

## 시화호의 계절변화에 따른 지화학적 환경요인 특성 연구

김 태 하\* · 박 용 철 · 이 효 진\* · 김 동 화 · 박 준 건 · 김 성 준 · 이 미 연  
인하대학교 해양과학과, \*지오시스템 리서치  
(2004년 10월 21일 접수; 2004년 12월 23일 채택)

## The Environmental Impacts of Seasonal Variation on Characteristics of Geochemical Parameters in Lake Shihwa, Korea

Tae-Ha Kim\*, Yong-Chul Park, Hyo-Jin Lee\*, Dong-Hwa Kim, Jun-Kun Park, Sung-Jun Kim and Mi-Yeon Lee

Department of Ocenaography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

\*GeoSystem Research Corporation, Gunpo 435-824, Korea

(Manuscript received 21 October, 2004; accepted 23 December, 2004)

Seasonal variation of biogeochemical characteristics was determined in Lake Shihwa from October 2002 to August 2003. When the lake was artificially constructed for the freshwater reservoir in 1988, the development of the strong haline density stratification resulted in two-layered system in water column and hypoxic/anoxic environment prevailed in the bottom layer due to oxidation of accumulated organic matters in the lake. Recently, seawater flux to the lake through the sluice has been increased to improve water quality in the lake since 2000, but seasonal stratification and hypoxic bottom layer of the lake still developed in the summer due to the nature of artificially enclosed lake system. As the lake is still receiving tremendous amount of organic matters and other pollutants from neighboring streams during the rainy summer season, limited seawater flux sluicing into the lake may not be enough for the physical and biogeochemical mass balance especially in the summer. The excess of accumulated organic matters in the bottom layer apparently exhausted dissolved oxygen and affected biogeochemical distributions and processes of organic and inorganic compounds in the stratified two-layered environment in the summer. During the summer, ammonia and dissolved organic carbon remarkably increased in the bottom layer due to the hypoxic/anoxic condition in the bottom layer. Phosphate also increased as the result of benthic flux from the bottom sediment. Meanwhile, dissolved organic carbon showed the highest value at the upstream area and decreased along the salinity gradient in the lake. In addition to the sources from the upstream, autochthonous origin of particulate organic carbon from algal bloom in the lake might be more important for sustaining aggravated water quality and development of deteriorated bottom environment in the summer. The removal of trace metals could be attributed to scavenging by strong insoluble metal-sulfide compounds in the hypoxic/anoxic bottom layer in the summer.

Key Words : Hypoxic/anoxic environment, Nutrients, Trace metals, Dissolved organic matters, Lake Shihwa

### 1. 서 론

1994년 시화호의 방조제 완공 이후, 시화호의 수

질은 급속도로 악화되었고 이와 관련된 많은 환경 화학적인 연구가 진행되고 있다. 초기 외해수와와의 차단으로 인한 폐쇄적인 환경에서 주위의 하천을 통해 많은 오염물질이 시화호 내로 유입되면서 표층에는 연중 부영양화가 관찰되었다. 또한 물막이 공사 이전 저층에 잔존해 있던 해수와 물막이 공사 이

Corresponding Author : Tae-Ha Kim, Geosystem Research Corporation, Gunpo 435-824, Korea  
Phone: +82-31-423-8088  
E-mail: kth95osd17@hotmail.com

후 담수의 유입으로 표·저층간 염분구배에 따른 성층이 이루어 졌으며, 표층의 활발한 일차생산에 의한 유기물의 생성과 침강은 시화호의 수질을 더욱 악화시키는 악순환을 반복하게 되어 저층에서는 용존산소의 고갈로 인한 저산소 혹은 무산소의 환원 환경의 특성을 보이는 것으로 연구되었다<sup>1)</sup>. 이에 따라 악화된 수질을 개선하기 위하여 1998년 3월부터 조석주기에 따른 배수갑문의 개방으로 외해수와의 교류가 이루어져 연중 관찰되던 성층이 사라지는 등 어느 정도의 수질환경 개선효과가 나타나기 시작하였으나, 하계 동안 저층에서는 계속적으로 무산소의 환원환경이 관찰되어 수질 개선이 효과적으로 이루어지지 않고 있다.

이와 같은 용존산소의 급격한 수직적인 변화는 수괴의 산화-환원 환경을 결정하는데 절대적인 요인이 되며, 수괴내의 생지화학적 기작과 반응을 좌우하여 수층의 영양염류와 미량금속 등의 수직적인 종분화에 결정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다<sup>2,3)</sup>. 특히 하계와 같은 특정 시기에는 무산소 내지 저산소 환경의 발생이 보고된 바 있고, 이러한 현상으로 인해 수질 악화가 더욱 가속화 되는 것으로 알려져 있다<sup>4,5)</sup>. 외국 사례의 경우에도 시화호와 유사하게 저층에서 연중 저산소 내지 무산소 환경이 나타나는 흑해 등지에서 이와 유사한 활발한 연구가 진행되어왔고, 우리나라 진해만에서도 여름철 저층에 저산소 환경이 나타난다고 보고된 바 있다. 본 연구에서는 시화호의 계절에 따른 용존산소의 수직적인 변화와 그로 인한 여러 화학인자들의 분포 특성을 파악함과 동시에 배수갑문 개방 이전과 개방 이후의 수질 환경의 변화에 관하여 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 연구의 현장조사는 2002년 10월, 2003년 2월 그리고 8월에 걸쳐 총 3회 실시되었으며, 연구지역의 조사정점은 하천수가 유입되는 시화호 상류지역의 정점 1로부터 배수갑문 근처의 정점 7까지 7개의 정점을 선정하였다(Fig. 1). 수직적인 생지화학적 분포를 파악하기 위하여 다른 정점들보다 비교적 수심이 깊고 여름철 염분구배로 인한 성층의 형성이 잘 나타나는 정점 4와 6에서 일반 수리 물리적 특성과 여러 화학인자들의 수직적인 분포 양상을 측정하였다. 시료의 채취는 Peristaltic sampling pump (Cole-Parmer Instrument)를 이용하여 채수하였고, 특히 하계의 현장 조사에서는 다른 계절보다는 수심 간격을 좀 더 세밀하게 채수하여(약 1m 간격) 화학적 성분의 수직 분포 양상을 관찰하였다.

채취된 해수 중 무기 영양염류 분석을 위한 시료는 detergent (Ultra clean)와 염산(10% HCl)으로 처

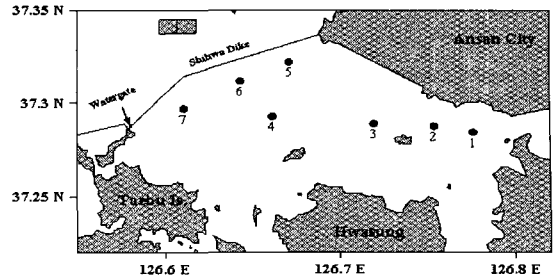


Fig. 1. Sampling stations in the study area.

리된 125 ml HDPE sample bottle에 넣은 후 -20°C 이하에서 냉동 보관되어 실험실로 옮긴 후 암모니아는 Solorzano(1969)<sup>6)</sup>, 그리고 그 외의 무기 영양염류는 Parsons *et al.* (1984)<sup>7)</sup>의 방법에 의거 영양염 자동분석기(Traacs 2000, BRAN+LUEBBE)를 사용하여 측정하였다. 용존 유기탄소는 시료를 GF/F 여과지로 여과시킨 후 HTCO (high temperature catalytic oxidation)/NDIR (non-dispersive infrared gas)의 방법으로 TOC-5000A (Shimadzu)를 이용하여 측정하였다. 분석은 시료에 2N HCl 처리 후 탈기시켜 무기탄소를 제거한 뒤 측정하는 NPOC (Non Purgeable Organic Carbon)의 방법으로 측정하였으며, 이때 사용된 carrier gas는 초순도 산소를 사용하였고, flow rate 150 ml/min, sparging flow rate 120 ml/min, sparging time 5 min의 조건으로 분석하였다<sup>8)</sup>. 용존 미량금속 분석을 위한 시료는 1L HDPE sample bottle에 넣어 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 pH 2.5로 acidification 시킨 뒤 APDC/DDTC와 chloroform (CHCl<sub>3</sub>)을 이용하여 추출한 후, 질산으로 digestion 시켜 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, Perkin Elmer, Elan 6100)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 수리 물리적 환경

연구지역의 수온은 2003년 2월을 제외하고는 표층과 저층간의 유사한 수온 분포를 보였으며 계절적으로 동계인 경우 흔히 수온강하가 표층에서 먼저 일어나기 때문에 저층에 비해서 표층의 수온이 낮은 편이며, 육상에 인접한 정점 1, 2, 3에서 상대적으로 높게 나타나 하천을 통한 담수 유입의 영향으로 보인다(Table 1). 염분도 분포는 표층의 경우 2002년 10월 평균 28.0 psu, 2003년 2월과 8월에는 각각 평균 28.5 psu, 12.5 psu의 분포를 보였고 대체로 하계에 낮게 나타났다. 수질 개선의 방법으로 1998년 3월부터 배수갑문을 조석주기에 따라 개방

시화호의 계절변화에 따른 지화학적 환경요인 특성 연구

Table 1. General water quality parameters in the Shihwa Lake (October, 2002)

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	DO (mg/l)	DO-S (%)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (uM)	TN	HPO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>	DOC (mg/l)	
1	0	13.28	27.18	10.43	118.06	23.21	2.21	7.60	33.03	2.09	40.19	2.58	
	1.5	13.24	27.19	10.66	120.57	24.06	2.16	6.58	32.80	2.23	44.28	2.56	
2	0	14.31	28.01	10.64	123.69	14.11	1.43	5.49	21.02	2.17	41.23	1.95	
	1	14.32	28.03	10.53	122.45	14.77	1.51	6.74	23.02	2.19	37.95	2.21	
	2	14.34	28.06	10.46	121.71	14.62	1.48	4.35	20.45	2.23	34.33	2.22	
	3	14.37	28.07	10.43	121.44	14.35	1.48	5.51	21.33	2.23	49.29	2.45	
3	0	14.42	28.07	10.43	121.57	3.23	0.55	2.76	6.54	1.75	30.35	2.42	
	1	14.49	28.11	10.34	120.72	3.16	0.51	2.39	6.06	1.76	29.74	1.44	
	2	14.41	28.06	10.32	120.25	2.99	0.52	2.55	6.07	1.73	25.67	2.21	
	3	14.53	28.11	10.29	120.24	3.13	0.52	2.49	6.15	1.76	27.43	2.35	
	4	14.44	28.08	10.23	119.29	2.86	0.48	2.66	6.00	1.84	29.35	2.18	
4	5	14.21	28.05	10.21	118.47	3.27	0.50	2.50	6.27	1.78	25.46	2.14	
	1	15.45	28.17	10.86	129.35	1.39	0.57	2.80	4.76	1.34	27.39	2.05	
	3	15.23	28.15	10.86	128.76	1.43	0.62	3.08	5.12	1.42	26.15	2.00	
	5	15.59	28.17	10.85	129.60	1.60	0.57	3.12	5.29	1.43	27.24	2.05	
	7	15.78	28.17	10.70	128.30	2.10	0.60	3.03	5.73	1.42	29.22	2.15	
5	9	16.01	28.66	10.26	123.96	3.11	0.69	3.35	7.15	1.27	26.78	2.03	
	11	16.28	29.11	10.40	126.68	3.76	0.88	4.12	8.76	1.10	21.63	1.91	
	0.5	16.17	28.01	10.71	129.30	0.72	0.44	2.29	3.45	1.07	27.35	2.18	
	1.5	16.01	27.97	10.67	128.37	0.61	0.48	2.05	3.14	1.27	26.04	2.44	
	2.5	16.01	27.99	10.46	125.86	1.01	0.46	2.37	3.84	1.32	26.98	2.22	
6	3.5	15.98	27.94	10.81	129.95	0.82	0.45	2.44	3.71	1.32	28.29	2.14	
	0	15.34	27.88	10.59	125.63	0.84	0.40	2.27	3.51	1.50	30.35	1.99	
	1	15.33	27.88	10.59	125.60	0.68	0.27	1.81	2.76	1.15	23.60	1.75	
7	3	15.33	27.82	10.70	126.86	1.34	0.62	1.54	3.49	1.44	22.91	2.42	
	5	15.41	27.90	10.52	124.99	1.15	0.37	2.22	3.74	1.38	22.75	2.42	
	7	15.57	28.25	10.26	122.56	1.66	0.46	2.55	4.67	1.28	23.91	1.78	
	9	16.24	28.80	10.12	122.94	3.76	0.74	3.95	8.44	1.22	22.19	2.13	
	11	16.21	28.87	10.43	126.68	3.44	0.79	3.62	7.84	1.16	21.75	2.01	
	0	15.78	28.37	10.64	127.73	1.44	0.36	2.08	3.88	0.90	22.31	1.82	
	1	15.68	28.33	10.50	125.77	1.64	0.46	2.40	4.50	1.21	21.88	2.13	
	2	14.43	28.37	10.58	123.57	1.60	0.48	1.89	3.97	1.18	24.41	2.37	
8	3	15.59	28.32	10.39	124.22	2.03	0.50	2.57	5.10	1.18	21.89	2.58	
	4	15.73	28.39	10.42	124.98	2.07	0.50	2.37	4.94	1.14	27.26	2.47	
	5	15.53	28.41	10.17	121.50	2.22	0.53	2.86	5.61	1.15	22.71	2.54	
	6	16.14	28.43	9.98	120.72	2.01	0.50	2.25	4.76	1.13	21.32	2.05	
	7	15.68	28.44	9.89	118.54	3.00	0.51	3.03	6.53	1.17	21.13	2.23	
	Max.	0	13.24	27.18	9.89	118.06	0.61	0.27	1.54	2.76	0.90	21.13	1.44
	Min.	11	16.28	29.11	10.86	129.95	24.06	2.21	7.60	33.03	2.23	49.29	2.58
Avg.	3.53	15.21	28.16	10.47	124.08	4.57	0.72	3.18	8.47	1.48	27.91	2.18	

(February, 2003)

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	DO (mg/l)	DO-S (%)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (uM)	TN	HPO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>	DOC (mg/l)
1	0	3.31	21.48	14.62	126.70	110.71	2.45	11.91	125.08	2.16	23.88	3.73
	1	1.88	28.07	13.85	121.10	32.80	1.14	4.72	38.66	2.49	6.09	8.78
	2	1.80	29.04	12.84	112.70	22.12	0.78	4.19	27.09	2.33	3.60	4.06
2	2.5	1.80	29.18	13.18	115.80	22.53	0.74	3.77	27.04	2.74	4.18	3.95
	0	2.91	27.37	14.46	129.10	51.48	1.23	7.70	60.41	0.94	10.07	4.76
	1	1.46	29.24	13.39	116.70	14.96	0.59	3.09	18.64	1.00	1.71	4.46
3	2	1.19	29.92	12.34	107.30	9.18	0.33	1.34	10.86	0.87	1.22	3.97
	3	1.16	29.92	12.29	106.80	7.19	0.31	1.45	8.94	0.81	2.63	3.44
	0	2.10	29.33	12.30	109.10	12.52	0.52	3.60	16.64	0.47	1.30	3.05
	2	0.97	30.17	11.57	100.20	7.70	0.20	1.01	8.91	0.54	1.02	3.32
4	4	0.83	30.43	11.01	95.20	3.95	0.10	0.71	4.76	0.49	1.22	2.67
	6	0.79	30.46	10.75	92.90	3.61	0.11	0.29	4.01	0.42	1.80	3.06
	7	0.79	30.45	10.48	90.50	3.52	0.12	0.39	4.02	0.42	0.86	3.00
	0	1.67	30.34	8.78	77.60	3.10	0.13	0.63	3.87	0.28	0.72	3.96
	2	0.75	30.44	8.53	73.60	3.45	0.10	0.38	3.92	0.44	1.49	3.48
5	4	0.72	30.48	8.39	72.30	3.03	0.09	0.44	3.56	0.46	0.83	4.97
	6	0.80	30.62	7.91	68.40	3.16	0.10	1.59	4.86	0.39	1.19	3.77
	7	0.69	30.60	7.49	64.60	4.55	0.08	1.09	5.73	0.41	0.67	3.16
	0	1.41	30.34	11.65	102.20	2.93	0.15	0.67	3.75	0.28	1.88	3.49
	2	1.29	30.36	11.93	104.40	3.12	0.13	1.15	4.39	0.32	1.99	3.11
	4	1.19	30.34	12.07	105.20	3.16	0.10	0.65	3.91	0.34	1.14	3.03

Table 1. Continued (February, 2003)

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	DO (mg/l)	DO-S (%)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (uM)	TN	HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>	DOC (mg/l)
6	0	1.63	30.47	11.83	104.40	2.87	0.07	0.61	3.55	0.29	0.61	2.95
	2	1.47	30.51	12.10	106.40	3.48	0.08	0.35	3.91	0.32	1.23	3.27
	4	0.92	30.46	12.17	105.50	3.70	0.10	0.63	4.42	0.38	0.91	2.24
	6	0.91	30.48	11.98	103.80	3.33	0.09	0.66	4.08	0.31	1.02	2.78
	8	0.76	30.62	11.56	99.90	4.97	0.08	1.12	6.18	0.30	2.57	2.88
7	0	1.27	30.57	12.11	106.10	2.88	0.10	1.92	4.90	0.24	1.77	3.64
	2	0.83	30.62	12.54	108.60	4.06	0.10	1.50	5.66	0.36	1.72	2.98
	4	0.83	30.60	12.22	105.80	4.40	0.09	1.69	6.18	0.34	5.80	2.30
	6	0.85	30.62	12.25	106.20	3.76	0.12	1.79	5.67	0.33	1.66	2.11
	8	0.77	30.65	12.09	104.50	2.72	0.11	1.75	4.58	0.26	3.02	2.98
Max.		0.69	21.48	7.49	64.60	2.72	0.07	0.29	3.55	0.24	0.61	8.78
Min.		3.31	30.65	14.62	129.10	110.71	2.45	11.91	125.08	2.74	23.88	2.11
Avg.		1.28	29.81	11.63	101.41	11.77	0.34	2.03	14.13	0.70	2.90	3.53

(August, 2003)

Station	Depth (m)	Temp. (°C)	Sal. (psu)	DO (mg/l)	DO-S (%)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (uM)	TN	HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Si(OH) <sub>4</sub>	DOC (mg/l)
1	0	23.06	3.13	10.35	123.00	31.58	7.87	126.30	165.75	4.36	35.56	
	1.5	24.01	15.78	3.66	48.30	30.15	5.91	38.91	74.98	1.89	48.33	3.70
2	0	22.84	3.33	9.32	110.80	68.60	9.58	113.69	191.86	2.88	53.18	10.83
	1	23.64	9.93	14.64	182.90	8.18	11.88	78.57	98.63	2.23	84.56	
3	2	24.03	15.99	5.10	66.20	21.87	3.97	30.44	56.28	1.81	37.11	3.93
	0	23.62	13.91	7.88	100.70	16.55	6.89	32.53	55.97	2.07	39.65	2.39
	1	23.57	14.67	6.56	84.10	15.34	10.71	27.55	53.61	1.96	40.63	6.33
	2	23.40	15.05	5.67	72.60	68.86	10.74	23.03	102.63	1.00	49.23	3.62
	3	24.10	19.30	3.83	50.80	20.02	3.22	23.86	47.09	1.35	28.04	4.50
4	4	23.94	21.91	2.64	35.40	12.44	2.88	26.89	42.21	3.71	25.76	4.09
	5	23.48	24.54	1.39	18.80	16.49	5.14	22.83	44.45	4.87	38.00	2.24
	0	24.21	15.50	11.24	146.50	4.11	4.30	20.02	28.43	1.30	21.84	2.43
	1	24.26	15.53	11.29	147.00	5.20	4.93	26.19	36.33	1.57	27.94	2.24
	2	24.07	17.71	7.16	94.30	22.31	6.00	24.30	52.60	2.44	22.95	2.65
5	3	24.42	20.31	3.64	49.00	18.95	2.28	19.35	40.58	2.75	21.12	2.30
	4	24.37	21.81	2.03	27.50	15.37	2.31	27.70	45.38	4.10	30.07	2.73
	5	24.25	22.53	1.41	19.20	14.86	2.56	24.16	41.58	3.99	29.50	3.91
	6	24.05	24.52	2.57	35.10	9.37	3.09	26.47	38.94	3.38	25.48	3.17
	7	23.66	26.07	2.16	29.50	8.53	4.00	22.93	35.45	4.58	34.03	2.16
6	8	23.39	26.64	0.78	10.70	12.30	4.43	18.86	35.59	5.55	42.34	2.42
	9	22.95	27.68	0.48	6.50	30.78	2.03	1.42	34.22	3.12	50.88	7.17
	10	22.75	27.94	0.44	6.00	67.90	0.59	0.00	68.03	7.66	54.48	2.78
	0	23.28	17.68	7.19	93.30	17.42	4.21	18.19	39.82	2.38	22.41	2.90
	1	23.28	17.74	7.29	94.70	16.78	3.89	17.44	38.11	2.29	22.17	2.52
7	2	23.40	18.76	6.82	89.20	21.17	4.08	19.29	44.54	2.89	22.71	4.69
	3	23.67	19.79	5.07	67.00	22.43	2.93	19.67	45.04	2.24	24.77	5.40
	4	23.92	21.15	4.51	60.30	15.22	1.43	21.85	38.50	3.02	21.97	2.93
	5	23.87	22.23	3.47	46.70	9.35	2.00	29.80	41.14	4.01	27.41	2.62
	6	23.39	25.01	1.76	23.80	5.79	2.46	23.11	31.37	4.67	30.84	2.01
8	0	23.30	17.51	8.09	104.80	13.74	4.24	18.23	36.22	2.23	21.91	3.70
	1	23.30	17.54	7.99	103.60	15.29	4.89	21.81	41.99	2.46	27.04	2.95
	2	23.18	17.56	7.96	102.90	15.71	4.97	22.72	43.40	1.32	27.84	3.24
	3	23.65	18.86	6.24	82.00	15.03	3.17	16.26	38.28	2.39	21.09	2.36
	4	23.93	21.46	4.48	60.20	14.65	2.71	21.76	44.78	3.79	28.28	2.79
9	5	23.87	22.67	2.90	39.00	12.11	2.33	27.64	42.07	3.86	27.82	2.49
	6	23.65	23.72	2.61	35.20	14.01	3.99	21.64	39.64	3.56	26.78	4.33
	7	22.99	26.91	1.20	16.40	19.23	4.89	8.13	32.25	4.97	45.68	2.08
	8	22.81	27.48	0.65	8.90	14.96	5.42	10.74	31.12	4.95	44.59	2.09
	9	22.56	27.75	0.50	6.80	23.54	2.74	3.86	30.14	4.09	51.74	2.28
10	0	22.97	16.73	8.34	107.10	12.46	5.63	23.97	42.06	2.38	28.51	2.90
	1	22.97	16.65	8.63	110.50	12.48	6.48	22.09	41.04	1.85	20.72	
	2	22.77	16.76	8.38	107.20	11.79	4.73	20.67	37.19	1.97	24.43	3.17
	3	23.12	17.33	7.97	102.60	13.54	4.45	18.99	36.98	2.12	23.44	2.87
	4	23.81	21.45	4.13	55.20	18.20	2.59	22.15	42.94	3.23	25.20	2.93
11	5	23.75	22.84	2.40	32.40	19.47	3.23	21.64	44.34	3.83	31.17	2.79
	6	23.69	24.05	1.39	18.60		0.32	32.48	34.61	4.24	28.00	2.47
Max.		22.56	3.13	0.44	6.00	4.11	0.32	0.00	28.43	1.00	20.72	2.01
Min.		24.42	27.94	14.64	182.90	68.86	11.88	126.30	191.86	7.66	84.56	10.83
Avg.		23.55	19.63	5.09	65.94	19.64	4.41	26.96	50.61	3.12	32.98	3.35

한 결과, 외해수와 외해수의 혼합이 이루어져 하계를 제외하고는 정점에 상관없이 수평·수직적으로 거의 유사한 염분도 분포를 보이고 있으나, 2003년 8월의 조사에서는 하천의 영향권인 정점 1에서 3.1~3.3 psu의 낮은 염분도를 보이는 반면 외해와 가까운 정점 7에서는 다소 높은 염분도를 보였다. 한편 비교적 수심이 깊은 정점 4와 6에서는 표·저층간의 뚜렷한 염분 차이를 보여 표층과 저층에서 두 수괴의 발달을 유추할 수 있었다. 현장수온과 염분도를 이용해 구한  $\sigma_t$  값의 변화를 살펴보면 표층과 저층의 두 수괴의 발달을 물리적으로 관찰할 수 있는데<sup>9)</sup>, 2003년 8월 정점 4의 경우 표층과 저층의 밀도( $\sigma_t$ )는 각각 8.9(24.2°C, 15.5 psu)와 18.6(22.8°C, 27.9 psu)으로서 강한 밀도 성층을 유지하고 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 2). 이는 본 연구 지역과 유사한 수괴 형태를 보이는 Black Sea의 표층과 저층의 밀도차 약 4보다<sup>10)</sup> 큰 값으로 갑문 개방 이후에도 여전히 하계에는 표층과 저층간의 염분구배에 의한 밀도성층의 형성이 관찰된 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2. 용존산소

연구 지역의 용존산소 분포를 살펴보면 대체적으로 표층에서 높게 나타났으며, 배수갑문 개방 이전 박(1998)의 자료<sup>9)</sup>와 비교해 볼 때 예전에 비해 수직적인 혼합이 잘 이루어졌다는 사실을 알 수 있다. 그러나 2003년 8월에 조사된 용존산소의 수직적인 분포를 살펴보면 표층에서 평균 8.92 mg/l이 나타났는데 비하여 저층에서 약 2 mg/l의 낮은 용존산소를 보이며, 특히 수심이 깊은 정점 4와 6의 경우에는 저층에서 0.5 mg/l 이하의 무산소(anoxic) 내지 저산소(hypoxic)의 환원 환경이 유지되고 있는 것으로 나타났다(Table 1). 일반적으로 수심이 얇고 염분도의 차이가 크지 않을 경우 밀도성층이 약해져 수괴의 수직 혼합이 원활하게 이루어져 저층 수괴의 오염물질 축적 현상이 개선되고 저층으로 산소의 공급이 이루어진다. 하지만 본 연구에서 하계의 경우, 하천을 통한 담수의 유입으로 표·저층간 염분구배에 의한 성층이 형성되고 이때 유입된 많은 육상 유기 오염물질들이 저층으로 침강되어 분해될 때 용존산소를 고갈시킴으로써 저층의 저산소 내지 무산소 환경이 나타났고 이러한 현상이 저층의 수질 악화에 큰 영향을 주는 것으로 사료된다(Fig. 2, 3).

### 3.3. 암모니아

연구 지역의 암모니아의 농도는 2002년 10월에 평균 4.57  $\mu\text{M}$ , 2003년 2월에 평균 11.77  $\mu\text{M}$  그리고 8월에는 평균 19.25  $\mu\text{M}$ 로, 1998년 조사된<sup>9)</sup> 암모니아의 평균 농도 185  $\mu\text{M}$  보다는 많이 감소되었음을

알 수 있었다. 수평적인 분포를 살펴보면 육상 유입원의 직접적인 영향을 받는 정점 1과 2에서 비교적 높은 농도를 보여 담수 유입에 따른 암모니아의 공급이 높은 것으로 사료된다(Table 1). 한편 암모니아의 수직적인 분포를 살펴보면 조사 시기 동안 담수의 유입권에 위치한 정점에서는 표층에서 높게 나타났고 그 외의 정점에서는 유사한 분포를 보여 외해수의 유입으로 인해 수평·수직적인 혼합이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 2003년 8월 조사에서 비교적 수심이 깊은 정점 4와 6에서는 수심 증가에 따라 감소하던 암모니아의 농도가 수심 약 8m 이하의 저층에서 다시 증가하는 경향이 관측되었는데, 이는 질산화과정에 의해 암모니아가 산화되어 점차 감소하다 저층 환원환경에서 산소의 고갈로 인하여 질산화과정(nitrification)이 충분히 이루어지지 않기 때문에 암모니아의 축적 현상이 이루어지는 것으로 사료된다(Fig. 4).

### 3.4. 아질산염과 질산염

아질산염과 질산염의 경우 3회 조사에서 모두 하천수 유입의 영향을 받는 정점 1, 2의 표층에서 다른 정점에 비해 높은 농도를 보였고 그 외의 정점에서는 수평·수직적으로 유사한 농도 분포를 보였으며 배수갑문 부근에서는 다소 낮은 경향을 보였다(Table 1). 대체로 하계 동안에는 시화호가 부영양화 상태인 관계로 식물성 플랑크톤의 대번식이 관찰된 바 있다<sup>1)</sup>. 이러한 하계의 식물성 플랑크톤의 대번식은 대량의 유기 탄소 입자를 생성한 후 저층으로 침강하여 산화되는 과정에서 산소 고갈 현상이 일어나 계절적으로 시화호의 저층수괴가 저산소 혹은 무산소의 환원환경으로 전환되는 중요한 요인 중의 하나로 사료된다. 성층이 잘 발달된 하계기간의 정점 4와 6의 수직분포를 살펴보면 약 6m의 수심을 경계로 하여 그 이하 수심에서는 암모니아의 농도가 크게 증가하였으며, 아질산염의 경우는 최저 0.59  $\mu\text{M}$ , 그리고 질산염의 경우는 8m 수심이하에서 매우 낮은 농도를 보였다(Fig. 4). 특히 하계에 환원환경에서 암모니아의 농도가 매우 높게 나타나는 것은(Fig. 5) 하계 기간에 발달된 2층 구조의 성층형성으로 인하여 저층에서 유기물 산화에 의해 용존산소가 고갈되어 더 이상의 질산화과정이 진행되지 못한 결과로 사료된다. 용존산소 포화량과 암모니아/질산염의 비를 관찰한 결과 5% 이하의 낮은 용존산소 포화율에서 암모니아/질산염의 비율이 0.5 이상으로 현저하게 높게 나타나 이러한 사실을 뒷받침해 주고 있다(Fig. 6).

### 3.5. 인산염

시화호의 인산염은 앞서 언급한 질소계 영양염류

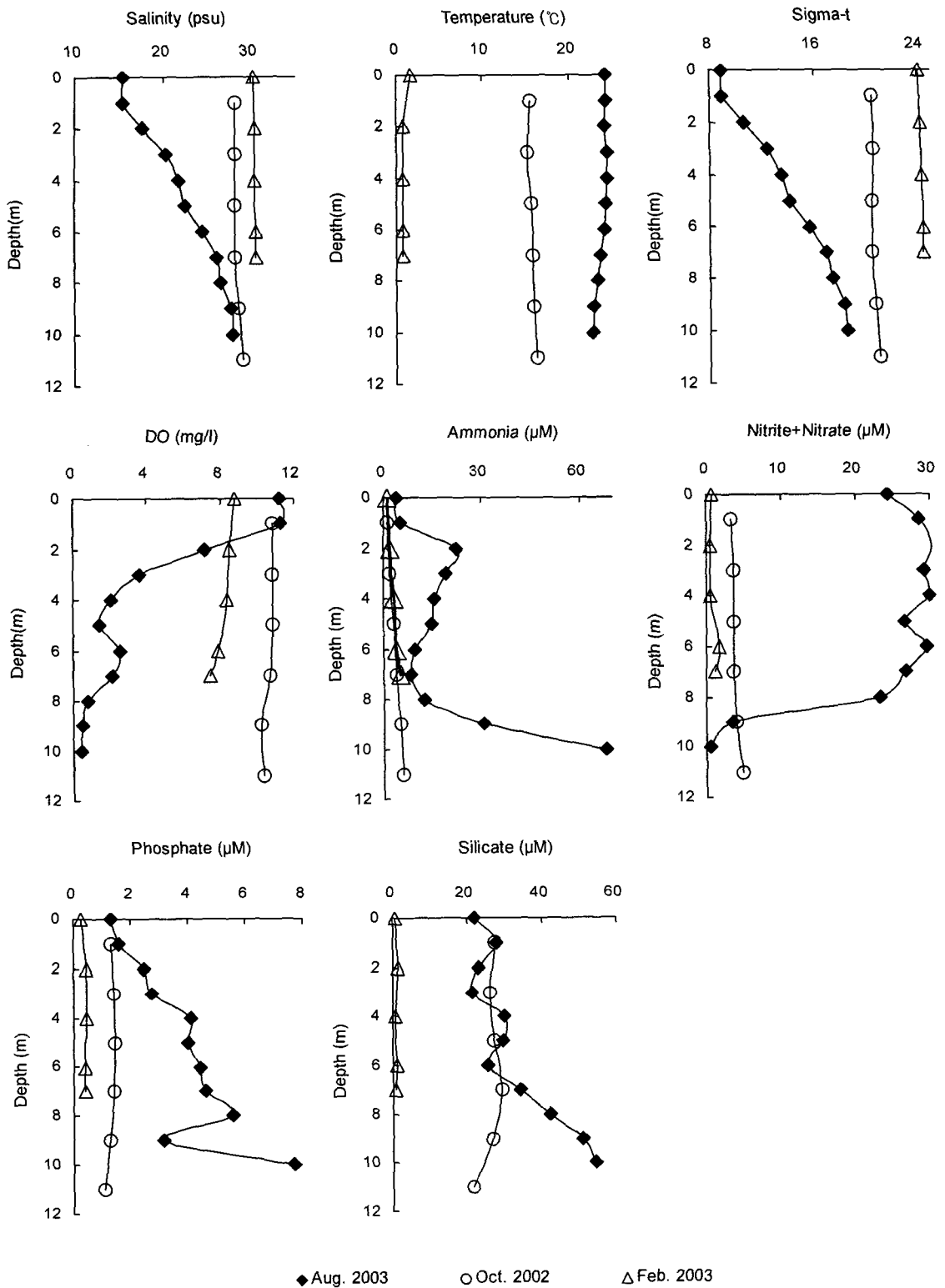


Fig. 2. Vertical profiles of hydrography and water quality parameters at station 4 in the study area.

시화호의 계절변화에 따른 지화학적 환경요인 특성 연구

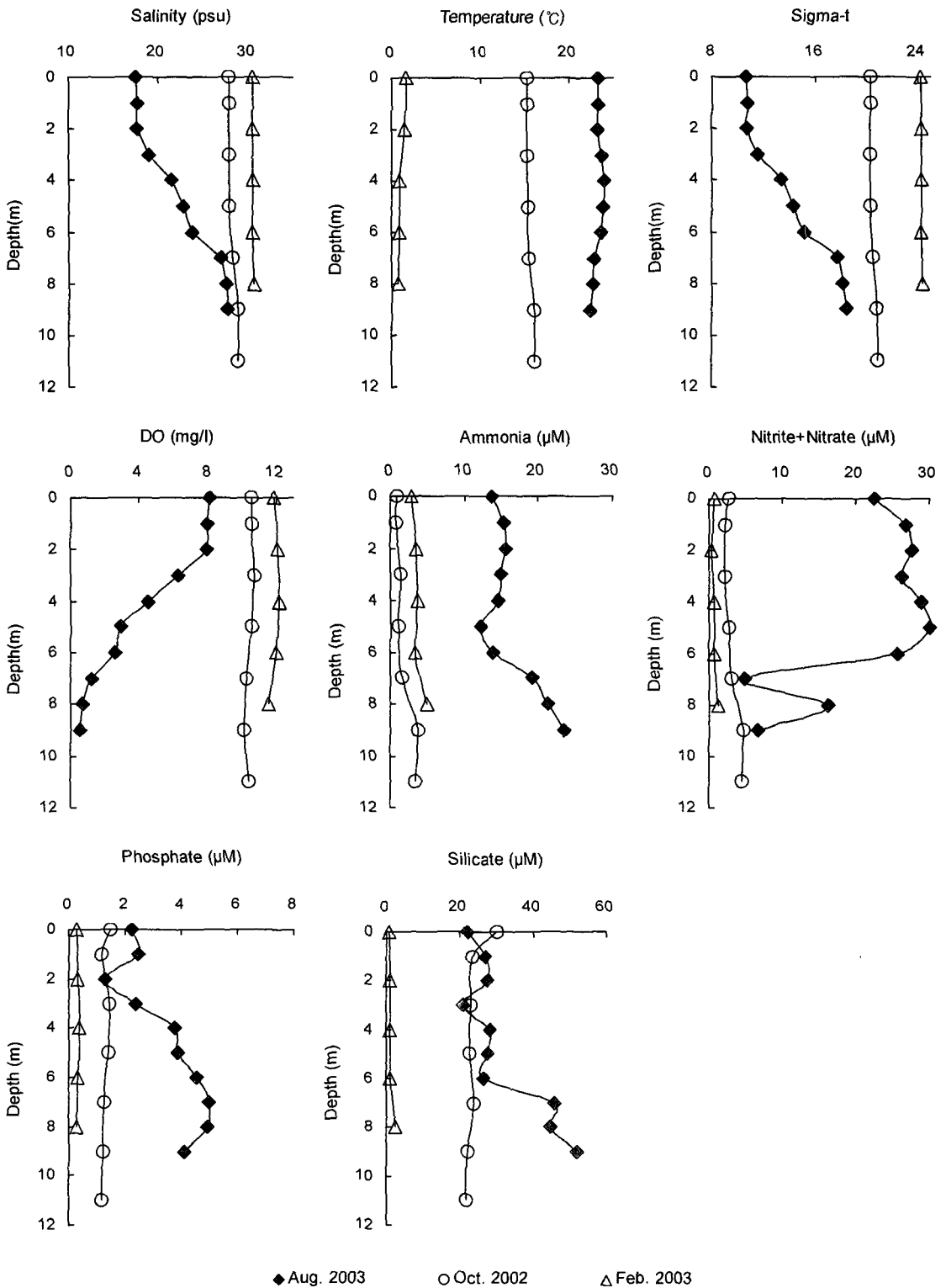


Fig. 3. Vertical profiles of hydrography and water quality parameters at station 6 in the study area.

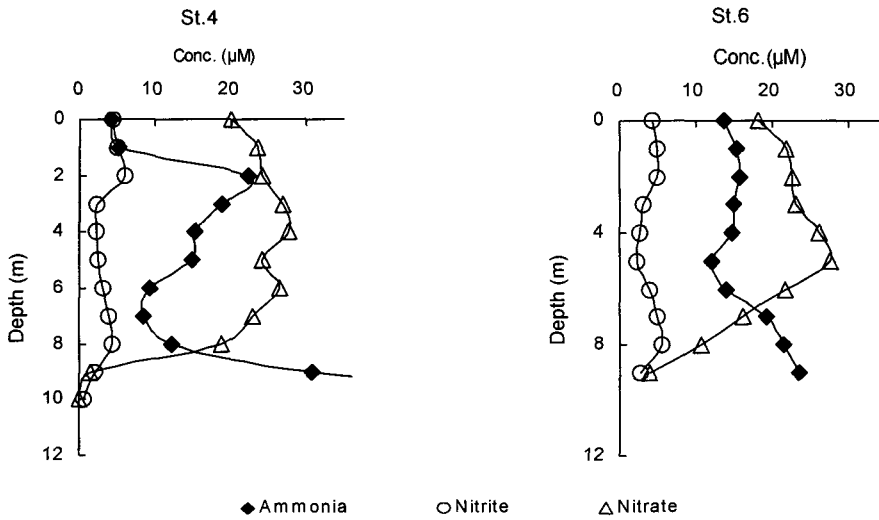


Fig. 4. Vertical profiles of ammonia, nitrite and nitrate in the study area (August, 2003).

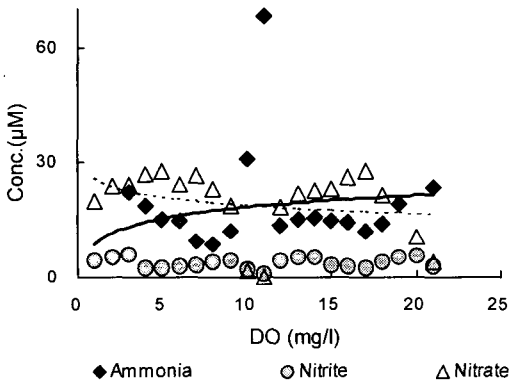


Fig. 5. The relationship between dissolved oxygen and nitrogenous nutrients in the study area (August, 2003). The solid line denotes a fitting curve for ammonia, and dashed line denotes for nitrate.

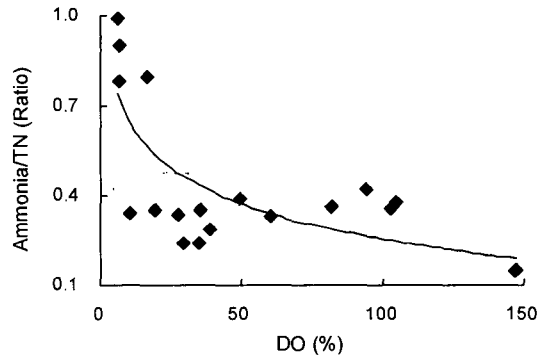


Fig. 6. The relationship between dissolved oxygen saturation(%) and ammonia/TN ratio in the study area (August, 2003).

의 분포 양상과 비슷하게 정점 1과 2에서 비교적 높게 나타나 하천으로부터의 유입원이 존재함을 알 수 있었고 배수갑문 부근에서는 낮은 농도를 보이는 수평적 구배가 나타나며(Table 1), 유기물에서 무기영양염류로 재생산된 후 산화-환원 과정이 더 이상 없기 때문에 대체로 표층에서 낮고 저층에서 높은 수직분포를 보이고 있다. 박(1998)의 연구<sup>9)</sup>에서 볼 수 있듯이 외해수와의 유·출입 이후인 1998년을 기점으로 표·저층 모두 농도가 감소하는 추세를 보이고 있으나 계절적으로 그 변화 폭이 컸다. 암모니아와 마찬가지로 하계 정점 4의 저층에서 인산염의 가장 높은 농도가 나타나는데(Fig. 2) 이는 이미 잘 알려진 바와 같이 산화-환원 경계면에서

인산염이 Fe 또는 Mn과 산화물을 만든 후 저층 환원층으로 침강하고, 다시 저층 환원층에서 용해되어 방출되기 때문으로 사료된다<sup>11-13)</sup>.

### 3.6. 규산염

한편 규산염의 농도는 2002년 동계의 경우 평균 2.90  $\mu\text{M}$ , 그리고 2003년 하계에는 평균 32.98  $\mu\text{M}$ 로 나타나 계절적으로 하계에 가장 높게 나타났다. 다른 용존 무기영양염과 같이 규산염 또한 표층에서 하천의 영향을 받는 정점 1과 2에서 다른 정점에 비해 다소 높은 값을 나타냈으나 뚜렷한 수평·수직적인 경향을 볼 수는 없었다(Table 1). 이는 질소와 인은 주로 비료, 세제 등과 같이 인간 활동에 의해 인위적으로 배출된 오·폐수의 유입량에 의해 그 분포가 영향을 받는 것으로 알려져 있는 것<sup>14)</sup>에 비하여 규산염은 생활 오·폐수의 유입과는 특별한



관계가 없기 때문이다<sup>15,16)</sup>. 일반적으로 수괴로 유입되는 규산염의 주요 공급원은 지각활동의 풍화와 용해작용 및 규소를 포함하고 있는 육상식물의 생물학적 분해를 통한 강물로의 유입이며<sup>17-19)</sup>, 퇴적 후 재부유하는 과정에서 수층으로 지속적으로 공급된다. 이것은 전체적으로 담수의 공급량이 많은 2003년 8월 조사에서 규산염의 농도가 다른 시기보다 높게 나타나는 본 연구에서의 내용과도 일치한다.

3.7. 용존 유기탄소

용존 유기탄소(DOC)는 모든 조사 시기 동안 하천수 유입의 영향을 받는 정점 1, 2에서 비교적 높은 농도를 보여 용존 유기탄소 또한 다른 용존 무기 영양염류와 마찬가지로 주 유입원이 하천임을 알 수 있었고, 표층에서 높고 저층으로 갈수록 서서히 감소하는 수직적인 분포 양상을 보였다(Table 1). 일반적으로 용존 유기탄소의 농도는 표층이 저층보다 높는데 이는 표층의 생물학적 활동이 활발하기 때문으로 알려지고 있다<sup>20)</sup>. 다만 2003년 8월에 정점 4의 저층에서 비교적 높은 농도 값(2.3~4.0 mgC/l)을 보였는데, 이는 저층의 용존산소 부족으로 인해 저층으로 침강된 유기물이 분해되지 못하여 축적되기 때문으로 사료된다(Fig. 7). 용존 유기탄소의 농도는 계절적으로 하계에 최대값을 나타내고 춘계에 최소값을 나타내며 이러한 계절적인 변화는 초여름에 고정된 탄소가 박테리아의 분해 작용으로 용존 유기탄소의 형태로 방출되어 수괴 내의 용존 유기탄소 농도가 증가하기 때문으로 생각된다<sup>21)</sup>.

3.8. 용존 미량금속

현장 조사가 행해진 모든 시기에서 용존 미량금속의 표층에서 분포는 하천수의 유입이 있는 시화호의 상류에서 배수갑문이 위치한 하류로 갈수록 대체로 감소하는 경향을 보여(Table 2), 용존 미량금속 또한 하천 및 주변 공단들로부터 시화호 내로 유입되는 것으로 사료된다. 용존 미량금속의 수직적인 분포는 저층의 저산소 내지 무산소 수괴가 나타나는 하계(2003년 8월) 정점 4와 6에서 잘 관찰할

수 있었다(Fig. 8, 9). 측정된 대부분의 용존 미량금속들은 표층에서 저층으로 갈수록 감소하는 수직적인 분포를 보였는데, 이는 용존 미량금속이 저층의 환원환경에서 황화합물과의 metal-sulfide형성으로 용존 형태에서 입자성 금속 이온의 형태로 변환되어 침강 및 제거되기 때문이다<sup>9,22)</sup>. 이와 같이 황화합물을 형성하는 금속으로는 Cu, Zn, Cd, Pb, As, Mo, Hg 등이 있는 것으로 알려져 있으며<sup>23,24)</sup>, 실제로 한 등(1997)의 연구<sup>25)</sup> 결과 시화호 저층에서 약 40 μM 이상의 높은 hydrogen sulfide를 측정하였고, 한 등(1999)의 연구<sup>26)</sup>에서도 시화호 표층 퇴적물에서 33 mM 이상의 높은 sulfide 농도가 측정되었다. 이와 같은 현상은 연중 저층에서 저산소 내지 무산소 환원환경이 나타나는 흑해의 용존 미량금속 수직분포에서도 유사하게 나타났다<sup>27,28)</sup>. 용존 미량금속은 담수의 풍부한 유기물과 결합하여 유기금속 착화합물을 형성하고, 특히 구리는 더욱 빠르고 안정되게 착화합물을 형성한다<sup>29,30)</sup>. 따라서 구리는 황화합물 형성에 의한 제거 이외에 유기물 흡착에 의한 제거도 있을 것으로 사료된다. 이러한 제거 기작으로 인해 시화호내의 퇴적물에는 미량금속이 지속적으로 축적되어 퇴적 환경에서의 심각한 중금속 오염 또한 예상 할 수 있다.

본 연구 결과 조사 해역의 일반적인 수질은 외해수와의 교환이 시작된 이후 어느 정도 개선됨을 보였으나 최근에도 하계에는 염분구배에 따른 성층이 형성되고 이를 경계로 저층에서는 저산소 혹은 무산소의 환원 환경이 관찰되고 있으며, 인근 하천을 통한 오염원의 유입과 부영양화된 시화호내에서 자생적(autochthonous) 식물성 플랑크톤의 대번식에 따른 유기입자 생산과 침전 및 산화 기작이 시화호의 저층 수질 상태에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 산화-환원 경계면이 뚜렷이 형성된 정점에서 용존 무기 영양염류의 수직 분포를 살펴보면 표층의 산화환경에서는 암모니아 산화에 따른 질산염과 아질산염의 증가를 볼 수 있었으나, 저층의 환원환경에서는 용존산소의 부족으로 질산화과정이 충

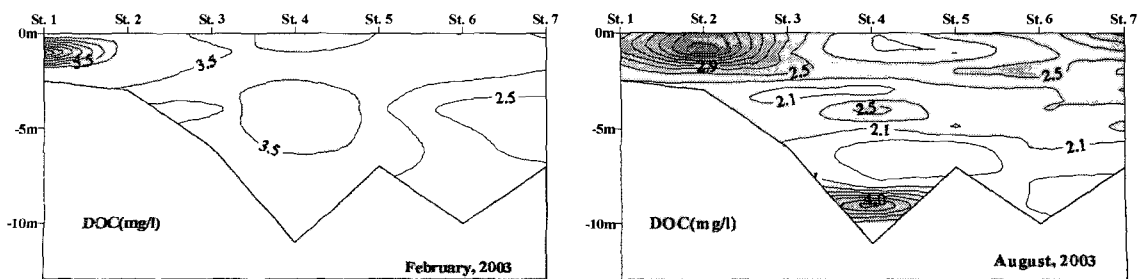


Fig. 7. Distribution of dissolved organic carbon in the study area.

Table 2. Concentration of dissolved trace metals in the study area (October, 2002)

Station	Depth (m)	Cr	Co	Ni	Cu (µg/l)	Zn	Cd	Pb
1	0	0.10	0.39	4.94	4.44	11.14	0.07	0.62
	1.5	0.13	0.26	8.56	6.72	12.78	0.07	0.75
2	0	0.09	0.12	2.70	2.28	6.36	0.06	0.38
	1	0.34	0.07	2.12	1.75	5.62	0.04	0.33
	2	0.25	0.08	3.56	2.54	6.34	0.08	0.20
3	3	0.16	0.05	3.38	2.66	6.78	0.07	0.25
	0	0.12	0.05	2.96	2.70	5.40	0.09	0.30
	1	0.13	0.05	2.84	2.88	4.68	0.08	0.22
	2	0.09	0.05	2.92	2.58	4.76	0.08	0.27
4	3	0.10	0.04	3.50	2.58	4.80	0.08	0.21
	4	0.22	0.04	2.98	2.64	4.86	0.08	0.20
	5	0.09	0.03	2.84	2.68	4.44	0.08	0.16
	1	0.09	0.05	2.52	2.22	3.52	0.07	0.10
	3	0.50	0.04	2.70	2.20	3.74	0.07	0.07
5	5	0.08	0.05	2.50	2.12	2.90	0.07	0.09
	7	0.10	0.04	2.52	2.26	4.18	0.08	0.09
	9	0.08	0.04	2.24	1.78	2.56	0.07	0.13
	11	0.11	0.05	2.22	1.66	3.26	0.10	0.13
6	0.5	0.16	0.04	2.18	2.20	4.00	0.06	0.13
	1.5	0.15	0.04	2.56	2.34	3.78	0.09	0.12
	2.5	0.50	0.03	3.36	2.40	3.06	0.07	0.06
	3.5	0.17	0.04	4.94	2.20	4.42	0.08	0.14
7	0	0.13	0.05	2.56	2.20	2.80	0.07	0.08
	1	0.25	0.06	2.44	2.30	5.96	0.07	0.38
	3	0.43	0.05	2.22	1.78	4.74	0.05	0.10
	5	0.09	0.05	2.44	2.06	2.76	0.07	0.09
	7	0.68	0.03	1.41	0.76	2.36	0.03	0.05
	9	0.12	0.04	2.18	1.92	3.08	0.07	0.11
	11	0.07	0.05	2.14	1.64	2.62	0.07	0.10
8	0	0.07	0.03	1.33	1.24	3.76	0.04	0.08
	1	0.11	0.05	2.04	1.64	3.30	0.06	0.07
	2	0.34	0.05	1.95	1.54	2.54	0.06	0.17
	3	0.28	0.06	2.36	1.74	3.38	0.07	0.12
	4	0.09	0.05	2.26	1.78	3.12	0.07	0.13
	5	0.10	0.05	2.16	2.08	5.50	0.07	0.33
	6	0.30	0.04	1.64	1.13	10.22	0.05	0.23
7	0.65	0.07	2.82	2.16	12.06	0.07	0.21	
Min.		0.07	0.03	1.33	0.76	2.36	0.03	0.05
Max.		0.68	0.39	8.56	6.72	12.78	0.10	0.75
Avg.		0.20	0.06	2.78	2.26	4.91	0.07	0.19

(February, 2003)

Station	Depth (m)	Cr	Co	Ni	Cu (µg/l)	Zn	Cd	Pb
1	0	0.26	0.46	30.60	9.49	29.80	0.16	0.32
	1	0.14	0.34	15.46	9.21	35.20	0.19	0.69
	2	0.08	0.20	11.50	8.69	28.40	0.19	0.83
	2.5	0.09	0.33	11.76	9.55	34.00	0.21	1.84
2	0	0.12	0.42	26.20	8.23	27.80	0.14	0.34
	1	0.10	0.24	10.84	6.23	20.80	0.16	0.31
	2	0.08	0.17	6.54	4.71	18.16	0.15	0.40
3	3	0.10	0.20	7.18	5.17	19.20	0.16	0.41
	0	0.09	0.27	10.14	6.59	24.80	0.16	0.39
	2	0.18	0.15	7.02	4.99	16.72	0.15	0.31
	4	0.29	0.11	6.18	4.09	14.20	0.13	0.22
4	6	0.08	0.13	5.54	3.95	13.68	0.14	0.24
	7	0.10	0.11	4.66	3.13	12.60	0.11	0.32
	0	0.10	0.14	5.60	3.61	14.60	0.13	0.31
	2	0.13	0.11	6.08	7.21		0.22	0.40
5	4	0.23	0.05	2.14	1.42	4.84	0.05	0.10
	6	0.07	0.09	4.34	2.77	9.60	0.12	0.19
	7	0.09	0.10	4.48	2.77	10.66	0.11	0.19
	0	0.08	0.11	5.58	3.67	13.24	0.12	0.21
	2	0.09	0.10	5.40	3.55	13.54	0.12	0.23
4	0.11	0.12	5.66	3.87	14.38	0.13	0.25	

시화호의 계절변화에 따른 지화학적 환경요인 특성 연구

Table 2. Continued (February, 2003)

Station	Depth (m)	Cr	Co	Ni	Cu (µg/l)	Zn	Cd	Pb
6	0	0.06	0.11	5.36	3.37	13.50	0.16	0.28
	2	0.08	0.11	5.54	3.43	12.88	0.13	0.25
	4	0.04	0.11	5.50	3.57	13.16	0.13	0.24
	6	0.04	0.13	5.58	3.53	13.26	0.14	0.20
	8	0.07	0.11	5.22	3.01	13.68	0.13	0.39
7	0	0.06	0.11	5.04	3.01	11.48	0.13	0.17
	2	0.29	0.09	5.94	3.81	14.56	0.15	0.35
	4	0.58	0.10	5.00	2.99	10.20	0.13	0.18
	6	0.49	0.09	4.84	2.73	11.28	0.12	0.26
	8	0.24	0.08	5.80	2.97	10.36	0.11	0.15
Min.		0.04	0.05	2.14	1.42	4.84	0.05	0.10
Max.		0.58	0.46	30.60	9.55	34.00	0.22	1.84
Avg.		0.15	0.16	7.96	4.69	16.69	0.14	0.35

(August, 2003)

Station	Depth (m)	Cr	Co	Ni	Cu (µg/l)	Zn	Cd	Pb
1	0	0.18	0.41	10.18	4.63	18.70	0.03	0.53
	1.5	0.12	0.39	8.94	5.37	27.80	0.07	0.50
2	0	0.36	0.41	8.08	4.91	30.20	0.04	0.39
	1	0.16	0.20	12.46	7.63	19.88	0.05	0.26
3	2	0.14	0.16	9.56	10.19	30.20	0.08	0.31
	0	0.19	0.21	8.96		72.80	0.18	0.38
4	1	0.18	0.15	8.88	38.79	65.40	0.16	0.35
	2	0.14	0.12	14.42	14.85	70.20	0.19	0.56
	3	0.33	0.03	6.74	5.39	20.20	0.06	0.22
	4	0.36	0.02	5.46	3.71	13.36	0.06	0.10
	5		0.07	7.26	3.07	10.36	0.05	0.11
	0	0.34	0.06	6.90	4.43	8.02	0.07	0.12
	1	0.23	0.05	6.94	4.51	10.24	0.09	0.13
5	2	0.38	0.03	6.64	4.21	14.06	0.08	0.12
	3	0.54	0.03	5.90	3.87	13.46	0.06	0.12
	4		0.05	7.58	3.71	13.28	0.06	0.09
	5	0.11	0.02	3.06	2.31	8.18	0.05	0.09
	6	0.09	0.03	3.62	2.49	8.84	0.06	0.10
	7	0.07	0.02	2.78	1.80	5.36	0.06	0.07
	8	0.07	0.03	2.60	1.64	7.16	0.04	0.06
6	9	0.17	0.02	1.59	1.46	5.00	0.02	0.06
	10	0.07	0.05	2.48	1.24	4.08	0.02	0.05
	0	0.11	0.04	5.04	3.99	11.72	0.05	0.15
	1	0.11	0.03	6.98	4.45	13.86	0.06	0.10
	2	0.07	0.03	5.90	3.71	12.74	0.06	0.13
	3	0.07	0.03	6.94	7.19	25.00	0.06	0.11
	4	0.07	0.02	5.94	3.57	14.26	0.06	0.12
7	5	0.13	0.03	4.66	3.31	11.68	0.05	0.12
	6	0.09	0.02	3.76	2.45	9.56	0.04	0.09
	0	0.33	0.03	6.50	4.45	11.58	0.06	0.09
	1	0.06	0.03	6.40	3.85	12.18	0.06	0.09
	2	0.08	0.04	6.20	3.65	15.36	0.06	0.15
	3	0.07	0.03	5.94	3.65	12.94	0.06	0.10
	4	0.07	0.02	5.18	3.07	10.98	0.06	0.08
7	5	0.11	0.02	4.38	2.91	11.44	0.05	0.09
	6	0.12	0.02	3.44	2.41	7.40	0.05	0.09
	7	0.10	0.02	2.00	1.43	5.84	0.02	0.06
	8	0.06	0.02	2.38	1.31	4.76	0.04	0.07
	9	0.05	0.02	2.32	1.11	3.90	0.03	0.04
	0	0.16	0.04	5.92	4.25	11.94	0.05	0.14
	1	0.10	0.08	6.20	3.95	15.10	0.05	0.21
7	2	0.16	0.03	6.12	4.57	13.10	0.06	0.10
	3	0.14	0.04	5.26	3.79	10.26	0.05	0.12
	4	0.14	0.03	4.00	2.77	10.04	0.04	0.11
	5	0.09	0.02	3.68	2.41	8.86	0.05	0.07
	6	0.09	0.02	4.36	2.91	11.46	0.05	0.09
	Min.		0.05	0.02	1.59	1.11	3.90	0.02
Max.		6.20	0.41	14.42	38.79	72.80	0.19	0.56
Avg.		0.37	0.07	5.88	4.70	16.36	0.06	0.16

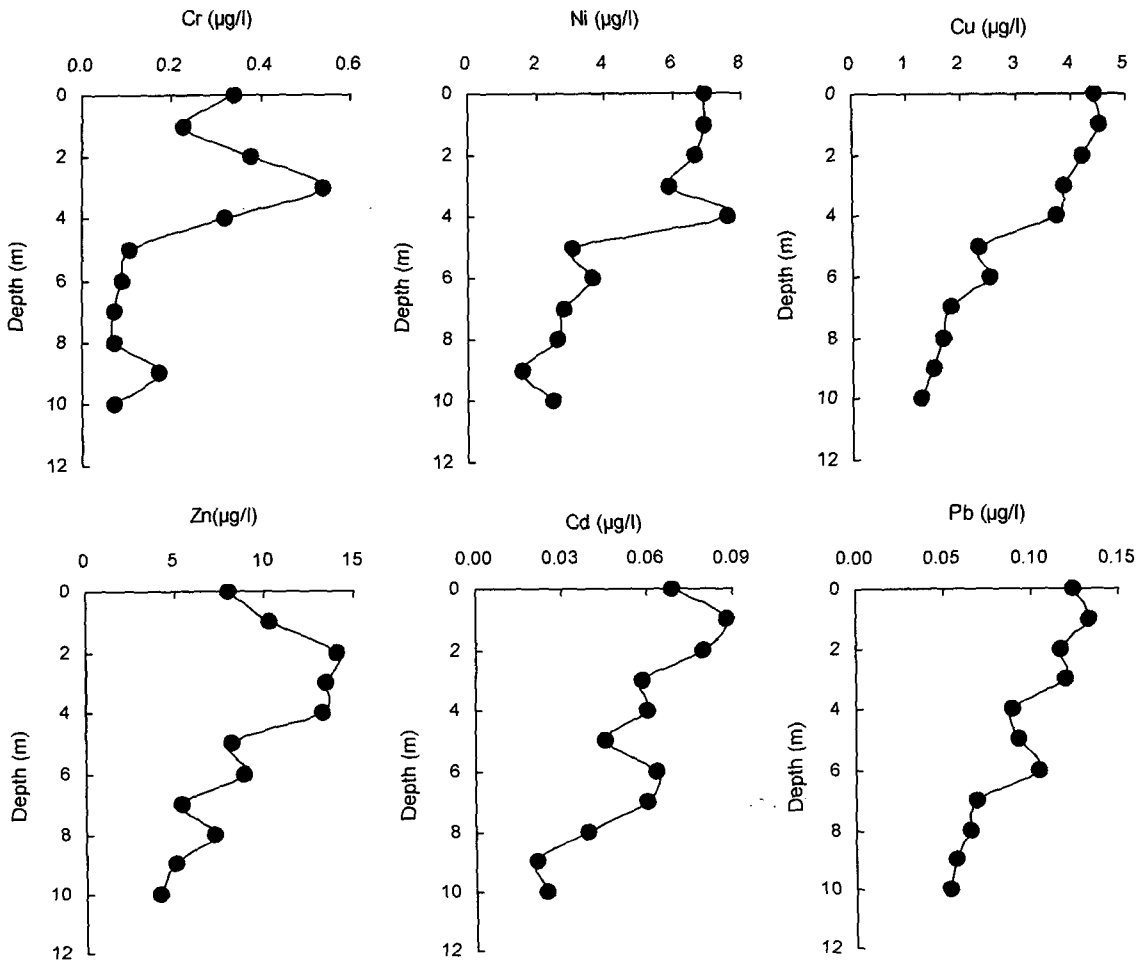


Fig. 8. Vertical profiles of dissolved trace metals at station 4 in the study area (August, 2003).

분히 일어나지 않아 암모니아 상태 그대로 축적되는 것으로 나타났다. 인산염 또한 저층의 저산소 수괴에서 높은 농도를 보였는데, 이는 표층에서의 활발한 생물 활동에 의해 생성된 유기입자가 침강하여 저층에 퇴적된 후 유기성 인이 분해되어 저층 퇴적물로부터 용출되는 기작에 의한 것으로 사료된다. 한편 용존유기탄소의 경우 주변 하천에서 유입되는 각종 유기 물질의 영향을 받아 시화호의 상류지역에서 상대적으로 높은 농도를 보여 시화호로 유입되는 주변하천이나 비점오염원에 대한 관리 대책이 필요한 것으로 사료된다. 또한 저층의 저산소 수괴에서는 용존 유기탄소 농도가 높게 나타나는데 이러한 결과는 환원환경에서 용존산소 고갈에 따라 유기물의 분해 과정이 충분히 이루어지지 못한 결과로 생각된다. 연구 지역의 용존 미량금속 분포를 살펴보면 저층에서 풍부하게 존재하는 sulfide와 용존 미량금속이 불용성 metal sulfide 형성을 거

쳐 입자 상태로 전환된 후 침전 제거되기 때문에 수괴내의 용존 미량금속의 농도는 저층에서 낮게 나타나지만 실질적인 저층 퇴적물의 중금속 오염도는 심각할 것으로 사료된다.

본 연구에서의 조사 결과 시화호는 비교적 얇은 수심에도 불구하고 하계에는 산화와 환원 상태의 두 층이 존재하고 이로 인해 여러 수질 인자들의 수직적인 분포 특성이 다양하게 나타나고 있다. 본 연구 결과를 과거 의해수가 차단되었던 시화호의 환경과 비교하면 연 평균 농도 면에서 개선된 수질 환경을 보여주고 있으나, 여전히 하계에는 저층에 저산소 수괴가 형성되어 그 개선 효과가 제한적임을 알 수 있다.

이와 같이 비교적 수심이 낮은 시화호에서도 하계 절에는 수괴의 밀도차에 의한 성층이 형성되고 이를 경계로 한 저층에서의 수질 환경이 악화되는 현상이 밝혀진 것은 매우 의미 있는 연구라 할 수 있다. 의해수와와 교류 이후 시화호의 수질이 향상되고 그

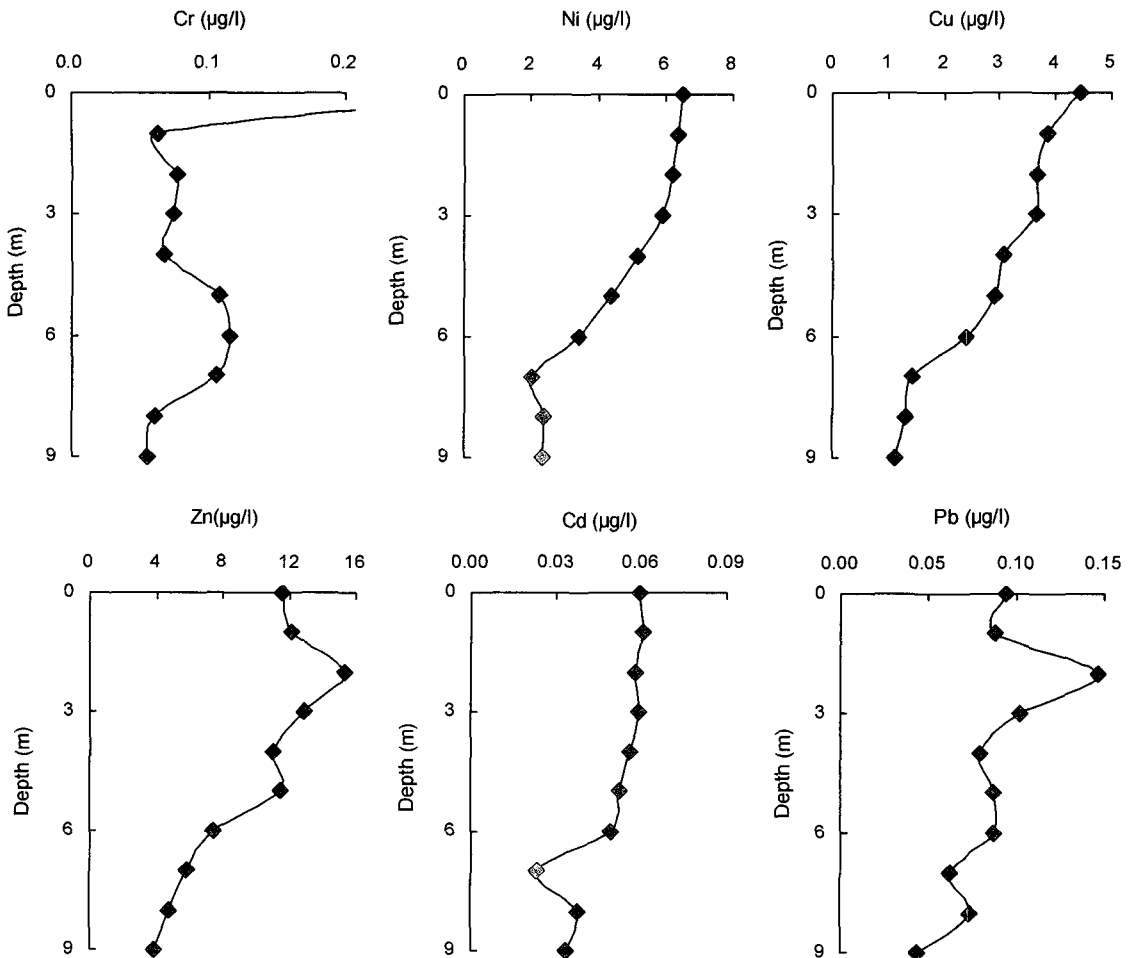


Fig. 9. Vertical profiles of dissolved trace metals at station 6 in the study area (August, 2003).

와 관련된 많은 생태, 환경학적인 연구가 수행되었지만 시화호의 수직적인 분포와 계절적이고 지속적인 저층 수괴 수질에 대한 환경학적인 고찰이 부족한 면이 없지 않다. 따라서 기존의 배수갑문을 통한 해수 유통만으로는 시화호의 수질 환경 개선에 한계가 있기 때문에 차후 해수유통량을 증대시킬 수 있는 방안의 수립이 바람직한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 2002-03년도 인하대학교 서해연안환경 연구센터(RRC)의 학술연구비 지원에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 여러모로 많은 도움을 주신 지오시스템리서치 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

### 참고 문헌

1) 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철, 2003, 시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구, Ocean

and Polar Res., 25(4), 461-467.

- 2) Codispoti, L. A., G. E. Frienderich, J. W. Murray and C. M. Sakamoto, 1991, Chemical variability in the Black Sea: implication of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface, Deep-Sea Res., 38, 691-710.
- 3) Lewis, B. L. and W. M. Landing, 1991, The biogeochemistry of manganese and iron in the Black Sea, Deep-Sea Res., 38, 773-803.
- 4) Portony, J. W., 1991, Summer oxygen depletion in a diked New England estuary, Estuar., 14(2), 122-129.
- 5) Stanley D. W. and S. W. Nixon, 1992, Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico River Estuary, Estuar., 15(3), 270-281.
- 6) Solorzano, L., 1969, Determination of ammonia

- in natural waters by the phenol hypochlorite method, *Limnol. Oceanogr.*, 14, 779-801.
- 7) Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli, 1984, A manual of chemical and biological methods for seawater analysis, Pergamon Press, 3-28pp.
  - 8) 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, *Mar. Chem.*, 24, 105-131.
  - 9) 박준건, 1998, 시화호 산화-환원 환경에서의 생지화학적 특성 연구, 인하대학교 이학석사학위논문, 1-17pp.
  - 10) Murray, J. W., Z. Top and E. Ozsoy, 1991, Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea, *Deep-Sea Res.*, 38, 663-689.
  - 11) Brewer, P. G. and D. W. Spencer, 1974, Distribution of some trace elements in Black Sea and their flux between dissolved and organic phases, In: *The Black Sea-geology, chemistry, and biology*, E.T. Degens and D.A. Ross, editors, AAPG, 137-143pp.
  - 12) Mayer, L. M., F. P. Liotta and S. A. Norton, 1982, Hypolimnetic redox and phosphorus cycling in hypereutrophic Lake Sebasticook, *Marine, Water Research*, 16, 1189-1196.
  - 13) Shaffer, G., 1986, Phosphate pumps and shuttles in the Black Sea, *Nature*, 321, 515-517.
  - 14) Wollast, R., 1983, Interaction in Estuaries and Coastal Waters, In: *The Major Biochemical Cycle and their Interactions*, edited by Bolin, B. and R.B. Cook, John Wiley & Sons, Chichester, 385-410pp.
  - 15) Officer, C. B. and J. H. Ryther, 1980, The possible importance of silicon in marine eutrophication, *Marine Ecology Progress Series*, 3, 83-91.
  - 16) Morris, A. W., A. J. Bale and R. J. M. Howland, 1981, Nutrient distributions in an estuary: evidence of chemical precipitation of dissolved silicate and phosphate, *Estuary. Coast. Shelf Sci.*, 12, 205-216.
  - 17) Martin, J. M. and M. Meybeck, 1979, Elemental mass balance of material carried by major world rivers, *Mar. Chem.*, 7, 173-206.
  - 18) Demaster, D. J., 1981, The supply and accumulation of silica in the marine environment, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 45, 1715-1732.
  - 19) Smith, R. E., D. H. Peterson, S. W. Hager, L. E. Schemel and R. E. Herndon, 1985, Seasonal and Interannual nutrient variability in northern San Francisco Bay, In: *Marine and Estuarine Geochemistry*, edited by Sigleo, A.C. and A. Hattori, Lewis Publishers Inc., 137-159pp.
  - 20) Doval, M. D., F. F. Perez and E. Berdalet, 1999, Dissolved and particulate organic carbon and nitrogen in the Northwestern Mediterranean, *Deep-Sea Res.*, 46, 511-527.
  - 21) Ulla L. Z., W. Johan, L. Erik and N. Bosse, 1995, Dynamic of dissolved organic carbon in a coastal ecosystem, *Limnol. Oceanogr.*, 40(2), 299-305.
  - 22) 김경태, 김은수, 조성록, 박준건, 박청길, 2003, 시화호 및 주변 하천 표층 퇴적물의 중금속 분포 변화, *Ocean and Polar Res.*, 25(4), 447-457.
  - 23) Huerta-Diaz, M. A. and J. H. Morse, 1992, Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 56, 2681-2702.
  - 24) Lewis, B. L. and W. M. Landing, 1992, The investigation of dissolved and suspended-particulate trace metal fractionation in the Black Sea, *Mar. Chem.*, 40, 105-141.
  - 25) 한명우, 박용철, 허성희, 1997, 시화호에서 암모니아와 납의 저층용출, *바다*, 2(2), 69-77.
  - 26) 현상민, 천중화, 이희일, 1999, 시화호의 퇴적환경과 중금속오염, *바다*, 4(3), 198-207.
  - 27) Haraldsson, C. and S. Westerlund, 1991, Total and suspended cadmium, cobalt, copper, iron, lead, manganese, nickel and zinc in the water column of the Black Sea, In: *Black Sea Oceanography*, edited by Izdar, E. and J.W. Murray, Kluwer Academic Publ., 161-172pp.
  - 28) Han, M. and Y. Park, 1999, The development of anoxia in the artificial Lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation, *Mar. Pollut. Bull.*, 38(12), 1194-1199.
  - 29) Van den Berg, C. M. G., 1984, Organic and inorganic speciation of copper in the Irish Sea, *Mar. Chem.*, 14, 201-212.
  - 30) Jickells, T. D. and J. D. Burton, 1988, Cobalt, copper, manganese and nickel in the Sargasso Sea, *Mar. Chem.*, 23, 131-144.