타내고 있었으나 10월 조사의 경우 표층 174%에서 2m 109%로 감소한 뒤 4m 수심에서 18.7%로 저층의 65.1%에 비해 더 포화도가 낮은 특징을 보였다(Fig. 8). 정점 4와 다르게 10월의 이와 같은 수직 분포는 상대적으로 높은 농도의 용존산소를 가진 외해수가 유입되면서 밀도차에 따라 저층의 바닥면에 크게 영향을 미치면서 유기물 분해에 의한 산소소비량이 산소 공급량보다 작았음을 시사한다.

인산 인의 수직분포는 4월에는 수직적으로 큰 차이를 보이지 않았으나 8월과 10월에는 2m 이후 수심에서 급격히 증가한 후 저층에서 다시 감소하는 수직적 분포를 보였고, 6월에는 저층에서 증가하였다(Fig. 8). 질산 질소와 암모니아 질소는 각각 시기에 따른 농도의 차이가 있으나 인산 인과 비슷한 분포를 나타내었다(Fig. 8). 조사기간 동안 출현한 두 항목의 최대 농도의 경우, 질산 질소는 정점 4와 정점 7이 서로 비슷하였으며, 암모니아 질소는 정점 4보다 25% 정도 낮았다.

COD는 4월의 경우 모든 수심에서 4.0mg/L 내외의 균일한 분포를 보였다(Fig. 8). 다른 조사시기에는 표층에서 높고 저층으로 갈수록 감소하는 경향을 보였는데 6월과 8월에는 최저층에서 2mg/L로 표층의 1/4 정도에 불과하였다. 표층에서의 COD 농도는 정점 4보다 낮은 농도를 나타내었으며, 자생 유기물 생성 정도와 관련되어 있다. 클로로필-a와 POC 역시 4월에는 수직적으로 균일한 분포였고, 6월, 8월, 10월 조사에서 표층에서 높고 급격히 감소하여 저층에서는 낮은 농도를 보였지만 시기별 농도는 4월을 제외하면 정점 4보다 낮았다(Fig. 8).

총인과 총질소는 4월과 10월에는 크게 변화가 없지만 저층에서 약간 낮은 분포였으며, 6월에는 수심 증가에 따라 감소하다가 저층에서 상승하였다(Fig. 8). 8월에는 4m 및 6m 수심에서는 증가하는 분포를 보였는데 총인의 경우 전체의 70% 이상을 차지하는 인산 인, 총질소의 경우 암모니아 질소의 영향이 크게 기여하며, 이는 빈산소 환경에 의한 영향이 지배적으로 작용하고 있음을 의미한다.

영양염은 2009년 조사에서는 8월 강우에 의한 담수의 대량 유입으로 다른 조사시기에 비해 높은 평균 농도를 보였고 특히 인산 인은 표층에서 저층까지 균일하게 높은 농도를 보여 하천을 통한 담수의 유입이 시화호의 중앙부분인 정점 7 지역까지 직접적으로 영향을 주는 것으로 나타났다(국토해양부, 2009). 2010년 조사결과를 통해 용존산소포화도를 통해 밝혀진 바와 같이 정점 7까지 외해수의 유입이 영향을 미치는 것으로 나타나 시화호의 중앙지역인 정점 7은 담수를 통한 유입 및 외해수의 유입 등의 복합적인 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다.

3) 정점 9

정점 9는 시화호의 중앙부에 위치하면서 본 연구의 시화호 조사 정점 중에서 수심이 가장 깊은 지역에 위치하고 있는 곳으로 수심이 깊어지면서 수직적 변화가 가장 크게 나타나는 지역이다.

4월의 염분은 표층과 저층 사이에서 약 29psu 내외의 균일한 분포 보이고 있었다. 6월 조사에서는 표층에서 약 24psu를 보여 4월에 비해 약 5psu 정도 감소하였으나 수심 증가에 따라 점차적으로 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9). 6월과 10월 역시 표층에서는 염분이 각각 21.4psu와 19.9psu로 낮았으며 수심증가에 따라 점차적으로 증가하여 수심 6m 이후에서는 균일한 수직적 분포를 보였다. 특히 8월과 10월에 4m 수심 상하로 강한 성층이 형성되어 있었으며, 이는 수직적인 혼합 및 물질 교환을 제한하여 담수 유입과 외해수 유입에 의한 영향이 상하로 구분되어 표층수의 수질을 더욱 악화시키는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 한편 10월에는 다른 시기에 비해 표층에서 낮은 염분을 나타내었는데 이는 성층 현상에 의하여 담수와 해수의 혼합이 제한되었기 때문으로 보인다.

pH는 표층에서 높고 수심증가에 따라 감소하는 경향을 보였는데 4월에는 비교적 균일하였지만 다른 시기에는 표층에서 높고 저층으로 급격하게 낮아지는 분포를 보였다. 특히 10월에는 표층과 2m 수심에서 각각 9.39와 9.14로 높아서 식물플랑크톤의 대량 번식에 따른 영향이 크게 나타나고 있었지만 수심 4m 이하에서는 해양의 일반적인 pH 수준인 8 내외를 나타내고 있었다(Fig. 9).

용존산소포화도는 4월에는 표층에서 92.6~99.2%로 비교적 균일한 분포를 보였지만 6월과 8월에는 표층에서는 각각 169%와 92%였으며, 강한 성층 형성과 활발한 유기물 분해에 의하여 수심증가에 따라 급격히 감소하였다. 8월에는 저층에서는 용존산소가 0mg/L인 무산소 수괴가 존재하는 것으로 나타났다. 10월 조사에서의 용존산소포화도는 표층에서 185%였지만 4m 수심에서 26.9%로 급격히 감소하였고 이후 증가한 뒤 8m 수심 이하에서는 약 90%의 높은 포화도를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 9). 이 지역은 수직분포 조사 정점 가운데 외해수의 영향을 많이 받는 지역으로 2009년 10월에는 최저층에서 78.0%의 포화도를 나타내었다(국토해양부, 2009). 인산 인은 2m 수심까지는 매우 결핍되어 있으며, 수직적 분포는 8월을 제외하고는 수심에 따라 증가하긴 하지만 큰 차이가 없으나 8월에는 수심증가에 따라 급격히 증가하여 저층에서 0.292mg/L로 10월 저층의 0.039mg/L에 비해 약 7배 높은 값을 보였다(Fig. 9). 질산 질소는 4월과 6월에는 수직적 차이가 크지 않았으나 8월과 10월에서는 표층에서 높고 이후 4m 혹은 6m 수심에서 최대 농도를 보인 후 조금 감소하는 수직적 분포였다(Fig. 9).

총인과 총질소는 8월을 제외하면 비교적 균일하거나 약간의 증감을 보였지만 8월에는 저층으로 가면서 지속적으로 증가하는 분포를 보였다. 8월의 경우 저층은 정점 7보다 높은 농도를 나타내었으며(Fig. 9), 총인은 인산 인이 99.7%, 총질소는 암모니아 질소가 89.2%로 두 항목 모두 정점 7에 비해 높은 점유율을 나타내어 유기물 분해에 의해 무산소 혹은 빈산소 환경이 발달되고 있음을 시사하였다.

COD, 클로로필-a 및 POC는 다른 정점 또는 과거와 유사하게 표층에서 높았고 이후 감소하는 경향을 보였고, 표층에

서는 시기에 따른 농도의 차이가 컸지만 중층 및 저층으로 가면서 차이가 줄었다(Fig. 9). 특히 POC의 경우 표층의 0.77~4.81 mg/L 범위에 비해 최저층에서는 0.40~0.56 mg/L 범위로 변동폭이 매우 감소하였는데 이는 시화호가 상대적으로 표층에서 유기물 생성 및 유입과 관련하여 수질 변동성이 큰 반면 저층에서는 무기화에 따라 영향이 크지 않다는 것을 의미한다.

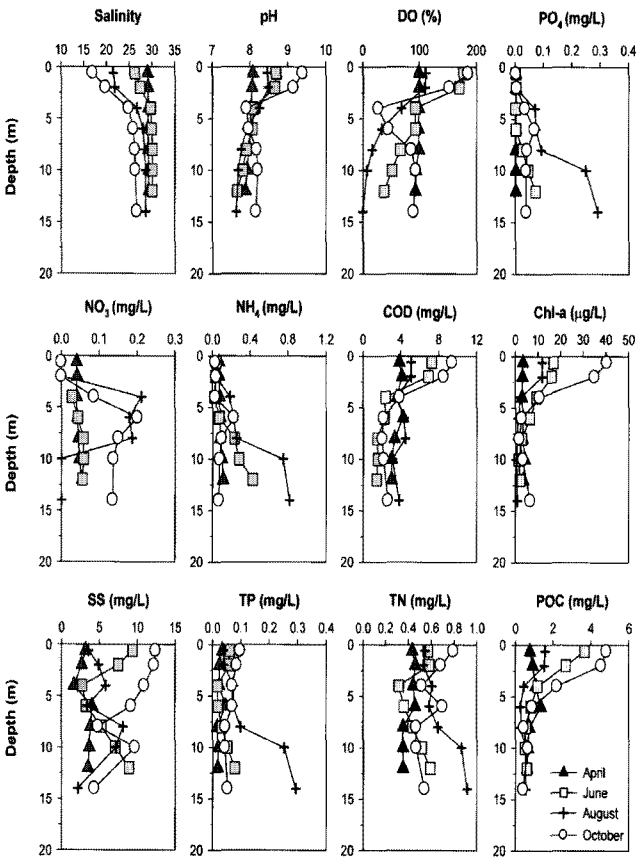

Fig. 9. Vertical distributions for water parameters of Shihwa Lake at St. 9 in 2010.

3.3 시화호 수질의 연도별 변화

1) 일반수질

2003년과 2010년 사이의 시화호 표층수 일반수질의 연도별 변화는 Table 2에 나타내었고, 조사시기별 수질변화는 Fig. 10에 제시하였다.

2003년 이후 최근 8년간 시화호 방제조 내측 pH의 연도별 변화는 2003년에서 2006년에 걸쳐 평균 8.53에서 8.07로 낮아진 뒤 다시 상승하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다. pH의 조사시기별 변화특성을 살펴보면 연도별로 차이는 있으나 대체적으로 클로로필-*a*의 농도가 높았던 여름철 및 가을 조사에서 높은 pH를 보였다. 용존산소포화도의 조사시기별 변화특성은 겨울(2월) 및 봄철(4월)에는 낮았으며, 2009년까지는 가을(9월과 10월) 조사에서 약 200% 수준으로 증가하였다. 이는 활발한 광합성으로 인하여 수층 내 용존산소가 과포화상태에 있는 것을 나타내며, 여름철 강우량이 높은 시기인 8월 조

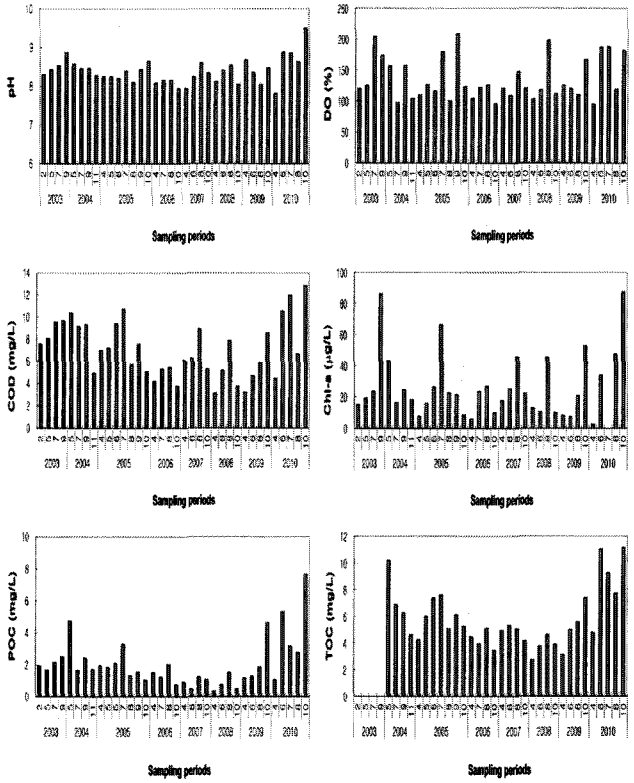

Fig. 10. Changes and comparisons of concentrations for water quality parameters in surface seawater in various sampling periods from 2003 to 2010.

사에서는 상대적으로 낮은 용존산소포화도를 나타내고 있다. 염분과 일반수질의 상관관계는 일반적으로 담수가 강우에 기인하기 때문에 시화호 내측의 pH가 해양에 비해 낮은 값을 가지고 있고 식물 플랑크톤이 활발히 번식하면 pH가 상승하는 경향을 보인다. 2009년 조사에서는 다른 조사연도와는 달리 염분과 pH간의 양호한 상관성을 보이며 특히 8월에는 낮은 염분과 낮은 pH를 보여 강우의 영향이 시화호 전반에 영향을 미친 바 있다. 2010년 조사의 경우, 염분이 낮을 때 높은 pH를 보이는 것으로 나타났다. 낮아진 염분은 담수를 통한 유입을 간접적으로 시사하기 때문에 강우기에 하천을 통하여 공급된 영양염이 식물 플랑크톤의 활동을 활발하게 하여 pH가 증가한 것으로 사료된다.

용존산소포화도는 2006년을 제외하면 최고값이 각 연도마다 200% 이상이었고, 2010년에는 최고값이 293%로 높게 나타났다. 2010년 연평균은 예년에 비해 30% 이상 상승하여 가장 높은 값을 나타내었다. 월별 변화는 연도에 따라 다르지만 대체적으로 하계에 높은 값을 나타내었다.

COD의 연도별 변화는 2003년에서 2006년까지 8.7 mg/L에서 4.7 mg/L로 감소하였고 이후 2009년까지는 큰 변화가 없었으나 2010년 조사에서는 COD의 평균 농도가 9.3 mg/L로 일시적으로 증가한 것으로 나타났다. 한편, 2006년과 2008년에는 최고 농도가 10 mg/L 정도였으나 그 외의 연도에는 최고 농도가 20 mg/L 내외로 높았으며, 특히 2010년에는 조사 자료

Table 2. Year-to-year comparisons of pH, DO saturation, Chl-*a*, COD, POC and TOC concentrations in surface seawater of Shihwa Lake during the period from 2003 to 2010

Year	pH	DO (%)	COD (mg/L)	Chl-*a* (μg/L)	POC (mg/L)	TOC (mg/L)
2003	8.17~9.00 (8.53)	100~244 (155)	4.7~17.9 (8.7)	1.4~144 (35.9)	0.63~7.88 (2.06)	-
2004	7.85~9.14 (8.43)	56.4~293 (129)	3.0~21.5 (8.5)	1.9~117 (25.4)	0.51~14.3 (2.64)	3.40~19.8 (6.99)
2005	7.44~8.73 (8.32)	47.7~263 (138)	3.1~19.6 (7.5)	0.9~270 (24.1)	0.41~9.61 (1.88)	1.70~15.6 (5.96)
2006	7.68~8.43 (8.07)	71.4~162 (112)	2.2~10.3 (4.7)	0.6~46.4 (16.5)	0.27~4.25 (1.38)	2.43~7.09 (4.24)
2007	7.42~9.12 (8.28)	73.8~252 (125)	1.9~23.2 (6.6)	1.5~228 (27.6)	0.12~6.07 (0.93)	2.59~10.4 (4.87)
2008	7.87~8.71 (8.27)	79.2~232 (133)	1.0~9.2 (5.0)	1.4~65.0 (19.5)	0.13~2.03 (0.77)	1.95~5.45 (3.76)
2009	7.50~9.08 (8.38)	61.1~242 (131)	1.8~17.0 (5.6)	3.0~170 (22.1)	0.73~10.0 (2.24)	2.49~12.8 (5.27)
2010	7.48~9.79 (8.73)	99.2~293 (169)	3.2~24.0 (9.3)	1.0~318 (42.7)	0.77~17.4 (3.99)	4.04~21.7 (8.79)

중 가장 높은 24 mg/L를 나타내었다. 이는 2010년의 총 5회 조사 중 3회 조사에서 식물플랑크톤의 대량 번식에 의해 자체 생산된 유기물이 COD에 큰 영향을 미쳤기 때문이다. 시화호 표층수의 COD 농도는 방조제 완공 후 급격히 증가하여 1997년에는 10.4~30.9 mg/L를 나타내었으나 1998년부터 본격적으로 실시한 해수유통에 의해 크게 낮아지고 있는 것으로 보고되었다(해양수산부, 2002). 과거 조사에서도 COD와 클로로필-*a*는 뚜렷한 상관성을 나타냈으며, 특히 시화호 상류지역에서는 담수를 통한 영양염의 유입, 정체된 수괴 및 상대적으로 높은 표층수온 등의 복합적인 영향으로 식물플랑크톤의 증식이 활발하게 일어나 COD에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 월별 변화는 COD의 경우 2003년에는 지속적으로 높게 나타났으며, 다른 연도에는 불규칙적이었지만 하계에 높은 농도를 보였으며, 클로로필-*a*는 월별로 큰 차이를 나타내며 하계 및 추계에 높게 나타났다. COD 및 클로로필-*a* 농도의 최근 2년간 일시적인 증가는 조사를 실시한 시기에 식물플랑크톤 대증식의 발생에 의하여 큰 영향을 받은 것이다.

POC는 2003년 이후 2008년까지 지속적으로 감소하였으나 2009년 2.24 mg/L로 2003년과 2004년 수준까지 증가한 뒤 2010년의 평균농도는 3.99 mg/L로 높은 것으로 나타났고 이는 식물플랑크톤 대증식을 반영한 결과로 사료된다. 식물 플랑크톤의 대증식은 생물 및 무생물학적 요인들 간의 다양한 상호관계에 의하여 영향을 받고 있으며 봄과 가을에 주로 대증식이 발생하고 있다. 식물플랑크톤의 대증식은 수층 내 영양염의 고갈로 인하여 단기간에 소멸되기도 한다. Back et al.(2009)는 강우로 인한 영양염의 공급 후 5일 뒤에 식물플랑크톤의 생물양이 급격히 증가한다고 보고하였다.

2) 영양염

2003~2010년까지 시화호 표층수의 영양염 연도별 변화를 Table 3에 나타내었으며, Fig. 11에는 월별 변화를 제시하였다. 인산인의 연도별 변화에서 평균 농도로 보면 2003년에 0.007 mg/L에서 2007년에는 0.035 mg/L로 증가한 뒤 2008년 이후 감소하는 경향을 보였지만 2010년에는 2003년과 큰 차이를 보이지 않는 높은 농도를 보였다. 연도별 농도 범위에서 최고 농도는 2005년에 0.233 mg/L로 가장 높았으며, 2003년,

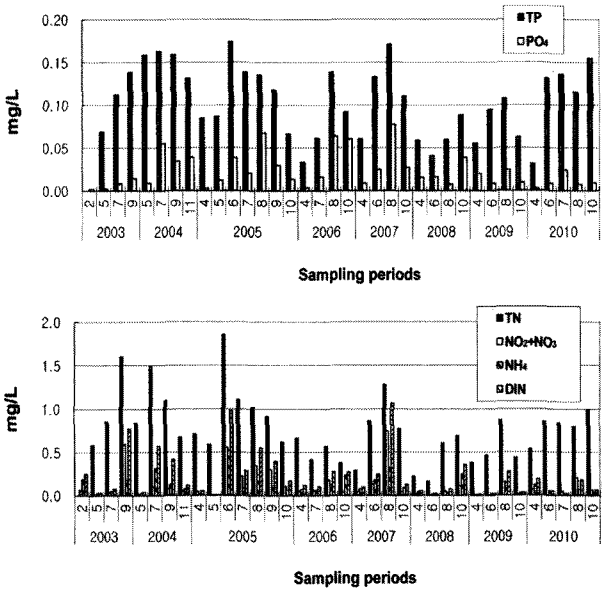

Fig. 11. Changes and comparisons of concentrations for dissolved nutrients, TN an TP in surface seawater in various sampling periods from 2003 to 2010.

Table 3. Year-to-year comparisons of nutrients concentrations (mg/L) in surface seawater of Shihwa Lake during the period from 2003 to 2010

Year	PO_4-P	NO_3-N	NH_4-N	DIN	TP	TN
2003	0.001~0.068 (0.007)	0.001~1.500 (0.146)	0.014~1.685 (0.110)	0.015~2.765 (0.283)	0.035~0.214 (0.107)	0.420~3.532 (1.012)
2004	0.003~0.148 (0.035)	<0.001~0.119 (0.151)	0.004~0.739 (0.136)	0.004~1.401 (0.288)	0.029~0.544 (0.153)	0.361~2.135 (1.025)
2005	0.001~0.233 (0.026)	<0.001~1.258 (0.200)	<0.001~1.375 (0.144)	<0.001~2.422 (0.349)	0.033~0.405 (0.115)	0.364~4.764 (0.973)
2006	0.002~0.130 (0.036)	<0.001~0.263 (0.063)	0.004~0.463 (0.122)	0.004~0.724 (0.193)	0.016~0.214 (0.081)	0.231~1.358 (0.506)
2007	0.003~0.147 (0.035)	<0.001~1.317 (0.220)	<0.001~1.155 (0.168)	<0.001~1.866 (0.385)	0.024~0.340 (0.119)	0.145~2.786 (0.799)
2008	0.002~0.068 (0.019)	<0.001~0.192 (0.033)	0.009~0.447 (0.086)	0.010~0.640 (0.129)	0.011~0.134 (0.062)	0.100~1.010 (0.421)
2009	0.001~0.126 (0.028)	<0.001~1.201 (0.112)	0.004~0.638 (0.086)	0.005~1.897 (0.212)	0.013~0.211 (0.086)	0.203~2.046 (0.615)
2010	0.002~0.079 (0.010)	<0.001~1.074 (0.060)	0.007~0.336 (0.058)	0.009~1.487 (0.101)	0.020~0.409 (0.114)	0.368~2.820 (0.801)

2008년, 2010년은 0.068~0.079 mg/L로 타 연도에 비해 낮았다. 질산 질소의 경우 2003년 0.146 mg/L에서 2007년 0.220 mg/L로 증가한 뒤 계속 감소하여 2010년에는 2009년에 비해 절반 수준인 0.060 mg/L로 감소한 것을 알 수 있었다. 암모니아 질소는 2003년 0.110 mg/L에서 2007년 0.168 mg/L로 점차 증가한 뒤 이후 감소하는 연도별 변화를 보여주고 있으며 2010년에는 0.058 mg/L로 2007년에 비해 1/3 수준으로 감소한 것을 알 수 있었다. 용존무기질소의 연도별 변화는 2003년 0.283 mg/L에서 2005년 0.349 mg/L로 증가한 뒤 2006년에는 0.193 mg/L로 감소하였으나 이후 다시 증가한 뒤 감소하는 것으로 나타났으며 2010년 용존무기질소의 평균 농도는 0.101 mg/L로 2009년의 절반 수준으로 감소하였다.

총인의 월변화는 여름철에 대체적으로 높은 평균 농도를 보이고 있으며, 2010년의 경우 10월에 가장 높은 것으로 나타났다. 2010년의 전체 조사시기에서 용존인산 인보다는 그 이외의 존재형태가 더 많은 부분 차지하고 있는 것으로 나타났다. 2006년과 2007년 8월의 경우 총인 중 용존인산 인이 차지하는 비율은 약 40% 수준이었으나 강우의 유입이 있었던 2010년 8월의 경우 용존인산 인이 차지하는 비율은 평균 4.6%로 다른 조사시기에 비해 낮았고 상류지역 하천에 인접한 정점에서는 각각 10%와 7%로 다른 지역에 비해 높은 것으로 나타났다. 총질소 역시 총인과 유사한 경향을 보였으며, 2005년 조사의 경우 총질소 중 용존무기질소가 절반 이상을 차지하고 있었으나 2010년 조사에서는 총질소 중 용존무기질소가 차지하는 비율이 4월 조사에서는 약 34%로 높았으나 10월에는 평균 5.1%로 총질소 중 대부분이 생물기원 유기물에 기원한 것으로 나타났다.

3.4 시화호 표층수의 수질항목간 상관성

시화호 표층수 수질항목간의 상관관계 분석을 실시하여 그 결과를 Table 4에 제시하였다

염분은 투명도와 유의한 양(+)의 상관성(r=0.81, $p<0.01$)을 나타냈으나 암모니아 질소를 제외한 용존영양염, COD, 총인, 총질소, 클로로필-a 등과 양호한 음(-)의 상관성($p<0.01$)을 보였다(Table 4 및 Fig. 12). 모든 조사시기에서 시화호 상류지역에서 낮은 염분과 높은 용존영양염의 농도는 반월 및 시화산단의 산업지역과 반월천 등 농업지역을 흐르는 하천수가 시화호 내 유입되는 용존영양염의 주요한 공급원의 하나임을 시사하고 있다. 담수를 통하여 유입된 용존영양염은 식물플랑크톤의 성장 및 번식을 증가시키므로 결과적으로 염분과 용존산소, COD, 총인과 총질소, 클로로필-a와 양호한 음(-)의 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 클로로필-a와 부유물질, COD, POC 및 PON 간의 상관성은 조사시기에 따라 차이는 있으나 양호한 양(+)의 상관성을 나타내고 있다(Table 4 및 Fig. 13). 시화호의 표층수 내 부유물질은 클로로필-a와 유의한 양(+)의 상관성 (r=0.90, $p<0.01$)을 나타내고 있어 부유물질과 식물플랑크톤 현존량과 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있었다. 하천을 통한 부유물질의 유입이 영향을 미칠 수는 있으나 2010년 8월에 반월 및 시화산단 유역 하천수의 평균 부유물질농도는 6.5 mg/L로 8월 시화호 표층수 내 부유물질의 평균농도 10.0 mg/L에 비해 낮았으며, 다른 조사시기 역시 하천공사에 의한 영향을 제외하고는 하천수 내 부유물질의 농도가 높지 않은 것으로 나타났다(국토해양부, 2010a). 따라서 시화호 표층수 내 부유물질, POC 및 클로로필-a 간의 높은 상관성은 부유물질 내 POC의 대부분이 식물플랑크톤의 생물기원에 기인한 것임을 나타내고 있다. 클로로필-a, POC 및 COD 간에

Tabel 4. Correlation factors for water parameters in the surface seawater of Shihwa Lake by Pearson's correlation analysis(Abbreviations for Sal and Tr mean salinity and transparency, respectively and superscript of * indicates a significant correlation at the 0.01 level)

	Sal	Tr	pH	DO	SS	COD	PO_4^{3-}-P	NO_2^--N	NO_3^--N	HN_4^+-N	SiO_2-Si	DIN	TP	TN	Chl-*a*	POC	PON	DOC	TOC
Sal	1.00																		
Tr	0.81	1.00																	
pH	-0.71*	-0.78*	1.00																
DO	-0.41*	-0.54*	0.76*	1.00															
SS	-0.68*	-0.76*	0.66*	0.71*	1.00														
COD	-0.52*	-0.74*	0.73*	0.85*	0.84*	1.00													
PO_4^{3-}-P	-0.45*	-0.64*	0.38*	0.61*	0.60*	0.71*	1.00												
NO_2^--N	-0.72*	-054	0.40	0.39	0.67*	0.44	0.76*	1.00											
NO_3^--N	-0.53*	-0.32	0.01	-0.08	0.48*	0.06	0.31	0.87*	1.00										
HN_4^+-N	-0.02	0.16	-0.45*	-0.32	0.02	-0.26	0.02	0.89*	0.70*	1.00									
SiO_2-Si	-0.39*	-0.46*	0.10	0.03	0.37*	0.17	0.38*	0.83*	0.69*	0.40*	1.00								
DIN	-0.35*	-0.12	-0.16	-0.15	0.32	-0.04	0.27	0.87*	0.98*	0.83*	0.60*	1.00							
TP	-0.72*	-0.78*	0.60*	0.66*	0.91*	0.84*	0.78*	0.78*	0.52*	0.07	0.55*	0.39*	1.00						
TN	-0.67*	-0.68*	0.52*	0.58*	0.87*	0.81*	0.73*	0.66*	0.51*	0.13	0.48*	0.42*	0.93*	1.00					
Chl-*a*	-0.70*	-0.66*	0.55*	0.50*	0.90*	0.80*	0.74*	0.53	0.57*	-0.02	0.29	0.36	0.90*	0.91*	1.00				
POC	-0.60*	-0.72*	0.69*	0.74*	0.95*	0.86*	0.47*	0.47	0.27	-0.11	0.21	0.12	0.82*	0.80*	0.86*	1.00			
PON	-0.67*	-0.72*	0.61*	0.67*	0.94*	0.85*	0.67*	0.59*	0.39*	-0.03	0.32	0.26	0.91*	0.92*	0.96*	0.93*	1.00		
DOC	-0.16	-0.26	0.15	0.31	0.24	0.35*	0.61*	0.70*	0.18	-0.06	0.48*	0.11	0.44*	0.37*	0.11	0.13	0.28	1.00	
TOC	-0.58*	-0.74*	0.66*	0.76*	0.92*	0.88*	0.66*	0.62*	0.29	-0.12	0.38*	0.14	0.89*	0.84*	0.82*	0.91*	0.91*	0.53*	1.00

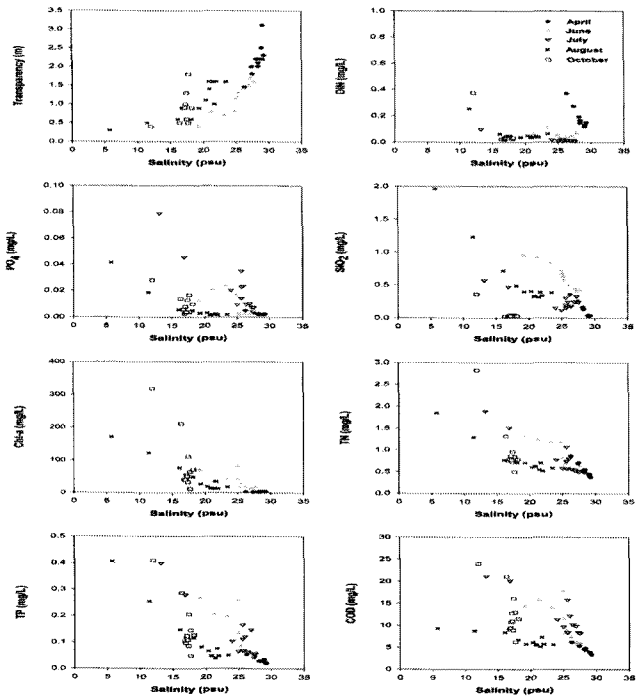

Fig. 12. Relationship between salinity and water parameters in surface seawater of Shihwa Lake 2010.

좋은 상관성을 보이고 있었다. COD와 총질소(r=0.81, $p<0.01$), 총인(r=0.84, $p<0.01$) 및 부유물질(r=0.84, $p<0.01$) 간에도 유의한 양(+)의 상관성을 보였다(Fig. 13). 총인과 총질소 간에서 높은 상관성(r=0.93, $p<0.01$)을 나타내었다(Table 4). 수층의 유기물의 양으로써 해양에서의 수중 오염도를 측정하기 위하여 사용되는 수질기준 지표항목인 COD가 총인, 총질소 및 부유물질과 높은 상관성을 나타내고 있어 앞서 설명한 POC와 같이 총인과 총질소 역시 대부분이 식물플랑크톤 증식과 같은 생물기원에 기인함을 알 수 있었다(Fig. 13).

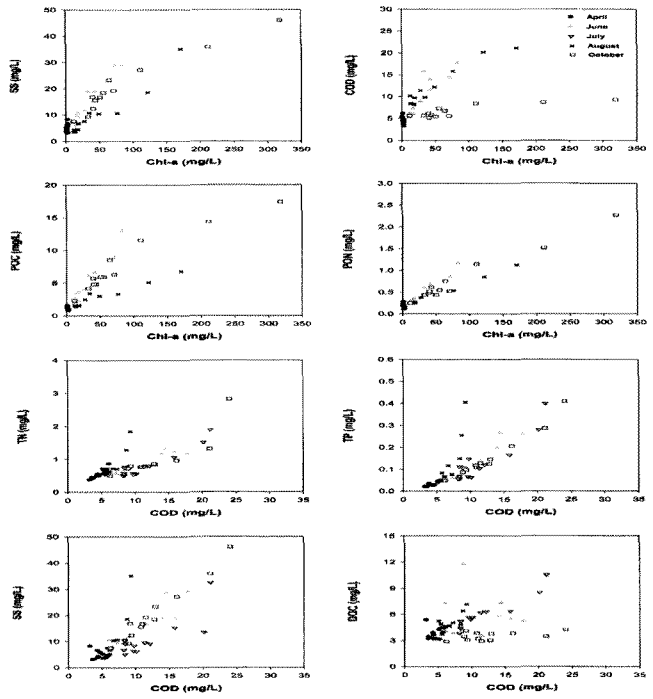

Fig. 13. Relationship between either Chl-*a* or COD and water parameters in surface seawater of Shihwa Lake 2010.

4. 결 론

본 연구에서는 경기만에 위치한 시화호와 주변해역에 대한 수질 현황과 함께 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표층수 내 일반수질항목의 수평적인 농도분포는 상류지역인 반월 및 시화산단 인접 정점에서 높은 값을 보였으며 배수갑문지역으로 갈수록 외해수 유입을 통한 해수교환의 영향으로 인하여 낮아지는 경향을 나타냈다.

2. 시화호 외측 해역에서의 일반수질항목 농도는 시화호 내측 해역에 비해 평균적으로 낮은 값을 보였으나 소래 포구에 인접한 해역에서 TN, TP 등이 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다.

3. 시화호 내측 수질들의 수직적인 농도분포는 여름철에 수온 증가에 의하여 강력한 성층이 형성되었으며 저층에서의 활발한 유기물 분해로 인하여 빈산소층 또는 무산소층이 발달되는 것으로 나타났다. 용존영양염, TN 및 TP는 표층보다 저층에서 높은 농도를 보였으나 COD, 클로로필-*a*, POC는 표층이 높은 농도를 보였으며 수심증가에 따라 감소하였다.

4. 시화호 표층수의 COD 연도별 변화는 2003년에서 2006년까지 감소하는 경향을 보였으며 2010년 조사에서 COD의 평균 농도가 일시적으로 증가하는 것으로 나타나 생물기원 유기물의 영향을 크게 받았으며 하계에 높은 농도를 나타내었다.

5. 시화호 표층수 내에서 수질항목간의 상관성 분석 결과, 염분은 용존영양염과 양호한 음(-)의 상관성을 보여 하천을 통한 담수기원의 영양염 공급을 보여주고 있다. 공급된 용존영양염은 식물플랑크톤에 이용되어 식물플랑크톤의 대증식으로 클로로필-*a*, COD, POC를 증가시켰으며 높은 농도의 COD 농도는 입자기원보다는 시화호 내에서 생산된 생물기원인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

[1] 국립수산과학원(2009), 국립수산과학원 웹사이트 국가해양측정망 홈페이지, http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata

[2] 국토해양부(2009), 시화호 해양환경 개선사업, p. 762.

[3] 국토해양부(2010a), 해양환경공정시험기준, pp. 28-52.

[4] 국토해양부(2010b), 시화호 해양환경 개선사업, p. 850.

[5] 기상청(2010), 기상청 웹사이트 강우량 홈페이지, http://www.kma.go.kr/weather/observation/pat_cal.jsp

[6] 농어촌진흥공사(1996), 한국의 간척, p. 405.

[7] 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성회(1997), 시화호 산하-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구, 한국해양학회지「바다」, 제2권, 제2호, pp. 53-68.

[8] 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철(2003), 시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구, Ocean & Polar Res., 제25권 제4호, pp. 459-468.

[9] 손주원, 박용철, 이호진(2003), 한국 연안수에서 총유기탄소 및 화학적 산소요구량 분포 특성, 한국해양학회지「바다」, 제8권 제3호, pp. 317-326.

[10] 이광우, 양한섭(2002), 화학해양학, p. 329.

[11] 최중기, 이은희, 노재훈, 허성회(1997), 시화호와 주변해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구, 한국해양학회지「바다」, 제2권 제2호, pp. 78-86.

[12] 한국수자원공사 · 농어촌진흥공사(1996), 시화방조제 방재차원 배수갑문운영에 따른 수질조사 결과보고서, p. 242.

[13] 한국수자원공사(1998), 시화호 수질관리대책수립 연구(최종보고서초안). p. 130.

[14] 한국해양연구소(1997), 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(1차년도). 한국해양연구소 보고서 BSPN 96325-985-4. p. 169.

[15] 한국해양연구소. 1998. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차년도). 한국해양연구소 보고서 BSPE 97610-00-1035-4. p. 230.

[16] 한국해양연구소. 1999. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(3차년도). 한국해양연구소 보고서 BSPE 98705-01-34. p. 363.

[17] 한국해양연구원(2008), 하구역 관리 및 기능회복기술 개발-한강 하구역을 중심으로 한 관리 및 복원관련 요소기술 개발, p. 711.

[18] 한명우, 박용철, 허성회(1997), 시화호에서 암모니아와 납의 저층용출, 한국해양학회지「바다」, 제2권 제2호, pp. 69-77.

[19] 해양수산부(2002), 해양오염 원격 감시체제 구축연구, p. 830.

[20] 해양수산부(2006), 시화호 해양환경개선 연구용역, p. 755.

[21] Back, S. H., S. Shimode, H. C. Kim, M. S. Han and T. Kukuchi(2009), Strong bottom-up effects on phytoplankton community caused by a rainfall during spring and summer in Sagami Bay, Japan, Journal of Marine Systems, Vol. 25, pp. 253-264.

[22] Codispoti, L. A., G. E. Freiderich, J. W. Murray and C. M. Sakamoto(1991), Chemical variability in the Black Sea: implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface, Deep-Sea Research, Vol. 38, pp. S691-S710.

[23] Lewis, B. L. and W. M. Landing(1991), The biogeochemistry of manganese and iron in the Black Sea, Deep-Sea Research, Vol. 38, pp. S773-S803.

[24] Sugimura, Y. and Y. Suzuki(1988), A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample, Marine Chemistry, Vol. 24, pp. 105-131.

[25] Valderrama, J. C.(1981), The simultaneous analysis of total N and P in natural waters. Marine Chemistry, Vol. 10, pp. 1009-1022.

원고접수일 : 2011년 03월 23일
원고수정일 : 2011년 04월 15일 (1차)
: 2011년 05월 12일 (2차)
게재확정일 : 2011년 06월 23일