

Article

시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구

박준건^{1*} · 김은수¹ · 조성록¹ · 김경태¹ · 박용철²

¹한국해양연구원 해양기후 · 환경연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²인하대학교 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

Annual Variation of Water Qualities in the Shihwa Lake

Jun Kun Park^{1*}, Eun Soo Kim¹, Sung Rok Cho¹, Kyung Tae Kim¹, and Yong Chul Park²

¹Ocean Climate & Environment Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

²Department of Oceanography, Inha University
Incheon 402-751, Korea

Abstract : Annual variation of water qualities in the Shihwa Lake were observed 18 times from June 1996 to October 2001. We studied at the station of the upper streams and near the water gate of lake. After the flow of the outer seawater through the water gate, the surface salinity in Shihwa Lake increased to the range of 25-30 psu in both stations after October 1998. Due to the declination of the salinity differences between the surface and the bottom water, the pycnocline in which had existed until 1997 has weakened, and made the water column mix vertically. This led to the improvement of anoxic/hypoxic environment at bottom waters after April 1998. However, despite the continuous flow of the outer seawater, the concentrations of chlorophyll-*a* at surface layer were varied from 2 $\mu\text{g/l}$ to 60 $\mu\text{g/l}$, and these values indicated the eutrophication. The following organic matter load was greatly influencing the surface layer's COD concentration. During the rainy season, the salinity at the surface layer fell below 15 psu resulting in stratification between the surface and bottom layer. Organic matters that were provided from the surface layer to the bottom layer due to active primary production in the year exhausted dissolved oxygen at the bottom layer, and the bulks of organic matters at bottom gave rise to hypoxic or anoxic environment. It was observed that the enrichment of ammonia and phosphate were main factors to worsen the water quality of the Shihwa Lake. The results of examining the annual variations in Shihwa Lake through principal component analysis shown that water characteristics in the rainy season were similar with those before input of outer sea water.

Key words : 시화호(Shihwa Lake), 수질(water quality), 부영양화(eutrophication), 성층화(stratification), 무산소/저산소(anoxic/hypoxic)

1. 서 론

1994년 시화 방조제 완공 이후 급속히 악화되는 수질환

경에 대한 연구는 그 동안 많이 수행되어져 왔다. 바깥 해수와 차단된 폐쇄된 환경에서 주변 육상으로부터 하천을 통해 유입되어지는 유기 오염 물질에 의해 표층수에서 연중 부영양화가 관찰되었다(박 등 1997; 최 등 1997). 또한 물막이 이전 잔존하고 있던 저층의 해수와 물막이 이후

*Corresponding author. E-mail : parkjk@kordi.re.kr

표층으로 유입되는 담수로 인한 염분차로 호 내는 성층이 이루어졌으며, 표층의 활발한 일차생산에 의한 유기물 생성과 하천으로부터의 유기물 유입은 시화호의 수질을 악화시켜, 고염의 저층수는 표층으로부터 침강된 유기물의 분해에 따라 산소가 고갈되어 저산소 환원 환경의 특성을 보이게 되었다(박 등 1997). 이와 같은 용존산소의 급격한 수직 변화는 수괴의 산화-환원 환경을 결정하는데 절대적인 요인이 되며, 수괴내의 생지화학적 기작과 반응을 좌우하여 수층의 화학적 종분화에 결정적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Codispoti *et al.* 1991; Lewis and Landing 1991). 이러한 시화호의 독특한 환경에서 수괴내의 생지화학적 종분화에 대한 연구(Han and Park 1999; 김 등 1998a; 김 2001; 박 등 1997; 박 1998; 신 등 2000a) 및 저층 퇴적 환경에 대한 연구(심 1998; 심 등 1998; 심 등 2001; 최 등 1999; 최 등 2000; 현 등 1999)등이 이루어져 왔으며, 특히 저층 환원 환경에서 암모니아(한 등 1997) 및 인(심 등 2001)의 용출은 저층 환경을 악화시켜오는 것으로 알려져 있다. 이러한 시화호의 수질 악화를 해결하고자 1997년 3월 배수갑문을 통한 시화호 시험 방류가 있었고, 1998년 3월부터 상시적인 배수갑문 개방에 의한 외해수와의 유출입이 시작되었다. 외해와의 유출입이 상시적으로 있을 후 배수갑문 근처의 염분은 29 psu에 이르는 등 저염의 표층수 특성은 사라졌으며, 염분에 의한 성층 또한 약화되었다. 그러나 외해수 유·출입 이후에도 수질 환경은 여전히 부영양화된 상태를 지속하고 있고 저층 환원 환경이 관찰되고 있어(김 등 1998b; 신 등 2000b), 배수갑문을 통한 외해수의 유출입만으로는 시화호 수질 개선에 한계가 있는 것으로 나타났다. 대표적으로 미국의

Chesapeake 만의 경우 산업화 이후 지속적인 오염물질의 유입에 따라 부영양화 및 수층의 무산소 환경이 오래전부터 관찰되었으며(Cooper and Brush 1991; Cooper and Brush 1993; Millero 1991; Seliger *et al.* 1985; Zimmerman and Canuel 2000), 다른 산업화된 지역의 인근 연안역에서도 대부분 인간 활동에 의한 오염물질의 유입에 따른 부영양화로 여러가지 환경문제가 발생되고 있다(D'Avanzo and Kremer 1994; Forsberg and Ryding 1980; Kennish 1997; Lapointe and Clark 1992; Valiela *et al.* 1992; Vollenweider and Kerekes 1982; Zaghoul and Halim 1992). 특히 여름철과 같은 특정 시기에는 무산소 내지 저산소 환경 발생이 보고 되었고, 이러한 현상으로 인해 수질 악화가 더욱 가속화 되는 것으로 알려져 있다(Kuo *et al.* 1991; Portnoy 1991; Stanley and Nixon 1992). 따라서 본 연구에서는 우리나라 인공 해수호의 대표적 오염 사례인 시화호의 부영양화 및 저층 용존산소 결핍 현상의 장기간 변동을 파악하고자 배수갑문을 통한 외해수의 유·출입이 본격적으로 시작된 1998년을 전후로 하여 수질 연변화 양상을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

연구자료는 1996년 6월부터 2001년 10월까지 총 18회 조사한 자료를 토대로 하였다. 다만, 저층자료는 1997년 4월부터 2001년 10월까지 조사한 자료를 사용하였다. 조사 정점은 신길천 및 반월 공단에 가까이 위치하여 담수의 영향을 많이 받고 수심이 얇은(약 6 m) 정점 A와 외해수 유입에 따른 해수의 영향을 많이 받으며 수심이 깊은(약

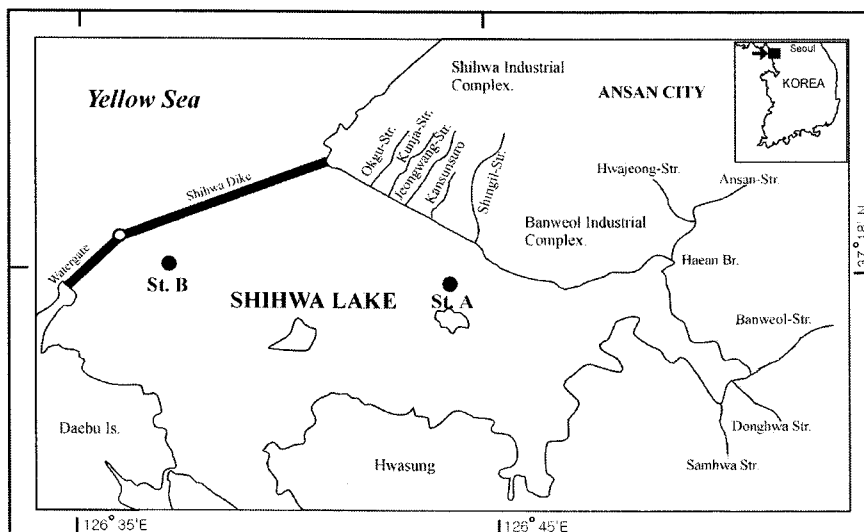


Fig. 1. Sampling stations in the Shihwa Lake.

14 m) 정점 B(Fig. 1)를 대상으로 하였다.

용존산소량은 선상에서 용존산소측정기(DO meter, YSI 58)로 측정 또는 Winkler법에 의하여 실험실에서 측정하였다. 염분은 CTD(SBE 19)로 현장 측정하였다. 질산염, 아질산염, 인산염 및 규산염 측정을 위한 시료는 선상에서 유리섬유필터(Whatman GF/F)를 통하여 여과한 후 여액을 폴리에틸렌 재질의 용기에 담아 즉시 냉동시킨 후 실험실로 옮겨 영양염자동분석기(Flow Injection Analyzer, LACHAT)로 분석하였다. 암모니아염은 시료에 페놀, sodium nitroprusside와 산화제를 첨가하여 분광광도계(UV-Vis spectrophotometer, Milton Roy Spectronic 3000)로 측정하였다(Solozano 1969). 클로로필-*a*는 해수를 유리섬유필터(Whatman GF/F)로 여과한 다음 냉동 보관하여 실험실로 옮긴 후 90% 아세톤으로 추출하여 분광광도계로 측정하였다(Parson *et al.* 1984). 화학적산소요구량(COD)은 시료를 폴리에틸렌 재질의 병에 담아 냉동 보관 후 실험실로 옮겨 시료를 알칼리성으로 하여 수욕상에서 60분간 가열한 후, 요오드칼륨을 넣어 유리된 요오드를 티오황산나트륨으로 적정하였다(해양수산부 1997).

3. 결과 및 고찰

수리 물리적 환경

조사 해역의 수온은 연변화에 따른 변화 보다는 계절에 따른 일사량 변동에 따라 변화하는 양상을 나타냈으며, 정점 A, B 간의 차이는 크게 나지 않았다(Table 1, Fig. 2).

염분의 경우 표층은 1996년 6월에서 1997년 10월까지 정점 A에서 7.3~15.8 psu, 정점 B에서 9.9~15.9 psu의 범위를 나타내었고, 외해수 유·출입이 본격화된 1998년부터 표층수의 염분은 급격히 증가하여 정점 B에서는 1998년 4월, 정점 A에서는 1998년 10월 이후 각각 29.7 psu, 25.4 psu의 값을 나타내 외해수 유입에 따른 표층 염분의 증가가 관찰되었다(Table 1, Fig. 2). 두 정점 사이에 시기적으로 차이가 있는 것은 정점 A가 하천의 영향을 더 많이 받는 시화호 상류쪽에 위치하고 있기 때문이다. 그러나 1998년 7월과 2000년 7월, 그리고 2001년 8월에는 표층 염분이 정점 A와 B 모두 12~20 psu로 떨어지는 현상이 관찰되었다(Fig. 2). 이는 이 시기에 나타난 다량의 강우(기상청 1998, 2000, 2001)에 의한 육상으로부터 하천을 통한 담수 유입 증가에 기인된다. 저층 염분은 정점 A에서 1997년 4월과 8월 각각 13.7 psu, 9.3 psu를 기록하였고 그 이후에는 26 psu 이상의 값을 나타냈다. 정점 B에서는 1997년 4월 이후로 27~31 psu의 범위를 나타냈다. 본 조사 기간 동안의 수리 물리적 환경 연구결과 여름철 강우기의 경우 염분 경사에 의한 성층화가 관찰되었다(Fig. 3). 또한, 강우기에 육상 기인의 많은 오염물질 등이

하천을 통해 시화호 표층으로 유입되어 수질 악화에 영향을 줄 수 있을 것으로 생각된다.

수질 환경 요인 분포

용존 산소

표층 용존 산소 분포는 표층 수온 변화와 마찬가지로 외해수 유·출입에 의한 연변화보다는 계절에 따른 변이가 크게 나타났으며 그 변화폭은 정점 A, B 각각 4.46~14.48 mg/l, 4.81~16.00 mg/l이었다. 1998년 7월의 정점 B에서 용존 산소 농도 16.0 mg/l로 최대를 나타내는 등 주로 여름철에 상대적으로 높은 용존 산소 값을 나타내었다(Table 1, Fig. 2). 용존 산소 포화도 또한 상대적으로 여름철에 높게 나타났으며(Fig. 2), 1998년 7월 정점 B에서 최대 221.9%를 나타냈다. 조사기간 동안 일부 계절을 제외하고는 타 계절에서도 100% 이상의 높은 용존 산소 포화도를 나타냈는데, 이는 시화호 내 식물 플랑크톤의 높은 일차생산에 의한 영향 때문인 것으로 생각된다(박 등 1997; 최 등 1997). 반면 저층의 경우 수심이 깊은 정점 B에서는 1997년 4월에서 10월까지 평균 0.14 mg/l의 매우 낮은 값을 가진 빈산소(hypoxic) 상태를 나타냈다. 상대적으로 수심이 얇은 정점 A에서는 6.00~7.68 mg/l의 범위를 나타내었다(Table 1, Fig. 2). 이후 외해수와의 교환이 활발해진 1998년 4월에는 저층에서 두 정점 모두 약 10 mg/l까지 상승하였다. 그러나 1998년 7월, 2000년 7월, 2001년 8월에는 용존 산소 값이 다시 약 2 mg/l이하의 빈산소 환경을 나타냈으며 특히 2001년 8월에는 정점 B에서 0.07 mg/l의 무산소 환경에 가까운 값을 나타냈다. 정점 B에서의 수직 분포 양상은 1997년 이후 어느 정도 수직 혼합이 이루어 지는 것을 볼 수 있으나 여름철에는 다시 성층화에 의한 수심 6 m 부근에서 현격한 용존 산소 변화를 관찰할 수 있었다(Fig. 3). 저층에서 저산소 내지 무산소 환경현상이 일어난 시기는 앞서 표층 염분도가 감소하는 시기와 일치하며, 여름철 우기 시 시화호 표층으로의 담수의 유입이 염분에 의한 밀도 약층 형성을 다시 유발시키는 것으로 보인다. 이때 하천을 통해 유입된 많은 양의 육상 기원 유기물들이 저층으로 떨어져 분해 될 경우 용존 산소를 고갈 시킴으로서 저층의 저산소 내지 무산소 환경을 다시 유발시킬 수 있는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 미국의 New England 인근 하구역(Portnoy 1991), 메사추세츠 주의 Waquoit 만(D'Avanzo and Kremer 1994), 노스 캐롤라이나의 Pamlico 강 유역(Stanley and Nixon 1992), 지중해의 Alexandria 항구(Zaghloul and Halim 1992)등지에서도 유사하게 나타난 바 있으며, 흑해의 경우는 지난 수십년간 부영양화로 인한 저층 저산소 내지 무산소 수괴가 없어지지 않고 있다(Konovalov and Murray 2001). 또한 국내에서도 진해만에서 여름철에 무산소 수괴

Table 1. General water quality parameters in the Shihwa Lake form June 1996 to October 2001.

		Temp (°C)		Sal. (psu)		Do (mg/l)		DO (%)		Chl-a (µg/l)		COD (mg/l)		NO ₂ ⁻ (µM)		NO ₃ ⁻ (µM)		NH ₄ ⁺ (µM)		TN* (µM)		HPO ₄ ²⁻ (µM)		Si(OH) ₄ (µM)								
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B					
1996	Jun.	Surface	23.3	22.1	15.8	15.9	7.96	11.95	102.4	150.7			38.69	46.37	67.96	84.75			106.65	131.12	0.60	0.04	5.65	0.38								
		Bottom																														
	Aug.	Surface	23.7	24.4	13.7	13.3	6.59	9.93	79.1	128.7		6.07	5.88	5.26	4.48	23.73	15.89			28.99	20.37	4.66	2.04	49.00	9.40							
		Bottom																														
	Oct.	Surface	12.9	14.1	13.1	14.0	8.21	14.16	84.5	150.2	13.6	69.6	4.86	7.04	3.32	0.94	11.22	4.21	96.70	5.70	111.24	10.85	1.17	0.10	29.52	13.38						
		Bottom																														
1997	Nov.	Surface	7.3	8.6	12.9	13.7	14.30	14.77	129.1	138.5	26.3	22.5	4.89	5.07	13.12	2.23	36.66	10.91	146.10	28.30	195.88	41.44	2.13	0.56	27.64	12.31						
		Bottom																														
	Apr.	Surface	15.9	13.5	13.5	14.2	12.20	4.81	134.1	50.5			6.78	5.28	51.57	53.70	76.89	73.07	135.24	132.05	2.16	3.32	36.39	35.72								
		Bottom	14.4	6.9	13.7	22.6	7.68	0.14	82.0	1.4			7.42	0.36	58.60	0.00	80.43	160.37	146.45	160.73	3.20	13.32	45.28	37.65								
	Aug.	Surface	28.8	28.4	7.3	9.9	8.44	12.87	114.2	175.5	32.6	23.0	18.40	14.73	2.94	0.22	5.36	0.13	197.14	1.00	205.44	1.35	6.41	2.80	16.41	96.27						
		Bottom	28.3	15.5	9.3	27.2	6.00	0.14	81.4	1.7			0.47	3.77	1.54	2.72	27.26	628.54	29.27	635.03	3.41	50.86	51.01	187.52								
	Oct.	Surface	18.2	18.5	15.3	19.2	12.70	6.84	147.9	82.0			2.11	0.79	2.10	0.77			48.22	49.77	0.13	3.35	0.78	34.41								
		Bottom	18.9		27.1		0.14		0.18				0.77		0.61				154.55	155.92	8.70			49.76								
	Apr.	Surface	13.0	11.9	11.5	29.6	14.48	12.88	147.8	143.8	6.0	11.6	6.33	7.40	6.14	0.92	40.44	3.28	126.87	16.53	173.45	20.73	1.67	0.20	48.85	1.18						
		Bottom	8.2	7.9	31.2	31.3	8.67	9.92	90.1	102.4			1.22	0.88	5.44	6.00	24.22	24.76	30.89	31.64	0.13	0.21	8.71	6.86								
	Jul.	Surface	26.0		20.4		16.00		221.9				2.10		15.27				0.84		18.21		0.31		33.42							
		Bottom	19.6		30.2		1.03		13.5				0.30		0.10				82.75		83.15		9.76		75.23							
	Sep.	Surface	23.8	22.8	25.4	24.8	4.46	5.64	61.3	75.8		0.8	3.39	3.76	1.93	2.10	4.85	5.66	52.30	18.70	59.08	26.45	2.95	1.76	35.95	23.75						
		Bottom	23.5	23.5	26.5	27.6	2.34	5.92	32.2	81.9			0.91	2.30	2.03	7.64	56.20	17.40	59.15	27.35	2.50	1.55	22.32	16.04								
	Dec.	Surface	5.1		29.6		10.62		101.5		1.6	14.0	12.51	4.85	1.05		5.53		59.73		64.50		0.10		17.55							
		Bottom	4.9		29.6		10.29		97.8				1.73		5.72				128.87		136.32		0.10		17.42							
	Mar.	Surface	8.0	7.9	29.2	29.8	11.20	13.16	114.3	134.5	28.6	23.1	12.20	11.81	3.01	2.28	18.55	14.86	33.32	4.42	54.88	21.56	0.25	0.22	9.48	5.39						
		Bottom	4.5	5.4	30.7	31.1	6.09	12.21	57.8	118.7			2.95	1.72	16.27	12.93	17.88	4.83	37.10	19.48	0.26	0.23	8.62	2.93								
	Sep.	Surface	28.3	25.9	23.0	26.1	10.01	5.54	146.5	79.3	10.1	9.4	8.20	4.87	5.77	3.24	13.04	7.64	188.90	182.07	207.71	192.95	0.22	0.21	7.77	7.80						
		Bottom	24.3	24.6	27.5	28.3	0.12	5.08	1.7	71.9			0.20	2.98	0.40	7.07	95.95	82.98	96.55	93.03	3.44	1.09	21.07	10.15								
	Apr.	Surface	11.3	11.9	31.1	30.8	8.06	10.25	89.06	115.3	11.4	3.3	3.92	3.96	1.35	1.29	11.76	11.88	6.57	0.10	19.68	13.27	0.37	0.25	3.20	0.37						
		Bottom	10.0	9.4	30.9	30.9	7.26	9.48	78.4	101.0			1.11	1.01	10.93	10.57	4.15	7.43	16.19	19.01	0.53	0.90	4.39	4.76								
	Jul.	Surface	30.0	27.6	12.5	15.2	14.07	11.15	200.0	154.5	32.7	3.6	12.70	6.86	4.12	2.68	45.76	23.39	16.41	6.09	66.29	38.16	0.25	0.17	28.39	3.97						
		Bottom	25.2	23.7	30.8	1.34	1.67	19.4	23.6			0.86	1.14	2.62	4.08	29.33	22.62	32.80	27.84	2.00	4.30	23.50	34.73									
	Nov.	Surface	12.8	13.4	27.6	28.3	9.18	9.69	103.1	110.8	25.4	14.8	5.84	3.80	1.28	0.50	1.13	1.70	5.08	1.62	7.49	3.82	4.81	0.43	16.08	10.48						
		Bottom	12.6	14.3	27.8	29.1	9.33	8.68	104.5	101.6			0.62	1.81	0.74	8.71	3.64	4.59	5.00	15.11	2.93	0.82	14.83	13.04								
	Aug.	Surface	29.4	30.0	14.6	13.1	10.85	13.63	154.4	194.3	16.7	59.1	6.43	12.99	5.65	2.08	36.21	9.59	8.52	1.38	50.38	13.05	0.98	0.17	45.31	9.76						
		Bottom	24.1	21.6	26.7	31.0	0.14	0.07	2.0	0.9			3.71	0.10	3.64	0.10	54.06	95.98	61.41	96.18	8.63	16.31	45.77	101.69								
	Oct.	Surface	17.9	17.8	29.0	29.6	8.05	9.93	101.2	125.0	1.9	7.7	3.50	4.14	1.29	1.61	1.49	0.70	3.43	0.71	6.21	3.01	6.42	0.73	6.85	2.10						
		Bottom	17.9	18.3	29.3	30.7	4.88	7.04	61.4	90.1			1.75	3.98	1.37	3.62	2.68	3.76	5.79	11.35	12.80	1.15	10.05	6.82								

*TN: NO₂⁻ + NO₃⁻ + NH₄⁺.

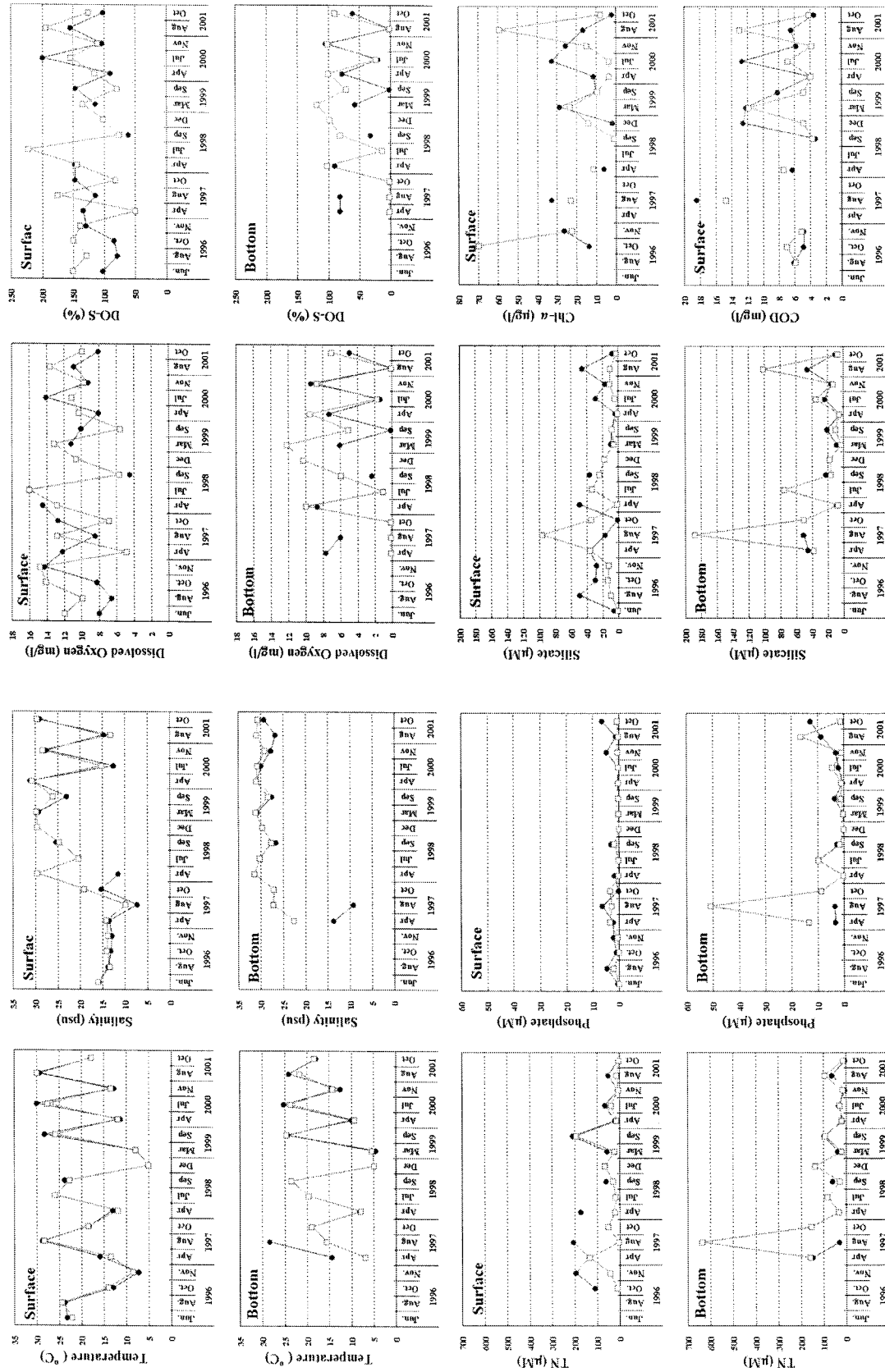


Fig. 2. Annual variation of water quality parameters in the Shihwa Lake from June 1996 to October 2001 (● : Station A, □ : Station B; the values of chl-a and COD were only obtained at the surface layer).

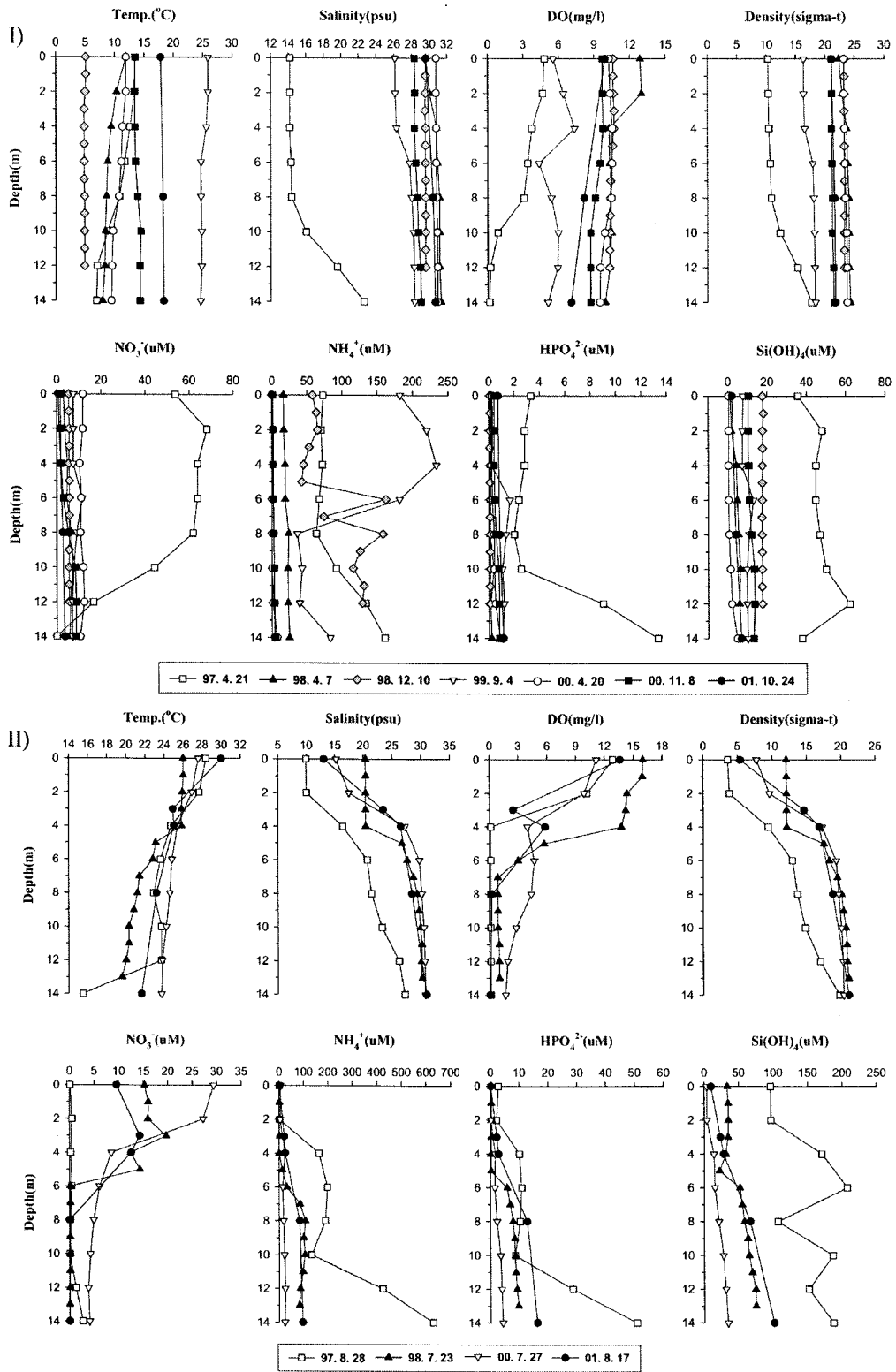


Fig. 3. Vertical profiles of hydrography and water quality parameters at station B in the Shihwa Lake (I: dry season, II: wet season).

가 보고된 바 있다(한국해양연구소 1990).

클로로필 *a*

시화호 표층의 클로로필 *a* 농도는 1996년 10월 최대 69.6 $\mu\text{g/l}$ (정점 B)를 나타냈으며, 외해수와 유·출입이 상시적으로 있는 이후 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나 계절간 격차가 매우 심하게 나타났다. 특히 여름철의 경우 두 정점 모두 약 20 $\mu\text{g/l}$ 이상의 높은 값을 나타냈으며, 2001년 8월에는 정점 B에서 59.1 $\mu\text{g/l}$ 을 기록하였다. EPA(1976) 및 Forsberg and Ryding(1980)의 분류에 따르면 클로로필 *a* 농도가 각각 10 $\mu\text{g/l}$, 20~25 $\mu\text{g/l}$ 이상일 때 부영양 수역으로 보았으며, Marchetti(1984)는 해역에서 클로로필 *a* 농도가 10 $\mu\text{g/l}$ 이상일 때 과영양 해역으로 분류한 것을 적용해 볼 때, 일부 겨울철을 제외하고는 농도 범위가 약 6~30 $\mu\text{g/l}$ 로써(Fig. 2) 담수 기준 및 해수 기준에서 모두 부영양 내지 과영양 상태를 나타내고 있었다.

COD

정점 A와 B에서 1997년 8월 각각 18.40 mg/l, 14.73 mg/l로 가장 높았으며, 평균적으로 5~13 mg/l의 변화 범위를 나타냈다(Fig. 2). 이는 COD 기준 해역수질 3등급(4 mg/l 이하)보다도 높은 농도로서, 외해수 유입이 상시적으로 행하여진 1998년 이후 COD 농도가 많이 감소하기는 했지만 여전히 높은 농도를 유지하고 있는 것을 알 수 있었다. 조사기간 중 COD와 클로로필 *a* 사이의 유의한 상관관계(Fig. 4, $r=0.43$, $p<0.05$)로부터, 시화호 내의 꾸준히 높은 COD 농도는 하천에 의한 유기물 공급 외에 표층의 식물 플랑크톤에 의한 일차생산이 시화호 내부의 유기물 공급에 큰 기여를 하고 있다는 것을 암시한다(김 등 1998a, 1998b).

용존 무기 영양염류

연구해역의 총무기질소($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)는 표·저

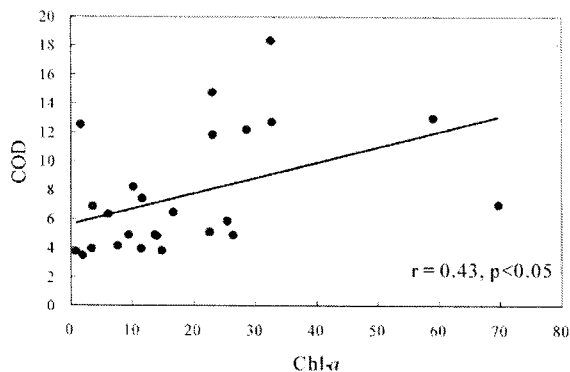


Fig. 4. Correlation between Chl-*a* and COD at surface water in the Shihwa Lake.

층 모두 1997년 8월 이후로 점차 감소하여 외해수의 유출입이 상시적으로 있는 1998년부터는 그 농도가 많이 감소하였다. 그러나 표층의 경우 육상으로부터의 담수 유입에 따른 계절적 진동이 나타났으며, 특히 1999년 9월에 정점 A, B 각각 207.71 μM , 192.95 μM 의 높은 농도를 나타내었고(Table 1, Fig. 2), 이중 암모니아염의 농도가 정점 A, B 각각 188.90 μM , 182.07 μM 로써 총무기질소의 대부분을 차지하였다(Table 1). 그 외의 계절에도 질소계 영양염의 대부분이 암모니아염인 것으로 나타났다(Table 1). 박 등(1997)의 연구 결과에서도 시화호 내 질소 공급원 중 대부분이 암모니아염인 것으로 보고되었으며, 이러한 특징은 외해수와 교환이 상시적으로 있는 후의 본 연구 결과에서도 유사하게 나타났다(Table 1). 2000년 이후 배수 갑문에 인접한 정점 B의 경우 한때 암모니아염의 농도가 0.1~0.7 μM 로써 1996년 외해수의 농도(약 1.0 μM , 박 1998)와 유사하게 나타났으나, 여름철 우기에는 다시 약 6 μM 로 상승하였고, 같은 시기 정점 A에서는 약 16 μM 을 나타냈다. 이러한 높은 암모니아염은 식물 플랑크톤의 주된 질소원으로서 우선적으로 흡수되기 때문에 시화호 내의 식물 플랑크톤의 연중 과대 번식을 촉발시킬 수 있다. 또한 정점 B에서 용존산소와 질산염, 암모니아염의 수직 변화 양상을 살펴본 결과 외해수 혼합 이전과 유사한 분포 특성을 여름철 우기시에 발견할 수 있어(Table 1, Fig. 3), 시화호 저층 수질은 성층이 이루어질 경우 급속히 악화될 수 있음을 알 수 있었다.

인산염의 경우도 질소계 영양염류와 비슷한 연변화 양상을 보이고 있었다. 외해수와 유·출입 이후인 1998년을 기점으로 표·저층 모두 농도가 감소하는 추세를 보이고 있으나 계절적으로 그 변화가 많았다. 특히 여름철의 경우 질소계 영양염류와 달리 표층에서 고갈되어, 표층 N/P 비가 정점 A, B 각각 평균 약 151, 163으로 매우 높았다. 이로서 여름철의 시화호 내 표층 환경이 담수환경의 특성을 지니고 있어 인산염 유입시 식물플랑크톤의 과다 번식이 일어날 수 있다고 판단된다(Table 1, Fig. 2). 인산염의 수직 분포 양상은 암모니아염과 마찬가지로 여름철 저층에서 증가하였는데, 이는 잘 알려진 바와 같이 산화-환원 경계면에서 인산염이 Fe 또는 Mn과 산화물을 만든 후 저층 환원층으로 침강하고, 다시 저층 환원층에서 용해되어 방출되기 때문이다(박 등 1997; 김 등 1998; 심 등 2001). 또한 과거 외해수와 유입 이전 오염되었던 퇴적 환경에서 지속적으로 용출되는 암모니아염과 인산염 또한 수질환경에 큰 영향을 줄 것으로 생각된다(한 등 1997; 심 등 2001).

규산염의 경우 표층은 정점 B에서 1997년 8월에 최대 96.27 μM 를 나타냈으며 이후 2001년 10월 2.10 μM 으로 줄어들었으나 다른 영양염류와 마찬가지로 계절적 변동이

심하였고, 정점 A의 경우는 인근 하천의 영향으로 뚜렷한 연변화는 보이지 않았다(Table 1, Fig. 2). 저층의 경우 1997년에 비해 정점 A, B 각각 $51.01 \mu\text{M}$, $187.52 \mu\text{M}$ 에서 $10.05 \mu\text{M}$, $6.82 \mu\text{M}$ 로 줄어들었으나 2001년 8월 정점 A, B 모두 각각 $54.77 \mu\text{M}$, $101.69 \mu\text{M}$ 로 증가하여 계절변화가 컸다(Table 1, Fig. 2). 일반적인 해양환경에서의 규산염과 인산염의 비율은 40정도이나 본 연구해역의 표층에서는 일부 여름, 가을철을 제외하고 13~31의 비율로 표층에서 고갈되어 있는 것으로 나타나 규조류 플랑크톤의 활발한 규산염 흡수에 의한 제거를 나타냈다. 그러나 계절에 따라 우점종이 변함에 따라 표층 규산염의 변화량도 많은 영향을 받는 것으로 알려지고 있다(박 등 1997; 최 등 1997).

주성분 분석을 통한 여름철 저층 저산소 환원 환경 발생 연구

수리 물리적 요소 및 수질 환경 요인 분포에서 알 수 있듯이 1998년 이후 배수갑문을 통한 외해수와의 상시적인 교환이 이루어진 후 표·저층간 염분차의 감소로 수직 혼합이 가능해져 그 동안 시화호의 가장 큰 문제였던 저층 저산소 내지 무산소 환원환경은 많이 개선되는 듯 보였으나 여름철, 특히 담수의 유입이 많아지는 우기 시에 염분차에 의한 성층이 다시 이루어지고, 이에 따른 저층 용존산소 고갈과 영양염류 축적이 이루어지는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 수질 환경 요인들과 계절간의 관계를 통계적인 분석을 통해 좀 더 자세히 알아보려 주성분 분석을 실시하였으며, 분석에 이용된 수질인자는 시화호 저층

Table 2. Summary of principal component analysis based on correlation matrix of the general water quality parameters in the Shihwa Lake from April 1997 to October 2001 (Bottom water).

	PC I	PC II	PC III
Percentage	87.263	9.786	1.713
Cum. Percentage	87.263	97.048	98.761
	PC I	PC II	PC III
Temperature	0.012	0.155	0.309
Salinity	-0.012	-0.001	0.090
DO	-0.099	-0.299	0.094
DO-S(%)	-0.334	-0.706	0.423
Nitrite	-0.002	-0.101	0.125
Nitrate	-0.072	-0.227	0.240
Ammonia	0.636	-0.305	-0.157
TN*	0.579	-0.371	-0.028
Phosphate	0.178	0.163	0.257
Silicate	0.319	0.325	0.737

*TN: $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$.

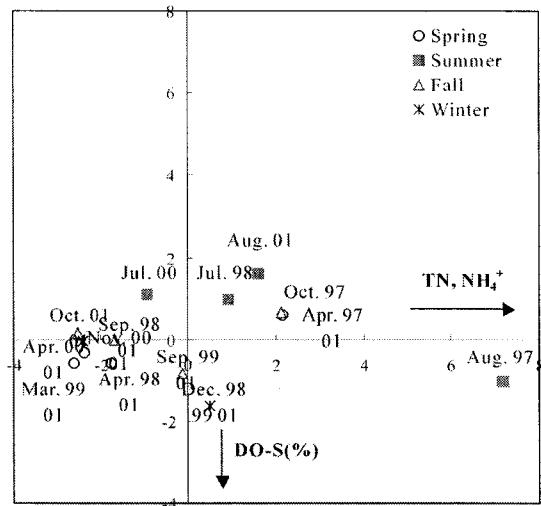


Fig. 5. Principal component analysis using water quality data in the Shihwa Lake (Station. B, bottom water).

수의 수온, 염분, 용존산소, 용존산소 포화도, 아질산염, 질산염, 암모니아염, 총무기질소, 인산염, 그리고 규산염 농도 자료를 이용하였다. 주성분 분석 결과 성분 I(PC I)에서 각 수질인자가 시화호 저층수의 연변화를 약 87.3% 설명할 수 있으며, 이중 암모니아와 총무기질소가 가장 많이 기여를 하고 있었다. 성분 II(PC II)에서는 약 9.8% 정도로서 각 수질인자가 시화호 저층수의 연변화를 설명해 주고 있으며, 이중 용존산소 포화도가 가장 많이 기여를 하고 있었다(Table 2). 주성분 분석에 의한 결과에서 알 수 있듯이 1997년 4월과 10월, 1998년 7월과 2001년 8월에 고농도의 암모니아 농도와 저산소 특성이 공통되게 나타났다. 이것은 외해수 유·출입이 상시적으로 있는 후에도 우기인 여름철(1998년 7월과 2001년 8월)에는 외해수 유·출입 이전과 유사한 성격의 수질 특성이 나타남을 의미한다. 또한 우기인 여름철과 비수기인 타 계절간의 수질 요인의 분포 양상이 매우 달라지는 특성도 보이고 있었다(Fig. 5).

4. 결 론

물막이 공사 이후 폐쇄된 환경으로 인해 오염이 가중되었던 1996년 6월부터 외해수와의 교환이 상시적으로 이루어졌던 1998년 이후 2001년 10월까지의 시화호 수질의 연변화 양상은 다음과 같다.

첫째, 1998년 이후 시화호 내측과 외해와의 배수갑문을 통한 상시적인 외해수 유·출입으로 인해 1999년 이후 시화호 상류쪽인 정점 A에서도 연평균 염분도가 27 psu에 이르는 등 해수화 경향이 나타났으며, 이로 인한 염분약층

은 여름철을 제외하고는 소멸되었다. 그러나 우기인 여름철에는 여전히 육상으로부터의 담수 유입이 표층 염분에 큰 영향을 미치고 있었으며, 수괴의 성층화가 다시 이루어졌다. 둘째, 표층에서의 연간 활발한 일차생산은 외해수와 의 상시적인 유·출입이 시작된 1998년 이후에도 지속적으로 부영양화를 발생시켜 시화호 표층 수질은 COD 기준으로 해역 3등급을 초과하고 있었다. 담수의 영향이 큰 여름철 표층에서의 과다한 유기물 공급은 결국 저층의 저산소 내지 무산소 환원 환경을 다시 나타나게 하였고, 이로 인한 고농도의 암모니아염 생성과 인산염의 용출이 1998년 7월, 2000년 7월과 2001년 8월 관찰되었다. 셋째, 수질 환경 인자들에 관한 주성분 분석 결과 여름철의 경우 외해수 유·출입이 본격화 되기 이전인 1997년의 수질 상태와 유사한 것으로 나타났으며, 전반적으로 연변화에 따른 수질 환경 요인의 변화 보다는 계절에 따른 변동이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 이제까지의 배수 갑문을 통한 외해수의 유·출입 만으로는 시화호 수질 개선에 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 주변 육상 오염원 및 시화호 표층의 식물플랑크톤의 대량번식에 의한 유기물 공급, 그리고 오염된 퇴적환경에 대한 종합적이고 지속적인 연구가 차후 절실히 요망된다.

사 사

본 논문이 나오기까지 오랜기간 현장조사와 자료분석에 도움을 주신 하늘호 조진행 선장님과 한국해양연구원 신진선 씨에게 감사의 말씀을 드립니다. 또한 자료의 주성분분석 및 통계 처리에 많은 도움을 주신 인하대학교 해양학과 윤석현 선생님과 논문의 여러 부족한 점에 대해 좋은 지적을 해주신 두 분의 심사위원님께서도 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 이 논문은 한국해양연구원에서 수행한 기관고유사업인 “시화호의 해수화에 따른 환경변화 및 수질관리에 관한 연구” 및 해양수산부의 “해양오염 원격 감시체제 구축 연구” 사업의 일환으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 기상청. 1998. 기상월보(1998.7). 49 p.
- 기상청. 2000. 기상월보(2000.7). 49 p.
- 기상청. 2001. 기상월보(2001.8). 50 p.
- 김경태. 2001. 연안 간척으로 조성된 인공호수 시화호의 환경변화에 따른 중금속 거동. 부경대학교 박사학위논문. 199 p.
- 김은수, 김경태, 조성록. 1998a. 해수 및 표층 퇴적물의 생지화학적 연구. *해양연구*, 20(3), 237-250.
- 김은수, 이기복, 심무준, 김경태, 조성록. 1998b. 시화호의 수질변화. p. 47-52. In: *한국해양환경공학회 1998 춘계학술대회 논문집*. 한국해양환경공학회.
- 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희. 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구. *한국해양학회지 바다*, 2(2), 53-68.
- 박준건. 1998. 시화호 산화-환원 환경에서의 생지화학적 특성 연구. 인하대학교 석사학위논문. 103 p.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000a. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. *한국유수학회지*, 33, 109-118.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000b. 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. *한국환경과학회지*, 9, 115-123.
- 심무준. 1998. 시화호의 퇴적물과 공극수의 지화학적 특성에 관한 연구. 한양대학교 석사학위논문. 81 p.
- 심무준, 김은수, 김경태, 이기복, 강화성, 이광우. 1998. 시화호 퇴적물의 유기탄소, 황 및 중금속 분포. *한국물환경학회지*, 14(4), 469-482.
- 심무준, 조성록, 나공태, 신진선, 김은수. 2001. 시화호 퇴적물에서 인의 지화학적 특성. *한국해양환경공학회지*, 4, 16-27.
- 최만식, 천종화, 우한준, 이희일. 1999. 시화호 표층 퇴적물의 중금속 및 퇴적상 변화. *한국환경과학회지*, 8(5), 593-600.
- 최정훈, 강정원, 홍대벽, 박용안. 2000. 시화호 퇴적물의 유기탄소, 유기질소 및 중금속 함량과 분포. *한국해양학회지 바다*, 5(4), 276-284.
- 최정훈, 김미옥. 2001. 배수갑문 운용에 따른 용존산소와 pH 변화. *한국지구과학회지*, 22, 195-207.
- 최중기, 이은희, 노제훈, 허성희. 1997. 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. *한국해양학회지 바다*, 2(2), 78-86.
- 한국해양연구소. 1990. 진해만의 유기물 순환과 무산소 환경 발생에 대한 연구. BSPE 00148-265-4. 66 p.
- 한명우, 박용철, 허성희. 1997. 암모니아와 납의 저층 용출. *한국해양학회지 바다*, 2(2), 69-77.
- 현상민, 천종화, 이희일. 1999. 시화호의 퇴적환경과 중금속 오염. *한국해양학회지 바다*, 4(3), 198-207.
- 해양수산부. 1997. 해양환경공정시험방법. 316 p.
- Codispoti, L.A., G.E. Friederich, 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 Res.*, 38, S691-S710.
- Cooper, S.R. and G.S. Brush. 1991. Long-term history of Chesapeake Bay anoxia. *Science*, 254, 992-996.
- Cooper, S.R. and G.S. Brush. 1993. A 2,500-year history of anoxia and eutrophication in Chesapeake Bay. *Estuaries*, 16(3B), 617-626.
- D'Avanzo, C. and J.N. Kremer. 1994. Diel oxygen dynamics and anoxic events in an eutrophic estuary of Waquoit Bay, Massachusetts. *Estuaries*, 17(1B), 131-139.

- EPA. 1976. Water quality criteria research of the U.S. Environmental Protection Agency. Proceedings of EPA sponsored symposium. EPA-600 (3-76-079). 185 p.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.*, 89, 189-207.
- Han, M.W. and Y.C. 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.
- HELCOM. 1990. Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea 1984-1988. Background Document, *Balt. Sea. Envir. Proc.*, 35B, 432 p.
- Kennish, M.J. 1997. Practical handbook of estuarine and marine pollution, ed. by M.J. Kennish. CRC Press. 524 p.
- Konovalov, S.K. and J.W. Murray. 2001. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960-1995). *J. Marine Syst.*, 31, 217-243.
- Kuo, A.Y., K. Park, and M.Z. Moustafa. 1991. Spatial and temporal variabilities of hypoxia in the Rappahannock River, Virginia. *Estuaries*, 14(2), 113-121.
- Lapointe, B.E. and M.W. Clark. 1992. Nutrient inputs from the watershed and coastal eutrophication in the Florida keys. *Estuaries*, 15(4), 465-476.
- Lewis, B.L. and W.M. Landing. 1991. The biogeochemistry of manganese and iron in the Black Sea. *Deep-Sea Res.*, 38, S773-S803.
- Marchetti, R. 1984. Quadro analitico complessivo dei risultati delle indagini condotte negli acque costiere dell'Emilia Romagna: situazione e ipotesi di intervento, Regione Emilia Romagna. 310 p.
- Millero, F.J. 1991. The oxidation of H₂S in the Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 33, 521-527.
- Murray, J.W., Z. Top, and E. Ozsoy. 1991. Hydrographic properties and ventilation of the Black Sea. *Deep-Sea Res.*, 38, S663-S689.
- Nehring, D. 1992. Eutrophication in the Baltic Sea. p. 673-682. In: *Marine coastal eutrophication, Proc. Int. Conf.*, ed. by Vollenweider, R.A., R. Marchetti, and R. Viviani. Elsevier.
- Parson, T.R., Y. Matia, and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon press, 173 p.
- Portnoy, J.W. 1991. Summer oxygen depletion in a diked New England estuary. *Estuaries*, 14(2), 122-129.
- Seliger, H.H., J.A. Boggs, and W.H. Biggley. 1985. Catastrophic anoxia in the Chesapeake Bay in 1984. *Science*, 228, 70-73.
- Solorzano, L. 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenol hypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, 14, 799-801.
- Stanley D.W. and S.W. Nixon. 1992. Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico River Estuary. *Estuaries*, 15(3), 270-281.
- Valiela, I., K. Foreman, M. LaMontagne, D. Hersh, J. Costa, P. Peckol, B. DeMeo-Andreson, C. D'Avanzo, M. Babione, C.H. Shem, J. Brawley, and K. Lajtha. 1992. Couplings of watersheds and coastal waters: sources and consequences of nutrient enrichment in Waquoit Bay, Massachusetts. *Estuaries*, 15(4), 443-457.
- Vollenweider, R.A. and J.S. Kerekes. 1982. Eutrophication of waters: Monitoring, Assesment and Control. OECD, Paris, France.
- Zaghloul, F.A. and Y. Halim. 1992. Long-term eutrophication in a semi-closed bay: the eastern Harbour of Alexandria. p. 727-735. In: *Marine coastal eutrophication, Proc. Int. Conf.*, ed. by Vollenweider, R.A., R. Marchetti, and R. Viviani. Elsevier.
- Zimmerman, A.R. and E.A. Canuel. 2000. A geochemical record of eutrophication and anoxia in Chesapeake Bay sediments: anthropogenic influence on organic matter composition. *Mar. Chem.*, 69, 117-137.

Received Jul. 15, 2003

Accepted Nov. 11, 2003