

물 교환이 제한적인 시화호 상류 기수역의 부영양화

최광순* · 김세원 · 김동섭 · 허우명¹ · 이윤경
황인서 · 이한진²

(한국수자원공사 수자원연구원, ¹강원대학교 건설공학부,
²한국수자원공사 시화호환경관리센터)

Eutrophication in the Upper Regions of Brackish Lake Sihwa with a Limited Water Exchange. Choi, Kwangsoon*, Sea-won Kim, Dong-sup Kim, Woomyoung Heo¹, Yunkyoung Lee, In-Seo Hwang and Han-Jin Lee² (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)

To understand eutrophication in the upper regions of brackish Lake Sihwa with a limited water exchange, temporal and spatial distributions of pollutants in water and sediment were investigated from March to October in 2005 and 2006. Also, pollution levels of water and sediment were estimated by trophic state index (TSI) and sediment quality guideline (SQG). Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), organic matter (COD), and chlorophyll *a* (Chl-*a*) concentrations in the surface waters were largely varied temporally and spatially, and the variations were highest in the middle areas where strong halocline was formed. Chl-*a* concentrations in the middle area were very high in April ($>900 \mu\text{g L}^{-1}$) when algal blooms (red tides) occurred. The relationships between TN and Chl-*a* ($r=0.31$), and TP and Chl-*a* ($r=0.65$) indicated that the algal growth was primarily affected by phosphorus rather than nitrogen. The distribution of COD was similar to that of Chl-*a*, indicating that the autochthonous organic matters may be a more important carbon source, especially in the middle areas. The brackish water regions were classified as eutrophic or hypertrophic based on their TSI values (69~76). In addition, the content of nutrients (especially TP) in surface sediments were classified as severe polluted state, except the upper areas. Major causes of the eutrophication observed were probably due to high nutrients loading from watersheds, the phosphorus release from anaerobic sediment, and long retention time by the limited water exchange through the sluice gates.

Key words : brackish Lake Sihwa, eutrophication, TSI, halocline

서론

시화호는 국토확장과 농업용수 확보를 목적으로 경기

도 서해안 일대에 12.7 km의 시화방조제 건설이후 담수화된 이래 유역으로부터 하·폐수의 유입과 수체의 정체 현상은 식물플랑크톤의 대량발생, 심층의 무산소층 형성, 저서생태계의 교란을 가져왔다(한국수자원공사, 1996; 최

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

등, 1997; 박 등, 1997; 한국해양연구소, 1997, 1998; 허와 오, 1997; 김과 고, 2000; 신 등, 2000). 이에 따라 정부에서는 1996년 시화호의 수질개선을 위해 해수유통방안, 환경기초시설의 증설, 인공습지 조성 등을 포함한 시화호 수질개선종합대책을 수립하여 시행하였고, 그 결과 2005년 시화호의 수질은 호소 COD 기준 3등급으로 개선되었다(해양수산부, 2006). 그러나 담수와 해수가 상시 공존하는 시화호 상류 일부 구역에서는 적조현상과 악취발생 등 수질문제가 빈번히 발생하고 있어(Choi *et al.*, 2007), 이 구역에 대한 수질오염 원인과 대책에 관한 체계적인 기초조사가 필요한 실정이다.

일반적으로 해수와 담수가 만나는 기수역(汽水域)에서는 상하층간 염분도의 차이에 의한 염분성층이 쉽게 발생하여 수체의 혼합이 제한되는 환경특성을 가지고 있기 때문에 상류에서 유입된 오염물질이 쉽게 퇴적되고, 물의 정체에 의해 조류의 대량증식현상과 유기퇴적토의 분해에 의한 용존산소의 고갈현상이 쉽게 나타난다(Gray *et al.*, 2002; McLusky and Elliott, 2004). 이러한 이유로 미국, 일본 등 선진국에서는 기수역의 부영양화 문제를 하천수질관리의 중요한 과제로 인식하여 기수역에 대한 환경조사지침서를 제작하고, 수질개선기법을 개발하는 연구를 하고 있다(Kramer *et al.*, 1994; Kennish, 2000; Orive *et al.*, 2002; 汽水域の河川環境の捉え方に関する検討會, 2004).

현재의 시화호 상류부의 기수역은 시화방조제에 설치된 배수갑문을 통한 해수유통이 1997년부터 이루어지면서 생성되었으며, 시화호 내측의 수위를 E.L. -1m로 유지하고 있기 때문에 해수유통량이 극히 제한적으로 과거 자연적인 조수현상에 의해 형성된 기수역의 특성과 다른 양상을 보일 것으로 사료된다. 본 연구에서는 해수유통이 제한적인 시화호 기수역에서 수질과 퇴적물의 시공간적 분포 및 오염도를 평가하고, 기수역의 부영양화 원인을 분석하고자 하였다. 본 연구의 결과는 시화호 상류 기수역의 수질개선에 대한 기초자료로 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

시화호는 경기도 안산시, 시흥시, 화성시 일대의 서해안에 12.7km의 방조제가 완공됨에 따라 생성된 인공 호수로 유역면적은 476.5 km², 수표면적은 47.7 km², 평균 수심은 5.8 m, 총 저수량은 332 × 10⁶ m³이다(Fig. 1). 시

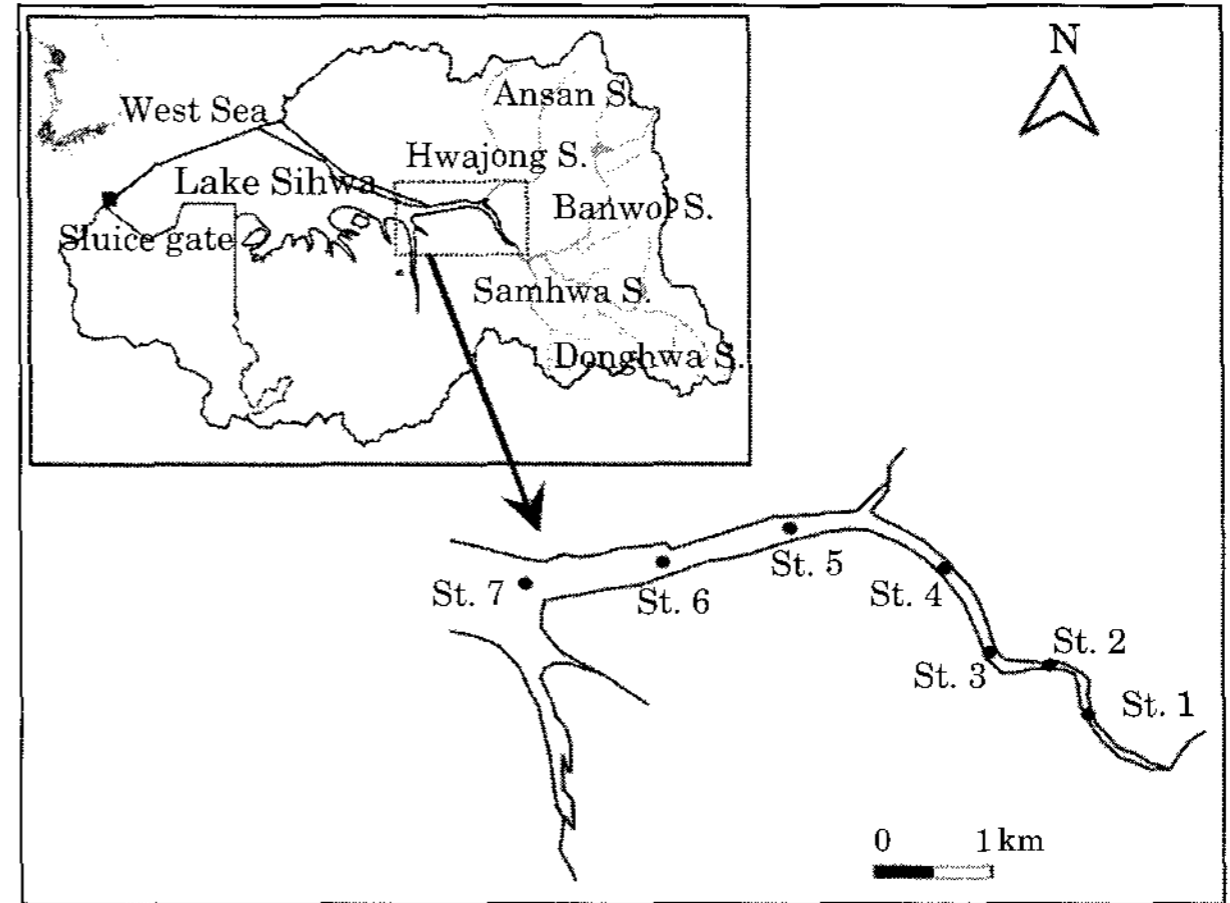


Fig. 1. Map showing the sampling sites in the upper regions of brackish Lake Sihwa.

화호 유역의 유입하천을 통한 연간 유입수량은 214×10^6 m³ yr⁻¹으로 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 시화호는 1997년부터 배수갑문을 통한 해수와 담수의 유통이 있기 때문에 이를 고려한 수리학적 체류시간은 15일 이하로 짧아진다(1997~2006년까지 연평균 물교환량, 8.6×10^9 m³ yr⁻¹). 시화호에서 배수갑문 운영을 통한 호소수의 유출량과 해수의 유입량을 더한 물교환량은 배수갑문의 운영 연도에 따라 차이를 보였다(Fig. 2a). 1997년에는 해수유통을 시작한 해로 배수갑문을 6월부터 시범적으로 운영하였기 때문에 1.2×10^9 m³으로 적었고, 1999년에는 배수갑문 운영기간이 3월부터 7월까지 5개월간으로 짧았기 때문에 물교환량이 8.5×10^9 m³으로 1998년과 2000년에 비해 적었다. 시화호의 물교환량은 2000년에는 15.2×10^9 m³으로 가장 많았고, 그 이후로는 배수갑문의 안전운전 및 주변의 공사 등으로 인해 유통량이 줄어들다가 2005년부터 조금씩 증가하여 2006년에는 9.6×10^9 m³에 달했다.

본 연구의 대상지인 시화호 상류 기수역은 수심이 2m 내외로 매우 낮으며, 담수의 유입은 농촌유역 특성을 보이는 반월천, 동화천, 삼화천과 안산시 시가지 따라 흐르는 안산천과 화정천을 통해 유입된다(Fig. 1). 그리고 위 5개 하천으로 유입되는 연간 총 유입수량은 88.6×10^6 m³ yr⁻¹으로 시화호 전체 유역으로부터 유입되는 연간 유입수량의 약 41.4%를 차지한다(해양수산부, 2005).

시화호 유역의 최근 10년간 연평균 강수량은 1,325

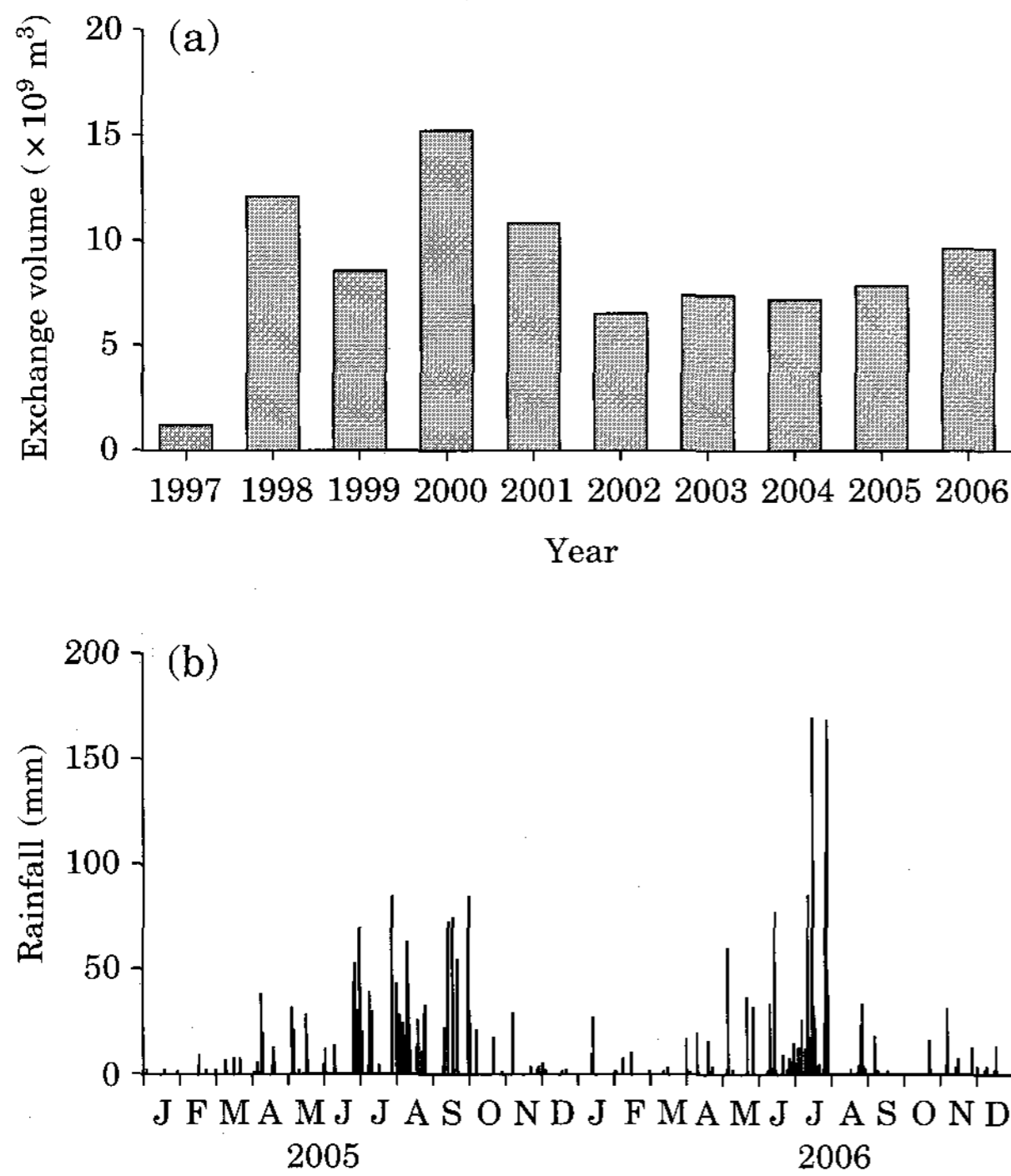


Fig. 2. The annual exchange volume of water through the sluice gates (a) and rainfall (b) in Lake Sihwa from 1997 to 2006.

mm였고 (www.kma.go.kr, 2006), 조사기간인 2005년과 2006년의 연간 강우량은 각각 1,427.6 mm과 1,362 mm로 2005년에 더 많은 것으로 나타났다. 연간 강우패턴을 보면 2005년에는 6월에서 9월에 집중된 반면 2006년에는 5월부터 7월에 집중되는 양상을 보였다(Fig. 2b). 또한 2005년에는 9월에 약 300 mm(하루 최대강우량 약 100 mm)을 보인 반면 2006년에는 7월에 약 760 mm(하루 최대강우량 약 200 mm)으로 2005년에 비해 2배 이상 큰 강우강도를 보였다.

2. 조사방법

본 연구에서는 시화호내 염분도의 변동이 큰 상류부의 7 km 구간을 기수역의 범위로 정하였고, 기수역내에 7개 지점을 선정하여 수질 및 퇴적물을 조사하였다(Fig. 1). 수질조사는 각 조사지점의 표층을 대상으로 2005년부터 2006년까지 3월부터 11월에 걸쳐 총 26회 실시하였다. 조사 첫 해인 2005년에는 기수역의 수질환경을 보다 정밀하게 조사하기 위하여 월 2회 실시하였고, 2006년에는 월 1회 실시하였다.

기수역의 수질조사는 각 지점의 표층수를 채취하여 영양염류(인, 질소), 유기물, 엽록소 *a* (chlorophyll-*a*; Chl-*a*)

항목을 분석하였다. 투명도는 지름 30 cm의 투명도판(Secchi disc)을 사용하여 현장에서 측정하였다. 퇴적물조사는 수질과 동일한 지점에서 2005년 3월, 5월, 8월, 11월, 2006년 3월, 8월, 12월에 총 7회 수행하였으며, 시료는 Van der grab sampler를 이용하여 표층 20 cm까지 채취 후 공기와의 접촉을 최소화시키고 실험실로 옮긴 후 분석하였다. 채취한 퇴적물은 입도분포, 영양염류, 유기물을 조사하였다.

3. 수질분석

채수한 시료는 GF/C 필터로 여과한 후 필터는 냉동보존한 후 엽록소 *a* (Chl-*a*) 분석에 사용하였다. 여과한 여과액은 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아성질소($\text{NH}_3\text{-N}$), 용존무기인(dissolved inorganic phosphorus: DIP), 총용존인(Total dissolved phosphorus: TDP) 분석에 사용하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 카드뮴환원법, $\text{NH}_3\text{-N}$ 는 automated phenate법, DIP와 TDP는 ascorbic acid법을 이용하여 수질자동분석기(Auto Analyzer3, Bran+Luebbe)로 분석하였다(APHA, 2001). 총인(TP)과 총질소(TN)은 여과하지 않은 시료를 사용하여 persulfate digestion 후 TP는 ascorbic acid법, TN은 카드뮴환원법을 이용하여 수질자동분석기로 분석하였다(APHA, 2001). 유기물양은 화학적산소요구량(chemical oxygen demand: COD)로 나타냈으며, COD 분석은 과망간산칼륨법으로 분석하였다(환경부, 1999). 시화호 기수역의 부영양화 정도는 TN, TP, Chl-*a* 농도에 의한 분류방법과 부영양화지수(Trophic State Index: TSI)를 이용하여 평가하였다.

4. 퇴적물분석

퇴적물분석은 해양오염공정시험법(해양수산부, 2002)에 준하여 수행하였으며, 이 방법에 포함되어 있지 않은 항목은 Standard Methods(APHA, 2001)를 이용하였다. 입도분석은 시료를 H_2O_2 로 전처리 후 Master size (Malvern, UK)로 분석하고, 입자구분은 국제토양학회 분류기준인 점토(Clay, <0.002 mm), 실트(Silt, 0.02~0.002 mm), 모래(Sand, 2.0~0.02 mm)를 따랐다. 퇴적물내 TN은 시료 1 g을 킬달플라스크에 넣고 증류수를 주입하여 100 mL로 만든 후 Standard Methods에 준하여 실시하였다. TP는 건조시킨 시료 50 mg을 증류수 50 mL에 넣고, H_2SO_4 1 mL과 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 0.4 g을 첨가한 후 전열기에서 10 mL 정도 될 때까지 가열한 후, 실온에서 냉각시킨 후 다시 증류수를 가해서 50 mL로 한 후 필터로 여과하고 phenolphthalein 한 방울을 첨가 후 pH 7.5 정도

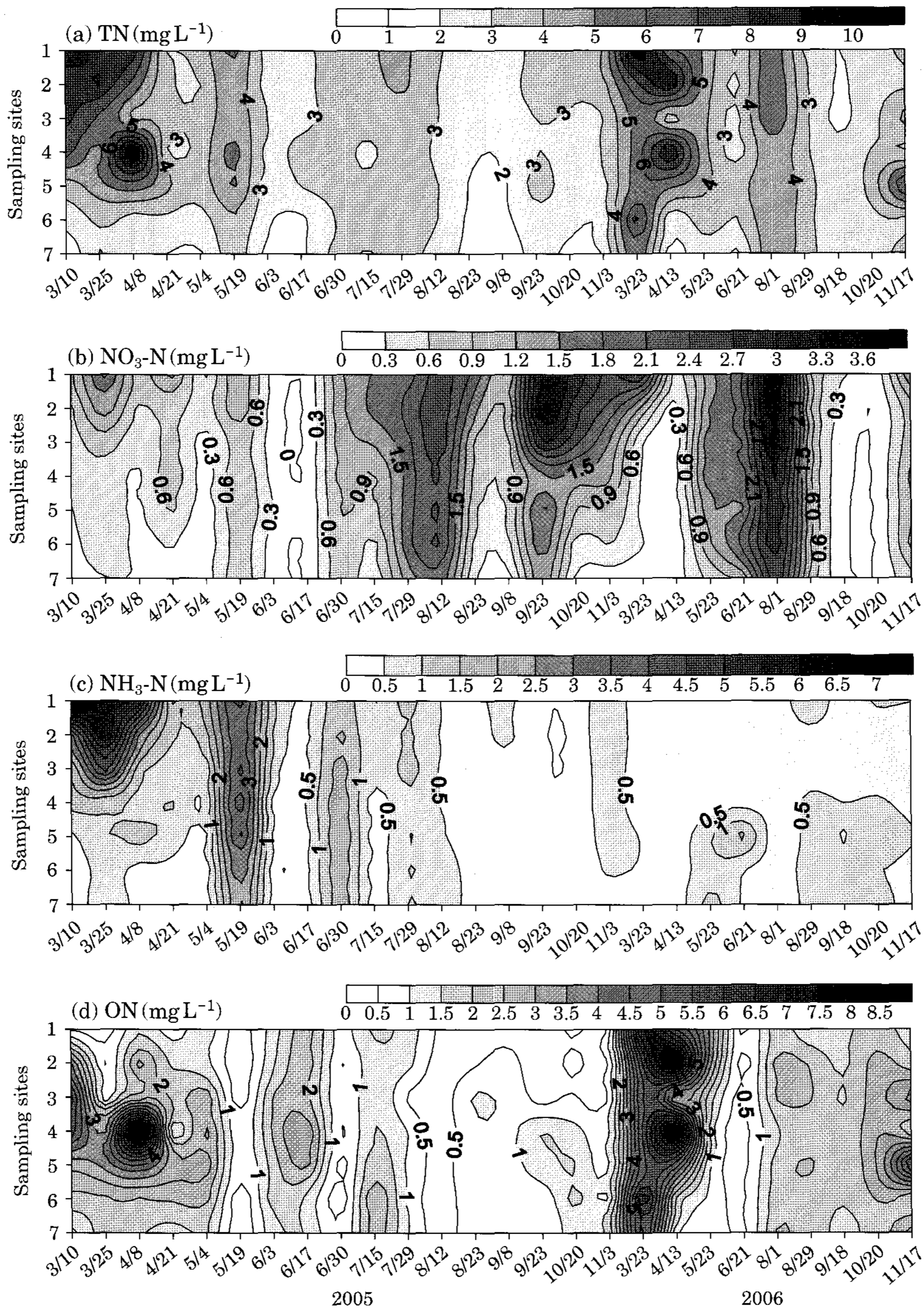


Fig. 3. Temporal and spacial distributions of nitrogen fractions.

로 맞추고 Standard Methods에 따라 실험하였다. 퇴적물내 유기물함량은 산화제로 크롬을 이용한 COD 분석방법(COD_{Cr})으로 시료 1g을 분취하여 Standard Methods에 준하여 분석하였다. 퇴적물의 오염도 평가는 USEPA (1993)에 의해 제안된 미국 오대호의 퇴적물 분류지침서를 이용하였다.

결과 및 고찰

1. 수질분포 특성

1) 영양염류

조사기간 동안 시화호 기수역에서 표층의 TN 농도는

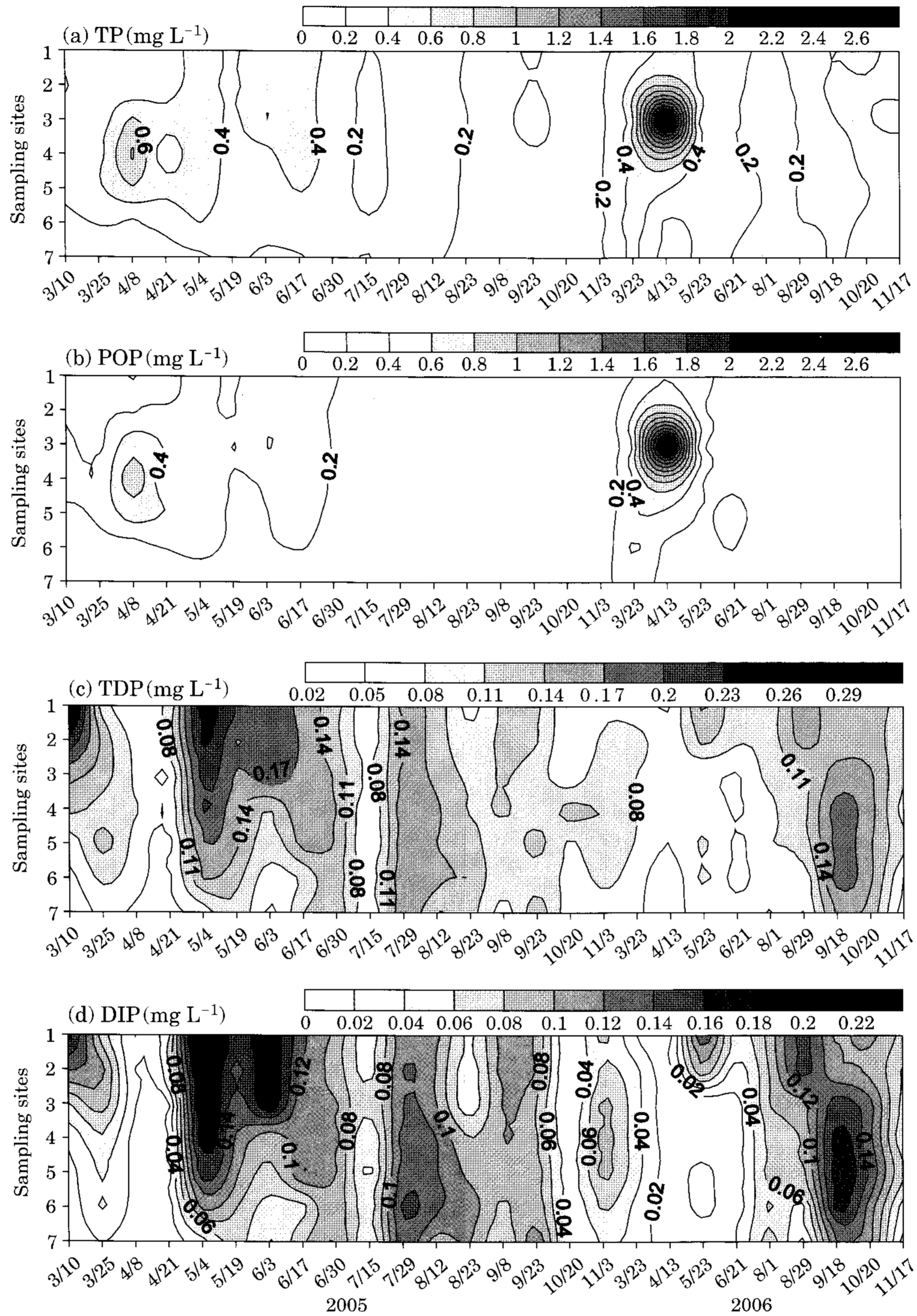


Fig. 4. Temporal and spacial distributions of phosphorus fractions.

1.2~11.0 mg L⁻¹ (3.6 mg L⁻¹)의 범위로 시공간적으로 큰 변동을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3a). 전반적으로 초봄인 3월과 4월 초에 상류와 중류지점에서 높은 값을 보였고, 그 이외의 계절에는 2.0~3.0 mg L⁻¹의 수준으로 상

하류 간 큰 차이를 보이지 않았다. 질소의 존재형태별 농도분포를 보면 무기질소 중 질산(NO₃-N)과 아질산(NO₂-N)을 합한 농도는 0.00~3.96 mg L⁻¹ (평균 0.96 mg L⁻¹), NH₃-N는 0.02~7.48 mg L⁻¹ (평균 0.82 mg L⁻¹)의 범위를

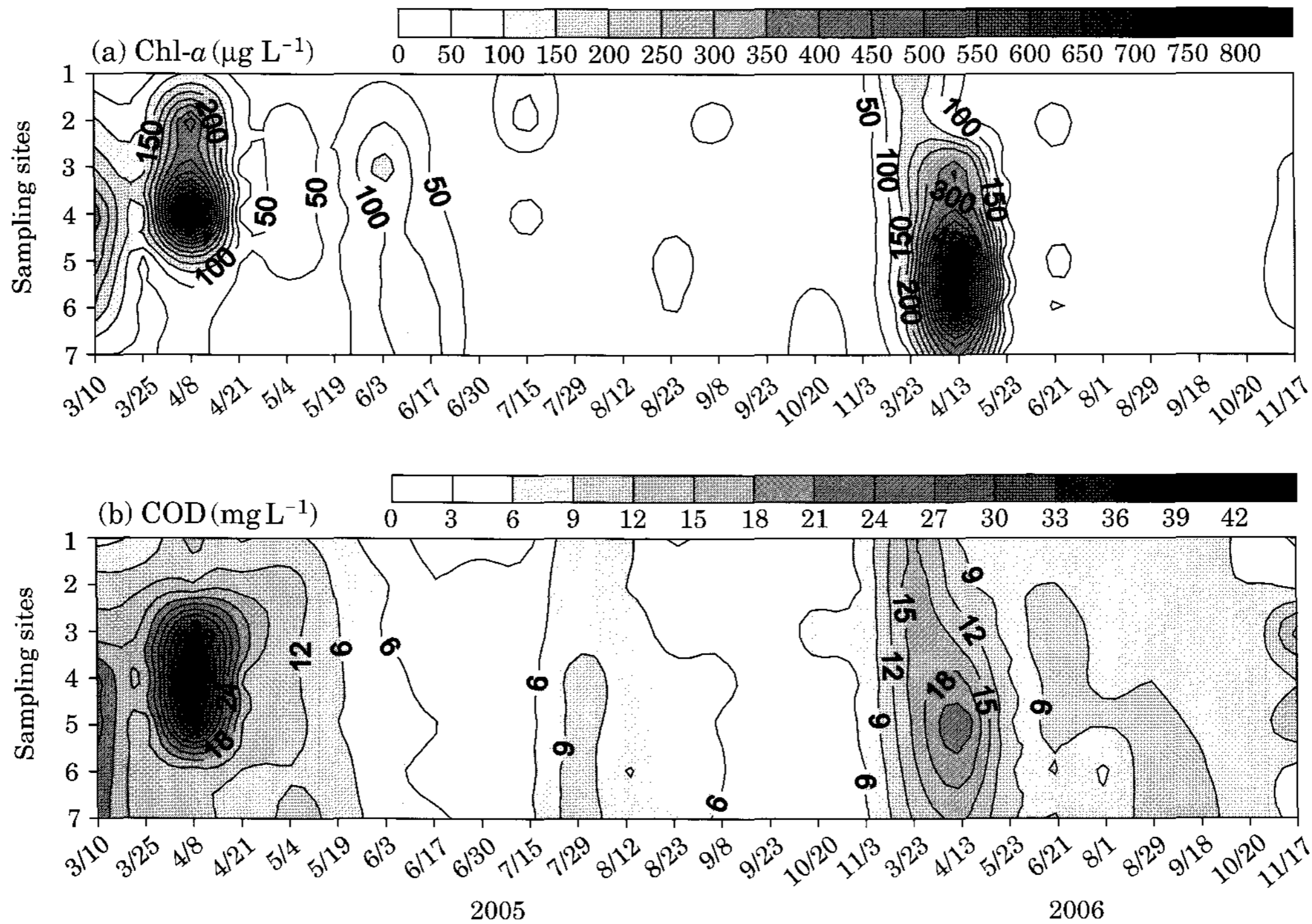


Fig. 5. Temporal and spacial distributions of chlorophyll *a* (Chl-*a*) concentration and chemical oxygen demand (COD).

보였으며, 유기질소 (organic nitrogen; 총질소에서 무기질소를 빼서 산정)는 $0.00 \sim 10.10 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 1.74 mg L^{-1})의 범위로 평균농도로 볼 때 무기형태와 유기형태가 비슷한 비율로 존재하는 것으로 나타났다 (Fig. 3b-d). 그러나 질소의 시공간적 분포는 존재형태에 따라 매우 상이하게 나타났다. 무기질소는 상류에서 하류쪽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였지만, 유기질소는 중류지점에서 높은 공간적분포를 보였다. 그리고 $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N}$ 는 강우 시기, $\text{NH}_3\text{-N}$ 는 3월과 5월에 높은 경향을 보였으며, ON은 4월 높은 계절분포를 보였다.

TP 농도는 $0.056 \sim 2.992 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 0.284 mg L^{-1})의 범위로 4월에 중류지점에서 높은 분포를 보였다 (Fig. 4a). 특히 2006년도 4월에 St. 3에서 높은 농도분포를 보였다. 인의 존재형태별 농도분포를 보면 POP가 $0.007 \sim 2.907 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 0.179 mg L^{-1}), TDP가 $0.021 \sim 0.308 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 0.105 mg L^{-1})의 범위로 용존형태보다 입자형태의 인이 더 많이 존재하고, 변동폭도 더 큰 것으로 나타났다 (Fig. 4b, d). POP의 시공간적 분포는 TP의 분포와 같이 4월에 중류지점에서 높은 경향을 보인 반면 TDP는 초봄에는 상류지점에서 높은 값을 보이다가 여름으로 갈수록 중하류지점에서 높은 분포를 보였다. 그리고 POP와는 반대로 4월에 중류지점에서 매우 낮은 값을 보였다. 한편

DIP는 $0.003 \sim 0.236 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 0.075 mg L^{-1})의 범위로 TDP의 대부분 (평균 70%)을 차지하는 것으로 나타났다 (Fig. 4d). DIP의 시공간적 분포는 TDP와 거의 비슷하게 초봄에는 상류지점에서 높은 농도를 보이다가 여름으로 갈수록 중하류지점에서 높은 값을 보였으며, 이러한 시공간적 분포는 TDP에 비해 보다 뚜렷하였다.

2) 엽록소 *a* (Chl-*a*)

시화호 기수역에서 Chl-*a* 농도는 $1.3 \sim 942.9 \mu\text{g L}^{-1}$ (평균 $73.1 \mu\text{g L}^{-1}$)의 범위로 시공간적으로 매우 큰 변동을 보였다 (Fig. 5a). 계절적으로는 3월에는 $100 \sim 300 \mu\text{g L}^{-1}$ 범위의 농도를 보이다가, 4월에 급격히 증가하여 최고 $900 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 높은 농도를 보였다. 그 이후 5월에 $50 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 농도를 감소하였다가 6월 초에 $100 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상으로 약간 증가하였다. 그리고 강우시기에는 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 매우 낮은 농도를 보였으며, 그 이후 10월과 11월의 다시 증가하여 일부 지점에서는 $50 \sim 100 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도를 보였다. 지점별 Chl-*a* 농도는 계절에 따라 상이한 분포를 보였지만, 전반적으로 상하류 지점에 비해 중류지점에서 높은 값을 보였다 (Fig. 5a). Chl-*a* 농도의 최대치는 2005년 4월에 St. 4 지점 ($942.9 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 보였으며, 2006년에는 St. 3 지점 ($910 \mu\text{g L}^{-1}$)에서 나타났다.

3) 유기물

조사기간 동안 기수역의 COD는 2.0~47.2 mg L⁻¹의 범위로 영양염류와 Chl-a 농도와 마찬가지로 시공간적으로 변동이 컸다(Fig. 5b). 봄에 20 mg L⁻¹ 이상의 높은 농도를 보였으며, 그 이후 서서히 감소하여 강우기 전에는 5 mg L⁻¹ 이하까지 감소하였다. 강우시기에는 다시 증가하여 10 mg L⁻¹ 정도의 값을 보였으며 강우 이후에는 감소하는 계절분포를 보였다. 기수역의 평균 COD는 9.3 mg L⁻¹으로 시화호 평균농도인 4 mg L⁻¹에 비해 2배 이상 높은 값을 보여 기수역의 유기물농도가 높음을 알 수 있다. 지점별 평균 COD 값은 상류구역인 St. 1, St. 2에서는 각각 9.2 mg L⁻¹, 9.1 mg L⁻¹, 중류구역인 St. 3~St. 5에서 각각 10.3 mg L⁻¹, 10.6 mg L⁻¹, 11.1 mg L⁻¹, 하류구역인 St. 6, St. 7에서는 각각 7.0 mg L⁻¹, 8.0 mg L⁻¹으로 중류 지점의 유기물 오염이 가장 심한 것으로 나타났다. 그리고 COD의 시공간적 분포가 Chl-a의 분포와 매우 유사한 것으로 나타난 것으로 보아(Fig. 5a, b), 기수역에서 식물플랑크톤에 의한 유기물생산이 큰 것으로 사료된다.

2. 퇴적물분포 특성

1) 입도분포

시화호 기수역에서 표층퇴적물의 입도분포는 조사지점에 따라 차이를 보였으며, 이러한 공간적 분포는 강우시기를 전·후로 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6). 기수역의 상류지점(St. 1과 St. 2)에서의 입도조성비를 보면 모래(56~100%)>실트(0~40%)>점토(0~4%) 순으로 모래가 대부분 차지하는 것으로 나타났고, 강우시기인 8월에 뚜렷한 경향을 보였다. 이는 강우시 하천으로부터 유입되는 입자중 비중이 큰 모래가 최상류 구간인 St. 1과 St. 2 지점에 우선적으로 침전되었기 때문으로 판단된다. 퇴적물의 입도분포는 St. 2과 St. 3 지점 사이에서 가장 뚜렷한 차이를 보였으며, 중류지점인 St. 3~St. 5 구간에서의 입도 조성비는 실트(38~60%)>모래(34~58%)>점토(3~7%) 순으로 모래보다 실트의 조성 비율이 더 큰 것으로 나타났다(Fig. 6). 이 구간에서 퇴적물의 입도별 조성비의 시공간적 변동 폭이 상류구간보다 적은 특징을 보였다. 한편 하류지점인 St. 6과 St. 7 지점에서의 입도 조성비는 모래(41~57%)≒실트(38~54%)>점토(3~8%) 순으로 중류지점과 또 다른 양상을 보였다(Fig. 6). 중류 지점에서 실트의 평균조성비가 53%로 모래(41%)보다 컸던 반면, 하류지점에서는 실트와 모래의 평균조성비가 각각 47%로 비슷하였다. 점토의 조성비는 상류지점에서 가장 낮았고, 중류지점과 하류지점에서는 비슷한 조성비

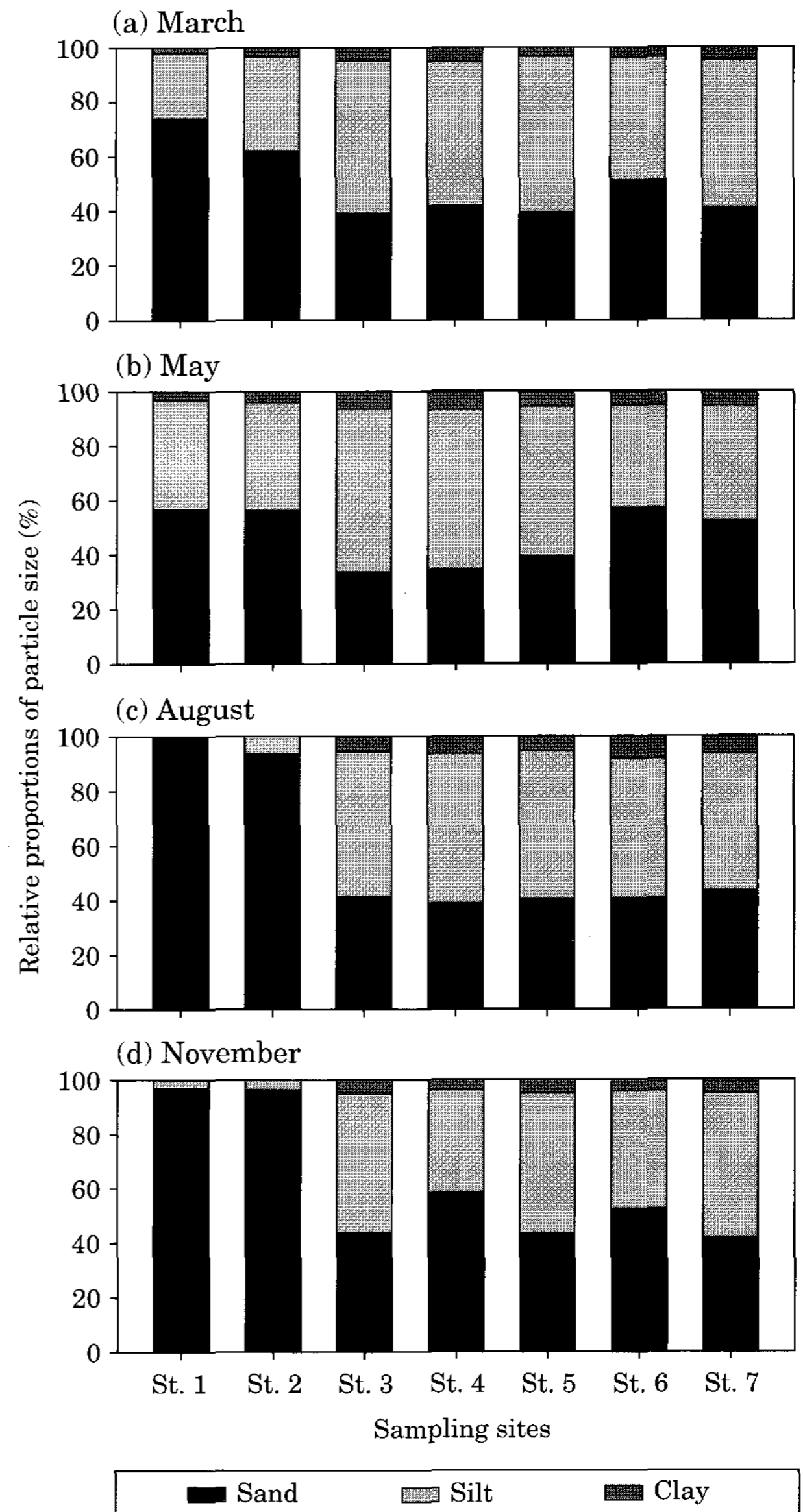


Fig. 6. Temporal and spatial distributions of particle size within surface sediments.

를 보였다.

표층퇴적물의 입도분포로부터 기수역내의 상류, 중류, 하류의 구간별 퇴적환경 특성이 뚜렷하게 나타났다. 상류 지점은 담수유입에 의한 영향을 가장 많이 받는 곳으로 입도의 조성비가 강우사상에 의해 변동하며, 퇴적층이 주로 모래로 구성되어 있는 하천의 특성을 보였다. 그리고 중류지점에서는 모래보다 작은 실트 입자가 주로 퇴적되는 것으로 보아 조사구간 중 기수역 환경특성을 가장 잘 나타내고 있는 것으로 사료된다. 일반적으로 0.02~0.002 mm의 크기의 실트는 하천의 운반물질이 해저에 퇴적할

때 가장 빨리 가라앉는 입자로 연안성퇴적물에서 많이 발견되는 것으로 알려졌다(Van Rijn, 1993). 또한 최 등(2008)의 보고에 의하면 시화호 기수역에서 수평수직적인 염분성층(halocline)이 중류지점에서 가장 뚜렷하고 강하게 형성된다고 하였다. 그러므로 기수역의 중류지점은 정체현상이 가장 큰 곳으로 실트 크기의 입자성 물질이 퇴적이 가장 활발한 곳으로 판단된다.

2) 영양염류 및 유기물 함량

조사기간 동안 시화호 표층퇴적물의 물질함량은 수질과 마찬가지로 시공간적인 변동을 보였으나, 계절과 물질함량 사이에 뚜렷한 상관관계는 보이지 않았다(Fig. 7). 퇴적물내 TN 함량은 172~4,614 $\mu\text{g g}^{-1}$ (평균 1,586 $\mu\text{g g}^{-1}$)의 범위로 상류지점에 비해 중하류지점에서 높은 값을 보였다(Fig. 7a). 최상류 지점인 St. 1지점에서는 평균 794 $\mu\text{g g}^{-1}$ 로 가장 낮은 값을 보였고, 중류지점인 St. 4지점에서 평균 2,166 $\mu\text{g g}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 보였다. 퇴적물내 TP 함량은 18~2,959 $\mu\text{g g}^{-1}$ (평균 1,064 $\mu\text{g g}^{-1}$)의 범위로 TN의 공간적 분포와 매우 비슷한 경향을 보였다(Fig. 7b). 지점별 TP의 함량은 St. 4 지점에서 평균 1,572 $\mu\text{g g}^{-1}$ 으로 최고치를 보였고, 최상류지점인 St.1 지점(평균 259 $\mu\text{g g}^{-1}$)에 비해 5배 이상 높은 값을 보였다. 해양수산부(2006)의 보고에 의하면 본 조사구간을 포함하지 않는 시화호내 14개 지점에서 표층퇴적물의 평균 TP 함량이 465 $\mu\text{g g}^{-1}$ (356~796 $\mu\text{g g}^{-1}$)인 결과와 비교하여 볼 때 시화호 상류 기수역 표층퇴적물내 TP 함량이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 시화호 기수역에서 퇴적물내 TN과 TP 함량비는 평균 1.5로 수중의 TN/TP비(12.6)에 비해 낮은 값을 보여, 많은 양의 인이 퇴적물에 존재하고 있음을 시사한다.

한편, 퇴적물내 COD 함량은 16~153 mg g^{-1} (평균 63 mg g^{-1})의 범위로 영양염류에 비해 공간적인 변동이 적었고, 분포양상도 다르게 나타났다(Fig. 7c). 영양염류의 경우 중류지점에서 가장 높은 값을 보인 반면 COD 함량은 상류지점에서 높은 값을 보였다. 퇴적물내 평균 COD 함량은 상류지점인 St. 1과 St. 2 지점에서 각각 69 mg g^{-1} 와 76 mg g^{-1} 의 값을 보였고, 중하류지점인 St. 3~St. 7 지점에서 53~62 mg g^{-1} 의 범위를 보였다. 본 연구에서 시화호 상류 기수역의 COD 함량은 해양수산부(2006)에서 보고한 시화호내 14개 지점에서 표층퇴적물의 COD 함량(8~31 mg g^{-1} , 평균 21 mg g^{-1})에 비해 3배 이상 높은 값을 보여 상류 기수역 표층퇴적물내 유기물오염이 심한 것으로 나타났다.

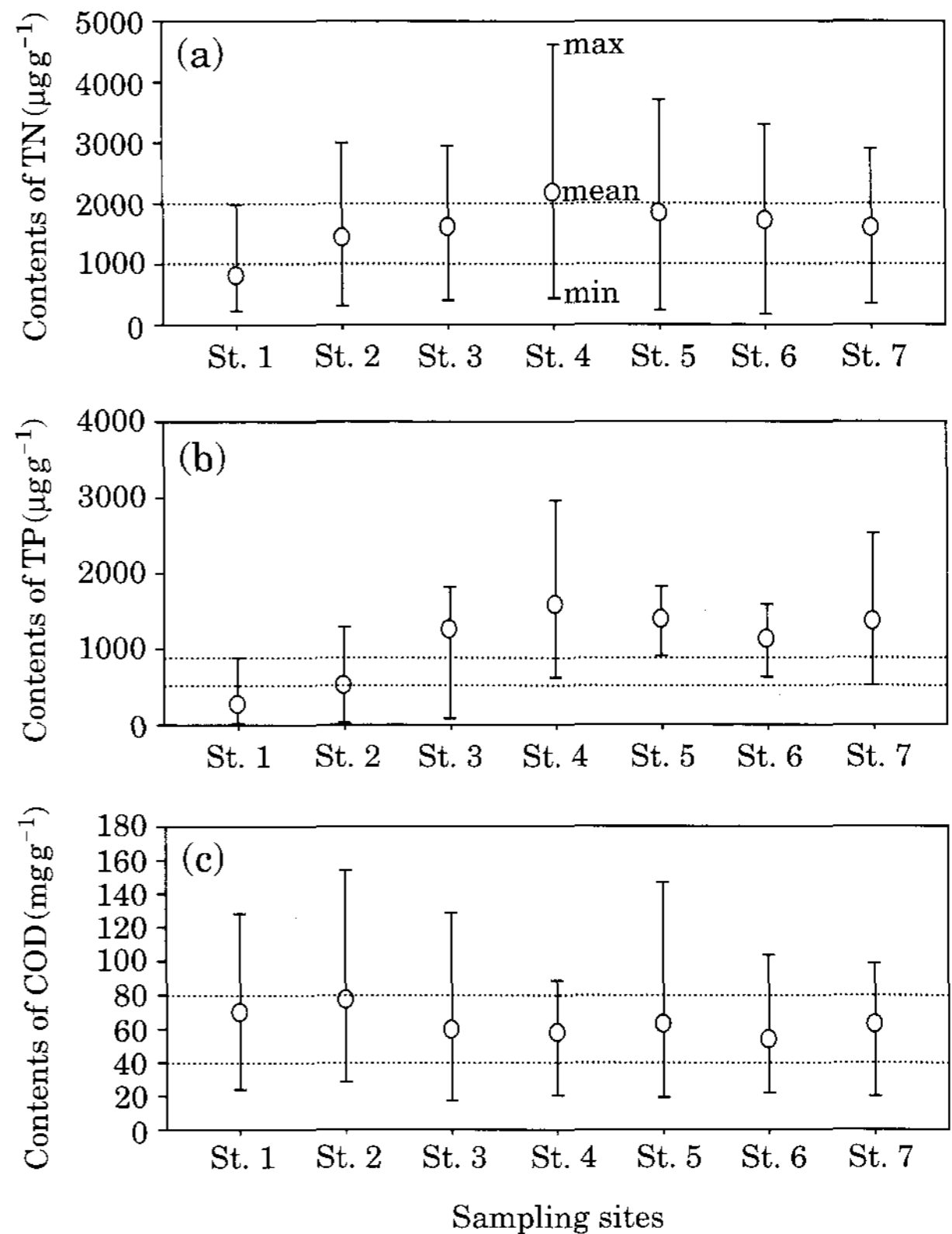


Fig. 7. Spatial distributions of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and organic matter (as COD) contents within surface sediments. Dot lines within each figure indicate the sediment quality standards of US EPA (upper and lower lines correspond to "severe pollution" and "unpolluted", respectively).

3. 기수역의 오염도 평가

1) 부영양화도

일반적으로 호소의 영양상태(trophic state) 평가는 제한영양염류인 인과 질소 그리고 식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 지표인 Chl-a의 농도를 이용하는데, 시화호 기수역의 영양상태는 대부분 지점에서 부영양상태의 수준을 초과하는 것으로 나타났다. 조사기간인 2005년과 2006년의 3월부터 11월까지 기수역의 TN 농도는 1.2~11.0 mg L^{-1} 으로 Forsberg and Ryding(1980)의 부영양화 기준으로 볼 때 부영양상태(0.6~1.5 mg L^{-1}) 또는 과영양상태(>1.5 mg L^{-1})에 해당하는 수준을 보였다. 특히 기수역의 중상류지점은 조사기간 내내 과영양상태를 유지하는 것으로 나타났다. TP농도는 0.056~2.992 mg L^{-1} 으로 Forsberg and Ryding(1980)와 USEPA(1976)의 기준으로 볼 때 부영양상태(0.025~0.100 mg L^{-1}) 또는 과영

Table 1. Trophic state index (TSI) of the upper regions of brackish Lake Sihwa. The TSI values were calculated by the approach of Carlson (1980).

Sampling sites	TSI (SD)	TSI (TP)	TSI (Chl- <i>a</i>)
St. 1	73	84	64
St. 2	73	84	66
St. 3	74	86	68
St. 4	73	84	67
St. 5	73	84	64
St. 6	70	81	63
St. 7	69	77	61

양상태 ($>0.100 \text{ mg L}^{-1}$)를 보였다. 그리고 Chl-*a* 농도는 $1.3 \sim 942.9 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 $73.1 \mu\text{g L}^{-1}$)으로 상기 두 가지 기준으로 볼 때 빈영양상태에서 과영양상태까지 광범위하게 나타났지만, 평균 Chl-*a* 농도 ($73.1 \mu\text{g L}^{-1}$)에서도 알 수 있듯이 조사기간 동안 대부분 지점에서 과영양상태를 보였다.

한편 수질농도에 의한 호소의 부영양화 평가에 대한 판정기준들 사이의 차이점에 대한 결점을 보완하여 영양상태의 평가를 객관화시킨 부영양화 지수 (Trophic State Index: TSI)가 Carlson (1977)에 의해 처음으로 제안되었으며 가장 일반적으로 이용되고 있다. Carlson (1977)의 TSI는 투명도 (SD), TP, Chl-*a* 농도를 0~100까지 범위에서 부영양화 정도를 평가하는데 TSI가 50 이상이면 부영양상태, 70 이상이면 과영양상태로 판정한다. 본 연구에서 Carlson의 TSI를 이용하여 시화호 기수역의 TSI 지수를 알아본 결과 TSI (SD)는 69~74, TSI (TP)는 77~86, TSI (Chl-*a*)는 61~68의 범위로 중류지점인 St. 3 지점에서 가장 컸고, 최하류지점인 St. 7 지점에서 가장 작은 값을 보였다 (Table 1). 환경부와 국립환경과학원 (2006)의 보고서에서 제시된 2002년부터 2004년까지 우리나라의 타수계의 SD와 TP 및 Chl-*a* 농도로부터 계산된 Carlson의 평균 TSI를 보면 소양호 등 15개 규모가 큰 호수의 경우는 39~63, 낙동강 등 하구에 위치한 호수의 경우는 59~67, 그리고 동해안의 7개 석호는 60~67의 범위로 내륙의 호수에 비해 연안의 호수에서 높은 값을 보였다. 시화호 기수역의 평균 TSI가 73으로 다른 수체에 비해 부영양화 정도가 심각한 것으로 나타났다. 그리고 동기간 기수역이 포함되지 않은 시화호의 TSI는 62로 나타난 것으로 보아 시화호내에서도 상류 기수역이 매우 부영양한 상태인 것으로 나타났다.

2) 퇴적물의 오염도

우리나라는 법제상 퇴적물의 오염분류기준이 마련되어

있지 않기 때문에 본 연구에서 시화호 기수역의 표층퇴적물의 오염도 평가는 US EPA (1993)에서 제안한 미국 오대호의 분류기준을 토대로 수행하였다. US EPA (1993)의 퇴적물 내 TN (TKN), TP, COD 함량에 의한 분류기준 크게 “오염되지 않음”, “중간오염”, “오염심함”으로 되어 있다. US EPA (1993)의 분류기준으로 볼 때 시화호 기수역의 표층퇴적물의 오염도는 조사지점과 시기에 따라 차이를 보였으며, 오염물질의 종류에 따라 서로 다른 경향을 보였다. 퇴적물내 TN 평균함량으로 보면 최상류지점인 St. 1 지점은 $1,000 \mu\text{g g}^{-1}$ 이하로 오염되지 않은 상태인 반면 St. 4 지점은 $2,000 \mu\text{g g}^{-1}$ 이상으로 오염이 심한 것으로 나타났으며, 그 외 지역은 $1,000 \sim 2,000 \mu\text{g g}^{-1}$ 의 범위로 중간오염으로 분류되었다 (Fig. 7). TP의 경우는 St. 1과 St. 2 지점에서 평균함량이 $420 \mu\text{g g}^{-1}$ 이하로 오염되지 않은 것으로 나타났으나, 그 외 모든 지점에서는 $650 \mu\text{g g}^{-1}$ 이상으로 오염이 심한 것으로 나타나 시화호 중하류지점의 퇴적물내 인함량이 매우 높은 것으로 평가되었다. 한편 퇴적물내 평균 COD 함량은 모든 지점에서 $40 \sim 80 \text{ mg g}^{-1}$ 사이의 범위로 중간오염으로 나타났다.

4. 기수역의 부영양화 원인

부영양화는 조류의 성장을 제한하는 영양염류 (주로 인과 질소)가 증가하여 조류의 양이 크게 증가하는 현상을 말하며, 심층의 산소고갈 및 혐기성가스 발생 등에 의한 수질과 저서생태계에 악영향을 준다 (Canfield *et al.*, 1996; Wetzel, 2001; Tsutsumi, 2006). 일반적으로 연안의 하구나 기수호의 경우 유역으로부터 오염물질의 부하량이 높고, 염분성층에 의한 수체의 정체로 인해 다른 수체에 비해 1차생산력이 크기 때문에 부영양화현상이 빈번히 발생하는 특성을 보인다 (Nixon, 1990; Horne and Goldman, 1994; 허 등, 1999; 신 등, 2000; Gray *et al.*, 2002; 신, 2003; Tsutsumi, 2006; 최 등, 2008).

식물플랑크톤의 성장을 제한하는 요인을 판단하는 방법으로는 algal growth potential test (AGPT) 방법 이외에 수중의 질소와 인의 비율 (TN : TP의 질량비)을 이용하는 방법이 있다. Forsberg and Ryding (1980)의 연구에 의하면 TN/TP비가 15~20 이상에서는 인이 그리고 10 이하에서는 질소가 식물플랑크톤의 제한영양소로 작용한다. 본 연구에서 시화호 기수역의 평균 TN/TP비는 12.6으로 식물플랑크톤의 성장의 제한영양소를 명확히 구분할 수 없다. 한편 영양염류와 Chl-*a* 농도 사이의 상관분석 결과, TN과 TP 모두 Chl-*a*와 양의 상관관계를 보였지만 TP와 Chl-*a*의 상관계수 (*r*)가 0.65로 TN과 Chl-*a*보다

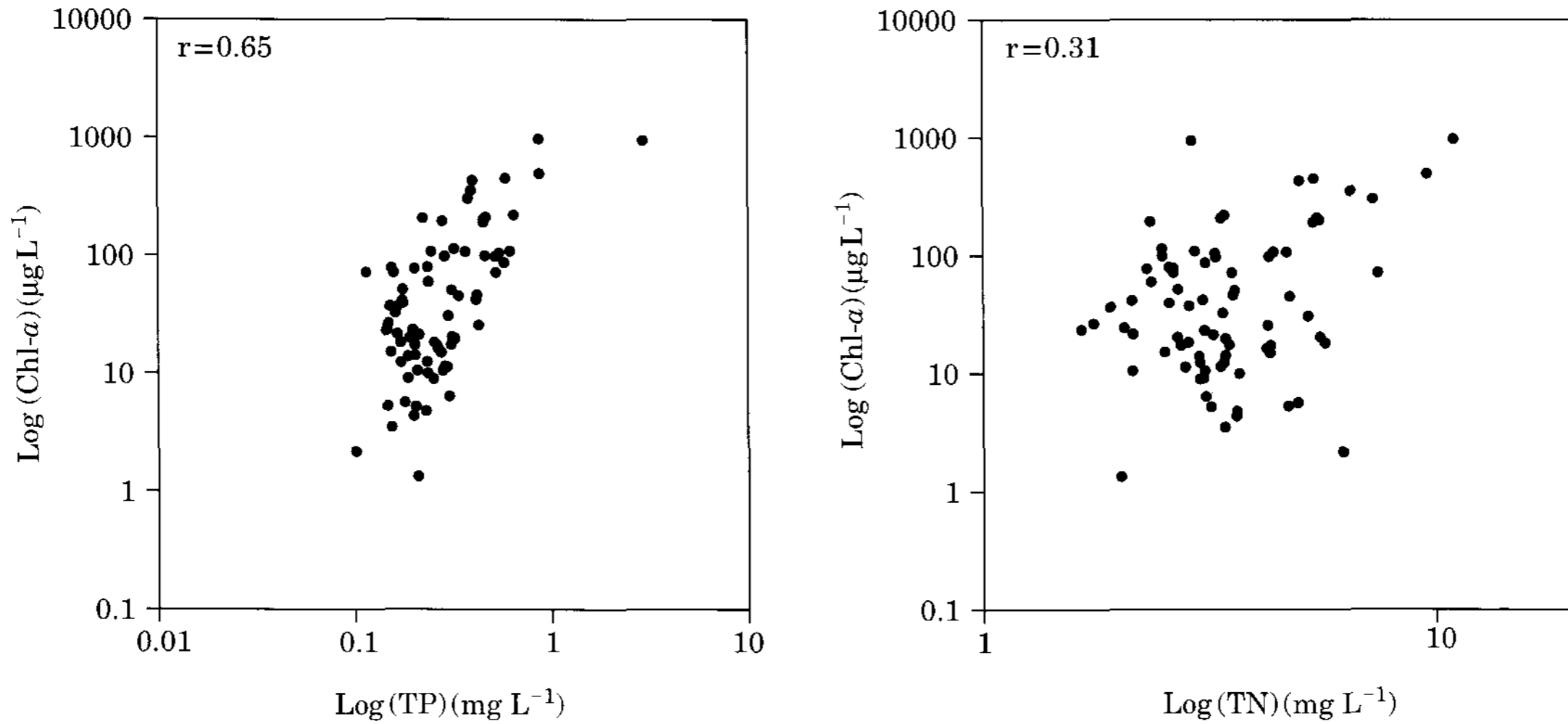


Fig. 8. Relationships between total phosphorus (TP) and chlorophyll *a* (Chl-*a*), and total nitrogen (TN) and Chl-*a* concentrations.

($r=0.31$) 더 크게 나타났다(Fig. 8). 이는 시화호 기수역에서 인이 식물플랑크톤의 성장과 관계가 있음을 시사한다.

시화호 상류 기수역의 유역은 크게 농경지와 시가지의 특성을 보이고 있기 때문에 기수역으로 유입되는 오염물질은 주로 비료와 미처리된 가정하수에 기인될 것으로 사료된다. 기수역으로 유입되는 TP 농도는 0.2 mg L^{-1} 이상으로 높은 농도로 유입되고 있어 유역으로부터 유입되는 인이 시화호 기수역의 부영양화의 1차적인 요인으로 판단된다. 그리고 기수역의 환경특성인 염분성층에 의한 수체의 정체현상은 외부로부터 유입된 인을 이용한 식물플랑크톤의 증식을 가속화시킬 수 있다. 최 등(2008)에 의하면 시화호 기수역에서 염분의 시공간적분포로부터 염분성층이 중류구간에서 가장 강하게 형성된다고 보고하였다. 그러므로 본 연구에서 기수역내 중류구간에서의 가장 높은 Chl-*a* 농도는 중류구간에 형성된 염분성층에 따른 수체의 정체현상에 기인된 것으로 사료된다.

시화호 기수역에서 부영양화현상의 또 다른 요인은 표층퇴적물의 높은 유기물과 인 함량을 들 수 있다. 표층퇴적물에 함유된 인은 혐기성 환경에서 수체로 쉽게 용출될 수 있으므로 수체의 혼합이 일어나는 시기에 심층에서 표층으로 인 공급이 있을 경우 식물플랑크톤의 증식을 가속화시킬 수 있다(Horne and Goldman, 1994). 기수특성을 가지는 수체에서는 염분성층에 의해 상하층간 물질이동이 제한적이기 때문에 심층의 산소고갈현상이 쉽게 관찰된다(허 등, 1999; 신 등, 2000, Ueda *et al.*, 2000; Gray *et al.*, 2002; McLusky and Elliott, 2004;

Tsutsumi, 2006; 최 등, 2008). 그러므로 시화호 기수역의 부영양화 현상은 유역으로부터의 인과 유기물의 유입과 기수역의 염분성층의 형성에 따른 수체의 정체현상 및 표층퇴적물의 혐기환경에 의한 인 용출에 의한 식물플랑크톤의 대량증식에 의한 것으로 판단된다. 또한 시화호 기수역은 자연적인 기수역에 비해 해수의 유통이 매우 제한적이기 때문에 상류 기수역의 정체현상이 자연적인 기수역에 비해 더 심하고, 이에 따라 부영양화가 정도도 더 심한 것으로 판단된다. 2009년 시화호 조력발전소가 완공되어 하루 해수유통량이 1억 6천만 톤(시화호 저수용량의 1/2에 해당)으로 증가하면 시화호 기수역의 부영양화 문제가 일정 부분 해결이 될 것으로 예상되나, 유역으로부터 오염물질의 지속적인 저감이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

물 교환이 제한적인 시화호 상류 기수역의 부영양화 현상을 이해하고자 기수역내 7개 지점을 선정하여 2005년과 2006년 3월부터 11월까지 수질 및 퇴적물의 시공간적 분포 조사와 오염도 평가를 실시하였다. 시화호 기수역의 영양염류와 엽록소 *a* (Chl-*a*) 및 유기물의 농도분포는 시공간적으로 변동이 컸으며, 전반적으로 염분성층이 강하게 형성되는 중류지점에서 높은 농도를 보이는 경향을 보였다. 조사기간 동안 TN, TP, Chl-*a* 농도는 각각 $1.2 \sim 11.0 \text{ mg L}^{-1}$, $0.056 \sim 2.992 \text{ mg L}^{-1}$, $1.3 \sim 942.9 \mu\text{g}$

L^{-1} 으로 대부분 지점에서 부영양 또는 과영양 상태를 나타냈다. 또한 기수역의 부영양화지수(TSI) 61~86의 범위로 과영양 수준을 보였으며, 중류지점에서 높은 값을 보였다. 기수역의 식물플랑크톤의 대량증식 현상은 매년 4월에 중류지점에서 나타났으며, 영양염류와 Chl. *a* 농도 사이의 상관분석으로부터 식물플랑크톤의 증식은 TN ($r=0.31$)보다 TP ($r=0.65$)가 관계가 있는 것으로 나타났다. 한편 기수역의 표층퇴적물내 COD 함량은 전 지점에서 중간오염의 수준을 보였지만, TN과 TP 함량은 중하류지점에서 오염이 심한 수준으로 나타났다. 또한 표층퇴적물의 입도분포로부터 연안성퇴적물에서 가장 많이 나타나는 실트의 조성비(38~60%)가 중류지점에서 가장 많은 것으로 보아 이 지점에서 염분성층과 퇴적현상이 가장 많은 것으로 사료된다. 본 연구의 결과로부터 물 교환이 제한적인 시화호 상류 기수역의 수질 및 표층퇴적물의 오염도는 타 수역에 비해 매우 높은 것으로 판단된다. 또한 시화호 상류 기수역의 부영양화 현상은 자연적인 기수역에 비해 강하게 형성된 염분성층에 의한 물의 정체현상 및 심층산소고갈 현상과 유역으로부터 많은 양의 인 유입과 퇴적물로부터 인 용출에 의한 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사의 “시화호 수질개선을 위한 기초조사 및 연구(2006)”의 일환으로 수행되었습니다. 세심한 심사를 해 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김동섭, 고석구. 2000. 시화호의 수환경 진단과 수질회복 평가. 한국수자원학회지 **33**(5): 551-559.
- 박용철, 박준진, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희. 1997. 시화호 산화-환원 환경하에 용존 무, 무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지(바다) **2**(2): 53-68.
- 신재기. 2003. 평택호에서 수환경과 식물플랑크톤의 계절적 동태. 한국조류학회지 **18**: 145-156.
- 신재기, 김동섭, 조경제. 2000. 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. 한국환경과학회지 **9**(2): 109-117.
- 최광순, 김세원, 김동섭, 오영택, 허우명, 이윤경, 박용순. 2008. 해수유입이 제한된 시화호 기수역에서 염분도, 수온, 용존 산소, 탁도의 시공간적 분포특성. 한국하천호수학회지 **41**(2): 216-227.
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희. 1997. 시화호와 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. 한국해양학회지(바다) **2**(2): 78-86.
- 한국수자원공사. 1996. 시화호 수질개선 종합관리대책 기본계획보고서. 한국수자원공사.
- 한국해양연구소. 1997. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(1차년도). 과학기술처.
- 한국해양연구소. 1998. 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(2차년도). 과학기술처.
- 해양수산부. 2002. 해양환경공정시험법. 해양수산부.
- 해양수산부. 2005. 시화호 해양환경개선 연구용역. 해양수산부.
- 해양수산부. 2006. 시화호 해양환경개선 연구용역. 해양수산부.
- 허성희, 오임상. 1997. 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구: 서문. 한국해양학회지(바다) **2**(2): 69-77.
- 허우명, 김범철, 전만식. 1999. 동해한 석호의 부영양화 평가. 한국육수학회지 **32**(2): 141-151.
- 환경부. 1999. 수질공정시험법. 환경부.
- 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.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th Ed. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Canfield, T.J., F.J. Dwyer, J.F. Fairchild, P.S. Haverland, C.G. Ingersoll, N.E. Kemble, D.R. Mount, T.W. La Point, G.A. Burton and M.C. Swift. 1996. Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach. *J. Great Lakes Res.* **22**: 565-583.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-369.
- 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 Biological Science.
- Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 swedish waste receiving lakes. *Arch fur Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Gray, J.S., R.S.S. Wu and Y.Y. Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **238**: 249-279.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill College.
- Kennish, M.J. 2000. Estuary Restoration and Maintenance. CRE Press, Florida.
- Kramer, K.J., U.H. Brockmann and R.M. Warwick. 1994. Tidal estuaries: manual of sampling and analytical procedures. AA Balkema, Rotterdam.

- McLusky, D.S. and M. Elliott. 2004. The Estuarine Ecosystem ecology, threats, and management. Oxford University Press.
- Nixon, S.W. 1990. Marine eutrophication: a growing international problem. *Ambio* **19**: 101.
- Orive, E., M. Elliott and V.N. de Jonge. 2002. Nutrients and eutrophication in estuaries and coastal waters. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 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.
- US EPA. 1976. Water quality criteria research of the US environmental protection agency. EPA-600 (3-76-079).
- US EPA. 1993. Questions and Answers about Contaminated Sediments, EPA 823-F-93-009. Office of Water, Washington, D.C.
- Van Rijn, L.C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries, and coastal seas. Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology. 3th ed., Academic Press, New York.
- www.kma.go.kr. 2006. 인천, 수원 강우량자료.
- (Manuscript received 22 May 2008,
Revision accepted 4 June 2008)