

시화호 인공습지에서 시공간적 수질분포 및 오염물질 제거효율 평가

최돈혁* · 최광순† · 김동섭 · 김세원 · 최동호** · 황인서 · 이윤경 · 강 호***

한국수자원공사 수자원연구원 · *한국수자원공사 시화호환경관리센터

금호건설 기술연구소 · *충남대학교 토목환경공학부

(2008년 8월 11일 접수, 2008년 9월 29일 채택)

Temporal and Spacial Distributions of Water Quality and Evaluation of Pollutant Removal Efficiency in the Sihwa Constructed Wetland

Don-Hyeok Choi* · Kwangsoon Choi† · Dong-Sup Kim · Sea-Won Kim

Dong-Ho Choi** · In-Seo Hwang · Yunkyong Lee · Ho Kang***

Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation

**Sihwa Lake Environmental Management Center, Korea Water Resources Corporation*

***Institute of Construction Technology, Kumho Engineering & Construction*

****Civil and Environmental Engineering, Chungnam National University*

ABSTRACT : To evaluate the pollutant removal efficiency and clarify the cause of low removal efficiency of the wetland, temporal and spacial distributions of water quality were investigated at 16 sites in the Sihwa constructed wetland. The removal efficiency showed a tendency to decrease since the construction of the wetland, except for TN. In addition, the efficiency was largely varied with season, especially BOD and TP. No removal efficiency of BOD was observed in April and July when algal bloom was occurred in lower part open water of the wetland. On the other hand, TP showed no removal efficiency from April to August showing -291% of removal efficiency in August. From the horizontal distribution in closed water regions, SS concentration for the central area was significantly higher than for left and right areas($p=0.013$, center > left > right areas). From the results of this study, we infer that anaerobic condition due to the excessive accumulation of organic matters and lack of uniformity of water flow distribution are major factors of the low removal efficiency of the wetland.

Key Words : *Constructed Wetland, Distribution of Water Quality, Removal Efficiency, Cause Analysis*

요약 : 시화호 인공습지의 오염물질 제거효율을 분석평가하고 수질정화기능의 저하원인을 파악하기 위하여 습지내 16개 지점에서 시공간적 수질분포에 대해 조사하였다. TN을 제외한 오염물질 제거효율은 조성 초기에 비해 낮아졌으며, 계절변동 또한 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 BOD와 TP의 평균 제거효율이 각각 12.3%, -44.5%로 낮고, TN과 SS에 비해 계절변동이 큰 것으로 나타났다. 월평균 BOD의 제거효율은 습지 하류부에서 식물플랑크톤이 대량 증식하였던 4월과 7월에 처리효율이 나타나지 않았으며, TP의 경우는 4월부터 8월까지 제거효율이 지속적으로 감소하였으며 수온이 가장 높았던 8월에 -291%를 나타냈다. 폐쇄수역에서 SS 농도분포는 좌안과 우안에 비해 중앙지점에서 높은 것으로 나타났다. 또한 ANOVA test로부터 수평적으로 유의적인 차이($p=0.013$, 중앙 > 좌안 > 우안)를 보였다. 시화호 인공습지에서 오염물질 제거효율의 저하원인은 과도한 유기물 생산에 의한 습지의 혐기성환경과 이에 따른 습지 하류부에서 용출된 인과 대량 증식한 식물플랑크톤이 균등하지 못한 물 흐름에 의해 식생대를 거치지 않고 유출되었기 때문으로 유추된다.

주제어 : 인공습지, 시공간적 수질분포, 제거효율, 원인분석

1. 서론

인공습지는 자연습지의 다양한 기능 중에서 수질정화기능을 강화시킨 수처리시스템으로서 주로 생활하수, 축산폐수, 농업 및 광산 배수를 처리하는 목적으로 1960년대부터 미국과 유럽에서 이용되어 왔다.¹⁾ 우리나라에서는 1990

년대부터 돈사폐수, 군부대 오수, 농업용수의 수처리 효율 검증을 위한 실험실내 실험지 또는 소규모의 인공습지^{2~6)}와 농업용수를 대상으로 한 인공습지의 수처리 효율 및 관리방안 수립을 위한 비교적 대규모의 연구시설⁷⁾이 조성되었다. 그리고 실제 처리시설로 운영되고 있는 인공습지는 시화호 인공습지와 주암댐 등 일부 상수원수의 수질개선을 위해 댐저수지 상류부에 조성된 인공습지가 있다. 또한 최근에는 정부차원에서 4대강 비점오염원관리 종합대책의 일환으로 하천주변에 비점오염원 저감시설로서 인공습지

† Corresponding author

E-mail: kchoi@kwater.or.kr

Tel: 031-400-1461

Fax: 031-400-1465

의 적용을 검토하고 있는 실정이다.⁸⁾

습지의 수질정화기작은 크게 미생물의 대사활동과 식물에 의한 영양염류의 흡수와 같은 생물학적 기작과 물-식물-퇴적토-식물뿌리에서 일어나는 침전, 흡착 그리고 응집과 같은 물리화학적 기작으로 나눌 수 있으며, 이러한 기작들은 독립적 또는 복합적인 과정을 통해 일어난다.⁹⁾ 일반적으로 인공습지에 의한 오염물질의 제거효율은 습지의 구조와 형태, 처리수의 종류와 농도 및 부하량, 체류시간, 수심, 식재식물의 종류, 토양환경 등에 의해 영향을 받는다.¹⁾ 또한 인공습지의 오염물질 제거효율은 오염물질의 종류에 따라 차이를 보이는데, 많은 연구에 따르면 생물학적산소요구량(Biochemical Oxygen Demand; BOD)과 부유성고형물(Suspended Solids; SS)에 비해 영양염류인 총질소(Total Nitrogen; TN)와 총인(Total phosphorus; TP)에서 낮은 제거효율을 보이며 계절변동도 큰 것으로 보고되었다.^{7,10,11)} 강과 송¹²⁾에 의하면 처리수로 고농도의 하수처리장 방류수를 받는 미국과 유럽의 인공습지에서 오염물질 평균 제거효율은 BOD가 76%, SS가 69%, TN이 52%, TP가 51%로 매우 높은 것으로 나타났다. 한편 일본에서 운영되고 있는 인공습지의 경우 처리수가 가정하수인 경우 TN과 TP의 제거효율이 각각 45%와 53%로 하천수 및 호소수의 제거효율(TN, 21%, TP 37%)보다 높은 것으로 보고되었다.¹³⁾ 우리나라의 경우는 오수를 대상으로 한 소규모의 연구용 인공습지에서의 오염물질의 제거효율은 미국과 유럽의 인공습지가 비슷한 수준으로 높게 나타났지만,¹²⁾ 실제 처리시설로 운영되고 있는 인공습지 경우는 대부분 10~20%의 낮은 처리효율을 보이는 것으로 나타났다.¹⁴⁾

본 연구의 조사대상지인 시화호 인공습지는 1996년 “시화호 수질개선대책”의 일환으로 시화호 상류유역으로부터 유입되는 비점오염물질의 오염부하를 저감하기 위해 조성되어 2002년 5월부터 운영되어 왔다. 인공습지의 유기물과 영양염류의 제거효율은 조성초기에 40~50%로 매우 양호한 수준이었으나, 2003년부터 이후 일부 오염물질의 제거효율이 급격히 저하되었을 뿐만 아니라 계절변동도 매우 심하게 나타나는 등 습지의 수처리능이 안정적이지 못한 경향을 보이고 있다.¹⁵⁾ 그럼에도 불구하고 습지의 수질정화기능의 저하원인에 대해서는 아직 규명되어 있지 않은 실정이며, 그 이유로는 대부분 인공습지의 수질모니터링이 유입수와 유출수에 국한되어 시행되어왔기 때문으로 사료된다. 인공습지에 의한 오염물질의 처리효율 평가 및 저하원인 분석을 위해서는 보다 체계적이고 정밀한 모니터링이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 시화호 인공습지에서 시공간적 수질분포에 대한 정밀조사를 실시하여 습지의 오염물질 제거효율 평가 및 수질정화기능 저하에 대한 원인을 파악하고자 하였다. 본 연구의 결과는 국내에서 수질정화 시설로 운영되고 있는 인공습지의 효율적인 관리에 기초자료로 활용될 것으로 사료된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지 개요

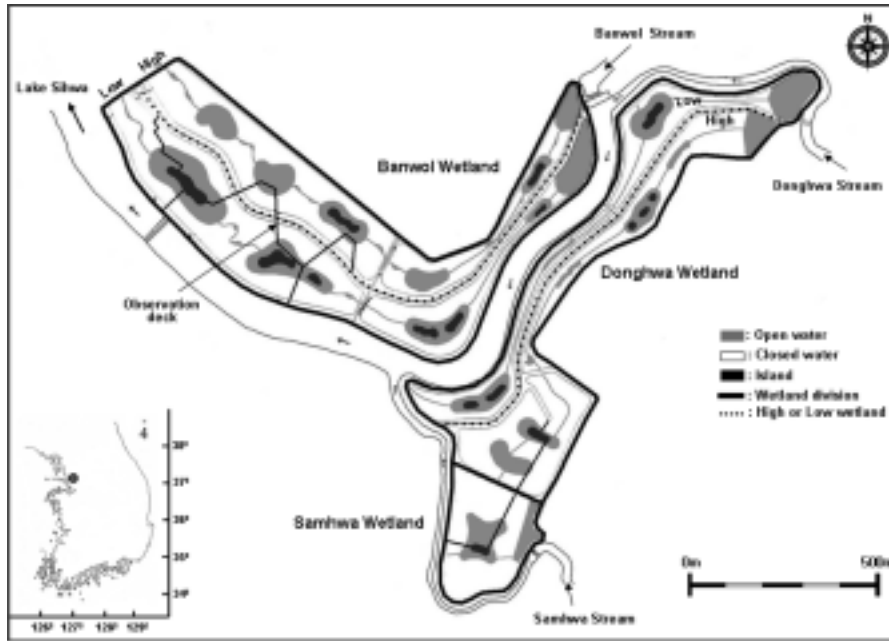
시화호 인공습지는 시화호로 유입되는 비점오염물질의 부하량을 저감하기 위해 상류유역 3개 하천(반월천, 동화천, 삼화천)의 합류지점에 조성한 습지로 총 면적이 1,037,500 m²에 달하는 국내 최대 규모의 수처리 시설이다(Fig. 1(a)). 인공습지는 반월천습지(415,952 m²), 동화천습지(265,999 m²) 및 삼화천습지(68,972 m²)로 3개의 습지로 나뉘어져 있다. 반월천습지와 동화천습지는 습지 조성지역의 지형 특성상 고습지(바닥고 E.L. + 3.5 m)와 저습지(바닥고 E.L. + 1.5 m)로 구분되어 있으며, 고습지는 저류보에 저장된 물을 펌핑에 의해 유입시키는 반면 저습지는 저류보의 일정수위 이상에서 물이 자연적으로 유하되어 습지로 유입된다. 고습지와 저습지 사이에는 2개의 연결구가 있어 물 분배를 효과적으로 할 수 있게 되어 있으나, 실제 운영은 되고 있지 않기 때문에 고습지와 저습지는 차단되었다고 볼 수 있다. 습지의 유입구는 1개인 반면 방류구는 여러 개(반월천 고습지의 경우 4곳) 설치되어 있다. 그리고 시화호 인공습지는 크게 식물의 식재 여부에 따라 폐쇄수역(closed water)과 개방수역(open water)으로 나뉘어져 있다. 폐쇄수역은 수심이 0.5~0.6 m로 인공습지의 수질정화기능을 담당하는 갈대와 부들로 채워져 있으며, 개방수역은 식물이 식재되어 있지 않는 구간으로 수심이 1.0~1.1 m로 유지되어 어류 및 야생동물의 서식공간을 제공해 줄뿐만 아니라 습지내 산소공급의 기능을 가지고 있다.

2.2. 운영현황

시화호 인공습지의 운영기간 동안 수처리 효율은 오염물질의 종류에 따라 차이를 보였으며, 전반적으로 운영초기에 비해 감소하는 것으로 나타났다(Table 1).¹⁵⁾ BOD의 경우 운영초기인 2002년에 54.8% 정도의 제거효율을 보이다가 2004년에 28.2%로 급격히 저하되었다. 한편 인공습지의 SS 처리효율은 56.3~86.4%로 다른 항목에 비해 매우 높은 효율을 보였다. TN의 처리효율은 습지 운영기간 동안 23~30%에서 비교적 안정적인 값을 보였던 반면 TP는 운영초기에 49.8%의 매우 높은 처리효율을 보이다가 급격히 감소하여 2004년에 -11.1%로 제거효율이 없는 것으로 나타났다.

Table 1. Removal efficiency of pollutants in the Sihwa constructed wetland(Banwolchon wetland)¹⁵⁾

Year	Concentration(mg/L)								Removal efficiency(%)			
	BOD		SS		TN		TP		BOD	SS	TN	TP
	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out				
2002	9.3	4.2	24.4	3.3	28.0	21.5	0.728	0.365	54.8	86.4	23.2	49.8
2003	7.0	4.1	24.5	5.1	28.0	19.5	0.662	0.549	41.4	79.1	30.3	17.0
2004	7.8	5.6	21.3	9.3	22.6	15.9	0.549	0.610	28.2	56.3	29.6	-11.1



(a)

(b)

Fig. 1. Schematic of the Sihwa constructed wetland(a) and map showing the sampling sites in the Banwol High Wetland. The letters of “R” and “L” within site numbers mean “right” and “left” parts of each site.

2.3. 조사방법

본 연구에서는 유입수가 안정적으로 공급되고 규모가 큰 반월천고습지를 대상으로 하여 조사하였다. 수질조사는 습지내 16지점과 유입수 1지점을 선정하여 2005년 3월부터 2005년 11월까지 총 14회 실시하였다(Fig. 1(b)). 습지내 조사지점은 유입부에서 유출부까지 유하방향으로 총 10개 지점을 선정하였으며, St. 2, St. 3, St. 5, St. 8, St. 10은 폐쇄수역이며, St. 1, St. 4, St. 6, St. 7, St. 9는 개방수역이다. 그리고 하류부 폐쇄수역인 St. 5, St. 8, St. 10에 대해서는 각각 좌완(Left; L)과 우완(Right; R) 2지점을 추가하여 습지내 수평적 수질분포를 조사하였다.

2.4. 분석방법

기본 수질항목인 수온, pH, 용존산소(Dissolved Oxygen; DO)에 대해서는 현장에서 다항목수질측정기(YSI 6600-MPS)로 측정하였으며, SS, BOD, TN, 질산성질소(NO₃-N), 암모

니아성질소(NH₃-N), TP, 용존총인(Dissolved Total Phosphorus; DTP), 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP), 그리고 엽록소 a(Chlorophyll a; Chl-a)는 표층수를 채취하여 분석하였다. 채수한 시료는 GF/C 여과지로 여과한 후 여과지는 냉동보존 하였다가 Chl-a 분석에 사용하였다. Chl-a는 Lorenzen¹⁶⁾의 방법에 따라 분석하였다. SS는 미리 무게를 잰 GF/C filter에 일정 시료를 여과한 후 105°C에서 1시간 건조시킨 다음 여과전과 후의 무게차이로 구하였다. 여과한 여과액은 NO₃⁻-N, NH₃-N, DIP, DTP 분석에 사용하였다. NO₃⁻-N은 cadmium reduction법, NH₃-N는 automated phenate법, DIP는 ascorbic acid법, DTP는 persulfate digestion 후 ascorbic acid법을 이용하여 수질자동분석기(Auto Analyzer3, BRAN+LUEBBE)로 분석하였다. TP와 TN은 여과하지 않은 시료를 사용하여 persulfate digestion 후 TP는 ascorbic acid법, TN은 cadmium reduction법을 이용하여 수질자동분석기로 분석하였다. BOD는 20°C 암실에서 5일간 배양한 후 배양전과 후의 농도차로 구하였다. 모든 수

질분석은 수질공정시험법¹⁷⁾과 Standard method(APHA, 2001)에 따라 수행하였다.

습지내 수평적 수질분포 차이를 알아보기 위하여 St. 5, St. 8, St. 10의 좌완, 우완, 중앙 지점의 수질자료에 대하여 ANOVA test(SPSS ver. 12.0)를 수행하였다. 자료의 정규성과 등분산성은 각각 Kolmogorov-Simirov's test와 Leven's test를 통하여 검증하였으며 사후검정은 Tukey's HSD multiple comparison을 통하여 수행하였다. 습지의 수처리효율은 $\{(유입농도 - 유출농도) / 유입농도\} \times 100\%$ 로 하여 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 상 · 하류간 수질분포

3.1.1. 수온, Chl-a, pH 및 DO

조사기간 동안 습지의 표층수온은 5.7~30.3℃의 범위로 3월에 10℃ 이하의 낮은 수온을 보이다가 4~5월에 20℃ 가까이 상승하였으며, 7~8월에 최고치를 보이다가 가을로 갈수록 하강하는 전형적인 온대성지역의 수온분포를 보였다(Fig. 2(a)). 지점별 수온분포는 초봄과 가을에는 균일한 분포를 보인 반면, 수온이 상승하는 4월 말부터 지점간 차이를 보이다가 여름에 뚜렷한 차이를 보였으며 폐쇄수역(St. 2, St. 3, St. 5, St. 8, St. 10)보다 개방수역(St. 1, St. 4, St. 6, St. 7, St. 9)의 수온이 높은 시공간분포를 보였다. 이는 폐쇄수역과 개방수역의 식물피복 유무에 의해 각 수역에 도달하는 일조량의 차이에 의한 것으로 판단된다.

Chl-a 농도는 4.0~268.9 µg/L의 범위로 시공간적으로 매우 큰 변동을 보였다(Fig. 2(b)). Chl-a 농도는 4월에 급격히 증가하여 일부 구간에서는 최고 200 µg/L 이상의 값을 보였으며, 5월에 20 µg/L 이하로 급격히 감소하였다. 이후 6월~8월에 다시 증가하다가 가을로 접어들면서 감소하는 계절변동을 보였다. 지점별 Chl-a 농도는 전반적으로 상류지점에 비해 중 하류지점에서 높았고, 폐쇄수역에 비해 개방수역에 높은 공간분포를 보였다. 시화호 인공습지내 Chl-a 농도는 Forsberg and Ryding¹⁸⁾의 부영양화 기준으로 분류하면 부영양상태(7~40 µg/L) 또는 과영양상태(> 40 µg/L)로 높은 식물플랑크톤 현존량을 보이고 있어, 식물플랑크톤의 증식이 습지내의 유기물증가에 적지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다.

pH는 7.2~9.3의 범위로 전반적으로 수온이 높은 여름에 전 지점에서 8 이상의 높은 값을 보였으며, 4월에도 상류와 하류지점에서 8 이상의 값을 보였다(Fig. 2(c)). 9월 이후에는 모든 지점에서 8 이하의 값을 보였다. pH는 수중에 존재하는 용존형태의 CO₂와 일차생산자인 조류의 양에 의해 변화하며 조류 발생량이 증가하는 경우 용존 CO₂가 감소하여 pH가 증가하게 된다.¹⁹⁾ 본 연구에서 pH의 시공간적 분포는 Chl-a와 매우 유사하게 나타난 것으로 보아(Fig. 2(b)), 봄과 여름의 높은 pH는 식물플랑크톤의 증식에 따른 광합성의 결과에 의한 것으로 사료된다.

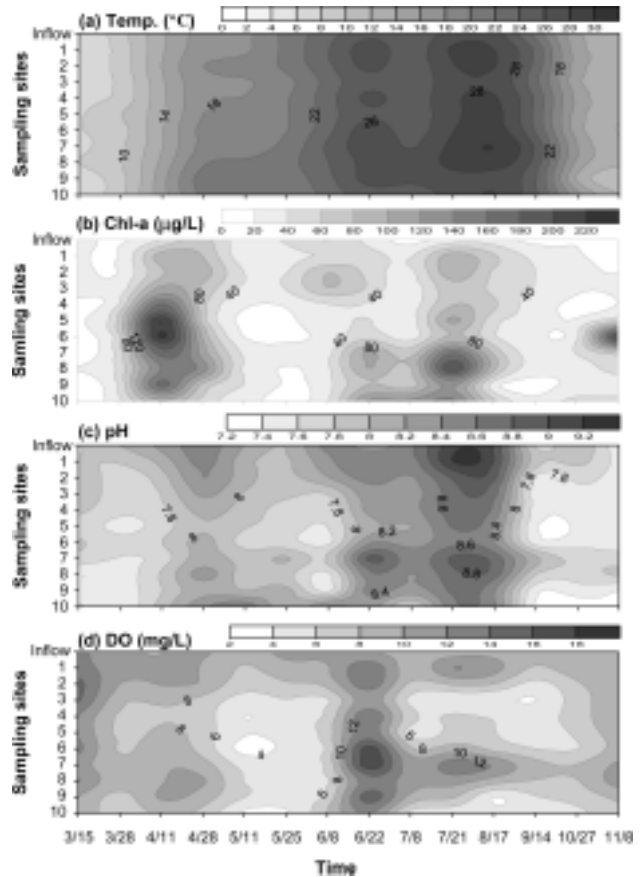


Fig. 2. Temporal and spacial distributions of temperature(a), chlorophyll a concentration(b), pH(c), and dissolved oxygen(d) in the Banwol High Wetland.

습지내 DO 농도는 2.3~20.3 mg/L(포화도 23~258%)의 범위로 pH와 마찬가지로 시공간적으로 매우 큰 변동을 보였다(Fig. 2(d)). DO 농도는 3월에 10 mg/L 이상의 농도에서 지속적으로 감소하다가 5월에 중류와 하류부에서 4 mg/L 이하의 값을 보였다. 이후 6월에 접어들면서 다시 증가하는 경향을 보였으나 7월 이후 일부 중류지점과 하류지점에서 6 mg/L 이하의 낮은 공간분포를 보였다. 그리고 폐쇄수역에 비해 개방수역에서 높은 DO 농도를 보였는데, 이는 Chl-a의 분포에서도 알 수 있듯이 식물플랑크톤의 광합성에 의한 산소공급이 있었기 때문으로 사료된다. 한편, 수중의 DO 농도는 대기중 산소의 자연적 용해, 조류나 수생생물의 광합성 작용에 의하여 증가하는 반면 동·식물의 호흡, 수중 환원물질의 산화작용, 미생물에 의한 유기물의 분해작용에 의해 감소된다.¹⁹⁾ 본 연구에서 7월과 8월에 일부 개방수역(St. 4, St. 6, St. 9)에서 Chl-a 농도가 높았음에도 불구하고 DO 농도는 낮았던 이유는 이 시기에 습지내의 광합성에 의한 산소공급 보다 유기물분해에 의한 산소소비가 더 많았기 때문으로 사료된다.

3.1.2. BOD와 SS

습지내 BOD는 0.1~21.5 mg/L의 범위로 4월과 7월에 St. 2, St. 3, St. 8을 중심으로 높은 값을 보인 반면, 5월

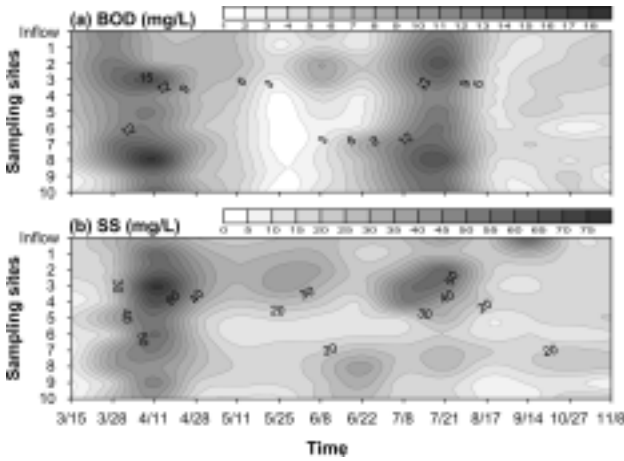


Fig. 3. Temporal and spacial distributions of BOD(a) and suspended solids(b) in the Banwol High Wetland.

에 중하류부에서 2 mg/L의 낮은 값을 보였다(Fig. 3(a)). 4월과 7월에 상류부인 St. 2와 St. 3에서 높은 BOD분포는 SS분포(Fig. 3(b))와 비슷한 반면 중하류부에서 높은 BOD 분포는 Chl-a분포(Fig. 2(c))와 비슷한 경향은 보였다. SS는 0.1~90.0 mg/L의 농도 범위로 4월과 7월에 St. 3에서 최고치를 보였다(Fig. 3(b)). SS 농도는 상류부에서 하류부로 갈수록 감소하는 경향을 보였지만, 4월과 6월에 하류 유출부에서 높은 값을 보였다. 수중의 SS는 육상기원의 토양 입자와 같은 무기성과 수체내에서 증식하는 조류와 같이 생물체에 기원을 둔 유기성으로 분류된다. 본 연구에서 SS 농도가 높은 시기인 4월과 7월에 Chl-a 농도도 높은 경향을 보였지만, 지점별 농도분포는 다르게 나타났다(Fig. 2(b), Fig. 3(b)). SS는 농도는 상류부(St. 3)에서 최고치를 보였고 하류부로 갈수록 감소하는 경향을 보인 반면, Chl-a는 중하류부(St. 6과 St. 8)에 최고치를 보였고 하류 지점에서도 높은 값을 보였다(Fig. 3(b)). 이러한 SS와 Chl-a의 상이한 공간분포는 습지내 SS 농도가 식물플랑크톤 이외에 무기현탁물질에 의해 영향을 받고 있다는 것을 시사한다.

3.1.3. TN과 TP

습지로 유입되는 반월천의 TN 농도는 봄에 20 mg/L 이상의 높은 값을 보이다가 지속적으로 감소하여 가을에는 2 mg/L까지 감소하는 계절변동을 보였다(Fig. 4(a)). 전반적으로 NH₃-N는 TN과 유사하게 봄에 가장 높고 그 이후 점차 감소하는 경향을 보인 반면, NO₃-N과 NO₂-N을 합한 농도는 4월, 7월 10월에 높은 계절 변동을 보였다. 그리고 TN에 대한 존재형태별 비율을 보면 봄에는 NH₃-N가 크고 여름 이후에는 NO₃-N과 NO₂-N이 큰 것으로 나타났다. 습지내의 TN 농도는 0.58~25.90 mg/L(평균 7.07 mg/L)의 범위로 전반적으로 습지를 거치면서 감소하는 공간분포를 보였다(Fig. 4(a)). 이는 습지내에서 TN이 효과적으로 제거되고 있음을 시사한다. 한편 NO₃-N과 NO₂-N을 합한 농도는 0.27~6.70 mg/L(평균 1.99 mg/L)의 범위로 4월 11일을 제외한 조사시기에는 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보였다.

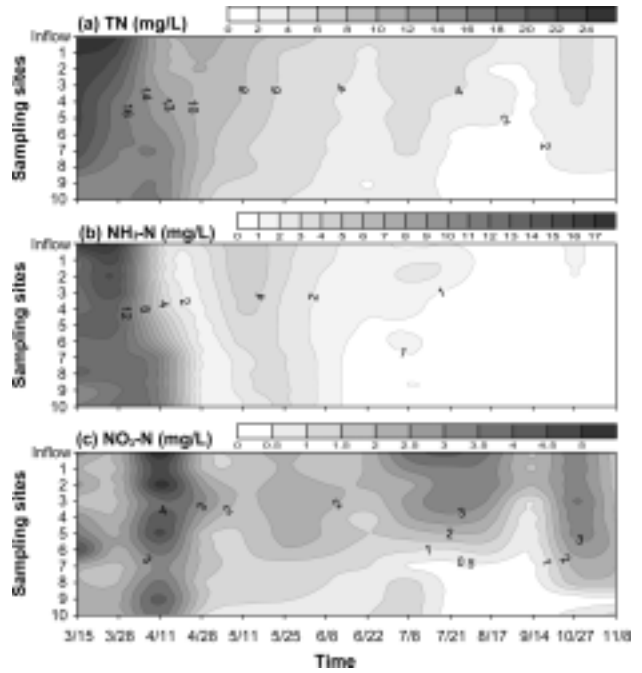


Fig. 4. Temporal and spacial distributions of nitrogen fractions; TN(a), NH₃-N(b), and NO₃-N(c) in the Banwol High Wetland.

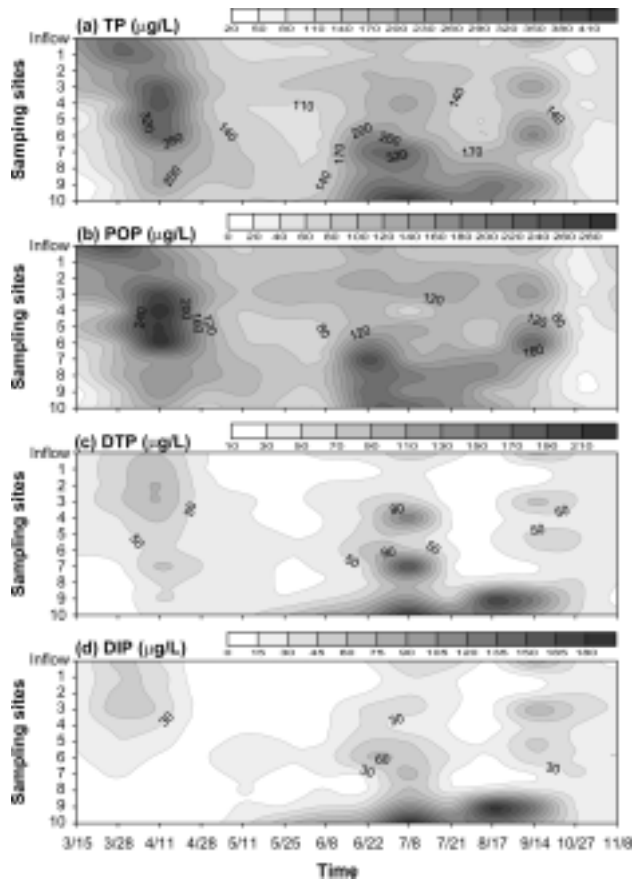


Fig. 5. Temporal and spacial distributions of phosphorus fractions; TP(a), POP(b), DTP(c), and DIP(d) in the Banwol High Wetland.

유입수의 TP 농도는 봄에 300 µg/L 이상의 높은 값을 보이다가 그 이후에는 150 µg/L 이하에 값을 보여, TN과 마찬가지로 봄에 높은 경향을 보였다(Fig. 5(a)). 습지내 TP 농도는 14~468 µg/L(평균 161 µg/L)의 범위로 4월 11일에 중상류지점인 St.3~St.7에서 200 µg/L 이상의 높은 농도분포를 보였으며, 6월~9월에는 중하류지점에서 높은 값을 보였다(Fig. 5(a)). 인의 존재형태별 농도분포를 보면 POP가 5~345 µg/L(평균 112 µg/L), DTP가 9~252 µg/L(평균 49 µg/L), 그리고 DIP는 1~230 µg/L(평균 28 µg/L)의 범위로 용존형태보다 입자형태의 인이 더 많이 존재하는 것으로 나타났다(Fig. 5(b)~(d)).

POP의 시공간적 분포는 TP의 분포와 비슷한 경향을 보인다 반면, DTP와 DIP는 4월 11일에 상류지점인 St.1~St.4에서 약간 높은 농도를 보였고 5월부터 9월까지 하류부(St.9와 St.10)에서 최고 200 µg/L 이상의 높은 값을 보였다. Chl-a와 SS의 분포로부터 4월 11일과 6월~9월의 높은 POP 농도는 각각 현탁물질과 식물플랑크톤에 기인된 것으로 판단된다(Fig. 2(b), Fig. 3(b), Fig. 5(b)). 한편 수중 생태계에서 DO 농도가 낮아져 혐기성 환경이 되면 퇴적물에 함유된 인이 수체로 쉽게 용출될 수 있는데,¹⁹⁾ 본 연구에서 5월 이후 하류지점에서의 높은 DTP와 DIP 농도는 이 시기에 하류지점에서 낮은 DO 농도와 관련이 있는 것으로 사료된다.

3.2. 수평적 수질분포

폐쇄수역인 St. 5, St. 8, St. 10에서 좌안, 우안, 중앙 지점의 수질농도를 ANOVA test로 비교 분석한 결과 St. 8지점에서 SS 항목만이 수평적으로 유의적인 차이(p=0.013, 중앙>좌안>우안)가 있는 것으로 나타났다(Table 2). SS의 평균농도는 St. 5와 St. 8에서는 중앙>좌안>우안 순으로 높게 나타난 반면 St. 10에서는 중앙>우안>좌안 순으로 나타나 습지내의 수평적 수질분포가 지점에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서 모든 지점에서 좌안과 우안에 비해 중앙에서 높은 SS 농도를 보이는 것은 각 지점의 상부의 개방수역(St. 4, St. 7, St. 9)으로부터 발생한 SS(식물플랑크톤, 무기현탁물질 등)가 좌안과 우안보다 중앙으로 이동되었기 때문으로 사료된다.

3.3. 오염물질 제거효율

2005년 3월부터 11월까지 반월천고습지의 월별 BOD 제거효율은 -50.1~61.6%의 범위로 계절변동이 컸으며, 3월과 9월에 각각 60%와 40% 정도로 높았던 반면 4월, 7월 10월에는 제거효율을 보이지 않았다(Fig. 6(a)). 월평균 BOD 제거효율은 12.3%로 유럽과 미국의 인공습지(평균 76%)에 비해 매우 낮은 수준이나, 국내에서 처리시설로 운영되고 있는 인공습지(10~20%)와 하천수를 처리하는 일본의 가스미가우라호 Bio-Park(28%)와 비슷한 수준을 보였다.^{7,12,14)}

Table 2. Horizontal distribution of SS concentration in closed water region (concentration ± 50, mg/L)

Site	Area		
	Left	Center	Right
St. 5	20.43±12.51	21.31±13.53	14.93±13.35
St. 8	22.33±9.37	25.10±11.15	12.42±13.59
St. 10	12.27±7.64	17.47±11.53	14.68±10.20

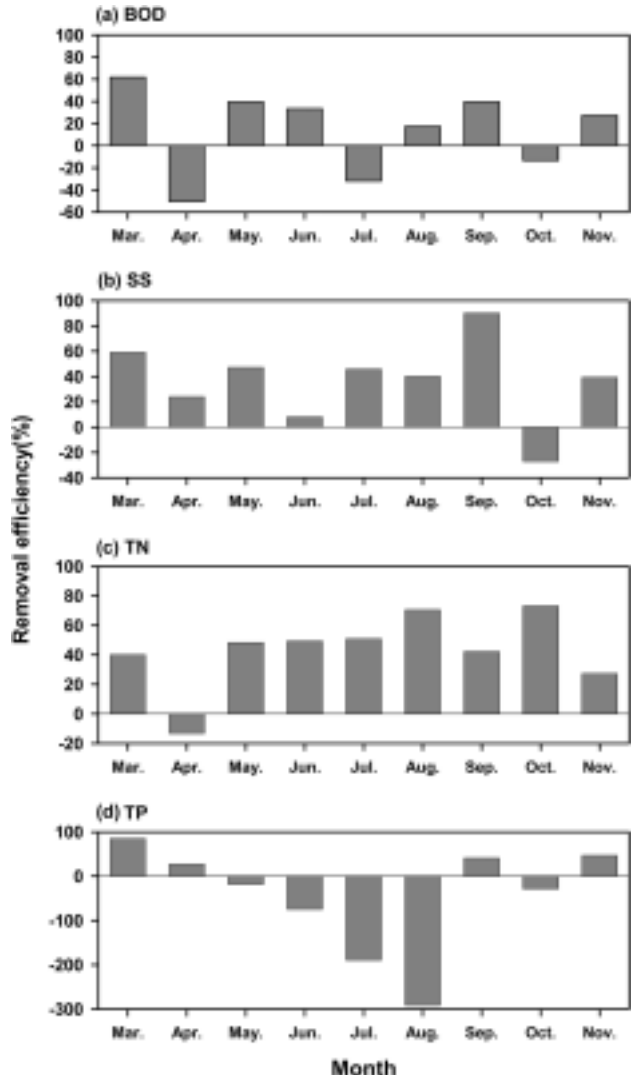


Fig. 6. The monthly removal efficiencies of BOD(a), SS(b), TN(c), and TP(d) in the Banwol High Wetland.

SS 제거효율은 -26.7~90.0%의 범위로 3월과 9월에 높은 경향을 보였으며, BOD와 비슷한 계절변동을 보였다(Fig. 6(b)). 월평균 제거효율은 36.2%로 하수처리장 방류수를 유입시키는 미국과 유럽의 인공습지(69%)와 국내 마산저수지 인공습지(65%) 그리고 가스미가우라호 Bio-Park(42%) 보다 낮았다.

TN 제거효율은 -13.1~70.4%로 다른 오염물질에 비해 매우 안정적이고 높은 결과를 보였다(Fig. 6(c)). 월평균 TN 처리효율은 43.1%로 하수처리수를 유입시키는 미국과 유

럽(52%)¹²⁾ 그리고 일본(45%)¹³⁾에 비해 낮았지만, 하천수와 호소수를 처리하는 일본의 인공습지(21%)¹³⁾와 마산저수지 인공습지(24%)⁷⁾에 비해 높은 것으로 나타났다.

TP의 제거효율은 -291.2~84.9%의 범위로 다른 오염물질에 비해 계절변동이 매우 컸다(Fig. 6(d)). 평균 제거효율이 -44.5%로 인이 습지에서 제거되는 양보다 습지로부터 용출되는 양이 더 많음을 알 수 있으며, 수온이 상승하는 5월부터 제거효율이 (-)로 전환되어 8월에 최고 -291.2%를 보였다.

3.4. 수질정화기능 저하의 주요 원인

본 연구에서 시화호 인공습지의 오염물질 제거효율은 TN을 제외한 BOD, SS, TP는 조성초기에 비해 전반적으로 낮아지는 경향을 보였고, 외국의 인공습지에 비해 낮은 것으로 나타났다. 특히 BOD와 TP의 평균 제거효율은 다른 오염물질에 비해 낮은 뿐만 아니라 계절변동이 매우 컸다. 습지내 오염물질의 시공간적 분포로부터 시화호 인공습지의 수질정화기능이 저하된 주요 원인은 다음과 같이 유추가 가능하다.

3.4.1. 습지내 유기물의 증가

시화호 인공습지는 조성 이후 습지내에서 생산된 식물의 생체 또는 고사체의 제거 없이 운영되어 왔기 때문에 분해되지 않은 일부 고사체가 습지내에 지속적으로 퇴적되어 왔다. 기존 연구에 의하면 시화호 인공습지에서 수생식물에 의한 연간 유기물생산(285 tonC/yr)의 40% 정도는 분해되지 않고 습지내에 퇴적되는 것으로 나타났으며, 퇴적물내 유기물함량은 4.1~47.7 mg/g의 범위로 매우 높은 것으로 나타났다.²⁰⁾ 또한 유입수에 포함된 부유물질이 침전지에서 30% 정도 침전되고 70%는 습지내에 유입되어 일부는 분해되고 나머지는 습지내에 퇴적되는 것으로 보고되었다.²¹⁾

한편 식물플랑크톤은 습지식물과 마찬가지로 유기물을 생산하는 1차생산자로서의 역할을 하며 습지내의 영양염류를 제거하는 수질정화기능을 한다. 그러나 수질정화를 목적으로 조성된 대부분의 인공습지는 높은 농도의 인, 질소가 유입되기 때문에 습지 내부에서의 과도한 식물플랑크톤의 증식을 가져올 수 있으며,¹⁾ 식물플랑크톤의 증식은 입자성유기물 뿐만 아니라 용존유기물 증가에 직접적인 영향을 주는 것으로 보고되었다.²²⁾ 그리고 식물플랑크톤에 의해 생성된 자체생성유기물은 이분해성의 특성을 가지고 있기 때문에²³⁾ 수체의 BOD를 증가시키는 결과를 가져올 수 있다. 최 등²⁴⁾에 의하면 시화호 인공습지에서 식물플랑크톤에 의한 평균 1차 생산력은 4,211 mgC/m²/day로 부영양화 수준인 600 mgC/m²/day을 훨씬 상회하는 것으로 나타났다.

습지식물과 식물플랑크톤의 대량증식에 의한 과도한 유기물증가는 습지내 산소를 고갈시켜 쉽게 혐기성 환경으로 바뀔 수 있으며, 이러한 혐기성 환경에서는 유기물의

분해속도가 느리고 또한 퇴적물로부터 인의 용출이 많아지기 때문에,¹⁹⁾ BOD와 TP 제거효율을 저하시키는 결과를 가져올 수 있다. 본 연구에서도 BOD의 제거효율이 나타나지 않았던 4월(-50%)과 7월(-35%)에 습지 하류부의 Chl-a 농도도 100 µg/L 이상은 높은 값을 보인 것으로 보아 식물플랑크톤의 대량증식이 습지 하류부의 유기물을 증가시켰고, 그 결과 습지의 BOD 처리효율을 저하시키는 것으로 사료된다. 또한 연중 수온이 가장 높았던 7월과 8월에 TP 제거효율이 -200% 이하로 매우 낮았고, 습지 하류부의 DO 농도가 2 mg/L 이하로 낮게 나타난 것으로 보아 이 시기에 미생물의 빠른 산소소비의 결과에 의한 혐기성환경이 퇴적물로부터의 인 용출을 촉진시켰을 것으로 사료된다. 기존의 연구에 의하면 반월천고습지와 저습지에서 5월, 7월, 9월에 채취한 sediment의 용출실험으로부터 0.34~1.52 mg/m²/hr의 속도로 7월에 가장 높은 인용출을 보였다.²⁰⁾

따라서 습지의 BOD 및 TP의 제거효율을 증대시키기 위해서는 과도한 유기물증가에 의한 습지의 혐기성환경에 대한 개선대책이 필요할 것으로 사료된다. 예를 들어 수생식물의 주기적인 절취를 통한 관리 또는 open water의 면적 또는 체류시간 조절에 의한 식물플랑크톤의 대량증식을 저감할 수 있는 방안이 필요할 것으로 본다.

3.4.2. 습지내 불균등한 물흐름 분포

인공습지에서 물 흐름은 수질정화기능에 매우 중요한 요인으로 인공습지 조성 시 유입수가 습지내로 골고루 퍼져 유입될 수 있도록 조성해야 한다.¹⁾ 만약 습지내의 물 흐름이 균등하지 않고 한쪽으로 치우쳐 물 흐름이 빠를 경우에는 입자성물질의 침전율이 낮거나 오염물질과 미생물의 접촉시간이 짧아져 결국 오염물질의 제거효율이 낮아질 수 있다. 그러나 역으로 물 흐름이 좋지 않거나 전혀 흐르지 않는 사수역이 발생한 경우에는 혐기성환경이 조성되어 수질정화기능이 저하되거나 또는 습지 본연의 수질정화기능이 없어지게 된다.

본 연구에서 습지의 SS 농도분포는 중앙지점에서 높은 경향을 보이며 수평적으로 차이를 보였는데(Table 2), 이는 시화호 인공습지의 물 흐름이 균등하지 못함을 간접적으로 시사한다. 최 등²¹⁾에 의하면 반월천고습지에서 염료추적자를 통한 물흐름 분포조사 결과 대부분 식물이 식재되지 않은 개방수역과 중앙수로에 집중되는 것으로 조사되었다. 반면 폐쇄수역에서는 물 흐름이 균등하지 않을 뿐만 아니라 일부 구간은 물이 흐르지 않는 사수역이 나타나는 것으로 보고되었다. 이러한 불균등한 물흐름 분포는 하류부 개방수역에서 발생한 식물플랑크톤이나 물고기에 의한 발생된 탁수 등의 오염물질이 식생대를 통한 정화작용 없이 방류구를 통해 직접 유출될 수 있기 때문에 유출수의 오염물질 농도가 높게 나타나고 결국 습지의 수질정화기능을 저하시키는 주된 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다. 시화호 인공습지에서도 하류부 개방수역에서 식물플랑크톤이 대량증식 하였던 시기에 유출부에서 Chl-a 농

도를 비롯하여 BOD와 POP의 농도가 높았던 것으로 보아(Fig. 2(b), 3(b), 5(b)), 인공습지의 물 흐름이 식생대를 거치지 않고 중앙수로로 치우치고 있는 것으로 판단된다. 그러므로 시화호 인공습지의 수질정화기능을 향상시키기 위해서는 습지의 물 흐름을 식생대로 유도할 수 있는 개선방안의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

시화호 인공습지의 시공간적 수질분포에 대한 정밀조사를 통하여 습지의 수질정화기능의 평가 및 저하원인을 분석한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1) 시화호 인공습지의 오염물질 제거효율은 조성 이후 지속적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 외국의 습지에 비해 낮은 것으로 나타났다. 특히 BOD와 TP의 월평균 제거효율은 각각 12.3%와 -44.5%로 나타났으며, 계절변동도 매우 큰 것으로 나타났다.

2) BOD의 제거효율은 습지 하류부에서 식물플랑크톤이 대량 증식하였던 4월과 7월에 (-)로 전환된 반면, TP의 경우는 4월부터 감소하기 시작하여 5월에 (-)로 전환되어 8월까지 제거효율이 없는 것으로 나타났다.

3) 폐쇄수역인 St. 5, St. 8, St. 10의 좌안, 우안, 중앙지점의 SS 농도분포를 비교 분석한 결과 지점에 따라 다른 분포양상을 보였지만 세 지점 모두 중앙지점에서 높은 경향을 보였다. 또한 ANOVA test 결과, St. 8 지점에서는 수평적으로 유의적인 차이(p=0.013, 중앙 > 좌안 > 우안)를 보여, 습지내의 물 흐름이 균등하지 못한 것으로 유추되었다.

4) 결론적으로 시화호 인공습지에서 수질정화기능의 저하는 과도한 유기물 생산에 의한 습지의 혐기성환경과 이에 따른 습지 하류부에서 용출된 인과 대량 증식한 식물플랑크톤이 균등하지 못한 물 흐름에 의해 식생대를 거치지 않고 유출되었기 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. EPA, "Design Manual; Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters," U.S. EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp. 12~20(2000).
2. 김도선, "인공습지를 이용한 군부대 오수 정화 효율성," 자연보존, **105**, 29~34(1993).
3. 이병현, 이남희, "부레옥잠을 이용한 둔사폐수의 처리," *J. Korea Soc. Water & Waste Water Treatment Technol.*, **2**(2), 29~38(1994).
4. 전만식, "부레옥잠을 이용한 수중의 영양염 제거에 관한 연구," 강원대학교석사학위논문(1994).
5. 안윤주, 공동수, "생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안," 대한환경공학회지, **17**(6), 193~203(1995)
6. 윤춘경, 권순국, 우선호, 권태영, "농촌지역 수질개선을 위

- 한 인공습지실험시설의 3년간 실험결과 검토," 한국물환경학회지, **15**(4), 581~589(1999).
7. 농림부, 농업기반공사, "농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리 요령," 농업기반공사 농어촌연구원, 안산(2004).
8. 관계부처합동, "물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책," 국무조정실, 행정자치부, 농림부, 산업자원부, 환경부, 건설교통부, 산림부(2004).
9. Reddy, K. R. and DeBusk, T. A., "State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control," *Water Sci. Technol.*, **19**(10), 61~79(1987).
10. Moshiri, G. A. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement.* CRC Press Inc., Lewis Publishers, London, pp. 35~58(1993).
11. Song, K. Y., Zoh, K. D., and Kang, H., "Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime," *Sci. Tot. Environ.*, **380**, 13~18(2007).
12. 강호정, 송근예, "인공습지를 이용한 수처리 효율 및 향후 연구제언," 한국습지학회지, **6**(2), 57~63(2004).
13. Nakamura, K., Chiba, T., Sato, K., Morita, Y., Hosomi, M., Tanaka, S., "A survey of construction wetlands in Japan," in *Proceeding of the 8th international conference on wetland system for water pollution control*, 1, pp. 1128~1132(2002).
14. 최지용, 반양진, 저수지 비점오염원 저감을 위한 인공습지의 효과 및 개선방안, 한국환경정책평가연구원, 서울, pp. 112(2007).
15. 한국수자원공사, 시화호 인공습지 수질조사 보고서, 한국수자원공사, 안산, pp. 53~64(2007).
16. Lorenzen, C. J., "Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equation," *Limnol. Oceanogr.*, **12**, 343~346(1967).
17. 환경부, 수질공정시험법, 환경부(1999).
18. Forsberg, C., Ryding, S. O., "Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 swedish waste receiving lakes," *Arch. fur. Hydrobiol.*, **89**, 189~207(1980).
19. Horne, A. J., Goldman, C. R., *Limnology.* McGraw-Hill Inc., New York, pp. 115~132(1994).
20. 한국수자원공사, 시화호 인공습지 수질정화기능 향상연구 보고서, 한국수자원공사, 안산, pp. 157~223(2006).
21. 최동호, 최광순, 김세원, 오영택, 김동섭, 조성주, 박제철, "시화호 인공습지의 물흐름 분포 및 입자성물질 퇴적 특성," 대한환경공학회지, **29**(4), 425~437(2007).
22. Sondergaard, M., Schierup, H. H., "Dissolved organic carbon during a spring diatom bloom in Lake Mosso, Denmark," *Water Res.*, **16**, 815~821(1982).
23. Wetzel, R.G., *Limnology*, 3th ed., Academic Press, New York, pp. 187~204(2001).
24. 최광순, 황길순, 김동섭, 김세원, 김호준, 조성주, 박제철, "수질정화용 인공습지 개방수역에서 유입수질에 따른 식물플랑크톤의 광합성특성 및 유기물생산력," 한국하천호수학회지, **40**(1), 61~71(2007).