

시화호 인공습지 운영현황 및 수질정화기능 개선방안



김 세 원 |
한국수자원공사 K-water 연구원 선임연구원
kimseaa@kwater.or.kr



김 동 섭 |
한국수자원공사 K-water 연구원 수석연구원
kimds@kwater.or.kr



최 광 순 |
한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원
kchoi@kwater.or.kr

인하여 심각한 수질오염 문제가 발생하였다. 특히, 시화호 상류하천인 반월천, 동화천, 삼화천 유역의 경우 주된 오염원이 축산폐수 및 도시하수, 농경지 배수 등이며, 대부분 비점오염원으로 산재되어 있어 오염물질 차집이 매우 어렵고 효과적인 정화처리가 어려운 실정이었다. 따라서 이상의 3개 하천 합류부에 비점오염 물질을 자연정화기법을 이용하여 처리할 수 있는 인공습지를 설치, 상류 유역으로부터의 오염된 하천수를 시화호 유입 직전에 습지로 유입시켜 수질정화 후, 시화호로 유입하여 시화호 수질을 개선하고자 하는데 그 조성목적이 있다.

이처럼 시화호 인공습지는 “시화호 수질개선대책”의 일환으로 반월천, 동화천, 삼화천이 만나는 지점에 총 5개의 습지를 조성하여 상류유역의 비점오염원 저감을 목적으로 2002년 5월부터 운영되고 있다. 습지운영 초기 유기물 및 영양염류 제거효율은 약 40~50%로 매우 양호한 수준으로 방류수 목표수질을 만족시키며 운영되었으나, 2004년부터 일부 오염물질의 제거효율이 저하되었고 계절변동에 따른 오염물질 제거효율 변화도 심하게 나타나는 등 습지의 수처리 기능이 안정적이지 못한 경향을 보이고 있다. 이에 현재 시화호 인공습지의 수질정화 기능을 종합적으로 분석하고, 인공습지의 수질정화기능 향상을 위한 대책방안을 수립하고자 한다.

1. 시화호 인공습지 조성배경 및 목적

시화지구 개발사업은 시화방조제 12.7 km를 축조하여 개발의 잠재력이 높은 17,300 ha의 광활한 간석지를 종합 개발하여 국토의 효율적인 이용을 도모 하고자 시행한 대규모 국토확장사업이다. 그러나, 시화방조제 건설로 생성된 시화호는 안산시, 시흥시, 화성시 등 상류 유역 내 인구 및 축산 농가의 증가, 환경기초시설의 미비와 부실로 각종 도시하수 및 공단폐수, 축산폐수 등의 다량 유입으로

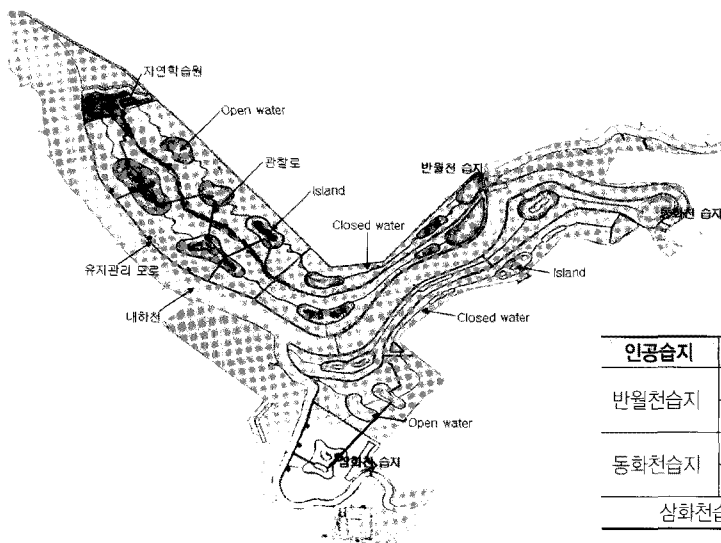
2. 시화호 인공습지의 구성

시화호 인공습지는 시화호 상류하천인 반월천, 동화천, 삼화천 합류지점의 간석지인 경기도 안산시 본오동 및 경기도 화성시 비봉면 일원에 위치한다. 시화호 인공습지는 총 면적이 1,037,500m²에 달하는 국내 최대 규모의 수처리 시설이다. 인공습지는 반월천습지(415,952m²), 동화천습지(265,999m²) 및 삼화천습지(68,972m²)로 3개의 습지로 나누어져 있다. 반월천습지와 동화천습지는 습지 조성지역의 지형 특성상 고습지(바닥고 E.L. +3.5m)와 저습지(바닥고 E.L. +1.5m)로 구분되어 있으며, 고습지는 저류조에 저장된 물을 펌핑에 의해 유입시키는 반면 저습지는 저류조의 일정 수위 이상에서 물이 자연적으로 유하되어 습지로 유입된다. 그리고 시화호 인공습지는 크게 식물의 식재 여부에 따라 폐쇄수역(closed water)과 개방수역(open water)으로 나누어져 있다. 폐쇄수역은 수심이 0.5~0.6m로 인공습지의 수질정화기능을 담당하는 갈대와 부들로 채워져 있으며, 개방수역은 식물이 식재되어 있지 않는 구간으로 수심이 1.0~1.1m로 유지되어 어류 및 야생동물의 서식공

간을 제공해 줄 뿐만 아니라 습지내 산소공급의 기능을 가지고 있다.

3. 시화호 인공습지 운영현황

시화호 인공습지 운영현황을 반월천 고습지를 대상으로 하였으며, 유입·유출수 수질현황 및 오염물질(BOD, TN, TP) 제거효율을 분석하였다. 시화호 인공습지 상류유역에 대한 유역관리 및 하수처리장 건설 등이 시행되어 운영초기 유입수 농도에 비해 현재 유입되는 유입수 BOD 농도는 약 5ppm 이하로 초기 설정한 10~30 ppm보다 현저하게 낮은 농도로 유입되고 있는 상황이다. 년 평균 유출수 BOD 농도는 목표수질인 8ppm 이하로 인공습지 운영기간동안 유지되고 있으나, 2004년부터 일시적으로 유출수 농도가 목표수질을 초과하는 현상이 나타나기 시작하였고 특히 봄·여름철에 이러한 현상이 자주 발생하였다. 반월천 고습지를 대상으로 조사한 년 평균 BOD, TN, TP 제거효율 분석결과, BOD는 운영초기 평균 47%로 양호한 오염물질 제거효율을 보였으나 점차적으로 제거효율이 감소하는 경향을



인공습지	총면적 (750,623 m ²)	
	반월천습지	고습지
	저습지	225,889 m ²
동화천습지	고습지	152,500 m ²
	저습지	113,499 m ²
삼화천습지		68,672 m ²

그림 1. 시화호 인공습지 평면도

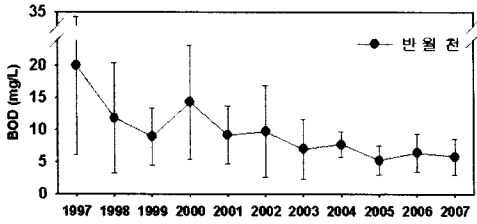


그림 2. 반월천 유입수 수질변화

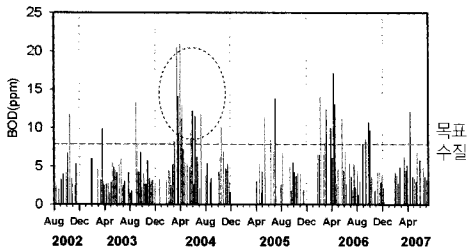


그림 3. 반월천 유출수 수질변화(계절별동)

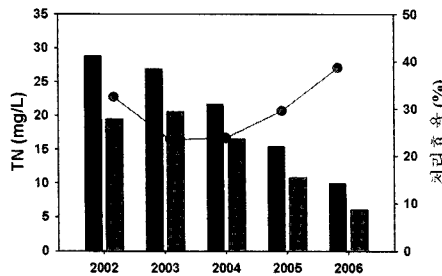
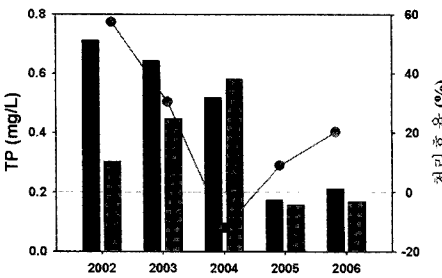
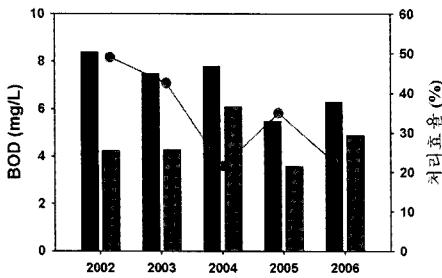


그림 4. 반월천 고습지 오염물질 제거효율

보였고, TN은 운영기간동안 약 20~40%의 안정적인 제거효율을 보였다. TP의 경우 운영초기에는 약 55% 이상의 높은 오염물질 제거효율을 보였으나, 그 다음해부터 제거효율이 급격하게 감소하였고 2004년부터는 유출수 농도가 유입수 농도보다 높은 역전현상이 나타나기 시작하였다.

4. 시화호 인공습지 수리·수문 현황

4.1 수심분포

과거의 인공습지는 완전 평면형태의 한 가지 수심만을 갖는 획일화된 구조로 조성되었으나 최근의 추세는 수질정화효과 향상 및 경관개선의 관점에서 다양한 수심의 다양한 환경을 제공하는 개념으로 전환되고 있다. 인공습지의 수심은 얇은 습지(closed water) 0.1~0.3m, 깊은 습지(open water) 0.3~1.0m, 연못 등 개방수역은(sedimentation basin) 1m 이상이 일반적으로 적용되고 있다. 처리효율, 수생식물의 성장, 용존산소농도 등을 고려할 때 평균 0.3m 정도가 유리하다(농업기반공사, 2004). 식물관리 등 유지관리에 필요한 수위조절장치가 설계에 반드시 포함되어야 하며, 필요수위가 잘 유지되어 운영 및 유지관리가 용이한 형태가 좋다.

시화호 인공습지에서 수심측정결과 그림. 5에서와 같이 open water 지역은 대체로 90~130cm의 수심을 보이는 것으로 조사되었고, closed water 지역은 60cm 미만의 수심을 보이는 것으로 나타났다. 하부습지의 경우 초기 설계계획서와 같이 습지 중앙의 open water를 상하로 가로질러 수로가 유지되고 있는 것으로 조사되었으나, 상부습지는 수로의 형태는 조개패각과 식물의 고사체로 인해 수로가 보이지 않았다. 상부습지의 경우 침전지를 지나 closed water 지역의 수로 폭이 좁으며 수심이 30cm 미만 지역이 넓게 분포하는 것으로 나타났고

식물 고사체가 다량으로 확인되었다. 현재 반월천 고습지의 경우 앞서 살펴본 바와 같이 식물 고사체로 인한 수위의 낮아지는 문제, 일부 open water 지역에서의 침식작용으로 인한 부들 유입 등의 문제점들이 파악되었다. 이러한 문제점들의 해결을 위해 문제 지역의 사수역 해결 방안을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 물흐름(체류시간) 조사

인공습지에서 염료를 이용한 체류시간 조사는 습지내 물흐름의 수리동역학적 특성을 알아보고 어떤 형태의 물흐름이 이루어지고 있는 지에 대해 알고자 할 때 매우 유용하게 쓰일 수 있다. 인공습지내 물흐름 특징을 살펴보면 대부분의 흐름이 open water를 따라 흐르며 식생이 없고 깊은 곳에서 가장 짧은 지체시간을 나타낸다. 반면에 수초대 측면 흐름영역에서는 물흐름, 유속변화가 크지 않다. 수초대가 있는 지역은 그렇지 않은 지역에서 보다 유속이 10%까지 감소하는 것으로 나타났다(Bencala, et al., 1983). 염료추적자로서 ANSI/NSF 기준의 일반하천 실험기준을 만족하는 Kingscote Chemical Inc.의 Rhodamine 50WT(Red) 용액을 이용하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 반월천 고습지 상부와 하부습지의 총 체류시간은 상류습지 총 44hr, 하류습지 총 96hr으로 약 140hr(5.8day)로 조사되었다. 체류시간을 통해 습지의 수리특성을 파악한 결과

수로와 자유수면지역(open water)에서의 흐름이 주를 이루고 있었으며, 이로 인해 습지 전체로는 부분별로 상이한 체류시간을 나타내는 바, 습지 내 흐름의 균일화를 위한 수리특성의 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 체류시간 실측을 통해 나타난 내용을 정리해 보면, 반월천 고습지에는 다음과 같은 수리특성이 있었다. 첫째, 긴급 배수를 위해 습지내에 조성한 수로 및 open water로 수체의 흐름이 주를 이루고 있었고, 이는 수로부분이 식생지역에 비해 흐름을 막는 갈대 등의 장애물이 없어 수리 저항이 작았기 때문인 것으로 판단된다. 둘째, 침전지를 통해 유입된 물은 수리 저항이 없는 수로와 open water를 중심으로 이동되며, 식생 밀집지역으로 이동이 있으나 지체시간이 길어짐을 알 수 있었다. 셋째, 이러한 수리특성은 습지 내의 각 부분에서 체류시간이 각각 상이하게 나타나는 현상을 초래하며 습지 내 퇴적물의 분포도 각각 다르게 하여 퇴적토의 분해기작을 특정지역에서 과다하게 일으킬 수 있고 과다한 체류시간으로 인한 혐기화도 발생시킬 우려가 있을 것으로 판단된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 습지내 흐름의 균일화를 위한 수리특성 개선이 필요할 것으로 판단된다.

4.3 시공간적 수질분포 및 오염물질 제거효율 평가

시화호 인공습지(반월천 고습지)의 시공간적 수

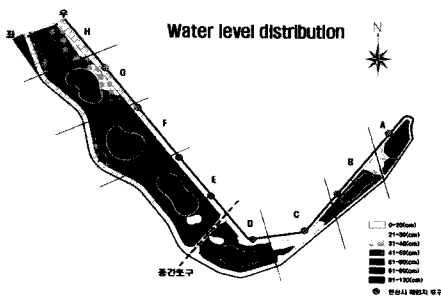


그림 5. 반월천 고습지 수심 현황

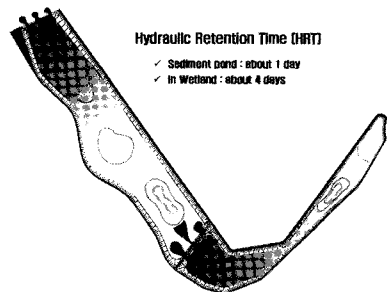


그림 6. 반월천 고습지 물흐름 분포현황

질분포에 대한 정밀조사를 통하여 습지의 수질정화 기능의 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, 중앙 지점의 SS 농도분포를 비교 분석한 결과 지점에 따라 다른 분포양상을 보였지만 세 지점 모두 중앙지점에서 높은 경향을 보였다.
- 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.

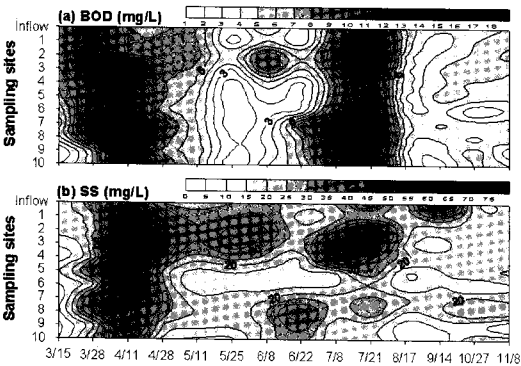


그림 7. 반월천 고습지에서 시·공간적 수질 분포 (BOD, SS)

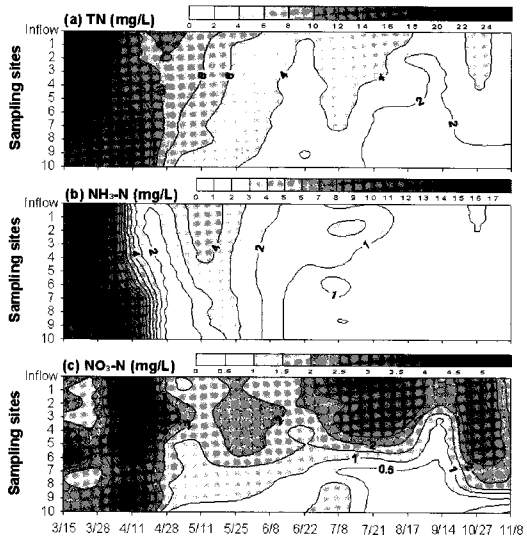


그림 8. 반월천 고습지에서 시·공간적 수질 분포 (TN, NH₃-N, NO₃-N)

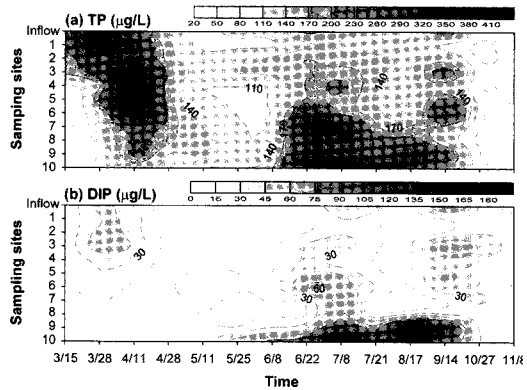


그림 9. 반월천 고습지에서 시·공간적 수질 분포 (TP, DIP)

5. 시화호 인공습지 수질정화기능 개선방안

시화호 인공습지의 수질정화기능 하락의 주요원인을 조사한 결과, 수위 및 수심조절 등이 계획적으로 운영되지 못하였고 오염물질들의 지속적인 퇴적 등으로 인해 특히 봄과 여름철에 혐기성환경이 형성되어 유기물 분해 능력이 감소한 것으로 조사되었다. 또한, 습지내 물흐름이 원활하지 못하여 대량



증식한 조류와 오염물질들이 습지내 수로를 통해 수질정화과정 없이 직접 유출되는 현상들로 인해 수질정화능력이 감소한 주요 원인으로 조사되었다.

위와 같은 조사결과를 바탕으로 시화호 인공습지내 수질정화기능 향상을 위한 수질개선 대책을 시행하였다.

5.1 수위조절

습지내 혐기성환경 개선을 위해 수위 조절을 통하여 대기중 산소 공급 능력을 향상시켜 퇴적물내 혐기성 환경을 자연산화 시키는 방안을 시행하였다. 본 방법 수행을 위해 겨울시즌에는 물을 빼서 일정기간동안 토양층을 대기에 노출 시켰고, 봄과 여름철에는 수위를 10~20cm로 낮게 유지시키는 방안을 시행하였다. 그 결과, 퇴적물층이 자연 산화되어 유기물 분해 능력이 향상되었고, 추가적으로 봄철에 갈대 성장도 촉진되는 결과를 가져왔다.

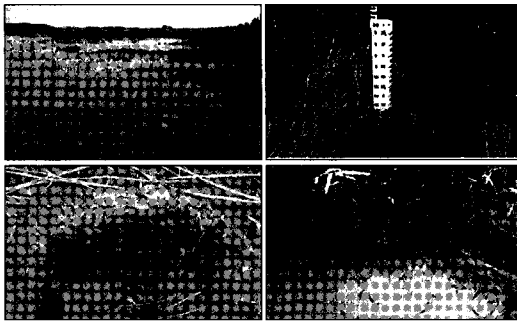


그림 10. 반월천 고습지 수위조절 사진(겨울철)

5.2 물흐름 개선

인공습지내 수로를 통해 어떤 수질정화 처리 없이 오염물질이 유출되는 현상을 개선하기 위해 물흐름을 갈대가 식재되어 있는 지역으로 유도하여 수질정화능력을 최대화 시킬 수 있는 시설을 반월천 고습지 유출부 지역에 설치하였다. 물흐름 개선을 위해 Zig-Zag 제방을 쌓아 물흐름을 식생대 지역으로 유도하여 충분한 체류시간을 갖고 수생식물과 접촉하여 물리·화학·생물학적 과정을 통해 오염물질을 정화시켜 수질개선 능력을 향상시키는 방법이다. 물흐름 시설 시행결과, 유기물과 입자성 오염물질의 처리효율이 향상되어 본 시설 적용전보다 유출수 수질이 매우 안정적으로 처리되는 것으로 나타났다.

6. 향후 관리방안

인공습지는 준공 후 시간이 지남에 따라 습지내 환경변화에 의해 자연습지화 될 수 있으며, 이러한 자연적 천이과정의 결과는 인공습지의 본연의 수질정화기능을 저하시킬 수 있다. 시화호 인공습지의 경우도 개장 이후 습지내 부유물질 및 갈대고사체의 지속적인 퇴적에 의한 환경변화가 습지의 혐기성문제와 물 흐름 저해 현상을 가져왔고, 결국 습지의 수질정화기능을 저하시키는 원인으로 밝혀졌다. 이러한 환경변화는 인공습지를 운영하는 한 지속적

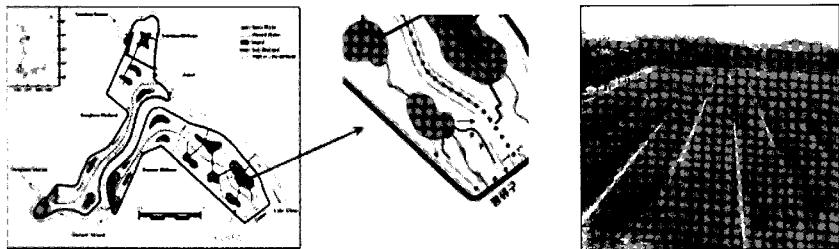


그림 11. 반월천 고습지 물흐름 개선 시설공사 사진



으로 일어나기 때문에 지속적인 모니터링을 통한 수질정화기능 평가 및 개선방안 및 관리방안이 필요하다. 본 연구를 통해 시화호 인공습지의 수질정화기능을 지속적으로 유지시키면서 관리하기 위한 방안으로 수위관리, 물흐름 개선 뿐만 아니라 식생

관리, 식물플랑크톤 대량증식 관리방안, 고사체 제거 및 인 용출 억제 방안, 수질 및 퇴적물 모니터링 등 다양한 수질정화기능 향상을 위한 개선대책을 체계적으로 수립하여 지속적으로 수행해야 할 것으로 사료된다. ☞

참고문헌

1. 농림부, 농업기반공사, "농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리 요령," 농업기반공사 농어촌연구원, 안산(2004).
2. EPA, "Design Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters," U.S. EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp. 12~20(2000).
3. Song, K. Y., Zoh, K.D. and Kang, H., "Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime," Sci. Tot. Environ., 380, pp. 13~18(2007).
4. Reddy, K. R. and T. A. DeBusk. State-of-the-art utilization of aquatic plants in water pollution control. Water Science and Technology. 19(10): 61-79 (1987).
5. Hammer, D. A. Constructed wetlands for wastewater treatment: Municipal, Industrial and agricultural. Lewis Publishers, Michigan, USA (1989).
6. Fisher, P. J., "Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond," NSW, Australia, in constructed wetlands in pollution control. Pergamon Press, New York, pp. 21~43(1990).
7. Kadlec, R. H., Bastiaens, W., and Urban, D. T., "Constructed wetland for water quality improvement: Hydrological design of free water surface treatment wetlands," Lewis Publishers, pp. 77~82(1993).