

시화호 배수갑문 운용에 따른 용존산소와 pH 변화

최정훈* · 김미옥

농업기반공사 농어촌환경연구소, 425-170 안산시 4동 1031-7

Impact of Seawater Inflow by the Operation of Sluice Gates on the D.O and pH in the Lake Shihwa, Korea

Jung-Hoon Choi* · Mi-Ock Kim

Korea Agricultural and Rural Infrastructure Corporation, Rural Research Institute, Ansan 425-170, Korea

Abstract: The variations of D.O and pH due to the inflow of seawater by sluice gates operation were observed in the Lake Shihwa, Korea. The distributions of D.O and pH were investigated at 11 stations during February 1997 to July 1998. The concentration of D.O before gate operation was 10 mg/l or more all over the watershed, yet 5 mg/l or less in the water layers of 11 m or below from March to June 1997. Anoxic layer appeared in June 1997 and expanded during rainy season. The anoxic layer in the lake depleted the oxygen in seawater as seawater was inflowed. It may be interpreted that the phenomenon comes from the contact of seawater to lower fresh water. The contact of seawater in pH 7.8 to 8.2 to lower water less than pH 7.4 enhanced to oxidize. After January 1998, D.O of the lake increased over 10 mg/l and the stratification was weakened. As a result, it may be concluded that the best way to improve the water qualities is to increase the amount of seawater inflow and outflow so as not to be generated pycnocline in summer.

Key words: Shihwa Lake, D.O, pH, stratification, pycnocline

요약: 1997년 2월부터 1998년 7월까지 총 33회에 걸쳐 시화호내 11개 정점에서 배수갑문 개·폐에 따른 용존산소와 pH의 변화를 파악하였다. 해수유입이 없었던 1997년 3월부터 1997년 5월까지의 용존산소 분포는 대부분의 수층에서 10mg/l 이상을 보이고 11m 이하의 수심에서 5mg/l 이하를 나타냈다. 1997년 6월에 수심 6m 이하에서 무산소층이 나타났다. 강우기 동안 배수만 실시했을 경우, 무산소층이 수심 8m에서 6m 이하로 증가하였다. 또한 해수유입 직후의 시화호 내에 잔존하는 무산소층이 해수에 포함된 용존산소를 급격히 소모시키는 특징을 나타냈다. 이러한 현상은 pH 7.8 ~ 8.2의 해수와 pH 7.4 이하의 저층수가 만나게 되어 산화작용을 촉진시켰기 때문인 것으로 해석된다. 해수유입이 크게 증가된 1998년 1월에는 전 수층의 용존산소가 10mg/l 이상을 나타냈다. 결론적으로 시화호 배수갑문 운용에 따른 수질개선을 위해서는 여름철에는 염분약층이 생성되지 않도록 해수의 유출량과 유입량을 늘리는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

주요어: 시화호, 용존산소, pH, 성층, 염분약층

서론

경기도의 시화호는 수도권인구분산을 유도하고 공업용지와 농지의 확보 및 수자원공급을 위하여 1987년부터 1994년까지 물막이 공사로 형성되었으며, 1994년 1월에는 방조제가 완성되어 해수 유입을 억제된 상태로 담수화가 추진되었다. 그러나, 방조제 완공 후에 유역의 안산시를 경유하는 6개 하천과 반

월공단등 주변공단으로부터 고농도의 유기물과 영양염을 포함하는 오·폐수가 유입되었고, 농촌지역의 가축사육도 꾸준히 증가하여 유역으로부터 유입된 오염물질이 담수호 내에 축적되어 오염이 진전되었다. 담수화과정에서 체류시간의 증가에 따라 물이 장기간 정체되면서 다양한 수질오염 현상이 관찰되었다(허성희·오임상, 1997). 오염된 호수수의 해양방류시 해양생태계에의 악영향이 우려되자(한명우 외, 1997), 결국 1997년 7월부터 해수 유입을 시작하여 시화호는 다시 해수화되었으며, 이와 같은 해수의 유출·입은

유역내의 수질개선대책이 완료되는 시점까지의 단계적인 수질대책으로 수행었다.

시화호는 겨울철에도 6m 이하의 수심에서 상·하층의 강한 밀도성층에 의한 2층구조(two layer system)를 보였다. 또한 여름철에 염분 성층기간에는 표층에서는 과포화 상태를 나타내지만, 6m 이하의 수심에서는 산소의 공급이 전혀 이루어지지 않으며 상대적으로 침전, 부유물질에 의한 산소 소모량이 많아서 결핍현상을 나타낸다(박용철 외, 1997). 이러한 현상은 표층의 생산층으로부터 공급되는 유기물량이 많아 질수록 현저하고 따라서 용존산소의 공급속도와 소비속도는 호수의 수질과 깊은 관계가 있다.

표층수에서 생성된 유기물은 식물플랑크톤세포, 동물플랑크톤 배설물 등의 형태로 침강하여 호수수심에서 분해되며 이때 용존산소를 소비하게 된다. 따라서 표층의 일차생산량이 클수록 용존산소 감소는 심하게 일어나게 된다.

기존의 시화호를 대상으로한 용존산소에 대한 자료는 계절별 자료이거나 단편적이다. 또한 배수갑문 운용에 따른 연구결과는 미흡한 실정이다.

본 연구는 인위적으로 조성된 독특한 환경에서 1997년 2월부터 1998년 7월까지의 장기간 관측한 용존산소, pH를 이용하여 배수갑문개폐로 인해 시화호가 담수호 상태에서 점차 해수화가 진행되는 과정의 용존산소의 분포 분포특성과 이에 따른 pH의 변화를 파악함으로써 향후 수질을 평가하고 생태계 변화를 연구하는데 있어 유용한 기초자료로 활용되는 것을 목적으로 한다.

연구해역 현황

서해 경기만에 위치한 시화호는 약 12.7km에 이르는 방조제로 막혀져 있으며, 시화호의 수심은 작은 가리섬 동쪽부근이 평균수심 15m 이하이며 최고수심 17.9m를 나타내고, 오이도, 형도 사이는 평균수심 10m의 범위이며 최고수심 14.2m이고, 음섬 앞의 최고수심은 10.2m, 사리포구앞 수심은 4.0m를 나타냈다(한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1995). 동쪽으로 진행함에 따라 수심이 알아짐을 알 수 있다(Fig. 1).

1997년 7월부터 1997년 10월까지 1회당 약 250만 m³의 해수가 유출·입되었으며, 1997년 11월 3일부터 12월 5일까지는 배수갑문 운영이 일시적으로 중단되었고, 1997년 12월부터 1998년 2월까지 3회

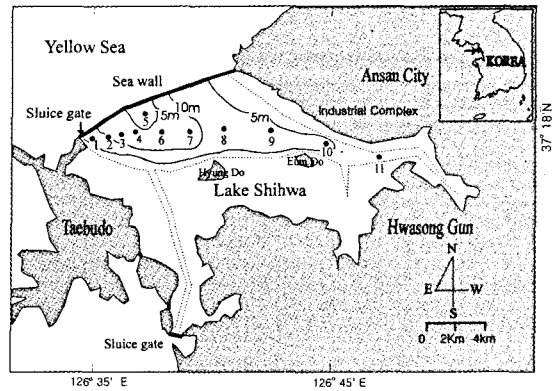


Fig. 1. Bathymetry of the study area and the location of sampling stations.

Table 1. Inflow and outflow in Lake Shihwa with sluice gate operation.

Date (month)	Outflow (10 ³ m ³)	No. of gate opening	Inflow (10 ³ m ³)	No. of gate opening
1997 6	117,357	41	-	-
7	113,312	55	329,913	15
8	92,503	44	57,593	27
9	83,735	44	83,735	37
10	106,122	96	148,981	47
11	7,455	3	30,116	4
12	169,526	34	161,945	33
1998 1	208,824	42	208,824	42
2	335,610	43	325,666	42
3	417,190	41	427,137	32
4	1,025,716	58	1,025,716	58
5	911,824	56	874,887	56
6	414,512	48	380,376	48
7	392,823	50	356,651	46

수유출·입량을 1회당 약 500만 m³으로 조정 시행하였다(한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1998). 1998년 1월 이후 결빙에 의한 수질악화가 우려되자 1998년 2월 이후에 해수 유출·입량을 1회당 750~1,000만 m³으로 상향조정하였다(Table 1).

연구방법

1997년 2월부터 1998년 7월까지 매월 1~5회에 걸쳐 시화호내 배수갑문으로부터 시화호 상류에 이르기까지 총 11개의 정점을 선정하여 HYDROLAB (Multiparameter Water Quality Instrument, 기종 DATA SONDA3 미국)을 이용하여 수심별 용존산소, pH를 측정하였고 염분과 탁도는 배수갑문 개·폐 이전기간인 1997년 4월과 배수갑문 개·폐 이후 기간인 1997

년 7월에 측정하였다(Fig. 1). 채수지점은 배수갑문 개·폐 현황에 영향을 가장 많이 받는 St. 1부터 만일, 시화공단과 하천수에 영향을 받는 상류의 St. 11까지 채수하였다.

시화호의 해수유입에 따른 표층유속의 공간적인 분포특성을 파악하기 위하여 RCM-7 유속계로 배수갑문 개방이전기간인 1997년 2월과 해수 유출·입기간인 1998년 3월의 총 2회에 걸쳐 3지점인 A(St. 6), B(St. 8), C(St. 9)에 수면하 1m 지점의 표층수에서의 유속, 유향을 함께 관측하였다.

결 과

표층유속 분포특성

1997년 2월은 상류부의 하천유입부에서 하류부의 방조제까지 호수 중앙부로 형성된 수로를 따라 2~5cm/sec의 약한 흐름이 형성되었고, 방조제까지 내려온 흐름은 다른 수로인 마산포 수로 방향으로 유향이 전환되었다(Fig. 2a). 해수 유출·입기간인 1998년 3월은 일 2회 해수를 1,000만 m³ 유출·입시킨 기간

으로 호내에 형성된 흐름이 북서, 남동 방향의 왕복성 흐름의 방향이 지배적이며 A지점까지 해수 유입으로 인한 유속변화를 나타내고(5~10cm/sec), 시화호 유입하천 하류부인 C지점에서 방조제 중앙부 B지점까지 약한 흐름을 나타내었다(Fig. 2b). 배수갑문의 개방으로 (8개의 배수갑문중 4개개방) 해수를 유출·입시켰을 때 부표추적결과 대조·소조의 어떤 경우에도 형도 까지 직접적으로 영향을 미치지 않으며, 배수갑문 폐쇄시 수증방류의 확산은 방조제 쪽으로 이루어지는 데 그 거리는 5km 이내인 것으로 나타났다(한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1995).

장기간 수심별 용존산소 및 pH 변화

배수갑문 개·폐에 따른 시화호내의 용존산소 및 pH 변화를 파악하기 위하여 배수갑문 개폐시기 및 해수유입량에 따라 시기별로 용존산소 및 pH의 수직적 분포를 도시하였다(Fig. 3 and Table 2). 배수갑문을 통한 해수유입이 없었던 1997년 3월부터 1997년 6월까지 용존산소의 변화는 3~5월 동안 대부분의 수층에서 10mg/l 이상을 보이고 11m 이하의 수심에서 5mg/l 이하이며 6월에 수심 6m 이하에서 무산소층을 나타냈다. 표층에서 식물성 플랑크톤의 광합성에 의해 과포화를 나타내고, 저층의 무산소층에서는 황화수소 등의 발생으로 심한 악취가 발생하였다. pH는 3~5월 동안 6.4~8.5이고, 특히 4월에 전수층이 7.5 이하로 낮은 값을 나타냈다.

1997년 7월, 8월로 접어들면서 용존산소는 더욱 감소하여 9월에는 수심 4m 이하에서 무산소층을 나타냈다(Fig. 3c). 10월중에는 표층에는 과포화 상태이고 중층수심이 6~8m에서 무산소층이 나타나고 8m 이하의 저층수심에서 용존산소가 다시 증가되는 특징을 나타냈다. 이러한 현상은 1997년 10월 16일에는 오후 15시부터 1시간 동안 250만 m³의 해수가 저층수를 따라 유입되었기 때문이다. 동기간 pH는 표층에서는 8.5~9.4로 높은 값을 나타내고 4~6m의 수심에서 pH의 경계층을 나타내고 10m 이하의 수심에서 6.8~7.5로 낮은 값을 나타냈다. 12월에는 대부분의 수층의 용존산소가 13mg/l 이상을 보이고 10m 이하의 수심에서 3mg/l로 감소하였다. 해수유입이 크게 증가된 1998년 1월에는 전 수층의 용존산소가 10mg/l 이상을 나타내고 하계로 갈수록 용존산소량이 감소하고 특히, 배수갑문 개방이전의 1997년 6월과 해수화된 1998년 6월의 수직적인 용존산소 분포는 1998년

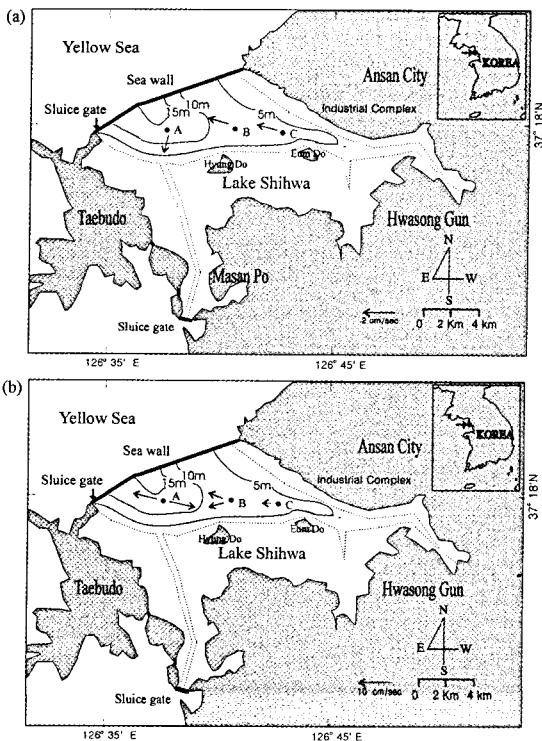


Fig. 2. Spatial distributions of mean speed and current direction (a) before and (b) after sluice gate operation.

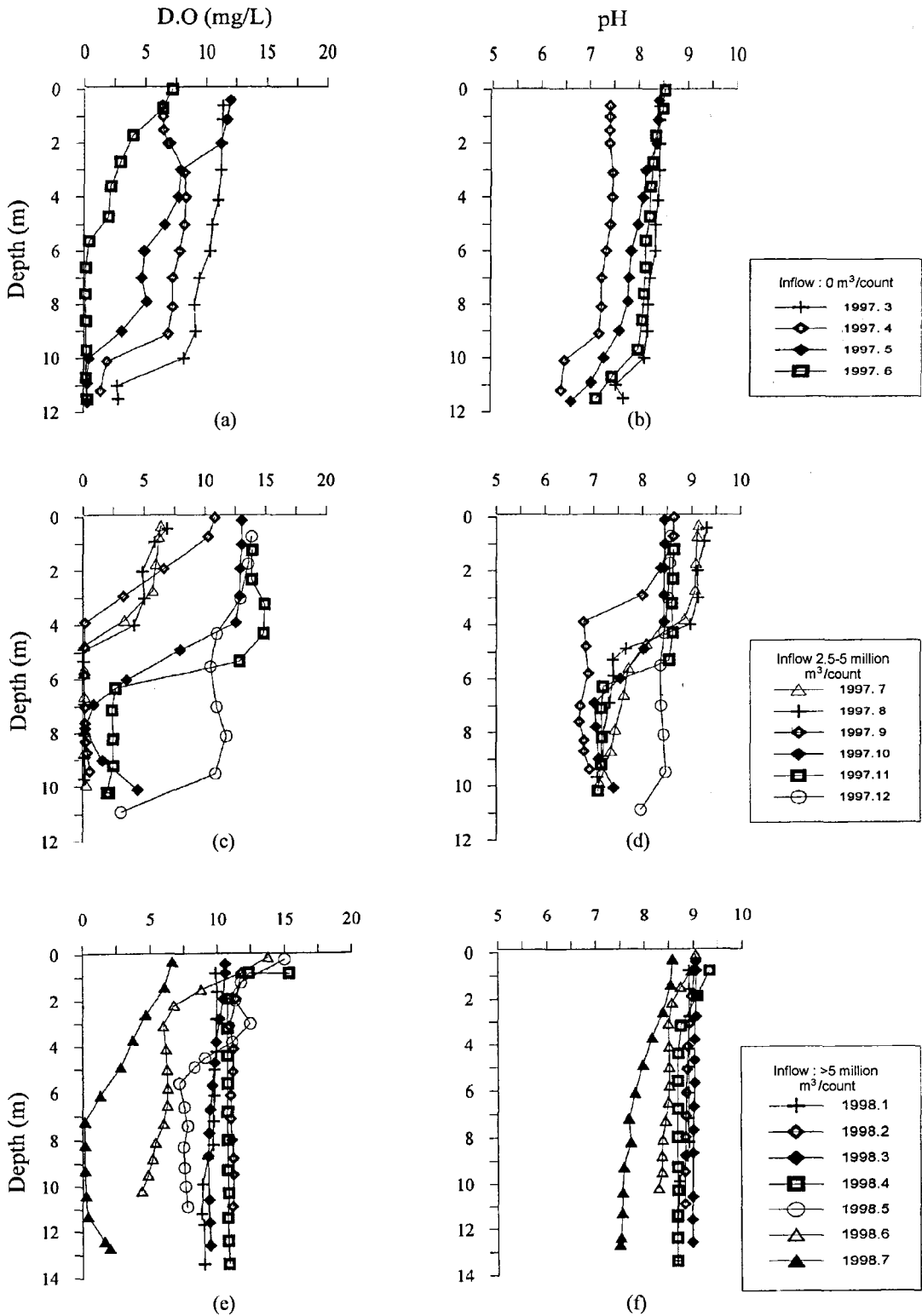


Fig. 3. Vertical distributions of D.O and pH (a, b) before sluice gate operation, (c, d) inflow seawater of 2.5~5.0 million m³ two times a day, and (e, f) more than 5.0 million m³ two times a day at Station 6 during March 1997 to July 1998.

Table 2. Vertical distributions of Temperature, Salinity, D.O and pH at Station 6 during March 1997 to July 1998.

Year/Month	Depth (m)	Tem. (°C)	Salinity (‰)	pH	DO (mg/l)
97/3	11.5	5.6	19.5	7.7	2.83
	11.0	5.4	17.3	7.5	2.74
	10.0	5.9	15.3	8.1	8.18
	9.0	6.0	15.0	8.2	9.15
	8.0	6.1	14.6	8.2	9.09
	7.0	6.0	14.4	8.2	9.46
	6.0	6.3	14.4	8.3	10.34
	5.0	6.3	14.4	8.4	10.54
	4.1	6.4	14.4	8.4	11.05
	3.0	6.4	14.4	8.4	11.25
	2.0	6.5	14.3	8.4	11.30
	1.1	6.5	14.3	8.4	11.38
	0.6	6.5	14.3	8.4	11.43
	97/4	11.2	7.0	19.3	6.4
10.1		8.0	16.3	6.5	1.88
9.1		9.5	14.5	7.2	6.90
8.1		9.7	14.5	7.3	7.28
7.0		10.1	14.4	7.3	7.28
6.0		10.4	14.4	7.3	7.84
5.0		10.9	14.3	7.4	8.21
4.0		11.1	14.3	7.5	8.34
3.1		11.3	14.3	7.5	8.19
2.0		11.7	14.2	7.4	7.01
2.0		11.8	14.2	7.4	6.83
1.5		12.1	14.2	7.4	6.48
1.0		12.3	14.2	7.4	6.44
0.6		12.3	14.2	7.4	6.40
97/5	11.6	10.0	19.3	6.6	0.30
	10.9	13.3	15.4	7.0	0.27
	10.0	15.4	14.2	7.3	0.37
	9.0	16.1	13.8	7.6	3.09
	7.9	16.3	13.6	7.8	5.14
	7.0	16.5	13.6	7.8	4.76
	6.0	16.7	13.5	7.9	4.96
	6.0	16.7	13.5	7.9	4.91
	5.0	17.1	13.5	8.0	6.62
	4.0	17.3	13.3	8.1	7.74
	3.0	17.5	13.2	8.2	7.89
	2.0	18.1	13.1	8.4	11.24
	1.1	18.1	13.1	8.4	11.73
	0.4	18.2	13.1	8.4	12.05
97/6	11.5	13.7	16.0	7.1	0.29
	10.7	15.1	14.8	7.5	0.20
	9.7	17.8	13.0	8.0	0.19
	8.6	18.3	12.9	8.1	0.14
	7.6	18.6	12.7	8.1	0.13
	6.6	19.4	12.6	8.1	0.13
	5.6	19.8	12.5	8.2	0.39
	4.7	20.5	12.4	8.2	2.02
	3.6	20.6	12.4	8.3	2.20
	2.7	20.9	12.4	8.3	2.95
	1.7	21.2	12.4	8.4	4.00
	0.7	21.7	12.4	8.5	6.45
	0.0	22.0	12.4	8.5	7.21

Table 2. Continued.

Year/Month	Depth (m)	Tem. (°C)	Salinity (‰)	pH	DO (mg/l)	
97/7	11.1	17.5	18.4	7.2	0.21	
	9.7	17.8	17.1	7.2	0.19	
	8.7	18.3	16.2	7.3	0.14	
	7.7	19.5	14.2	7.5	0.11	
	6.6	22.3	12.6	7.7	0.10	
	5.6	22.6	11.2	7.7	0.09	
	4.7	24.5	9.7	8.0	0.08	
	3.6	26.8	8.7	8.7	2.27	
	2.7	27.2	8.5	8.9	3.20	
	1.6	27.5	8.4	9.0	3.64	
	0.5	28.0	8.4	9.1	4.63	
	0.0	29.9	8.4	9.1	5.09	
	97/8	10.5	21.7	21.8	7.2	0.13
		8.7	22.0	21.1	7.3	0.11
7.8		22.0	20.5	7.3	0.11	
6.7		22.0	19.0	7.3	0.10	
5.7		22.7	17.4	7.4	0.09	
5.7		22.7	17.4	7.4	0.09	
4.7		24.1	15.0	7.5	0.09	
3.8		27.8	7.7	9.0	4.33	
2.7		28.2	7.6	9.1	5.36	
1.8		28.5	7.6	9.2	5.34	
0.7		28.7	7.4	9.3	6.46	
0.2		29.3	7.4	9.4	8.07	
97/9		10.3	25.4	25.0	6.9	0.57
		8.7	25.0	24.6	6.8	0.38
	8.3	25.0	24.5	6.8	0.24	
	7.6	24.5	24.0	6.7	0.18	
	7.0	24.6	23.6	6.7	0.17	
	5.8	24.9	23.3	6.9	0.16	
	4.8	24.7	22.1	6.8	0.15	
	3.9	24.7	20.9	6.8	0.14	
	2.9	25.7	13.3	8.0	3.30	
	1.9	25.3	11.0	8.4	6.63	
	0.7	26.9	10.6	8.6	10.26	
	0.0	27.1	10.6	8.6	10.81	
	97/10	10.8	17.5	27.4	7.4	4.51
		9.5	17.9	26.7	7.1	1.66
9.0		17.9	26.7	7.1	1.62	
7.8		18.8	26.6	7.1	0.17	
6.9		18.2	26.0	7.0	0.87	
6.0		16.9	24.4	7.6	3.59	
4.9		15.7	22.2	8.0	7.97	
3.9		15.5	20.9	8.4	12.54	
2.9		15.5	20.9	8.4	12.88	
1.9		15.5	20.9	8.5	12.94	
1.0		15.5	20.9	8.5	13.03	
0.1		15.5	20.9	8.5	13.04	
97/11		11.2	13.7	29.4	7.1	2.14
		10.2	13.7	29.4	7.1	1.98
	9.2	13.7	29.3	7.2	2.52	
	8.2	13.6	29.1	7.2	2.48	
	7.1	13.4	28.8	7.2	2.39	
	6.3	12.7	28.3	7.2	2.68	
5.3	11.4	24.8	8.6	12.89		

Table 2. Continued.

Year/Month	Depth (m)	Tem. (°C)	Salinity (‰)	pH	DO (mg/l)	Year/Month	Depth (m)	Tem. (°C)	Salinity (‰)	pH	DO (mg/l)
97/11	4.3	11.2	24.5	8.6	14.84	98/4	11.4	9.6	33.7	8.7	10.78
	3.2	11.2	24.4	8.6	14.93		10.3	9.6	33.7	8.7	10.82
	2.3	11.4	24.4	8.6	13.89		9.3	9.6	33.8	8.7	10.78
	1.2	11.4	24.4	8.6	13.88		8.0	9.6	33.8	8.7	10.78
97/12	10.9	7.3	27.3	8.0	3.12	6.8	9.6	33.8	8.7	10.74	
	9.5	4.8	26.3	8.5	10.92	5.6	9.6	33.8	8.7	10.74	
	8.1	5.1	26.2	8.4	11.77	4.4	9.6	33.9	8.7	10.76	
	7.0	5.0	26.2	8.4	11.00	3.2	10.0	33.6	8.8	10.77	
	5.5	4.9	26.0	8.4	10.52	1.9	11.8	32.6	9.1	10.75	
	4.3	4.6	26.0	8.4	10.99	0.8	13.1	32.1	9.3	12.36	
	3.0	4.2	25.8	8.5	12.94	10.9	14.5	32.2	-	7.76	
	1.7	4.0	25.7	8.6	13.59	9.2	14.9	32.0	-	7.53	
	0.7	4.0	25.7	8.6	13.83	8.3	14.9	32.0	-	7.46	
	0.1	4.0	25.8	8.6	13.84	7.4	14.9	32.0	-	7.80	
98/1	11.7	3.2	32.7	8.7	9.01	7.0	14.9	32.0	-	7.76	
	11.2	3.2	32.7	8.7	8.85	6.6	15.0	32.0	-	7.50	
	9.9	3.0	32.5	8.7	8.88	5.6	15.1	31.9	-	7.15	
	8.8	1.3	31.4	8.9	9.30	4.9	15.4	31.9	-	8.28	
	8.2	0.9	31.2	8.9	9.70	3.8	15.7	31.8	-	11.11	
	7.2	0.9	31.2	8.9	9.74	3.0	15.9	31.8	-	12.27	
	6.1	0.9	31.0	8.9	9.77	2.5	15.9	31.8	-	12.46	
	5.0	0.9	31.1	8.9	9.79	1.2	16.6	31.5	-	11.76	
	4.2	0.9	31.1	8.9	9.94	0.2	18.2	31.2	-	15.00	
	2.8	0.9	31.1	8.9	9.95	10.8	18.3	32.0	8.3	4.38	
98/2	1.6	1.0	31.0	8.9	9.98	9.5	18.5	32.0	8.4	4.84	
	0.8	0.9	30.9	8.9	9.87	8.8	18.5	31.9	8.4	5.18	
	10.1	1.9	32.6	8.8	11.15	8.1	18.6	31.9	8.4	5.39	
	9.5	1.9	32.5	8.8	11.19	7.3	19.0	31.7	8.4	6.03	
	8.0	1.7	32.3	8.8	11.08	6.5	19.2	31.6	8.5	6.27	
	7.1	1.7	32.4	8.9	11.01	5.8	19.3	31.6	8.5	6.09	
	6.1	1.7	32.2	8.9	10.96	4.1	19.3	31.6	8.5	6.19	
	5.1	1.7	32.2	8.9	11.15	3.1	19.3	31.6	8.5	6.01	
	4.1	1.4	32.0	8.9	11.21	2.2	19.5	31.5	8.6	6.76	
	3.1	1.0	31.5	8.9	10.92	1.5	20.0	31.3	8.7	8.79	
98/3	1.9	2.0	31.2	9.0	11.35	0.8	21.3	31.2	9.0	11.77	
	0.8	1.3	30.9	9.0	11.78	0.1	22.7	30.8	9.1	13.77	
	12.6	5.7	32.6	9.0	9.47	12.4	20.1	31.6	7.5	1.64	
	11.6	5.7	32.6	9.0	9.44	11.3	20.3	31.5	7.6	0.40	
	10.6	5.7	32.6	9.0	9.37	10.4	20.2	31.5	7.6	0.23	
	8.7	5.7	32.6	9.0	9.34	9.3	20.3	31.4	7.6	0.19	
	7.7	5.8	32.5	9.0	9.39	8.2	20.9	31.0	7.7	0.17	
	6.7	5.9	32.5	9.0	9.45	7.2	21.8	30.1	7.7	0.17	
	5.7	5.9	32.5	9.0	9.62	6.1	22.5	29.6	7.8	1.29	
	4.7	5.9	32.4	9.0	9.81	4.9	22.9	29.0	8.0	2.81	
98/7	3.8	5.9	32.5	9.0	9.95	3.7	23.7	27.7	8.2	3.73	
	2.8	6.0	32.6	9.1	10.18	2.6	24.4	24.3	8.4	4.68	
	1.9	6.3	32.4	9.1	10.44	1.4	24.8	24.2	8.5	6.07	
	0.4	6.8	32.5	9.1	10.57	0.3	25.8	24.0	8.6	6.65	

6월에는 무산소층이 나타나지 않았다(Fig. 3a, e).

해수유입에 따른 용존산소 및 pH의 변화

Fig. 4는 1997년 6월 12일부터 1997년 8월 28일

까지 총 8회에 걸쳐 배수갑문 개폐시기 전·후의 해수 유·출입량과 시화호의 중심부에 위치한 St. 6과 수심이 가장 깊은 St. 5의 수심에 따른 온도, 염분, 용존산소 pH의 변화이다. 강우기에 1일 2회 250만

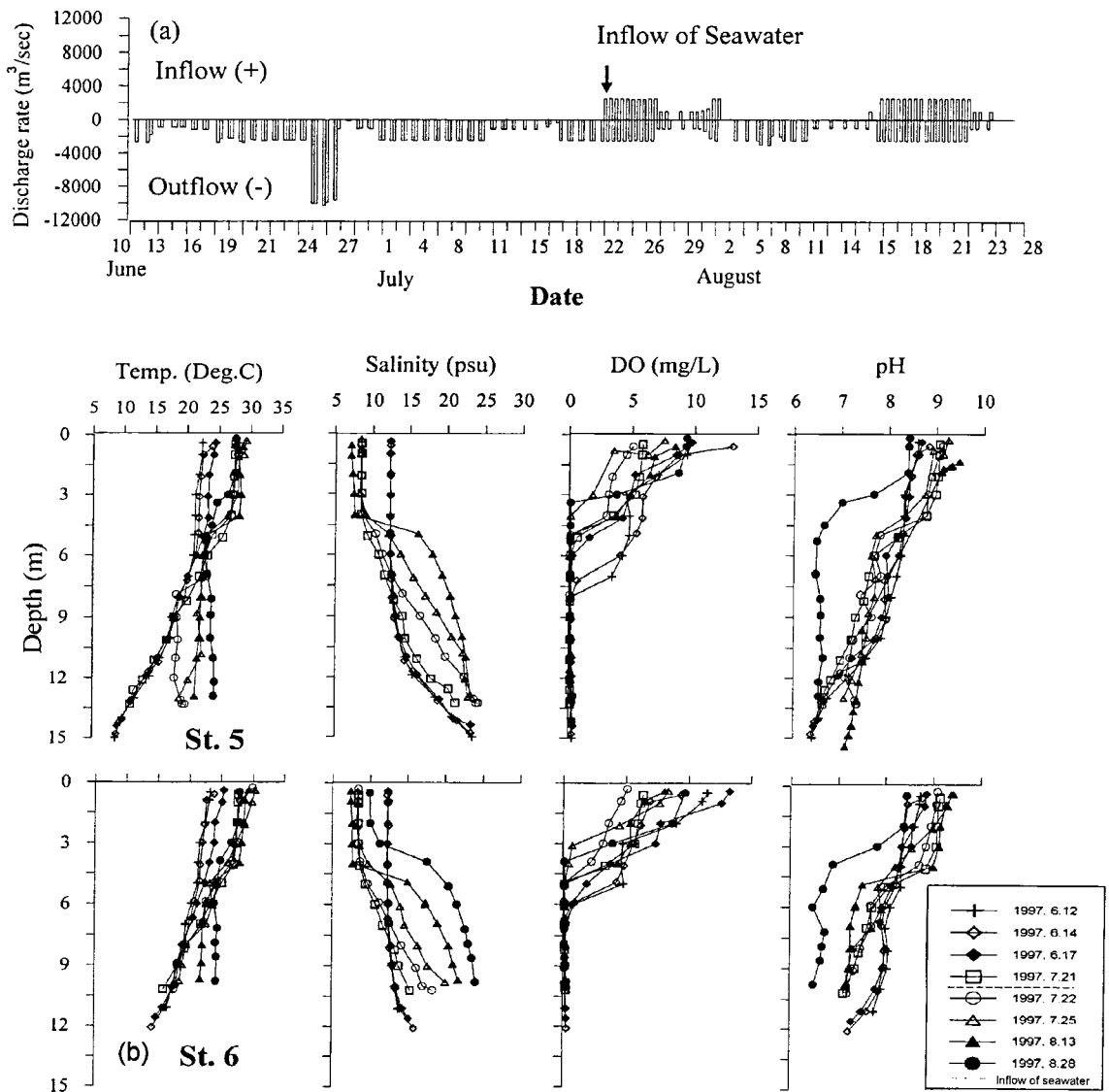


Fig. 4. Variation of (a) inflow (+) and outflow (-) of Lake Shihwa, (b) Vertical distributions of temperature, salinity, D.O, pH at Station 5 and Station 6 during June 12 to August 28, 1997.

m³의 배수만 실시했던 기간인 1997년 6월 12일, 14일, 17일 측정자료와 7월 21일의 것을 비교하면 무산소층이 수심 8m 이하에서 6m로 이하로 증가하였다. 이러한 현상은 1997년 6월 26일부터 7월 22일까지 250mm 이상의 강수량(한국수자원공사, 1998)의 영향과 배수갑문의 위치가 무산소층보다 높아 시화호수의 외해 배제시 표층수만이 외해로 유출된다. 해수가 유입된 7월 22일 이후에도 무산소층이 6m에서 3m로 증가하였다. 이는 유입된 해수로부터의 용존산소 공급속도보다 산소소비속도가 빠르기 때문에 전체적으로

로 무산소층이 개선되지 않고 오히려 용존산소량이 감소된 것으로 해석된다(한국수자원공사, 1997). 시화호내의 퇴적물의 산소소모율 측정결과에 의하면 본 연구지점인 St. 8과 St. 11에서 St. 8에서 0.38 ~ 1.58g/O₂m²(평균 0.74g/O₂m²), St. 11에서 0.11 ~ 5.89g/O₂m²(평균 3.18g/O₂m²)로 Delaware estuary(22 station)의 0 ~ 10.7g/O₂m²과 Baltic 해의 0.9 ~ 3.0g/O₂m²을 비교할 때 측정범위에 큰 차이는 없으나 지점별로 공단 및 하구에 위치한 St. 11의 측정값이 St. 8에 비하여 높게 관측되었다(홍대벽, 1995).

Fig. 5는 1997년 6월 12일부터 1997년 8월 28일까지 나타난 수온, 염분과 용존산소, pH의 변화이다. Fig. 5a는 1997년 6월 12일부터 7월 21일까지의 수온, 염분 분포는 비슷한 분포 경향을 나타내고 7월 22일 이후 깊이에 따라 수온변화에 비해 염분의 변화폭이 커지며 8월 28일에는 일정한 수온에 염분의

변화폭이 매우큰 것으로 나타났다. 염분과 용존산소의 변화는 1997년 7월 22일을 경계로 12.5psu에서 8psu로 감소되는 경향을 보이고(Fig. 5b), pH와 염분의 분포는 수온과 염분의 것과 비슷한 경향을 나타냈다(Fig. 5c).

따라서 강우기에 배수만 실시했을 기간인 1997년 6월 10일부터 7월 21일 동안 용존산소의 분포특성은 무산소층이 증가하고, 해수유입 직후에도 시화호 내에 잔존하는 무산소층이 해수에 포함된 용존산소를 급격히 소모하는 특징을 나타냈다.

공간적인 DO와 pH의 분포

Fig. 6은 St. 6의 월별 수심별 용존산소 변화이다. 무산소층이 1997년 5월의 10m 이하의 수심에서 나타나다가 10월까지 지속되었으며 11월 이후 저층수로부터 무산소층이 없어지고 1998년 여름철인 7월에 다시 무산소층이 나타났다.

해수유입 초기기간인 1997년 7월 22일부터 8월 2일까지 일일 2회씩, 250만 m³/회의 해수가 유입된 결과, 7월 22일과 25일 동안은 배수갑문으로부터 약 3km 해역까지 염분이 저층에서 조금씩 증가한 결과 무산소층이 St. 5까지 영향을 미쳤다(Fig. 7). 10월 16일에는 무산소층의 범위가 줄어들고 표층수는 7~11mg/l 이상을 나타냈다.

용존산소와 황화수소의 분포는 산화층과 환원층의 경계를 구분짓는 중요한 인자이다. 흑해(Black Sea)의 경우 산화, 환원 경계층이 150~200m에서 나타나며 이 경계층의 두께는 50m 내외이다(Haraldsson and Westerlund, 1988). 시화호의 경우 이 경계층이 6~8m에 해당하며 경계층의 두께는 1.2~2.6m로 추정된다(Han et al., 1999). 1997년 9월 이후 본 연구 지점에 St. 6에 인접한 지점의 수직적인 용존산소와 황화수소의 분포에서 산소가 존재하는 수심 3~4m까지는 황화수소가 검출되지 않았다. 그러나, 그 이하의 수심에서 황화수소가 검출되는 것은 외해수가 유입되면서 저층의 황화수소를 상층으로 확산시키기 때문이다. 아울러, 유입된 외해수층의 황산염은 짧은 시간내에 황화수소로 전환되는 것으로 보인다(한국해양연구소, 1997).

11월 3일부터 12월 5일까지는 배수갑문운영이 일시 중단되어, 11월 14일에 무산소층은 주로 하천 및 공단 유입부의 저층수로를 따라 무산소층이 나타났다. 12월 6일은 전수층이 11~14mg/l의 과포화 상태를 나

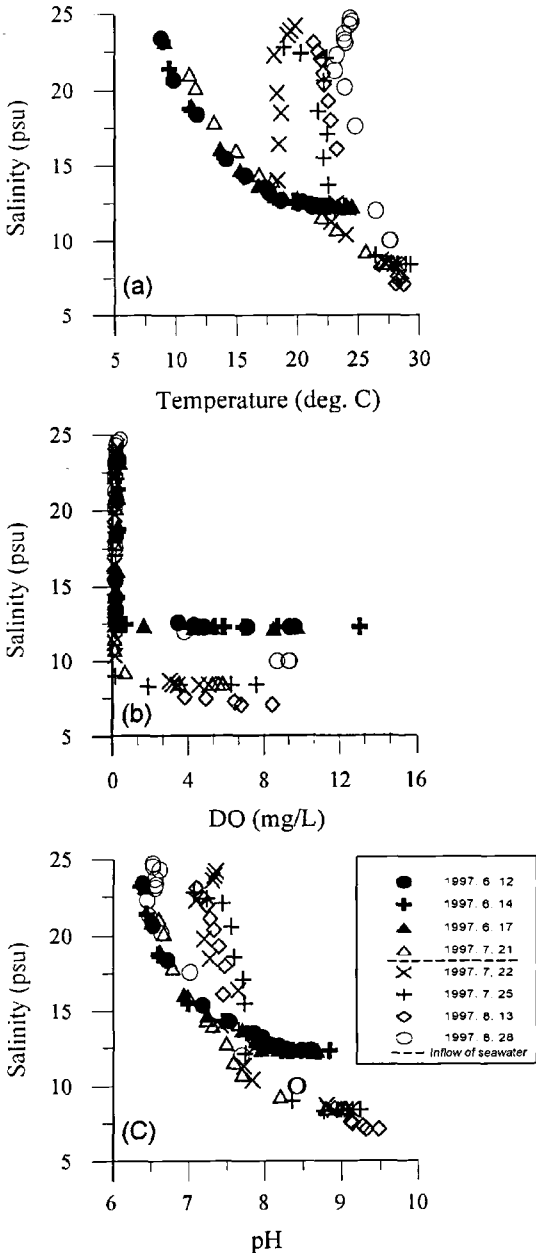


Fig. 5. Diagrams of (a) T-S, (b) D.O.-salinity and (c) pH-salinity Station 6 from June 12 to August 28, 1997.

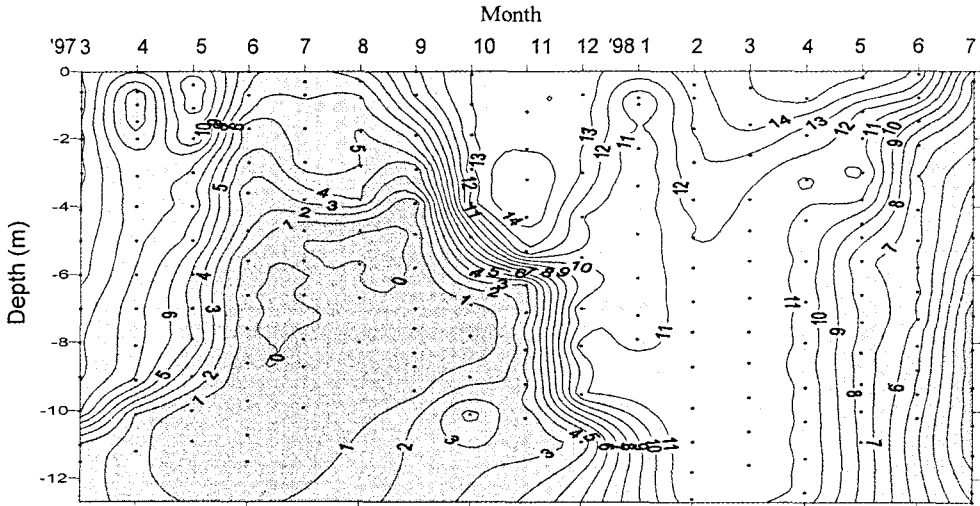


Fig. 6. Variations of D.O at Station. 6 from March 1997 to July 1998.

타내고 특히 배수갑문 주변지점에서 13mg/l 이상의 과포화상태를 나타냈다. 이러한 현상은 수위가 정체하면서 특히 배수갑문 주변에서 식물플랑크톤이 급증하였기 때문인 것으로 생각된다. 또한 1998년 2월 11일 관측이후로는 일일 2회씩 750~1,000 만 m³의 해수가 유입되어 시화호 내의 용존산소가 전수층에서 10mg/l 이상을 나타냈다.

토 론

박용철 외(1997)가 본 연구 정점 6과 인접한 2개의 정점에서 관측한 1996년 5월 18일의 수직적인 용존산소분포는 표층에서는 7.5~9.2mg/l를 나타내고 수심 6m 이하에서 1.3~6.8mg/l를 나타냈다. 1996년 8월 6일의 표층에서는 10.2mg/l를 나타내고 수심 5m 이하에서 1.6~6.3mg/l로 두 기간 동안 비슷한 수직적인 용존산소 분포를 나타냈다. 따라서 여름철 수온 증가로 인한 급격한 무산소층의 증가를 나타나지 않았다(Fig. 9). 그러나 본 연구결과와 Fig. 4에 의하면 6월 10일부터 8월 28일까지 일일 2회 250만 m³ 해수의 유입이 있음에도 불구하고 용존산소는 계속 감소하였다. 배수갑문 개·폐 이전기간인 1995년 10월과 1996년 8월 자료에 수직적인 COD와 암모니아염의 분포는 저층으로 갈수록 증가하고 용존산소가 감소하였는데 이는 대부분의 용존산소가 유기물산화에 이용된 것으로 해석하였다(박용철 외, 1997). 이러한 용존산소의 현저한 수직변화는 수괴내의 화학적 종분화과정에 결정적인 영향을 준다(Codispoti et al., 1991). 또한 유기물 분해에 의한 용존산소 소비와 해수의 유입으로 인한 산소공급간에 상쇄적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. Fig. 10은 배수갑문의 개·폐하지 않은 기간과 해수와 담수의 혼합과정 기간의 수층별 염분과 탁도분포이다. 1997년 4월 14일 배수갑문을 개·폐하지 않은 기간의 염분분포는 14psu 이하이고 탁도는 대부분 5~10 NTU로 낮게 나타났다.

Fig. 8은 pH의 공간적인 분포양상이다. 외해수의 유입에 따라 이산화탄소가 시화호 내로 공급되기 때문에 외해수와 시화호수의 혼합정도에 따라 pH가 좌우된다. 전 계층을 통해 저층보다 표층수괴에서 높은 pH를 나타냈으며 이러한 현상은 식물플랑크톤의 대번식으로 높은 일차생산에 의한 이산화탄소 흡수에 따른 pH의 증가로 해석된다(박용철 외, 1997). 시화외해역 환경영향조사(1998)에서 배수갑문 개방이전기간인 1997년 6월 11일 외해역 총 16지점에서의 pH는 평균 8.1를 나타냈다. 특히 여름철에는 봄철과 가을철에 비하여 약간 높게 나타났다. 일반적으로 pH 변화에 따른 퇴적물의 용존산소 소비속도는 pH가 높을수록 퇴적물에 의한 물질의 산화 정도가 빠르게 진행된다(이순화 외, 1995). 따라서 해수를 유입시킨 7월 22일부터 배수갑문을 통해 pH 7.9~8.2에 해당하는 해수가 유입되면서 저층수위를 따라 7.4 이하의 호소수와 만나게 되면 급격한 산화작용을 일으키고 빠르게 용존산소를 소모하였다. 1997년 10월 이후의 공간적인 pH 분포는 공단이나 담수 유입구에서 배수갑문쪽으로 갈수록 증가하였다.

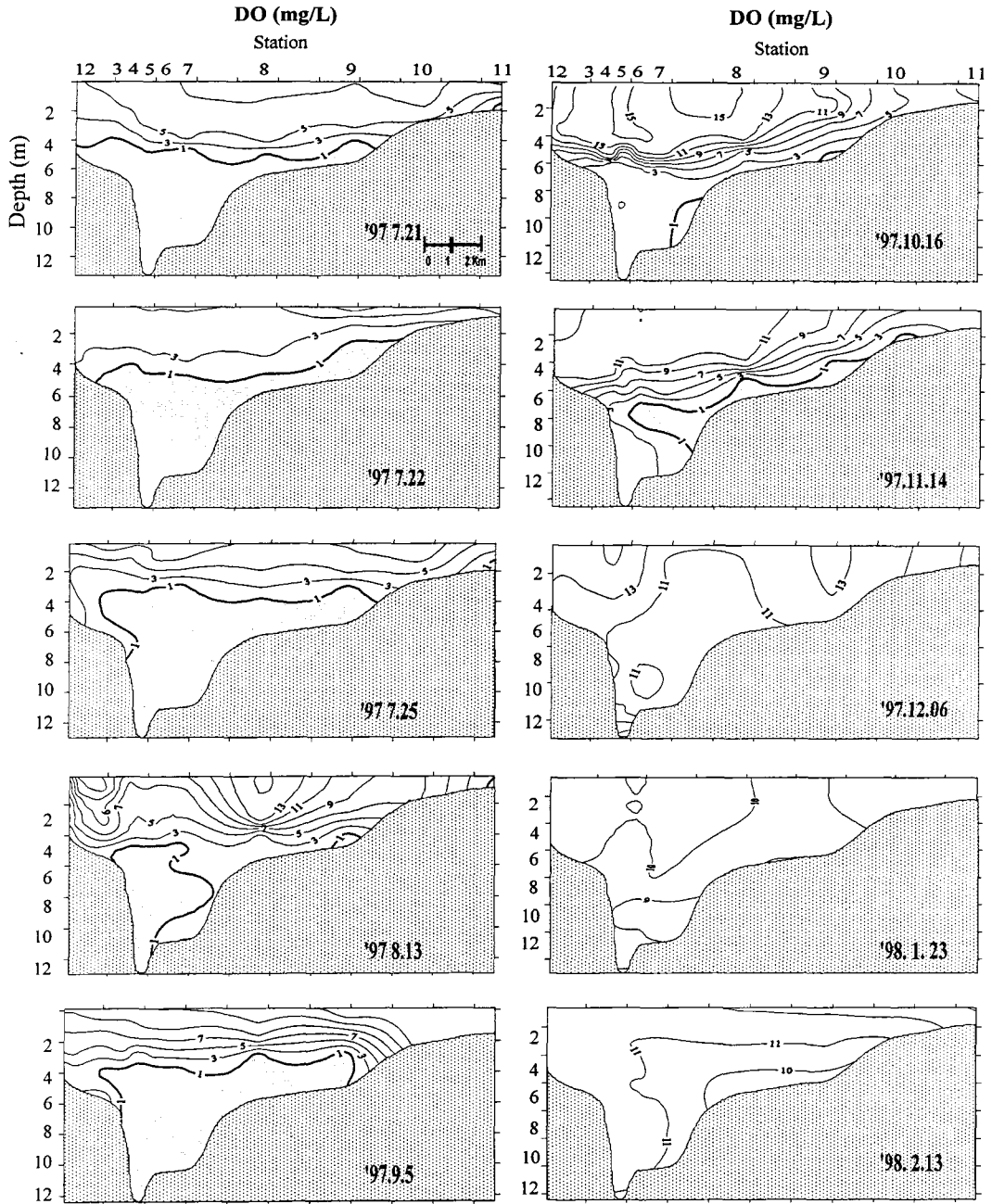


Fig. 7. Vertical section D.O during June 21, 1997 to February 24, 1998.

해수와 담수의 혼합과정기간인 1997년 7월 25일에는 오전 8시부터 8시 30분까지 30분간 250만 m³의 해수가 유입된 이후 배수갑문을 닫고 2시간 30분이 경과한 후에 관측한 결과 St. 7까지 저층 6m 이하의 수심에서 30 NTU 이상의 탁도를 나타냈으며 하천수의 영향을 받는 St. 9, 10에서도 30 NTU 이상을 나

타냈다. 따라서 해수가 유입되었을 시기에 표층퇴적물은 재부유된 것으로 사료된다. 배수갑문의 개방으로(8개의 배수갑문중 4개개방) 해수를 유출·입시켰을 때 부표추적결과 대조·소조의 어떤 경우에도 형도까지 직접적으로 영향을 미치지 않으며, 배수갑문 폐쇄시 수중방류의 확산은 방조제 쪽으로 이루어지는데

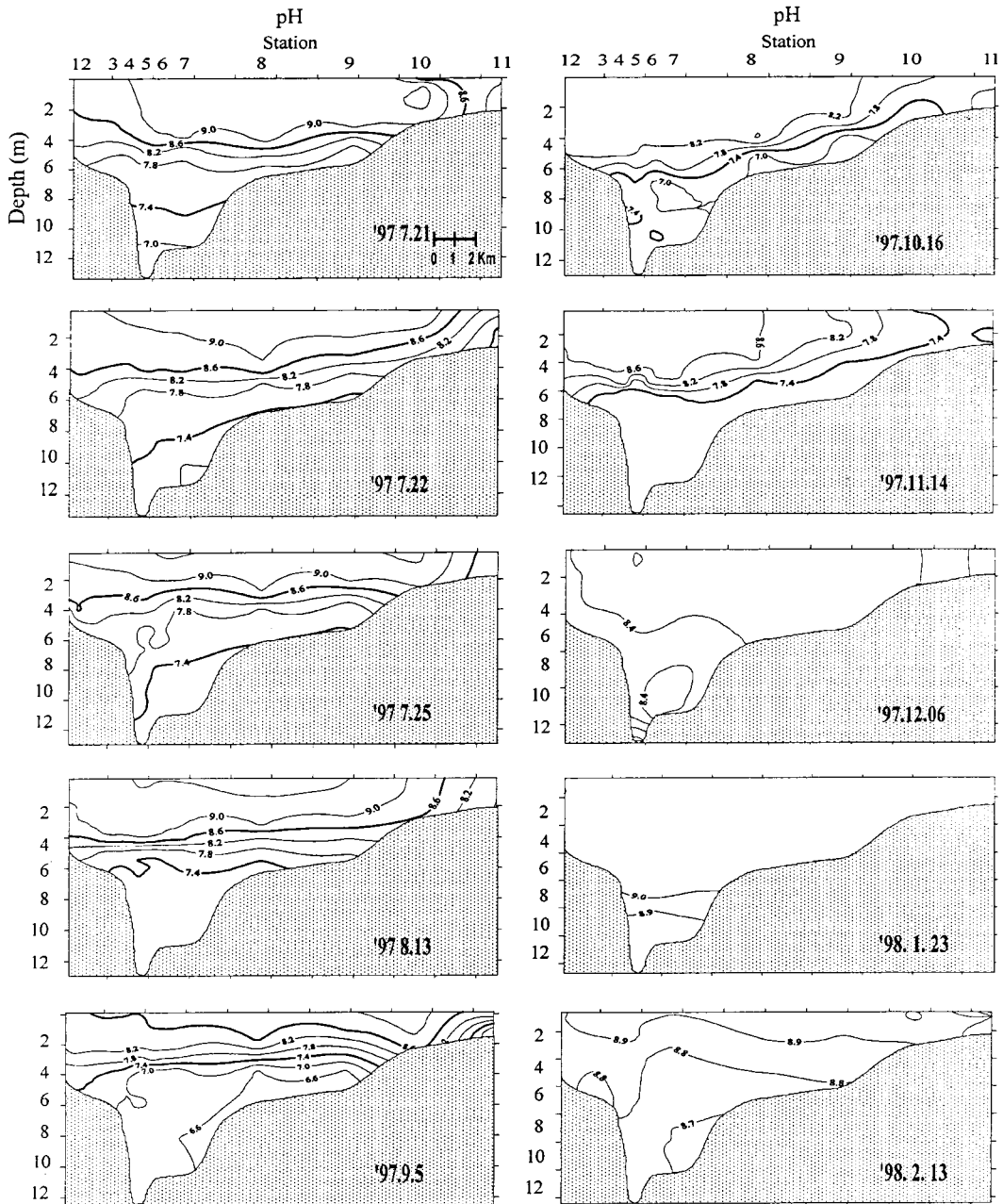


Fig. 8. Vertical section pH during June 21, 1997 to February 24, 1998.

그 거리는 5km 이내 인 것으로 나타났다(한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1995). 시화호내의 표층퇴적물의 유기탄소량은 1994년 방조제가 체결된 이후 매년 증가하고 특히 1996년에는 0.30~1.36%이다(김은수의, 1998).

결국, 해수가 시화호내의 저층으로 유입되어 표층

퇴적물이 재부유하고 그 위로 담수가 이동하면서 담수와 해수의 경계면에서 부유물이 발생하였을 것이다. 이러한 부유물은 유기물 함량이 높아 산소소모율이 높을 것으로 추정되며, 해수유입 중단 이후 정체기에 해수중에 산소를 소모한 것으로 판단된다.

한편, 1997년 7월부터 9월까지 시화호내의 용존산

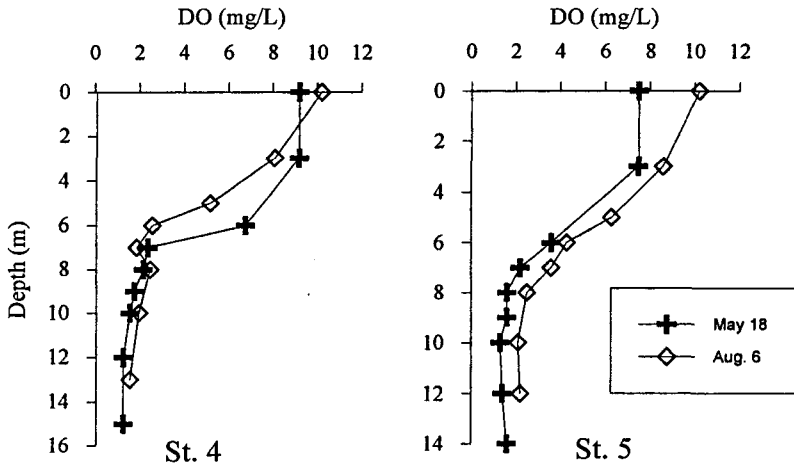


Fig. 9. Vertical distributions of DO at two sites at 1996 (modified from Park *et al.*, 1997).

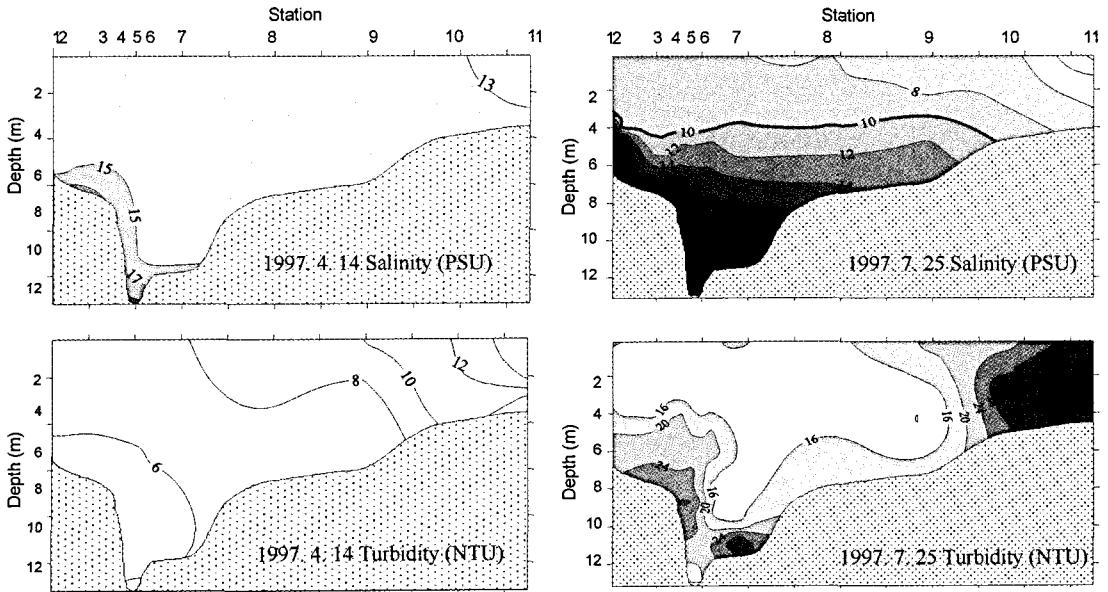


Fig. 10. Station-depth profiles of salinity, turbidity along sampling stations in Lake Shihwa in April 14 and July 25, 1997.

소량을 증가시키기 위해서는 1일 2회 250만 m³의 해수유입으로는 저층수의 수질개선이 어려우며 해수유·출입량을 늘리고, 또한 주기적으로 지속적인 배수갑문 개·폐가 필요하다.

결론

(1) 배수갑문을 통한 해수유입이 없었던 1997년 3월부터 1997년 6월까지 용존산소의 변화는 3~5월 동안 대부분의 수층에서 10mg/l 이상을 보이고 11m

이하의 수심에서 5mg/l 이하이며 6월에 수심 6m 이하에서 무산소층을 나타냈다.

(2) 강우기에 배수만 실시했던 1997년 6월 10일부터 7월 21일 동안 무산소층이 표층수심 8m 이하에서 6m 이하로 증가하고, 해수유입 직후인 1997년 7월 22일 이후에는 기존의 무산소층에 해수에 포함된 용존산소를 급격히 소모하는 특징을 나타냈다. 이러한 현상은 pH 7.8~8.2의 해수와 pH 7.4 이하의 시화호 저층수가 만나 급격히 산화되었기 때문인 것으로 판단된다. 또 다른 가능성으로는 해수유입이후 해수

가 저층으로 유입되고 그 위로 담수가 유동하면서 담수와 해수의 경계면에서 부유물이 발생할 것이다. 이러한 부유물의 성질은 유기물 함량이 높아 산소 소모율이 높으며, 해수유입 중단이후 정체기에 해수 중에 산소를 소모한 것으로 판단된다. 결국 여름철 강우와 해수의 유입은 염분차이에 의한 성층은 강화되고, 용존산소 결핍을 가속화되었다.

(3) 해수유입이 크게 증가된 1998년 1월에는 전 수층의 용존산소가 10mg/l 이상을 나타내고 하계로 갈수록 용존산소량이 감소하였다.

(4) 시화호내의 수질개선을 위해서는 여름철에는 염분약층이 생성되지 않도록 해수 유·출입량을 늘리는 것이 보다 효과적일 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사로부터 시화호 수질관리 대책 연구과제의 일환으로 수행되었으며, 논문을 세밀히 심사해주신 해양연구원의 김은수박사님과 인하대학교의 한명우교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

김은수·김경태·조성록, 1998, 시화호 해수 및 표층퇴적물의 생지화학적 연구. 해양연구, 20(3), 237-250.
 이순화·이철희·강미아, 1995, 인공 저수지에서의 용존산소

변화에 관한 연구. 대한환경공학회지, 481-488.
 박용철·박준건·한명우·손승규·김문구·허성희, 1997, 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유·무기화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 「바다」, 2, 53-68.
 홍대벽, 1995, 시화호의 환경특성과 동적모형에 의한 수질 관리방안에 관한 연구. 서울시립대학교 환경공학과 박사학위논문, 147 p.
 한국수자원공사, 1998, 시화호 수질개선대책에 따른 수질회복 추이에 관한 연구(2차년도). 288 p.
 한국수자원공사·농어촌진흥공사, 1995, 시화지구 담수호 수질보전 대책수립 수립 조사보고서. 102-165.
 한국해양연구소, 1998, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한연구(2차년도). 47-48.
 한국수자원공사·한국해양연구소, 1998, 시화호 외해 연안 환경영향조사 요약보고서. 92 p.
 한명우·박용철·허성희, 1997, 시화호에서 암모니아와 납의 저층용출. 한국해양학회지 「바다」, 2, 69-77.
 허성희·오임상, 1997, “인공호수 시화호와 주변 해역의 생태계 연구 : 서문”. 한국해양학회지 「바다」, 2, 49-52.
 Codispoti, L.A., Friederich, G.E., Murray, J.W., and Sakamoto, C.M., 1991. Chemical variability in the Black Sea : implications of continuous vertical profiles that penetrated the axic/anoic interface. Deep-Sea Reserch, 38, S5691-S710.
 Han, M.W. and Park Y.C., 1999. The development of anoxia in the artificial Lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation. Marine Pollution Bulletin, 38, 1194-1199.
 Haraldsson, C. and Wsterlund, S., 1998, Trace metals in the water columns of the Black Sea and Framraron Fjord. Marine Chemistry, 23, 417-429.

2001년 3월 21일 원고 접수
 2001년 4월 18일 수정원고 접수
 2001년 6월 9일 원고 채택