

시화호 배수갑문 운용에 따른 수질변화

Water Quality Variations in Sihwa Lake with Gate Operation

최 정 훈*, 김 미 옥*, 홍 대 벽*
Choi, Jung-hoon, Kim, Mi-ock, Hong, Dae-byuk

Abstract

The variations of water quality due to inflow of sea water by gate operation were observed in Sihwa Lake. The distributions and concentration of salinity, temperature, dissolved oxygen, nutrients were investigated from Feb. 1997 to Jul. 1998. The salinity of water before gate operation was ranged 8.0~15.1‰, and after the gate operation in Oct. 1997, it was highly increased over 20‰, so that it was ranged 30.4~33.5‰ in 1998. Inverse temperature between surface and bottom water occurred from Oct. 1997 to Feb. 1998. The variation of pH was observed higher in the surface layer than in the bottom layer. It was because dense phytoplankton bloom in the surface water induced the depletion of CO₂. The results indicate that the sea water inflow though regular operation of the gate decreased the eutrophication so that the water quality of the lake was improved.

I. 서 론

한국 서해 경기만에 위치한 시화호의 면적은 약 61km²이고 방조제의 길이는 약 12.7km에 이른다. 시화호의 총 저수량은 약 3억 3천만m³, 유효저수량은 1억 8천만m³으로 추정된다. 현재의 저수량은 약 3억m³ 정도이며, 호내의 최대수심은 15m에 이른다.

시화호는 1994년 1월에 방조제 물막이 공사가 완료되어 해수 유입이 차단되고 배수를 위한 간헐적인 수문조작이 시행되었으나 하천수의 부족과 주변도시의 개발로 많은 양의 오염물

질이 유입되어 수질오염이라는 큰 과제가 대두되었다. 이러한 조건에서 시화호는 1996년에 이르러 유입된 오염물질이 축적되고 성층이 발달하면서 식물 플랑크톤의 대발생으로 수질 악화 및 방류시 해양생태계에의 악영향이 제시 되었으며, 이에 따라 유역 내에 수질개선대책이 완료되는 시점까지 배수갑문 개방에 의한 해수 유통이 단기적인 수질대책으로 수행되었다. 시화호는 1994년초 방조제 체절 후부터 1997년 7월까지 담수화가 진행되었고, 1997년 7월부터 해수 유통이 시도되면서 다시 해수화되었다. 본 연구의 목적은 배수갑문 개방에 따

* 농업기반공사 농어촌연구원

키워드 : Potential energy anomaly, 시화, 부영양화

른 수질과 계절별 수질 환경의 변동을 파악하는데 있다.

II. 시화 담수호의 배수갑문 개·폐 상황

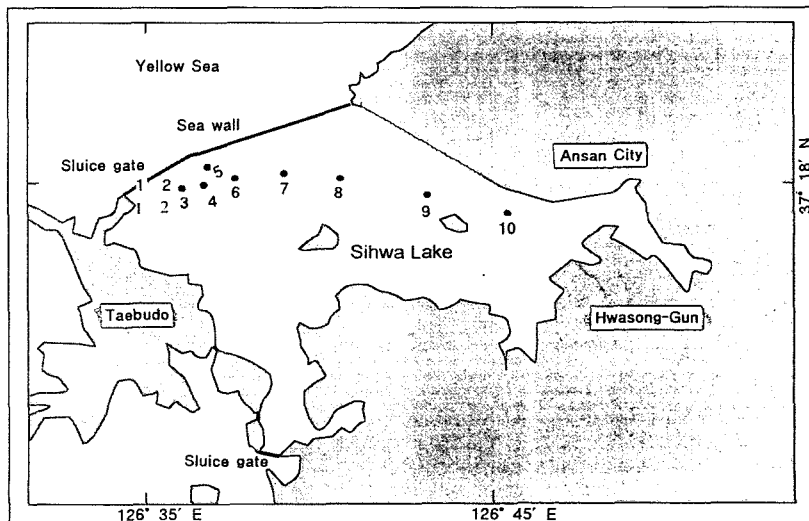
담수호 수질개선을 위하여 배수갑문을 통하여 해수를 유입시키는 배수갑문 개폐 관리의 개략은 다음과 같다. 1997년 7월 22일부터 10월까지 250만 m³/회 정도의 해수 유통이 시도되었으나 성층 현상을 제어하는데 부족한 것으로 평가되어 1997년 12월부터 1998년 2월까지 시험 개·폐시 해수 유통량을 500만 m³/회 정도로 조정·시행한 결과 1998년 1월 이후 전반적으로 수질이 개선되는 것으로 나타났으나 상·하층 수질이 여전히 차이가 나타나 이를 개선하고 결빙에 의해 수질이 악화되는 것을 방지하기 위해 해수 유통량의 증가 필요성이 검토되었다. 1998년 2월 이후 7월까지 해수 유통량을 750~1,000만m³으로 상향조정하고 상시 및 간헐 개폐 운영하고 있다. 배수갑문 개·폐 상황은 <Table 1>과 같다. 1997년 11월 3일부터 12월 5일까지 인명사고로 인하여 배수갑문이 작동되지 않았다.

<Table 1> Inflow and outflow in Sihwa Lake with 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	29,913	15
8	92,503	44	57,593	27
9	83,735	44	83,735	37
10	106,122	46	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

III. 재료 및 방법

1997년 2월부터 1998년 6월까지 배수갑문을 통한 해수 유통 전·후에 대한 수질변화를 1년 4개월간 총 10지점에서 33회 현장조사를 실시하였다. <Fig. 1>은 수질조사 지점을 보여주며 각 정점의 표층수와 저층 퇴적물로부터 1m



<Fig. 1> Sampling sites

상층의 저층수를 채취하였다. 채수지점은 배수갑문의 개·폐 현황에 영향을 가장 많이 받는 St. 1로부터 시작하였고 반월, 시화공단과 하천에 영향을 받는 St. 10을 마지막으로 채수하였다. 채수 시간은 오전 10시부터 오후 4시까지이며 배수갑문 운용상황에 따라 약간씩 변화였다.

수질분석은 5 l Niskin 채수기로 시료를 채수하여 냉동실에 보관하였다가 분석하였다. 수온과 염분, DO(용존산소), pH는 HYDROLAB (Multiparameter Water Quality Instrument, DATA SONDA3, 미국)을 이용하여 현장에서 측정하였다. SS(부유물질)은 4°C 이하로 보관하여 실내에서 GF/C로 여과 후 중량법으로 정량하였고 TKN은 Kjeldahl-N 분해법, $\text{NH}_4\text{-N}$ 은 Indophenol blue법, $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 Brucine법, T-P와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 Ascorbic acid 환원법에 의한 흡광광도법, Chl-a는 현장에서 GF/C로 여과 후 파쇄원심분리해서 상등액으로 흡광도를 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 수질항목 및 조사시기별 농도변화

조사시기별 수질항목들의 평균농도 변화를 알기 위하여 표층수와 저층수의 총 10지점의 평균농도를 <Fig. 2>에 나타냈다.

가. 염분

해수 유입 이전의 표층과 저층수의 염분범위는 각각 8.0~14.3‰와 10.5~15.1‰이고, 1997년 10월 16일의 조사시기부터 표층과 저층수에서 염분 값이 20‰ 이상으로 증가하면서 1998년 1월 조사 이후 표층과 저층수의 염분범위는 각각 30.4~32.1‰와 31.5~33.5‰를 보이고 전수층에서 30‰ 이상으로 조사되었다<Fig. 2A>.

나. 수온

여름철 가장 높은 수온을 나타낸 시기는 1997

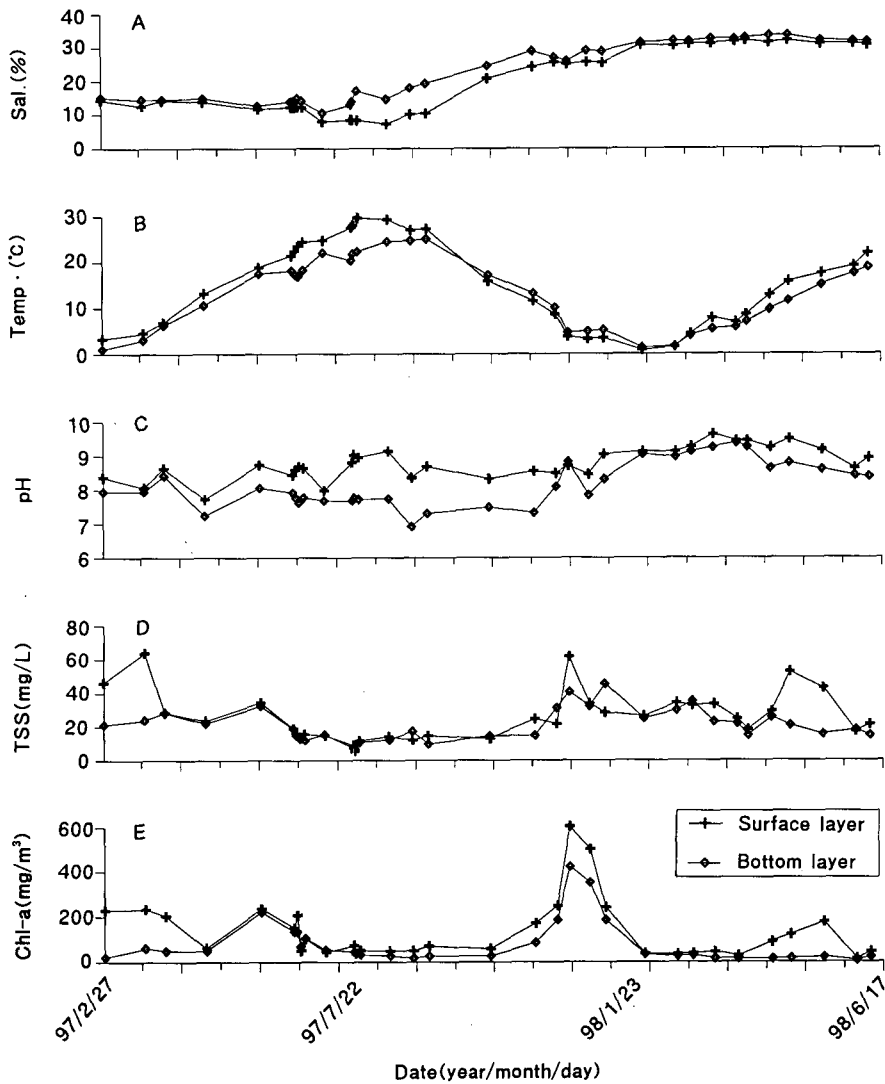
년 8월로 표층수에서 29.4°C이고 겨울철 가장 낮은 수온은 1998년 1월 표층수에서 0.8°C를 기록하였다<Fig. 2B>. 표층과 저층수의 수온의 차이는 6~8월의 조사기간이 다른 계절에 비해 크게 나타났다. 염분 값이 20‰ 이상으로 증가되는 1997년 10월 조사에서부터 1998년 2월 13일 조사시기까지 저층수의 수온이 표층수에 비해 높은 수온 역전 현상이 발생하였다. 이는 겨울철 수온 강하가 표층에서 먼저 일어나며 저염 표층수가 고염 저층수의 열 손실을 막고 있기 때문이다. 따라서 시화호의 수괴특성은 염분의 변화에서만 그 원인이 있는 것이 아니며, 수온변화 등 계절적인 요인이 부분적으로 영향을 주는 것으로 추정된다.

다. pH

해수 유입 이전의 표층과 저층수의 pH 범위는 각각 7.7~8.8과 7.2~8.4이며, 1998년 1월 조사 이후 표층과 저층수의 pH 범위는 각각 8.6~9.6과 8.4~9.4를 보여 고염분의 분포와 더불어 다소 높은 pH를 나타냈다. 또한, 다른 조사시기에 비해 표층과 저층수의 pH 차이가 작아지는 분포를 보인다<Fig. 2C>. 조사기간동안의 전반적인 pH의 분포는 표층수괴에서 높는데 이는 과대 번식된 식물 플랑크톤의 활발한 광합성에 따른 수중의 CO_2 감소와 관계하고 있다. 반면에 저층수의 pH는 유기물 분해에 따른 CO_2 생산 및 저산소 환경 하에서 발생한 NH_3 , HS^- , S^{2-} 등에 의한 alkalinity의 분포에 좌우된다.

라. 총 부유물질 (TSS)

총 부유물질의 분포는 몇몇 조사시기에서 나타난 40mg/L의 높은 값을 제외한다면 전반적으로 두 수괴가 비슷한 범위를 갖는다<Fig. 2D>. 조사기간동안 표층과 저층수의 농도범위는 각각 5.5~64.0mg/L로 넓은 농도범위를 갖는다. 계절 변화는 1997년 6~10월 조사에서 다른 시기보다 낮은 함량 (< 20mg/L)이 분포한다. 이



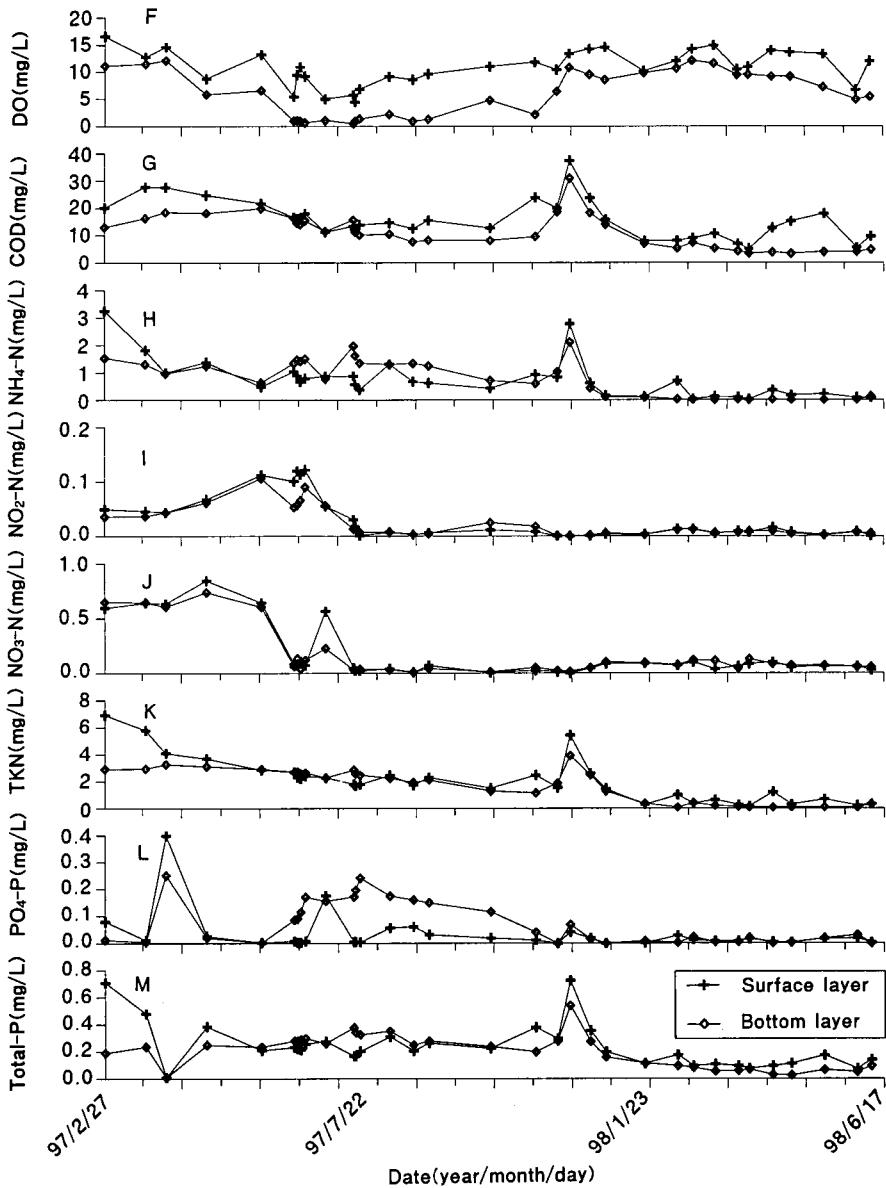
〈Fig. 2 A-E〉 Trends of salinity, temperature, pH, TSS, Chl-a concentration by 10 points mean value of surface, bottom layer in Sihwa Lake from February, 1997 to June, 1998

러한 계절적인 분포 특성의 원인으로는 클로로필의 분포와 비슷하여 부유물질의 구성성분이 식물 플랑크톤의 번식과 관계하고 있는 것으로 추정된다.

마. 클로로필 (Chl-a)

클로로필의 분포는 표층수에서 상대적으로

높은 농도분포를 보인다<Fig. 2E>. 이러한 원인은 하천과 우수관을 통한 지속적인 담수의 영양염들이 표층에서 식물 플랑크톤에 의해 이용되기 때문이며, 저층수의 낮은 농도는 표층의 높은 식물 플랑크톤으로 인하여 빛의 투과가 제한되고, 식물 플랑크톤의 생산이 제한되고, 더불어 이들의 사체가 급격하게 분



(Fig. 2 F-M) Trends of nutrients concentration by 10 points mean value of surface, bottom layer in Shiwa Lake from February, 1997 to June, 1998

해되기 때문이다. 1997년 12월 6일과 19일에는 표층수에서 각각 604.0mg/m^3 과 501.6mg/m^3 으로 높은 농도를 보였으나 이는 1997년 11월 3일부터 12월 5일까지 배수갑문을 작동하지 않아 시화호 수위가 정체되면서 식물 플랑크

톤이 급증한 결과이다. 즉 수위가 정체됨에 따라 외편모조류인 *Prorocentrum minimum*이 압도적으로 우세하게 출현하였으며 현존량도 매우 증가하여 $13 \times 10^8 \text{cells/l}$ 로 매우 높은 값을 보였기 때문이다. 해수의 유입으로 시화호가 완

전히 혼합된 형태를 보인 1998년의 조사 결과와 해수 유입이 있기 전의 1997년 2월부터 6월까지의 클로로필 농도의 범위는 각각 26.9~176.5mg/m³와 51.4~236.7mg/m³으로 지속적인 해수 유입시에 다소 낮은 Chl-a 농도를 보였다.

바. 용존산소 (DO)

해수 유입 이전의 표층과 저층수의 용존산소 범위는 각각 5.0~16.6mg/L과 0.5~12.1mg/L이며, 1998년 1월 조사 이후 표층과 저층수의 용존산소 범위는 각각 6.8~15.0mg/L과 5.0~12.1mg/L로 표층보다 저층수에서의 용존산소 증가가 뚜렷하였다. 용존산소의 계절적인 분포는 특징적으로 1997년 6월부터 9월까지 표층과 저층수에서 10mg/L 보다 낮은 농도를 보이면서 표층과 저층수의 높은 농도차이를 보인다. 그러나 해수의 유입으로 인해 염분이 20% 이상 되면서 두 수괴가 완전히 혼합됨에 따라 표층과 저층수의 용존산소 농도는 증가한다<Fig. 2F>. 1997년 7월 21일 저층수에서 최저 0.5mg/L를 나타낸 것은 표층으로부터 과도하게 유입 침강된 유기입자의 분해 때문이다.

사. 화학적 산소요구량 (COD)

해수 유입 이전의 표층과 저층수의 COD 범위는 각각 11.2~27.8mg/L과 11.4~19.9mg/L이며, 1998년 1월 조사 이후 표층과 저층수의 COD 범위는 5.0~18.0mg/L과 3.3~7.2mg/L로 해수 유입에 따라 전수층에서 COD가 감소하였다. 표층수에서 1997년 12월 6일, 19일에는 각각 37.4 mg/L, 23.7mg/L으로 높은 COD 농도를 보였다. 이는 클로로필 및 식물 플랑크톤 현존량 분포와 마찬가지로 시화호 수괴의 정체로 인한 결과로 추론된다<Fig. 2G>. 저층수의 COD의 분포는 DO의 분포와 반대의 경향성을 갖는데 이는 해수가 유입되면서 수질이 개선된 결과이다.

아. 영양염류 (NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, TKN, PO₄-P, Total-P)

암모니아염, 총 질소 그리고 총 인의 영양염류의 분포는 조사기간동안 감소하는 경향성을 보인다<Fig. 2H~M>. 이는 하천에서 유입되는 영양염들이 상대적으로 낮은 농도를 갖는 외해수의 유입으로 희석된 결과로 보여진다. 암모니아염의 1997년 2월 27일의 표층과 저층수에서 농도는 각각 3.248mg/L과 1.526mg/L인 반면에 해수 유입으로 완전히 혼합된 후의 1998년 6월 17일 경우 각각 0.090mg/L과 0.134mg/L로 낮아졌다. 특징적으로 1997년 5월부터 7월 21일까지의 분포를 보면 저층수의 농도가 표층수에 비해서 높다. 마찬가지로 인산염의 분포도 비슷한 경향성을 보인다<Fig. 2L>. 이는 저층수괴로 유입된 유기물의 혐기성 분해과정에서 생성된 후 저 산소환경에 더 이상 산화되지 못한 결과로 추론된다. 반면에, 수괴 내의 용존산소의 감소에 따른 저 산소환경에서 아질산염과 질산염의 뚜렷한 감소 경향성이 보인다<Fig. 2 I, J>. 총 질소의 1997년 2월 27일의 표층과 저층수의 농도는 각각 6.930mg/L과 2.926mg/L이고 1998년 6월 17일의 경우 두 층에서 0.325mg/L로 감소하였으며, 총 인에서도 완전히 혼합이 이루어진 고 염분이 분포하는 시기에 많은 감소를 보인다.

2. 시화호 수괴특성

시화호 하류수역의 중심부에 위치한 St. 6의 염분, 수온, Sigma-t 자료로부터 1997년 3월부터 총 26회에 걸쳐 Potential energy anomaly (Simpson et al., 1978)를 계산하여 수괴 성층 정도를 판별하였다.

$$V = \frac{g}{H} \int_{-H}^0 (\rho' - \rho) z dz$$

여기서 ρ'는 수층이 완전히 혼합되었을 경우

의 밀도이고 H는 수심(m)이다. Potential energy anomaly(V)는 관측된 수층이 지닌 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전 혼합 되었을 경우의 위치에너지의 차(V)로서, V가 0 이면 완전혼합이고 성층이 강할수록 -V가 커진다. <Table 2>로부터 시화호 수괴의 성층은 다음과 같이 구분된다. 배수갑문 개방 이전인 1997년 3월 18일부터 7월 21일의 기간 중 평균 Potential energy anomaly(V)는 1.145 J/m³이며, 범위는 0.329~1.882 J/m³를 보였다. 배수갑문을 개방한 1997년 7월 22일부터 12월 6일 기간 중

평균 Potential energy anomaly(V)는 1.585 J/m³이며 범위는 0.786~2.079 J/m³를 보이고, 표층수와 저층수의 염분이 30‰ 이상을 나타내는 1998년 1월 21일 이후에 평균 0.915 J/m³이며, 범위는 0.143~1.200 J/m³를 나타냈다.

3. 수괴 구분에 따른 일반수질환경특성

pH의 변화는 수괴 완전혼합 이후 저층수의 Median 값은 9.0으로 배수갑문 개방 이전과

(Table 2) Temperature, salinity and stratification parameter (log(-V)) of water column observed in March, 1997 to June, 1998. at station 6.

Date	Surface temp.(°C)	Bottom temp.(°C)	Surface sal.(‰)	Bottom sal.(‰)	Surface σ -t	Bottom σ -t	Stratification parameter(J/m ³)	Remarks
1997 Mar 18	6.3	5.7	14.3	16.5	11.2	13.0	1.072	
19	6.5	5.6	14.3	19.5	11.2	15.4	0.740	
Apr. 2	8.1	6.3	14.3	16.5	11.0	12.9	0.329	
4	9.0	6.4	14.3	20.8	11.0	16.3	1.282	Gate closed
14	12.3	7.0	14.2	19.3	10.5	15.1	1.348	
May.19	18.2	10.0	13.1	19.3	-	-	1.270	
Jun. 12	23.1	16.5	12.3	13.8	6.8	9.4	1.240	
Jul. 21	27.6	15.9	8.4	15.4	2.6	10.7	1.882	
22	29.9	17.5	8.4	18.4	1.9	12.7	1.822	
25	30.3	18.4	8.3	20.1	1.8	13.8	1.983	
Aug.13	29.3	21.7	7.4	21.8	1.4	14.3	2.079	Stratification
Sep. 5	27.1	25.4	10.6	25.0	4.4	15.7	1.982	
Oct.16	15.5	17.5	20.9	27.4	15.0	19.6	1.675	
Nov.14	11.4	13.7	24.4	29.4	18.5	21.9	1.532	
28	8.7	11.5	25.7	28.5	19.9	21.6	0.819	
Dec. 6	4.0	7.3	25.8	27.3	20.5	21.3	0.786	
1998 Jan. 23	0.4	1.5	31.0	31.1	24.9	24.9	0.143	
Feb.13	1.3	1.9	30.9	32.5	24.7	26.0	0.989	
24	4.1	4.1	31.1	32.5	24.8	25.8	1.003	
Mar. 9	7.7	5.3	31.5	33.2	24.6	26.2	1.200	
24	6.8	5.7	32.5	32.6	25.5	25.7	0.440	Full mixing
31	8.3	6.8	32.2	33.3	25.3	26.1	1.021	
Apr.15	13.1	9.5	32.2	33.4	24.2	25.8	1.117	
May.18	18.2	14.5	31.2	32.2	22.3	23.9	1.089	
Jun. 8	19.0	17.1	31.2	31.8	22.1	23.0	0.955	
17	22.7	18.3	30.8	32.0	20.8	22.9	1.194	

혼합과정 시기에 저층수 평균 7.7~8.0에 비하여 높은 pH를 보였다<Table 3>.

<Table 4, 5>는 1997년 2월부터 1998년 6월까지 표층수와 저층수의 총 10개 지점의 일반수질항목을 배수갑문 개방 이전과, 혼합기간, 수괴 완전혼합기간으로 나누어 상관분석을 실시하였다. 전반적으로 표층수와 저층수에서 수질항목별로 상관계수의 분포가 유사하였다.

Chl-a와 SS의 상관관계는 표층수에서 0.5~0.8로 높았으며 NH₄-N과 COD의 상관관계는 혼합과정 시기의 상관관계가 표층수에서 0.8, 저층수에서 0.5로 다른 조사시기에 비해 높은 상관관계를 나타냈다. COD와 Chl-a의 상관관계는 배수갑문 개방 이후의 혼합과정 시기와 수괴교란 이후에 0.8 이상의 높은 상관관계를 나타냈다.

<Table 3> Median of water qualities in the surface and bottom water in Sihwa Lake. ND=not detected; (Min.~Max.).

	Gate closed		Stratification		Full mixing	
	1997. 2.27 ~ 1997. 7. 21		1997. 7. 22 ~ 1997. 12. 29		1998. 1. 23 ~ 1998. 6. 17	
	surface	bottom	surface	bottom	surface	bottom
Salinity (%)	12.3 (1.3~14.7)	13.6 (3.3~23.3)	21.0 (7.0~26.8)	25.5 (7.5~31.5)	31.2 (26.8~33.2)	32.3 (29.3~33.8)
Tem. (°C)	22.4 (2.3~28.7)	17.5 (1.0~25.5)	15.4 (2.5~30.6)	15.5 (3.3~28.9)	9.1 (0.4~22.7)	6.8 (0.4~22.2)
pH	8.6 (7.3~9.3)	8.0 (6.4~9.2)	8.7 (7.1~9.6)	7.7 (6.5~9.6)	9.2 (8.4~9.9)	9.0 (8.0~9.6)
TSS (mg/L)	17.6 (2.8~156.4)	15.4 (4.4~59.6)	15.6 (0.4~203.0)	15.8 (2.0~141.6)	27.4 (ND~123.0)	21.2 (2.8~56.4)
DO (mg/L)	9.4 (2.7~21.3)	1.2 (0.1~16.5)	11.0 (3.6~17.2)	2.6 (0.1~14.6)	12.0 (4.7~17.5)	9.6 (0.2~13.5)
COD (mg/L)	16.8 (7.2~36.0)	15.0 (8.2~38.0)	14.0 (8.4~76.8)	11.2 (3.8~74.4)	8.2 (1.8~52.0)	4.0 (2.0~16.2)
TKN (mg/L)	0.9 (1.6~11.2)	2.8 (1.5~4.8)	1.8 (0.1~13.6)	1.8 (0.4~12.0)	0.2 (ND~8.5)	0.1 (ND~0.9)
NH ₄ -N (mg/L)	1.1 (0.3~8.0)	1.2 (0.4~4.0)	0.6 (ND~7.2)	0.8 (ND~6.5)	ND (ND~6.2)	ND (ND~0.6)
NO ₂ -N (mg/L)	0.1 (0.0~0.1)	0.1 (ND~0.2)	0.0 (ND~0.1)	0.0 (ND~0.1)	0.0 (ND~0.1)	0.0 (ND~0.1)
NO ₃ -N (mg/L)	0.1 (ND~2.1)	0.1 (ND~1.1)	0.0 (ND~0.1)	0.0 (ND~0.2)	0.1 (ND~0.5)	0.1 (ND~0.3)
PO ₄ -P (mg/L)	0.006 (ND~0.467)	0.059 (ND~0.504)	0.005 (ND~0.214)	0.073 (ND~0.527)	0.007 (ND~0.214)	0.006 (ND~0.091)
T-P (mg/L)	0.213 (0.004~1.211)	0.242 (0.002~0.720)	0.222 (0.125~1.785)	0.244 (0.008~1.660)	0.094 (0.011~0.671)	0.061 (0.003~0.233)
Chl-a (mg/m ³)	127.3 (10.9~626.8)	79.3 (5.3~276.3)	71.6 (14.3~1552.2)	42.9 (0.0~1465.0)	37.4 (3.0~589.7)	17.0 (1.0~86.2)

(Table 4) Correlation between water qualities in the surface water of Sihwa Lake according to the state of seawater intrusion.

Gale closed	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1.000												
pH	0.364	1.000											
Salinity	-0.605	-0.070	1.000										
DO	-0.603	0.284	0.424	1.000									
COD	-0.724	-0.128	0.540	0.582	1.000								
NH ₄ -N	-0.463	-0.163	0.182	0.217	0.242	1.000							
NO ₂ -N	0.334	0.204	0.132	0.029	-0.178	-0.195	1.000						
NO ₃ -N	-0.565	-0.536	-0.065	0.346	0.392	0.145	-0.200	1.000					
TKN	-0.756	-0.222	0.360	0.535	0.627	0.810	-0.265	0.353	1.000				
PO ₄ -P	-0.410	-0.048	0.172	0.233	0.348	0.259	-0.383	0.255	0.326	1.000			
T-P	-0.362	-0.293	0.155	0.246	0.272	0.685	-0.156	0.136	0.773	-0.121	1.000		
SS	-0.553	-0.271	0.083	0.397	0.629	0.381	-0.148	0.396	0.722	0.093	0.586	1.000	
Chl-a	-0.390	0.071	0.255	0.381	0.478	0.187	0.018	0.100	0.458	0.109	0.355	0.555	1.000

Stratification	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1.000												
pH	0.172	1.000											
Salinity	-0.971	-0.241	1.000										
DO	-0.755	-0.049	0.709	1.000									
COD	-0.422	-0.222	0.354	0.390	1.000								
NH ₄ -N	-0.157	-0.235	0.079	0.125	0.859	1.000							
NO ₂ -N	0.256	-0.130	-0.233	-0.468	-0.253	-0.080	1.000						
NO ₃ -N	-0.032	0.133	-0.026	0.081	-0.178	-0.188	0.330	1.000					
TKN	-0.197	-0.237	0.112	0.205	0.912	0.925	-0.108	-0.099	1.000				
PO ₄ -P	0.195	-0.396	-0.235	-0.184	0.331	0.604	0.155	0.041	0.561	1.000			
T-P	-0.305	-0.294	0.236	0.272	0.944	0.944	-0.130	-0.135	0.966	0.571	1.000		
SS	-0.484	-0.207	0.398	0.436	0.821	0.740	-0.238	-0.063	0.765	0.420	0.817	1.000	
Chl-a	-0.584	-0.252	0.480	0.476	0.908	0.754	-0.235	-0.046	0.831	0.341	0.874	0.822	1.000

Full mixing	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1.000												
pH	-0.287	1.000											
Salinity	-0.093	-0.074	1.000										
DO	-0.048	0.696	-0.145	1.000									
COD	0.257	0.304	-0.489	0.436	1.000								
NH ₄ -N	-0.020	0.060	-0.500	0.064	0.323	1.000							
NO ₂ -N	-0.049	0.133	-0.555	0.026	0.264	0.553	1.000						
NO ₃ -N	-0.160	0.042	-0.289	-0.031	0.250	0.237	0.716	1.000					
TKN	0.029	0.173	-0.663	0.194	0.591	0.847	0.571	0.342	1.000				
PO ₄ -P	-0.024	-0.017	-0.306	-0.001	0.130	0.823	0.203	-0.059	0.623	1.000			
T-P	0.071	0.125	-0.695	0.222	0.692	0.789	0.397	0.201	0.826	0.655	1.000		
SS	-0.015	0.243	-0.092	0.352	0.679	0.327	0.170	0.200	0.388	0.184	0.527	1.000	
Chl-a	0.240	0.225	-0.177	0.311	0.885	0.047	0.009	0.181	0.369	-0.046	0.459	0.656	1.000

(Table 5) Correlation between water qualities in the bottom water of Sihwa Lake according to the state of seawater intrusion.

Gale closed	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1.000												
pH	0.165	1.000											
Salinity	-0.597	-0.551	1.000										
DO	-0.655	0.424	-0.028	1.000									
COD	-0.169	0.276	0.234	0.291	1.000								
NH ₄ -N	-0.239	-0.424	0.572	-0.256	0.242	1.000							
NO ₂ -N	0.329	0.318	-0.320	0.057	0.070	-0.544	1.000						
NO ₃ -N	-0.522	0.191	-0.125	0.788	0.201	-0.279	0.207	1.000					
TKN	-0.477	-0.135	0.536	0.278	0.656	0.599	-0.375	0.161	1.000				
PO ₄ -P	-0.111	-0.297	0.461	-0.193	0.145	0.618	-0.499	-0.334	0.509	1.000			
T-P	0.161	-0.486	0.401	-0.565	0.216	0.759	-0.366	-0.478	0.400	0.418	1.000		
SS	-0.273	0.293	-0.086	0.598	0.401	-0.293	0.128	0.495	0.284	-0.175	-0.303	1.000	
Chl-a	0.413	0.302	-0.180	-0.133	0.303	-0.281	0.378	-0.119	-0.033	-0.249	0.040	0.281	1.000

Stratification	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1												
pH	-0.414	1.000											
Salinity	-0.769	-0.043	1.000										
DO	-0.729	0.751	0.370	1.000									
COD	-0.501	0.474	0.175	0.581	1.000								
NH ₄ -N	0.133	-0.125	-0.184	-0.109	0.569	1.000							
NO ₂ -N	0.213	-0.075	-0.072	-0.156	-0.277	-0.194	1.000						
NO ₃ -N	-0.181	0.152	0.178	0.148	-0.099	-0.341	0.280	1.000					
TKN	-0.112	0.115	-0.104	0.203	0.801	0.854	-0.239	-0.209	1.000				
PO ₄ -P	0.465	-0.540	-0.341	-0.566	-0.086	0.604	-0.036	-0.273	0.379	1.000			
T-P	-0.079	0.024	-0.071	0.099	0.776	0.903	-0.210	-0.264	0.938	0.478	1.000		
SS	-0.517	0.359	0.374	0.534	0.556	0.148	-0.206	0.204	0.350	-0.246	0.304	1.000	
Chl-a	-0.562	0.331	0.311	0.564	0.910	0.476	-0.210	0.021	0.750	-0.127	0.713	0.558	1.000

Full mixing	W.T	pH	Salinity	DO	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TKN	PO ₄ -P	T-P	SS	Chl-a
W.T	1.000												
pH	-0.754	1.000											
Salinity	-0.039	-0.017	1.000										
DO	-0.731	0.714	0.189	1.000									
COD	-0.259	0.278	-0.664	0.199	1.000								
NH ₄ -N	0.108	-0.067	-0.407	-0.076	0.469	1.000							
NO ₂ -N	-0.310	0.197	0.026	0.224	0.094	-0.044	1.000						
NO ₃ -N	-0.293	0.195	0.328	0.423	-0.232	-0.051	0.201	1.000					
TKN	-0.139	0.139	-0.328	0.165	0.408	0.581	0.034	0.131	1.000				
PO ₄ -P	0.158	-0.048	-0.263	-0.213	-0.020	-0.133	-0.006	0.004	0.043	1.000			
T-P	-0.232	0.184	-0.773	0.032	0.699	0.558	0.012	-0.093	0.416	0.149	1.000		
SS	-0.472	0.256	-0.055	0.461	0.349	0.009	0.332	0.179	0.189	-0.110	0.167	1.000	
Chl-a	-0.309	0.289	-0.545	0.282	0.817	0.510	-0.018	-0.078	0.428	-0.077	0.721	0.241	1.000

이는 배수갑문을 개방하여 해수가 유입됨에 따라 식물 플랑크톤의 대발생의 영향이 시화호 주변 하천 및 공단으로부터의 유입의 영향보다 클 것으로 추론된다.

$\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ 의 비는 배수갑문 개방 이전에는 표층수에서 3.5 : 0.3 : 1, 저층수에서 4.9 : 0.2 : 1이며 혼합과정 기간 중에는 표층수에서 28.6 : 0.2 : 1, 저층수에서 29.1 : 0.2 : 1을 보이고 수괴 완전혼합 이후에는 표층수에서 2.7 : 0.1 : 1 저층수에서 0.4 : 0.1 : 1를 보였다. 시화호 외해역에서 1995년 10월 (박 1997)에 의하면 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ 의 비가 0.9/0.5/1.0을 나타내어 완전혼합 이후의 결과와 비슷하였다. 이는 시화호가 과도한 유기물 유입에 따라 유기질소에서 암모니아가 재생산되는 초기 산화 단계인 탈질화 과정이 우점하는 환경에서 무기질소의 최종 산화 단계인 질산화 과정으로 바뀐 것으로 판단된다.

V. 결 론

1. 조사기간동안의 염분범위는 해수 유입 이전의 표층과 저층수의 염분범위는 각각 8.0~14.3‰과 10.5~15.1‰이고, 1997년 10월 16일의 조사시기부터 표층과 저층수에서 염분 값이 20‰ 이상으로 증가하면서 1998년 1월 조사 이후 표층과 저층수의 염분범위는 각각 30.4~32.1‰과 31.5~33.5‰를 보이고 표층수와 저층수에서 30‰ 이상으로 조사되었다. 수온의 분포는 염분이 20‰ 이상으로 증가되는 1997년 10월부터 1998년 2월까지 표층과 저층간에 수온역전 현상이 발생하였다. pH의 분포는 표층수괴에서 높는데 이는 과대 번식한 식물 플랑크톤의 활발한 광합성에 따른 수중의 CO_2 감소 때문으로 판단된다.

2. 시화호에서 해수 유입에 의한 수괴형성 과정은 배수갑문 개방 이전, 해수 유입 과정,

혼합 이후로 구분되며 배수갑문 개방 이전의 평균 Potential energy anomaly(V)는 1.145 J/m^3 이고 배수갑문 개방 이후 평균 1.585 J/m^3 이며 수층이 완전히 혼합된 시기에는 평균 0.915 J/m^3 를 보였다.

3. COD와 Chl-a, $\text{NH}_4\text{-N}$ 과 COD의 상관관계는 해수를 유입시킨 이후 높은 양의 상관관계를 보였다. $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NO}_2\text{-N}/\text{NO}_3\text{-N}$ 의 비는 배수갑문 개폐 이후 혼합과정 기간의 저층수에서 29.1/0.2/1로 수괴완전혼합 이후 0.4/0.1/1과 대조를 이룬다. 이는 시화호가 과도한 유기물 유입에 따라 유기질소에서 암모니아가 재생산되는 초기 산화 단계로부터 탈질화 과정이 우점하는 환경에서 해수의 유입과 비교적 정상적인 무기질소의 최종 산화 단계인 질산화 과정으로 바뀐 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유·무기화합물의 생지화학적 연구, 한국해양학회지 「바다」, 2(2), pp.53~68.
2. Simpson, J.H., C.M. Allen and N.C.G. Morris, 1978. Fronts on The continental shelf. J. Geophys. Res., 83, pp.4607~4614.