

물 교환이 제한적인 시화호 상류 기수역에서 기초수질의 시공간적 분포특성

최광순* · 김세원 · 김동섭 · 오영택 · 허우명¹ · 이윤경 · 박용순²

(한국수자원공사 수자원연구원, ¹강원대학교 건설공학부

²한국수자원공사 시화호환경관리센터)

Temporal and Spatial Distributions of Basic Water Quality in the Upper Regions of Brackish Lake Sihwa with a Limited Water Exchange. Choi, Kwangsoon*, Sea-won Kim, Dong-sup Kim, Youngtaek Oh, Woomyoung Heo¹, Yunkyong Lee and Yongsoon Park² (Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Ansan 426-170; ¹Division of Construction Engineering, Kangwon National University, Samcheok 245-711; ²Sihwa Lake Environmental Management Center, Korea Water Resources Corporation, Ansan 426-170)

Temporal and spatial distributions of salinity, temperature, dissolved oxygen (DO), and turbidity were investigated at seven sites in the upper regions of brackish Lake Sihwa with a limited water exchange, from March to October 2005. During the study period, salinity and temperature varied 0.1~29.9 psu and 4.7~28.1°C, respectively, depending on seasons and sites sampled. A distinct halocline profile showing the maximum density gradient (difference over 20 psu m⁻¹ between surface and bottom layers) was observed during the rainy season, due to the decrease of salinity in surface layers by freshwater inflow. This result implies that rainfall event is the important factor forming the halocline. On the other hand, the depth and location of halocline varied with the amount of seawater through the sluice gates and the operation systems (inflow or outflow). High DO (over 300% saturation) was observed at surface layer above the halocline in April when red tide occurred, whereas low DO (below 20% saturation) was at the bottom layer below the halocline in the rainy season. Turbidity ranged 1.5~86.3 NTU showing the maximum turbidity at the layers above or upper the halocline. As a result, the distributions of DO and turbidity in the upper regions of brackish Lake Sihwa were largely affected by the variation of salinity. Also, when the halocline was formed, the water quality between upper and lower water layers may be expected completely different. This study suggests that the physicochemical characteristics of water in the brackish regions are closely associated with the causes of eutrophication such as red tide and DO deficit.

Key words : Lake Sihwa, brackish water, halocline, water quality, distribution

서 론

기수역은 조석현상에 의한 해수유입과 하천으로부터의

담수유입이 만나는 곳으로 해수와 담수의 복잡한 혼합특성에 의해 시공간적으로 염분변동이 매우 큰 수역이다. 기수역에서의 염분변동은 하구연안의 생물상의 시공간적 변화에도 영향을 줄 뿐만 아니라(Clark, 1977; McLusky

* Corresponding author: Tel: 031) 400-1461, Fax: 031) 400-1465, E-mail: kchoi@kwater.or.kr

and Elliott, 2004) 수질분포와 거동에 직접적인 영향을 주는 요인이 된다(Kondo *et al.*, 1994).

일반적으로 담수나 해양의 경우 수체의 성층현상이 수온차이에 의해 나타나는 반면 기수역에서는 수온뿐만 아니라 염분도의 차이에 의한 염분성층이 강하게 형성되며 수온성층보다 비교적 안정화되어 있다(Horne and Goldman, 1994; McLusky and Elliott, 2004). 기수역에서 형성된 염분성층은 수체의 상하층 또는 상하류간 물질이동을 제한시키고, 염분성층을 경계로 매우 상이한 수질특성을 보인다(Hashitani *et al.*, 1989; Ueda *et al.*, 2000). 이러한 물리화학적 특성을 가지는 기수역에서는 식물플랑크톤의 대량증식 및 침층산소고갈현상 등의 부영양화현상에 의한 수질문제가 빈번히 발생한다(허 등, 1999; Tsutsumi, 2006).

본 연구대상지인 시화호의 기수역은 과거 1994년 1월에 시화방조제가 건설됨에 따라 담수 환경 과정을 겪었다가, 수질악화문제로 1997년 6월부터 배수갑문을 통해 해수유통이 다시 이루어지면서 현재의 기수환경으로 변화되었다. 현재 시화호의 관리수위는 방조제 건설 이후 유역에 새로 형성된 공단 및 신도시의 범람을 고려하여 E.L. -1m로 유지하고 있으며, 배수갑문 조작을 통한 극히 제한적인 물 교환 때문에 과거 자연적인 조수현상에 의해 형성된 기수역의 특성과 다른 양상을 보일 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 시화호의 기수특성에 대한 연구는 해수유통의 시범적 단계인 1997년과 1998년에 배수갑문 운영에 따른 수온, 염분, 용존산소 및 pH의 시공간적 분포 및 수체의 성층현상에 대해 수행되었을 뿐이다(최 등, 2000; 최와 김, 2001). 또한 이들 연구는 시화호에 $200 \sim 500 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ 회}^{-1}$ 규모의 소량의 해수를 유입 시킴에 따른 수질의 공간적 분포에 대한 연구로 해수의 확산범위가 시화호의 중하류에 집중되어 있기 때문에 현재의 해수유통(평균 $1,300 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ 회}^{-1}$)에 의해 형성된 시화호 상류의 기수역에 대한 물리화학적 특성을 설명하기 어렵다.

시화호는 1996년부터 수질개선대책의 시행으로 최근 시화호의 연평균 수질이 COD 4 mg L^{-1} 로 크게 개선되었다(해양수산부, 2006). 그러나 시화호의 상류부 기수역은 아직도 적조현상과 용존산소 고갈현상 등이 빈번히 발생하여 이 구역에 대한 수질개선대책이 더욱 필요한 실정이다(Choi *et al.*, 2007). 본 연구는 해수유통이 제한적인 시화호에서 염분도, 수온, 용존산소 그리고 탁도의 시공간적 분포특성을 파악하여 시화호 상류수역의 수질개선 및 관리에 대한 기초자료로 활용하고자 하였다.

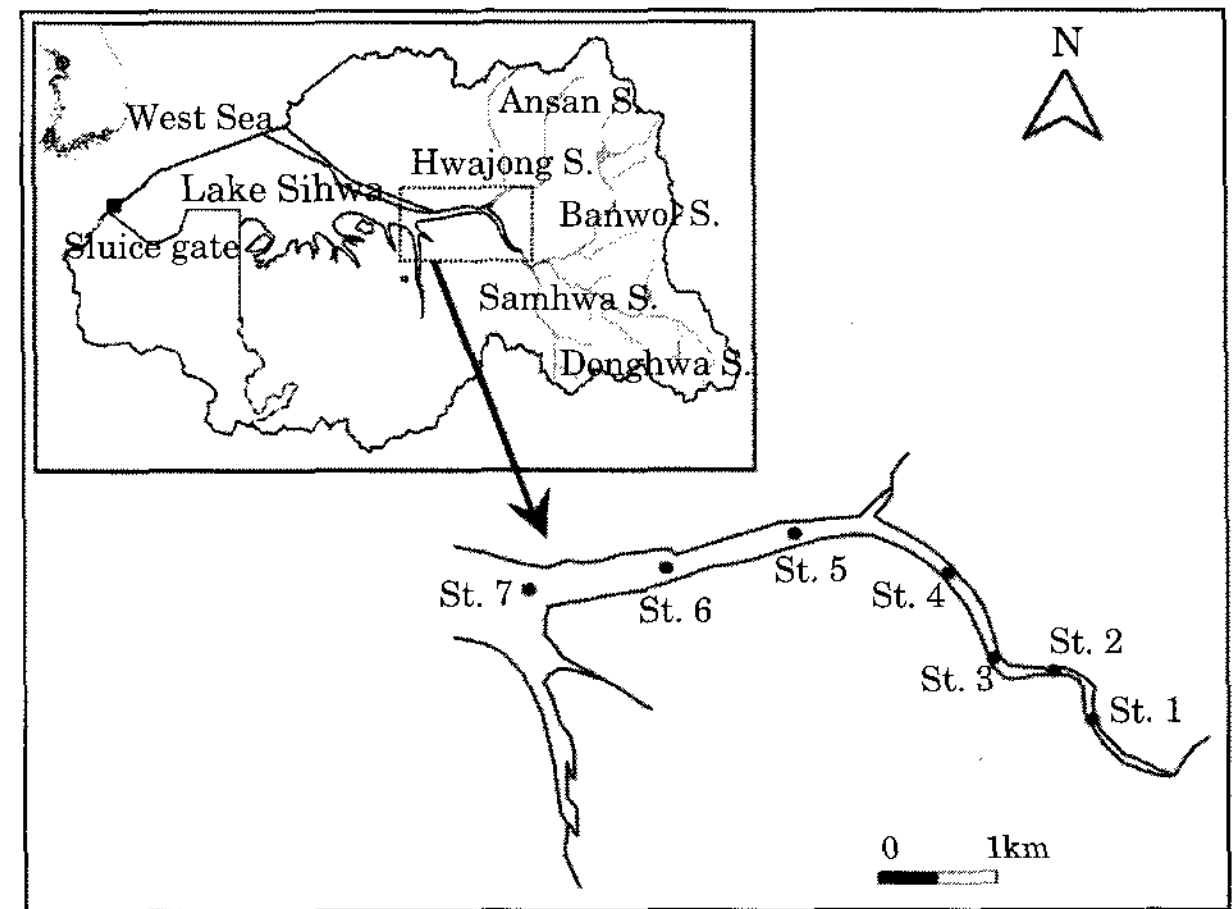


Fig. 1. Map showing the sampling sites in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

시화호는 국토확장과 농업용수 확보를 목적으로 경기도 안산시, 시흥시, 화성시 일대의 서해안에 12.7 km의 방조제가 완공됨에 따라 생성된 인공호수이다(Fig. 1). 시화호의 전체 유역면적은 476.5 km^2 , 수표면적은 47.7 km^2 , 평균수심은 5.8 m, 총 저수량은 $332 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다(김과 고, 2000). 시화호 유역의 최근 10년간(1997~2006년) 연평균 강수량은 1,325 mm(www.kma.go.kr, 2006)이고, 유입하천을 통한 연간 유입수량은 $214 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 으로 총 저수량에 비해 총 유입수량이 적은 편이다(해양수산부, 2005).

시화호의 수리학적 체류시간을 단순히 담수호와 같이 계산(유입하천을 통한 총유입수량/총저수량)하면 1년 이상이 된다. 그러나 시화호의 경우 1997년부터 배수갑문을 통해 해수의 유입(1997년부터 2006년까지 연평균 유입량이 $4,278 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$)과 유출(1997~2006년까지 연평균 유출량이 $4,366 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$)이 있기 때문에, 이를 고려한 수리학적 체류시간은 30일 이하로 짧다.

시화호에서 1997년부터 2006년까지 배수갑문 운영에 따른 호소수의 유출량과 해수의 유입량을 더한 연간 해수유통량은 Fig. 2와 같다. 1997년은 해수유통을 시작한 해로 6월부터 배수갑문을 시범적으로 운영하였기 때문에 유통량이 $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 적었다. 1999년의 해수유통량은 $8.5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 1998년과 2000년에 비해 적었는데 이는 해수유통기간이 3월부터 7월까지 5개월간으로 짧

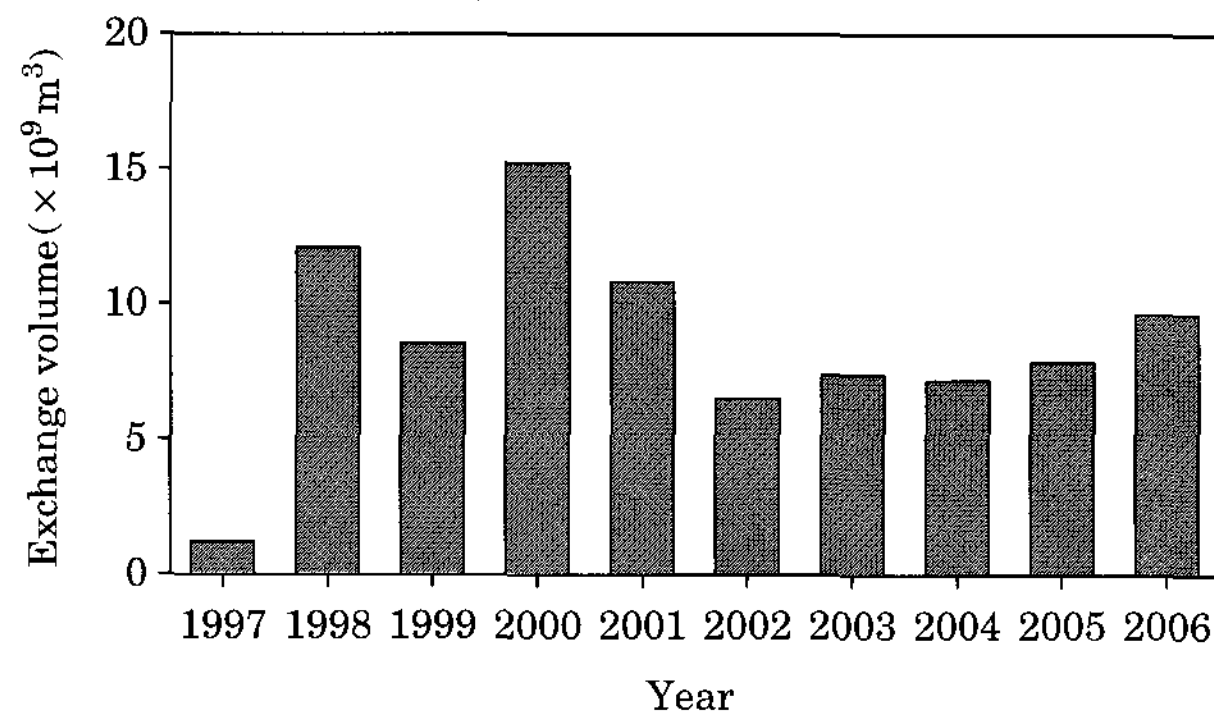


Fig. 2. The annual exchange volume of sea water through the sluice gates in Lake Sihwa from 1997 to 2006.

Table 1. Hydrological conditions at the sampling dates in 2005.

| Sampling dates | Rainfall ¹⁾ (mm) | Seawater exchange volume ²⁾ | |
|----------------|--------------------------------|---|--|
| | | Inflow ($\times 10^6 \text{ m}^3$) | Outflow ($\times 10^6 \text{ m}^3$) |
| Mar. 25 | - | 7.01 | - |
| Apr. 8 | 8.0 | 6.48 | - |
| May 19 | 46.5 | 5.78 | - |
| Jun. 17 | 0.6 | 3.08 | - |
| Jul. 29 | 127.7 | - | 14.19 |
| Aug. 12 | 31.0 | - | 49.72 |
| Sep. 23 | 39.4 | 32.36 | - |
| Oct. 10 | - | - | 36,326 |
| Nov. 3 | - | 32.49 | - |

¹⁾Rainfall is the total amounts of rain fallen 2 days before the sampling.

²⁾Seawater exchange volume is the amount exchanged through the sluice gates just before the sampling.

았기 때문이다. 해수유통량은 2000년에 $15.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 으로 가장 많았고 그 이후로는 배수갑문의 안전운전 및 주변의 공사 등으로 인해 유통량이 줄어들다가 2005년부터 조금씩 증가하여 2006년에는 $9.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 에 달했다.

본 연구의 대상지인 시화호 기수역은 수심이 2m 내외로 매우 낮으며, 담수의 유입은 농촌유역 특성을 보이는 반월천, 동화천 및 삼화천과 안산시 시가지 따라 흐르는 안산천과 화정천을 통해 유입된다(Fig. 1). 이들 하천으로부터 유입되는 연간 총 유량은 $88.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ 으로써 시화호 전체 유역으로부터 유입되는 연간 유량의 약 41.4%를 차지한다(해양수산부, 2005).

2. 수문특성

해수와 담수의 유입은 기수역의 수질분포에 직접적인

영향을 줄 수 있으므로 조사일의 해수유통량과 담수 유입수량(본 연구에서는 강우량으로 표현)에 대한 분석은 매우 중요하다. 본 연구에서 각 조사일의 수문환경 특성은 Table 1과 같다. 강우량은 조사일을 기준으로 선행 2일간 총 강우량을 의미하며, 물 교환량은 선행 배수갑문을 통한 교환량을 말한다. 강우에 의한 담수유입이 있었던 날은 5월 19일, 7월 29일, 8월 12일 및 9월 23일이었다. 그리고 해수유통은 7월 29일, 8월 12일 및 10월 10일에 시화호 내에서 외해로 유출이 있었으며, 나머지 조사일에는 외해에서 시화호 내로 해수가 유입되었다.

3. 조사방법

시화호 내 상류 기수역의 범위는 염분도의 변동이 15 psu 이상으로 큰 지점을 중심으로 7km 구간으로 정하였고, 조사지점은 기수역 내에 7개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 시화호 기수역에서 염분도, 수온, 용존산소(dissolved oxygen, DO), 탁도(turbidity)의 시공간적 분포를 알아보기 위하여 2005년 3월부터 11월까지 다항목수질측정기(YSI 6600-MPS)를 이용하여 각 지점의 표층에서 심층까지 0.5m 간격으로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 수문환경 특성

2005년의 연간 강우량은 인천기상대가 1,155 mm, 수원기상대가 1,427 mm으로 수원지역이 많았고, 두 지역 모두 6월에서 9월에 집중되는 양상을 보였다(Fig. 3). 한편 일일 최대강우량이 두 지역 모두 7월 28일에 인천지역에서 127.5 mm, 수원지역에서 84.5 mm으로 나타났다. 연간강우량과 일일 최대 강우량의 자료로부터 수원지역에 비해 인천지역에서의 연간 강우량 변동이 큰 것으로 나타났다.

시화호의 배수갑문 운영은 1997년부터 2005년 7월 25일까지 관리수위를 E.L. -1.0m로 정하여 하루에 두 번 유입량대비 유출량을 정량적으로 순환시키는 방식으로 실시하였다가, 2005년 7월 26일부터는 관리수위를 E.L. -1.0 ~ -2.0 m의 범위에서 유동적으로 바꾸어 운영하였다. 변경된 배수갑문 운영방법은 초기관리수위 E.L. -1.0 m에서 3일 연속 방류하여 관리수위를 E.L. -2.0 m 범위로 낮춘 후 다시 2일 이내에 초기관리수위인 E.L. -1 m까지 수위를 회복하는 방식이다. 이러한 변경 운영방식은 1회에 시화호 내로 유입시킬 수 있는 해수유통량을 증가

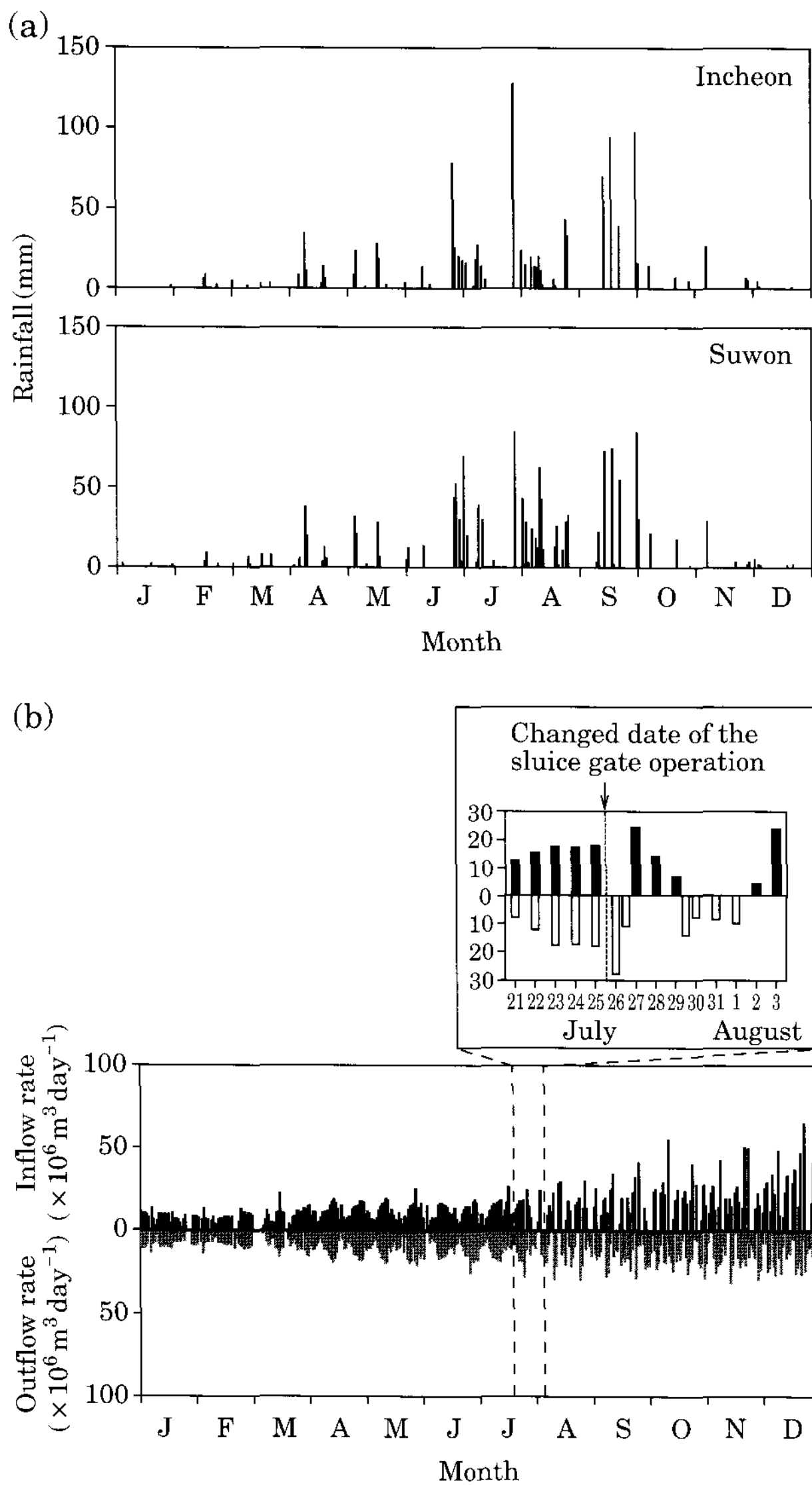


Fig. 3. Rainfall (a) and daily water exchange volume (b) in Lake Sihwa during the study period.

시화호 상류구간의 수질오염문제를 해결하고자 시행하였다. 조사기간 동안 배수갑문 운영 변경 전후의 1일 최대 유입량과 유출량을 비교해 보면, 변경 전에는 최대 유입량과 유출량이 각각 $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과 $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었는데 비해 운영방식 변경 후에는 각각 $79 \times 10^6 \text{ m}^3$ 과 $42 \times 10^6 \text{ m}^3$ 으로 유입량은 3배, 유출량은 1.7배 각각 증가하였다 (Fig. 4).

2. 염분도 분포특성

시화호 기수역의 염분도는 0.1~29.9 psu의 범위로 시공간적으로 매우 변동이 컸다. 염분도의 공간적 분포는

상류에서 하류로 갈수록 높고, 표층이 낮고 심층이 높은 전형적인 기수역의 염분분포를 나타냈다 (Fig. 5a). 이러한 염분도의 공간적 차이는 담수의 유입량이 증가하는 강우시기에 뚜렷한 경향을 보였다. 특히 강우사상과 해수의 유출이 있었던 7월 29일과 8월 12일에 기수역의 중류부인 St. 3과 St. 4의 심층까지 담수가 유입되어 상하 층간은 물론 수평적으로도 15~20의 염분차이를 보이는 강한 성층이 나타났다 (Fig. 5a).

일반적으로 기수역의 염분성층의 형성과 소멸과정에는 바람, 조수, 지하수의 침투, 담수의 유입량 등 그 지역의 기상과 수리수문 특성에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Uncles *et al.*, 1990). Schroeder *et al.* (1990)의 연구에 따르면 담수의 영향을 많이 받는 미국 알라바마 주의 Mobile Bay에서는 강우사상에 의한 담수유입이 성층의 생성과 소멸과정에서 가장 중요한 요인이었고, 바람은 단지 담수의 유입이 적을 경우에만 요인으로 작용한다고 보고하였다. 또한 Tsutsumi (2006)의 보고에 의하면 일본 Isahaya Bay에서 염분성층의 형성원인을 강우시 표층으로의 담수유입과 강우시 이후 태양복사열에 의한 표층의 온도상승이라고 하였다. 기존의 연구로부터 기수역의 염분성층의 생성 및 소멸과정에 있어서 강우사상에 의한 담수의 유입량이 매우 중요한 역할을 하고 있는 것을 알 수 있다. 본 연구 대상지인 시화호의 경우도 강우시 강한 염분성층이 형성되는 것으로 보아 (Fig. 5a) 담수 유입량이 염분성층의 형성과정에 매우 중요한 것으로 판단된다. 그리고 시화호 기수역의 경우는 해수유통량이 제한적이기 때문에 다른 자연적인 기수역에 비해 유역으로부터 유입되는 담수의 영향이 염분성층 형성과 소멸과정에 상대적으로 더 많은 영향을 주며, 이러한 독특한 환경 특성은 수질분포와 거동에 있어서도 자연적인 기수역과 다른 양상을 보일 것으로 예상된다.

한편 강우기 동안 기수역 내 염분성층이 형성되는 범위는 담수유입량보다 배수갑문을 통한 해수의 유입 및 유출 그리고 각각의 유통량에 의해 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 예를 들어 담수의 유입수량이 8월 12일 (강우량 31.0 mm)에 비해 7월 29일 (강우량 127.7 mm)에 더 많았음에도 불구하고 염분성층은 8월 12일에 하류쪽으로 이동하였다 (Fig. 5a). 이는 8월 12일의 유출량 ($49.7 \times 10^6 \text{ m}^3$)이 7월 29일 ($14.1 \times 10^6 \text{ m}^3$)에 비해 3배 이상 많았기 때문으로 염분성층 구간이 해수의 유출에 의해 하류쪽으로 이동하는 것으로 사료된다. 반면 강우량은 8월 12일과 비슷한 9월 23일 (39.4 mm)의 경우는 염분성층 구간이 0.5 m 이내의 표층에 형성되었는데 (Fig. 5a), 이는 9월 23에는 해수가 심층으로 유입 (32.3×10^6

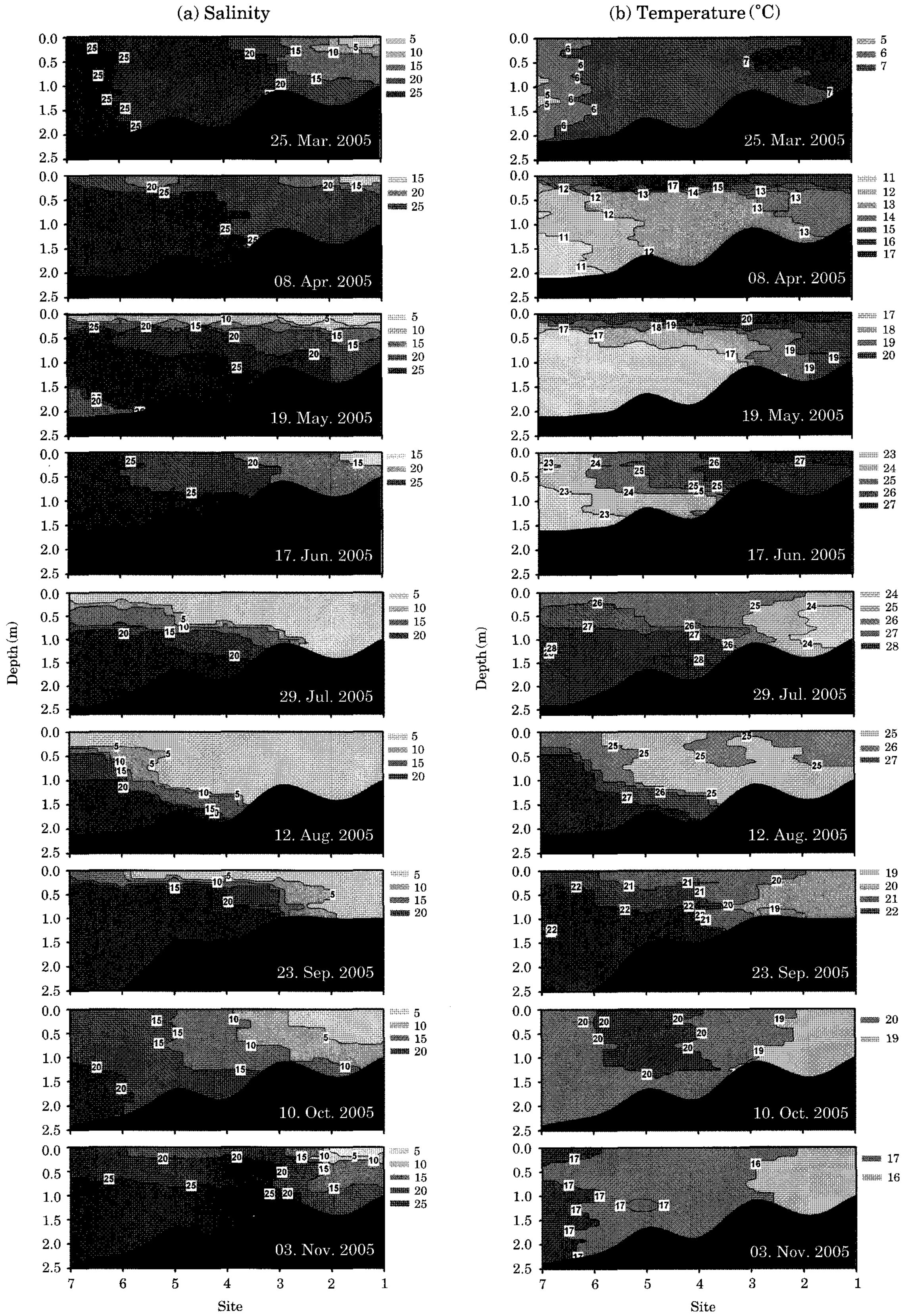


Fig. 4. Temporal and spacial distributions of salinity (a) and temperature (b) in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

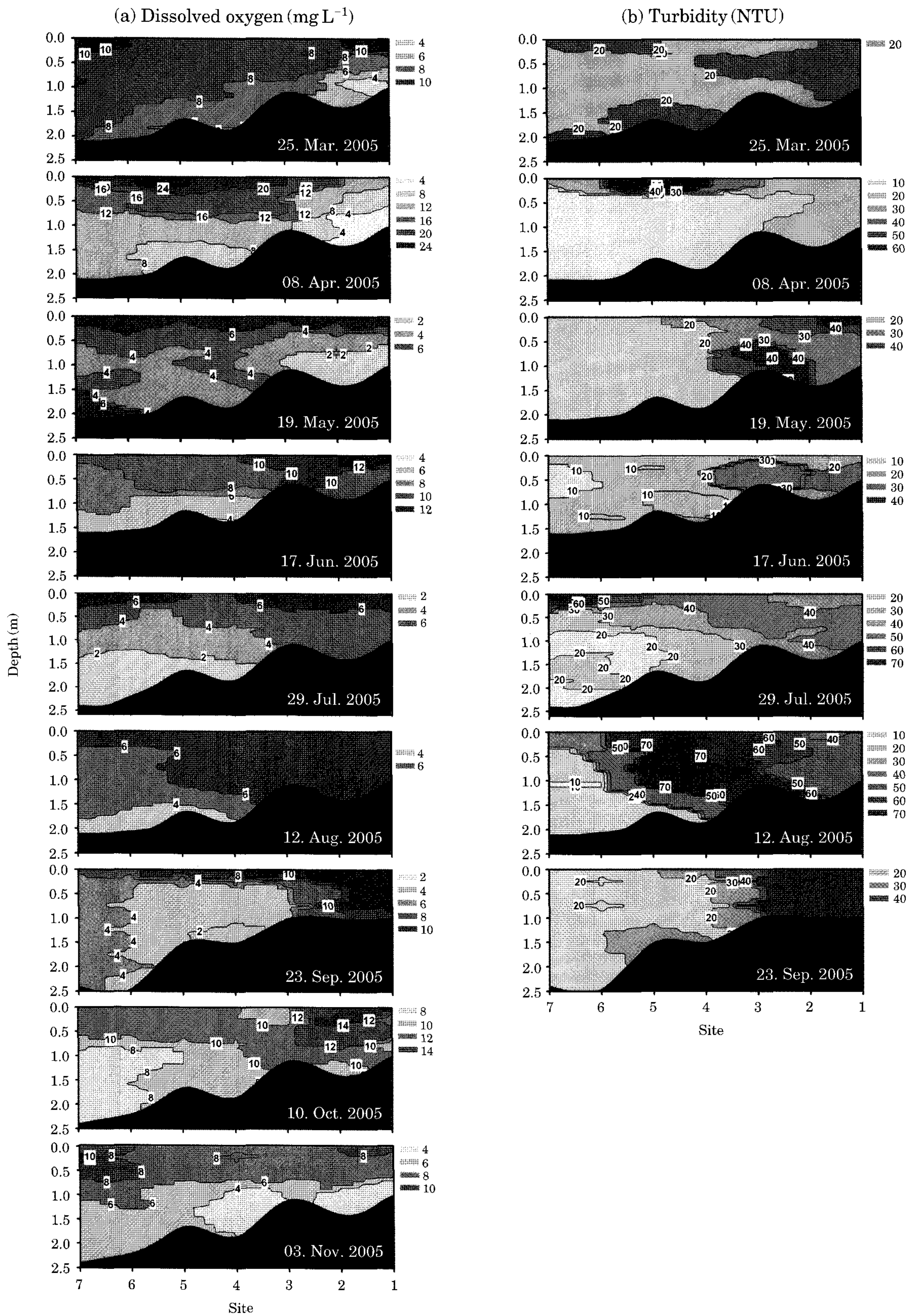


Fig. 5. Temporal and spacial distributions of dissolved oxygen (a) and turbidity (b) in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

m³)되면서 염분약층이 위쪽으로 밀려갔기 때문에 판단된다. 위의 결과로부터 시화호 기수역에서의 염분성층의 형성에는 담수유입이 주된 요인이며, 염분약층이 형성되는 구간은 배수갑문 운영에 의한 해수의 유입 및 유출 여부와 해수유통량에 더 영향을 받는 것으로 사료된다.

기수역에서 염분의 공간적 분포에 의한 수체의 혼합형태는 약혼합, 완혼합, 강혼합의 세 종류로 분류된다(汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会, 2004). 약혼합형에서는 담수와 해수의 혼합이 약하고 밀도가 큰 염수 위를 밀도가 적은 담수가 미끄러지듯이 유하하며 두 수층 사이의 염분구배가 큰 계면이 명확히 나타나는데 이 계면 부근의 층을 염분약층(halocline)이라 부른다. 반면 강혼합형에서는 수직방향으로 충분히 혼합되는 형태로 수직적으로 등염분선이 연직되어 염분구배가 수평방향으로 존재한다. 그리고 완혼합형은 약혼합형과 강혼합형의 중간적인 혼합상태로 염분구배가 수평과 수직의 양방향에 존재한다. 이러한 혼합형태는 특정한 기수역에 특정형이 해당되는 것이 아니고 특정 기수역에서도 장소에 따라서나 시기에 따라 혼합형태가 달라진다. 해수유통이 제한적인 시화호 기수역에서의 혼합형태는 조사시기에 따라 다른 양상을 보였고, 담수유입량에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 비강우시기에는 유역으로부터의 유입 수량이 적기 때문에 상류지점에서의 염분도가 6~10 psu, 하류부는 24~28 psu의 범위로 강혼합 또는 완혼합 형태를 보였다(Fig. 5a). 반면 강우사상이 있었던 시기(7~9월)에는 많은 양의 담수가 표층으로 유입되어 표층의 염분도가 5 psu 이하로 낮아져 심층과의 염분도 구배가 큰 약혼합형의 형태를 보였다(Fig. 5b).

3. 수온 분포특성

조사기간 동안 기수역의 수온은 4.7~28.1°C의 범위로 3월에서 4월로 접어들면서 표층의 수온이 5~8°C에서 13~18°C까지 급격히 상승하였고, 여름인 7, 8월에 최고치를 보이다가 가을로 갈수록 하강하는 전형적인 온대성 지역의 온도분포를 보였다(Fig. 5b).

지점별 표층의 수온분포는 봄에서 여름으로 갈수록 상류지점의 수온이 하류지점보다 높고, 반대로 가을부터 겨울로 갈수록 상류지점의 수온이 하류지점보다 낮았다(Fig. 5b). 이는 일반적인 하천과 호수에서도 나타나는 현상으로 상·하류간 수체의 크기와 주변의 기온과의 관계로 해석될 수 있다(Wetzel, 2001). 즉 하류지점에 비해 상류지점의 수체용량이 적고 수심이 낮기 때문에 대기의 온도변화에 의해 쉽게 수온이 바뀌게 되기 때문이다.

한편 수심별 수온분포는 표층수온이 상승하는 4월부터 상·하류간 수온차이를 보이기 시작하였고, 중류지점인 St. 3~St. 6의 표층 0.5 m 이내에서 4°C 이상의 수온차이를 보이는 강한 수온약층이 형성되었다(Fig. 5b). 그리고 기수역의 수심별 수온차이는 배수갑문에 의한 해수 유입과 강우시기의 담수유입에 의해 상이한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 전반적으로 표층의 수온이 심층보다 높은 수온분포를 보였지만, 강우 시기인 7월 29일과 8월 12일에는 심층보다 표층의 수온이 낮은 경향을 보였다(Fig. 5b). 일반적으로 내륙에 있는 호수에서 물의 밀도에 영향을 주는 주된 요인은 수온으로, 수온이 높으면 반대로 밀도가 작고 가볍기 때문에 표층의 수온이 높고 심층의 수온이 낮은 수심 분포를 보인다(Horne and Goldman, 1994). 그리고 강우시 호수로 유입되는 탁한 물은 본류보다 수온이 낮고 밀도가 큰 입자성 물질을 함유하기 때문에 대부분 호수의 표층보다 아래쪽으로 유입된다(Thornton *et al.*, 1990). 그러나 본 연구대상지인 기수역에서는 강우시 유입된 탁한 물이 시화호의 수체보다 수온이 낮음에도 불구하고 시화호의 표층을 따라 유입되는 현상을 보였다(Fig. 5b). 이러한 현상은 담수와 해수가 만나는 기수역에서 일반적인 현상으로 물의 밀도가 수온보다는 염분도에 더 많은 영향을 받는다는 것을 시사한다.

4. DO 분포특성

조사기간 동안 시화호 기수역에서의 DO농도는 0.5~26.5 mg L⁻¹ (포화도 1.6~315.4%)의 범위로 시공간적으로 매우 큰 변동을 보였다(Fig. 6a). 기수역 내 표층의 DO분포를 보면 3월에 약 8~10 mg L⁻¹로 상하류간 차이를 보이지 않다가, 수온이 급격히 상승하는 4월에 12~26.5 mg L⁻¹으로 증가하였으며 상류에 비해 중하류부에서 높은 분포를 나타냈다. 특히 표층부에 염분약층이 강하게 형성된 St. 5와 St. 6 사이에서 최대값을 보였다. Choi *et al.* (2007)은 시화호 기수역에서는 매년 이 시기에 와편모조류인 *Heterocapsa triquetra*의 대량증식에 의한 적조현상이 나타난다고 보고하였다. Ueda *et al.* (2000)은 일본의 기수호인 Lake Obuchi에서 표층의 DO 과포화현상이 식물플랑크톤의 광합성활동에 기인한다고 보고하였다. 이러한 기존의 연구결과는 시화호 기수역에서 봄철 표층의 DO 과포화 현상이 와편모조류의 대량증식의 결과라는 것을 뒷받침해 준다. 전반적으로 표층의 DO농도는 강우사상이 있었던 5월, 7월, 8월, 9월에 낮은 값을 보였고, 상·하류간 차이를 보이지 않았다(Fig. 6a). 이는 강우시기에 DO농도가 낮은 담수가 표층을 따라 하류로

유입되었음을 시사한다.

한편 심층의 DO분포는 염분약층이 형성되는 지점에서 낮은 값을 보였고, 기온이 상승하는 여름으로 갈수록 뚜렷한 양상을 보였다(Fig. 6a). 염분도 분포에서 알 수 있듯이 염분약층이 뚜렷이 형성되는 강우시기에 염분약층의 하부층에서 DO농도가 2 mg L^{-1} 이하로 낮았으며, 특히 수온이 가장 높았던 7월에 저산소층이 넓게 분포하였다(Figs. 5a, 6a). Tsutsumi (2006)에 의하면 일본 Isahaya Bay표층의 적조현상과 심층의 산소고갈현상은 강우기 담수유입에 의한 표층의 염분도 감소에 의한 염분성층에 그 원인이 있다고 하였다. 본 연구에서 기수역내 상·하층간 DO농도의 차이와 수온 및 염분도의 차와 상관관계를 알아 본 결과, DO농도의 차와 염분도의 차 사이에서의 상관계수(r)가 0.50 그리고 DO농도의 차와 수온의 차 사이에서의 r 값은 0.55로 모두 양의 상관을 보였으며 비슷한 r 값을 보였다(Fig. 6). 위의 결과로부터 시화호의 기수역에서 상·하층간 DO분포는 염분과 수온의 복합적인 시공간적 변동에 의해 영향을 받는 것으로 사료된다.

일반적으로 호수생태계에서 DO농도에 영향을 주는 요인으로는 1차생산자인 식물플랑크톤의 광합성에 의한 산소공급과 미생물에 의한 유기물분해에 의한 소비에 의해 영향을 받는다(Horne and Goldman, 1994). 그러나 과도한 식물플랑크톤의 대량증식은 수체의 유기물의 증가를 가져오고, 심층의 산소결핍은 혐기성가스를 발생시켜 수질문제를 가져올 뿐만 아니라 저서생태계에도 치명적인 영향을 줄 수 있다(Diaz and Rosenberg, 1995; Ueda *et al.*, 2000; Wetzel, 2001). 본 연구에서도 기수역 일부 지

역의 표층에서는 식물플랑크톤의 대량증식에 의해 과포화현상이 나타나는 반면 심층에서는 산소공급의 차단 및 미생물에 의한 유기물분해에 의한 산소고갈현상이 일어나는 등 부영양호에서 나타나는 증세를 보이고 있다. 그리고 시화호 기수역의 부영양화의 주요 원인은 기수역의 물리화학적 특성에 의한 수체의 정체현상으로 사료된다. 그러므로 기수역의 수질문제를 해석하는 데 있어서 수온 및 염분도 분포에 따른 물의 혼합특성을 이해하는 것이 매우 중요하다.

5. 탁도 분포특성

시화호 기수역 내의 탁도는 $1.5 \sim 86.3 \text{ NTU}$ 의 범위로 다른 염분도, 수온, DO의 분포와 마찬가지로 시공간적으로 매우 변동이 컸다(Fig. 6b). 전반적으로 하류에 비해 중류와 상류지점에서 높은 값을 보였고, 염분도의 구배가 큰 염분약층 구간에서 높은 경향을 보였다. 계절적으로는 3월에 20 NTU 이하로 균일한 공간분포를 보이다가 4월에 St. 4~St. 6의 표층(수심 30 cm 이내)에서 $30 \sim 50 \text{ NTU}$ 의 고탁수층이 형성되었다. 한편 강우시기에는 염분약층을 경계로 뚜렷한 탁도 차이를 보였고, 하류로 갈수록 표층에서 높은 분포를 보였다(Fig. 6b).

기수역에서 물의 탁도는 해수와 담수에 포함된 부유물질의 양, 수체의 혼합정도, 그리고 부유물질의 침전속도에 의해 결정된다(McLusky and Elliot, 2004). 그리고 기수역에서의 고탁도는 대부분 담수와 해수가 만나 염분성층이 형성되는 중류부와 상류부에서 발생하는데, 이는 염

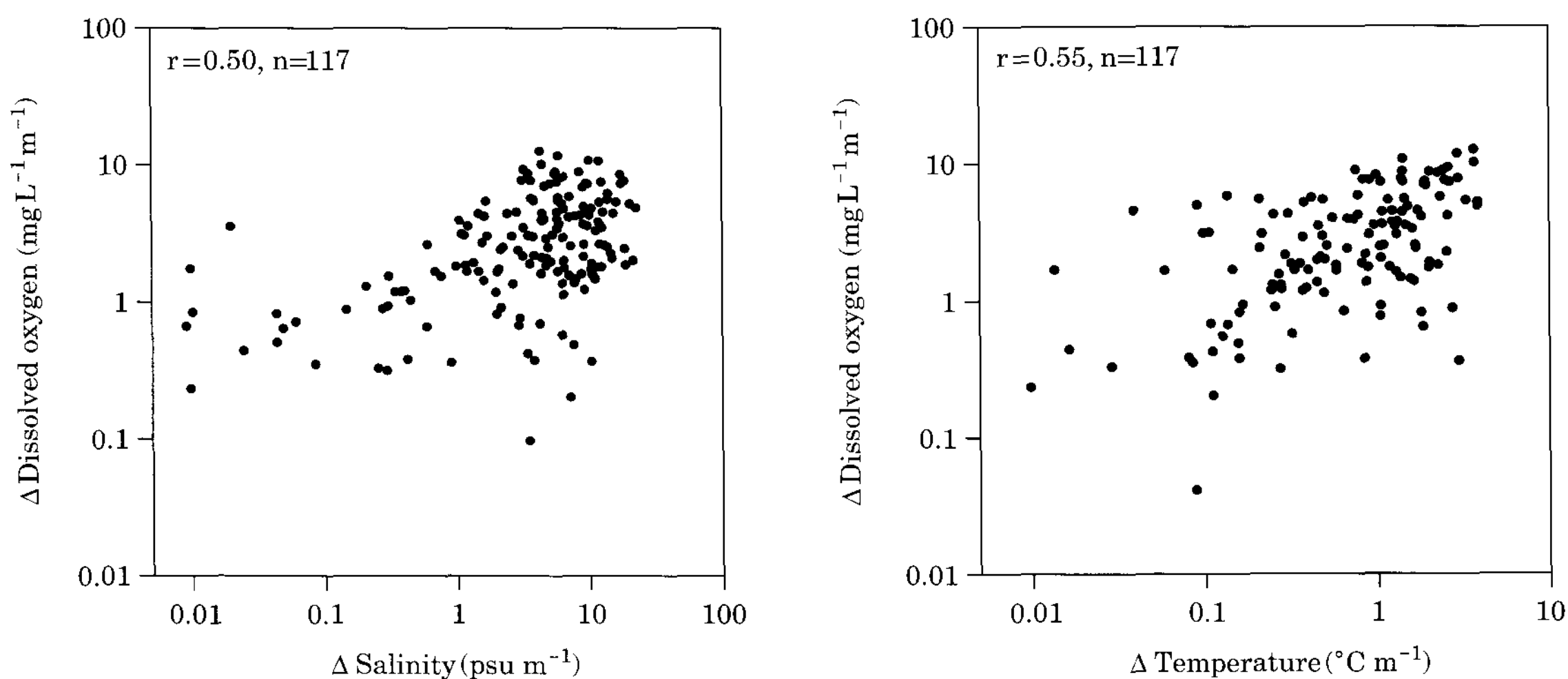


Fig. 6. Relationships of dissolved oxygen to salinity and temperature in the upper regions of brackish Lake Sihwa. The symbol of “Δ” means the difference of values per unit meter between surface and bottom at sampling sites.

분성층의 경계면에서 유속이 현저히 떨어지고 담수와 해수의 혼합에 의한 응집침전이 일어나기 때문이다. 또한 기수역에서의 정체현상은 식물플랑크톤의 증식을 가져올 수 있는 환경을 제공하기 때문에 일시적으로 표층의 고탁도층이 형성될 수 있다. 따라서 본 연구에서 4월 표층에서의 고탁도 현상(Fig. 6b)은 DO와 마찬가지로 식물플랑크톤의 대량증식에 기인된 것으로 사료된다. 그리고 강우시기에 표층에서 높은 탁도를 보였는데, 이는 강우시 유입된 탁수가 해수보다 밀도가 작기 때문에 표층을 따라 하류로 유입되었기 때문으로 판단된다. 일반적으로 강우시 발생한 탁수가 대상 수체로 유입될 경우 같은 밀도층을 따라 유입되는데, 대부분의 댐저수지에서는 고탁도 유입수가 수체의 중층을 따라 유입되어 중층에 고탁도층이 형성되는 반면 기수역에서는 밀도가 높은 해수와 만나게 되어 표층으로 유입된다(Thornton *et al.*, 1990; McLusky and Elliott, 2004). 즉 이러한 현상은 강우시 수온분포에서도 알 수 있듯이 기수역에서는 물의 밀도가 수온보다는 염분도에 더 많은 영향을 받는다는 사실을 입증해 준다. 수중태계에서의 탁도는 입자성 오염물질의 양과 밀접한 관계가 있으므로 염분성층에 의한 고탁수층 형성이 빈번히 발생하는 시화호 기수역에서는 입자형태의 오염물질이 수질오염의 미치는 영향이 클 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 방조제 조성 이후 물 교환이 제한적인 시화호의 기수역에서 염분도, 수온, DO, 탁도의 시공간적 분포특성을 분석하여 기수역의 수질오염 원인을 해석하고 개선방안을 수립하기 위한 기초자료를 활용하고자 하였다. 시화호 기수역에서 염분도는 0.1~29.9 psu 그리고 수온은 4.7~28.1°C의 범위로 변동이 매우 컸으며, 담수유입량과 해수의 유입/유출 여부 및 유통량에 의해 영향을 받은 것으로 나타났다. 그리고 기수역 내 염분약층의 형성과정에는 담수유입이 주된 요인인 반면, 염분약층이 형성되는 구간은 배수갑문을 통한 해수의 유입 및 유출여부와 유통량에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 기수역에서 수온과 염분도의 시공간적 분포는 DO농도와 탁도 분포에 영향을 미치는 것으로 나타났다. DO는 수온이 상승하는 4월에 기수역 중류부의 표층에서 최대 26.5 mg L⁻¹(포화도 315%)의 농도를 보였는데, 이는 이 시기 대량 증식한 식물플랑크톤의 광합성에 의한 것으로 사료된다. 반면, 염분약층이 강하게 형성된 지점의 심층에서는

저산소층이 형성되었고, 여름으로 갈수록 확대되어 수온이 가장 높았던 7월에 가장 넓게 형성되는 것으로 나타났다. 한편 탁도는 1.5~86.3 NTU의 범위로 하류에 비해 중류와 상류부에서 높은 값을 보였고, 염분약층이 형성된 구간에서 높은 경향을 보였다. 본 연구로부터 담수와 해수가 공존하는 시화호 상류 기수역에서 염분도 차이에 의해 형성되는 염분약층은 수체의 공간적인 혼합을 제한시키는 결과를 가져오고, 결국 심층의 산소고갈, 퇴적물의 증가, 식물플랑크톤의 대량증식에 의한 수체의 유기물 증가 등의 수질문제를 유발시킬 수 있는 원인으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 “시화호 수질개선을 위한 기초조사 및 연구(2006)”의 일환으로 수행되었습니다. 시료채취와 분석에 도움을 주신 한국수자원공사 연구원들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김동섭, 고석구. 2000. 시화호의 수환경 진단과 수질회복 평가. 한국수자원학회지 33(5): 551-559.
- 최정훈, 김계영, 홍대벽. 2000. 배수갑문 운용에 따른 시화호의 수온과 염분 변화. 한국지구과학회지 21(5): 541-552.
- 최정훈, 김미옥. 2001. 시화호 배수갑문 운용에 따른 용존산소와 pH 변화. 한국지구과학회지 22(3): 195-207.
- 해양수산부. 2005. 시화호 해양환경개선 연구용역. 해양수산부.
- 해양수산부. 2006. 시화호 해양환경개선 연구용역. 해양수산부.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해한 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 32(2): 141-151.
- 汽水域の河川環境の捉え方に関する検討会. 2004. 汽水域の河川環境の捉え方に関する手引書.
- Choi, K., S.W. Kim, Y.T. Oh and D.S. Kim. 2007. Distribution and origin of organic matter in the brackish region of Lake Sihwa, Korea. Proceeding of the 13th International Symposium of River and Environment (Jeju, Korea). The Korean Society of Limnology and the Korean Association of Biological Science.
- Clark, J. 1977. Coastal Ecosystem. Ecological Consideration for Management of Coastal Zone. John Wiley & Sons, New York.
- Diaz, R.J. and R. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar.*

- Ann. Biol. Ann Rev.* **33**: 245-303.
- Hashitani, H., M. Okumura, K. Kondo, Y. Seike and T. Kimura. 1989. Variation of overlying water quality in the brackish Lake Shinji. *Saninchiikikenkyu* **5**: 75-88 (in Japanese).
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill College.
- Kondo, K., Y. Seike and H. Hashitani. 1994. The role of halocline on the control of vertical distribution of nutrients and phytoplankton in brackish lake Nakanoumi. *Jpn. J. Limnol.* **55**: 47-60.
- McLusky, D.S. and M. Elliott. 2004. *The Estuarine Ecosystem Ecology, Threats, and Management*. Oxford University Press.
- Schroeder, W.W., S.P. Dinnel and W.J.W. Wiseman. 1990. Salinity stratification in a river-dominated estuary. *Estuaries* **13**(2): 145-154.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Tsutsumi, H. 2006. Critical events in the Ariake Bay ecosystem: Clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water. *Plankton Bethos Res.* **1**(1): 3-25.
- Ueda, N., H. Tsutsumi, M. Yamada, K. Hanamoto and S. Montani. 2000. Impact of oxygen-deficient water on the macrobenthic animals in the innermost areas of Dokai Bay and on the mud flats adjacent to the bay, in Kitakyushu, Japan. *Mar. Pollut. Bull.* **40**: 906-913.
- Uncles, R.J., J.E. Ong and W.K. Gong. 1990. Observations and analysis of a stratification-destratification event in a tropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **31**: 651-665.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology*. 3th ed., Academic Press, New York.
- www.kma.go.kr. 2006.
- (Manuscript received 18 April 2008,
Revision accepted 29 May 2008)