

상수원 상류지역 인공습지의 5년간 수질 정화효율 평가

박 종 석* / 김 강 석** / 김 용 찬*** / 이 경 훈****

Evaluation of Treatment Efficiencies of Water Quality for 5 years in Constructed Wetland to Upper Region of Water Source

Jong Seok Park* / Kang Seok Kim** / Yong Chan Kim*** / Kyoung Hoon Rhee****

요지 : 본 연구에서는 비점오염물질을 효과적으로 처리하기 위해 주암호 상수원 상류지역에 위치한 복내 바이오 파크 인공습지를 대상으로 2006년 1월부터 2010년 12월까지 5년간 수질정화효율을 평가하였다. 월별 오염물질의 처리효율을 분석한 결과 BOD는 -19.11~37.72% 범위, COD는 -30.14~27.38% 범위로 BOD 보다 상대적으로 월별 편차가 높게 나타났고 SS는 -54.07~64.82% 범위로 나타났다. 그리고 계절별 오염물질의 처리효율을 분석한 결과 TN의 처리효율은 봄과 겨울이 5년간 평균 36.8%보다 높게 나타났으며, TP의 평균 처리효율은 다른 오염물질에 비해 상대적으로 낮았지만, 계절적 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 상수원, 인공습지, 비점오염물질, 정화효율

Abstract : This study evaluates treatment efficiencies of pollutants in Boknae bio-park constructed wetlands surrounding Juam Lake for 5 years from January 2006 to December 2010, in order to treat non-point pollutants effectively. The analysis of monthly treatment efficiency of pollutants shows that the scope of BOD is -19.11~37.72%, and of COD is 30.14~27.38%, thus the monthly deviation COD is relatively higher than BOD, and the scope of SS is -54.07~64.82%. Moreover, the analysis of seasonal treatment efficiency of pollutants shows that the treatment efficiency of TN is higher than 36.8% on average for 5 years in the spring and winter, and of TP relatively lower than other pollutants, however, the seasons don't make much difference to the treatment efficiency of TP.

keywords : Water source, Constructed wetland, Non-point pollutant, Removal efficiency

1. 서 론

최근 우리나라는 국민들의 생활수준 향상과 산업의 발달로 인하여 하천의 기능과 역할 등이 다양화되면서 하천과 인간과의 관계 또한 변화되었다. 더불어 보다 깨끗한 물 공급의 욕구가 증대되어 최근 상수원과 하천 수질의 향상을 위해

꾸준한 노력에도 불구하고 하천의 자정능력이 저하되고 수질 오염현상이 날로 심화되고 있다. 이러한 오염의 원인으로는 다양한 점오염원과 강우시 유출되는 비점오염원을 들 수 있으며, 특히 문제가 되고 있는 것은 정체성 수역에서 부영양화의 주원인물질로 알려져 있는 과도한 영양물질이라 할 수 있다(최윤영 등, 2005 ; 최지용 등, 2002 ;

+ Corresponding author : victorypjs@jnu.ac.kr

* 정희원 · 전남대학교 토목공학과 강사 · E-mail : victorypjs@jnu.ac.kr

** 정희원 · 전남대학교 토목공학과 강사 · E-mail : diamond8661@hanmail.net

*** 비희원 · 코오롱 water & Energy 과장 · E-mail : 10000chan@naver.com

**** 정희원 · 전남대학교 토목공학과 교수 · E-mail : water@jnu.ac.kr

최지용, 2008). 이와 같이 정체성 수역의 수질을 관리하기 위하여 각종 오염저감 대책이 수립되어 추진되고 있으며, 특히 자연정화기능을 활용한 수질개선행법으로 인공습지에 관한 연구가 활발히 진행 중이다.

습지는 수질오염물질 정화기능, 지하수 저장 및 충전기능, 홍수와 가뭄 등 자연재해 완화기능, 생물종의 다양성 및 서식환경 제공 등 생태적 가치가 매우 높으며, 이들 중 수질오염물질 정화기능과 생물종의 다양성 및 서식환경 제공이 가장 중요한 조절 기능이라 할 수 있다(Ye 등, 2009 ; Kröpfelová 등, 2009 ; Lizama 등, 2011). 그리고 습지는 유량 및 수질 변화에 대한 적응력이 높아 폭 넓은 범위의 수리부하에서도 운영이 가능하기 때문에 농촌지역의 비점오염원 관리에 유용하다(함중화 등, 2004).

습지를 이용한 오염물질 처리에 관한 연구는 1960년대부터 소규모의 하수처리에 적용하기 시작한 독일을 비롯한 유럽이 가장 활발하게 진행되고 있으며, 1970년대 미국에서는 자연습지를 이용한 수처리 연구를 시작하였다(Luedritz 등, 2001 ; USEPA, 2000). 특히 수처리를 목적으로 조성되는 인공습지는 습지식생, 토양, 미생물 등의 자연작용을 이용하여 생활하수나 공장폐수, 축산폐수, 광산폐수 등의 점오염원과 강우유출수, 하천정화와 같은 비점오염원을 처리하는 습지로 정의되고 있다(Kadlec 등, 1996 ; DLWC, 1998). 이처럼 외국의 경우는 점오염원과 비점오염원을 관리하기 위한 자연습지와 인공습지 적용사례가 많으나, 국내의 경우에는 농촌 수역의 비점오염원 관리를 위한 인공습지의 적용 연구가 대다수를 차지하고 있으며(고대현 등, 2010 ; 남귀숙 등, 2004 ; 안태웅 등, 2009 ; 강창국, 2010 ; 정용준 등, 2006 ; 최돈혁 등, 2010 ; 박재홍 등, 2005 ; 신재석 등, 2009 ; 유훈선 등, 2009), 최근 하수처리용 인공습지와 차별성을 갖는 상수원 상류 지역의 오염물질 처리효율 및 관리 방안을 위한 연구가 활발히 진행 중이다(정용준, 2006 ; 최지용, 2008 ; 서동철 등, 2011 ; 최익원 등, 2011).

하수처리용 인공습지와 차별성을 갖는 저수지 상류의 대규모 인공습지는 저수지 상류 유입하천 주변부에 조성되며 하류 저수지로의 점·비점오염물질의 유입을 방지하는 역할을 수행한다. 그리고 상대적으로 농도가 낮고 유량이 많으며, 시기별로 유량 변동 폭이 크다는 점에서 처리효율을 최대한 유지하면서 가변적인 유량을 처리할 수 있도록 하는 점이 특징이다(최지용, 2008). 하지만 오염원을 처리하기 위해 조성된 인공습지는 조성 이후 내외적인 환경변화에 의해 오염물질의 제거효율이 저하될 수 있기 때문에 지속적인 모니터링을 통한 수질정화기능 평가와 함께 개선방안의 수립 및 적용이 필요하다(최돈혁 등, 2010). 따라서 본 연구에서는 오염물질을 효과적으로 처리하기 위하여 주암호 상수원 상류지역에 위치한 복내 바이오파크 인공습지를 대상으로 수질정화효율을 평가하였다. 2006년 1월부터 2010년 12월까지 5년간에 걸쳐 인공습지의 수질변화를 모니터링한 결과를 바탕으로 인공습지의 월별, 계절별 그리고 연평균별 수질변화특성 및 그 요인을 파악함으로써 수질정화효율을 평가하여 향후 주암호의 수질개선을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상지역

복내 바이오파크 인공습지(E 127.9° 28.2', N 34.59° 8.7')는 환경관리공단에서 2002년도에 주암호의 수질개선을 위하여 조성한 수질정화용 인공습지이며, 주요 처리대상 오염원은 도로 및 시가지지역의 강우시 유출수, 농경지역의 배수, 강우시 유출수 및 복내 하수종말처리장 방류수 등이다. 복내 바이오파크 인공습지는 자유수면형 인공습지(FWS; Free Water Surface)로 조성되었으며, 습지는 침강 저류지, 습지연못(1차 습지, 2차 습지 및 3차 습지) 및 마이크로폴(micropool)로 구성되어 있다. 침강 저류지는 유입수의 고형물을 침전시키며 주변에 물억새, 부처꽃, 쭉부쟁이, 갯

버들, 키버들이 성장하고 있다. 습지연못은 식생에 의한 오염물의 침전, 흡수하고 연못에 의한 탈질화와 인성분을 정화하는 역할을 하며, 3단계의 습지와 4개의 연못으로 구성되었고 미나리, 달뿌리풀, 갈대, 애기부들, 줄 등의 정수식물과 노랑어리연꽃, 수련 등의 부엽식물이 성장하고 있다. 그리고 마이크로포는 산소공급 및 재부유방지용 습지말단부 시설로 부수식물과 침수식물의 자연발생을 유도하였으며, 줄, 수련 및 노랑어리연꽃이 주로 분포하고 있다. 복내 바이오파크의 전체 면적은 약 23,092 m²이고, 습지 면적은 약 13,655 m²이다.

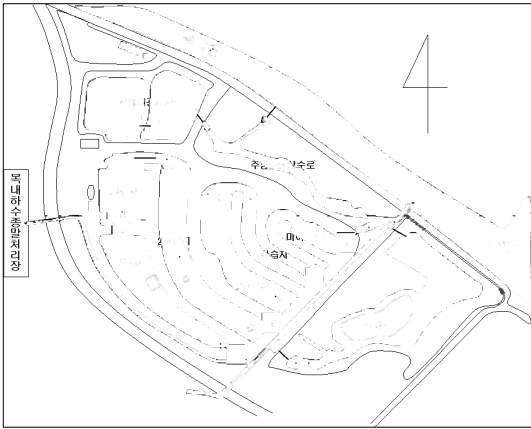


Fig. 1. Sampling points in the Boknae Bio-Park constructed wetlands (1: inflow, 8: outflow)

인공습지의 총 용량은 7,941m³이었고, 그 중 침강 저류지의 용량은 3,225 m³(평균수심 1.5m)이었으며, 습지조의 용량은 3,726 m³(수심 0.2-0.7m)이었고, 방류전의 마이크로포의 용량은 960 m³(평균수심 1.2m)이었다. 인공습지의 용량에 따른 체류시간은 평상시의 경우 7일 정도이며, 강우시의 경우 2일 정도로 유지되도록 설계되었다. Fig. 1은 복내 바이오파크 인공습지의 수질조사 지점을 나타낸 것이다(조주식, 2008 ; 조주식, 2009).

2.2 시료채취 및 분석

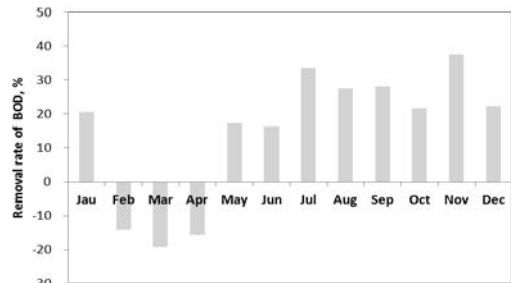
복내 바이오파크 인공습지의 월별, 연평균별 그리고 계절별 수질변화특성을 분석하기 위하여 2006년 1월부터 2010년 12월까지 월 2회 주기로 습지의 유입수와 유출수에서 시료를 채취·분석하였다. 인공습지의 계절별 수질변화특성은 봄 (3, 4, 5월), 여름 (6, 7, 8월), 가을 (9, 10, 11월), 겨울 (12, 1, 2월)로 구분하여 수질특성변화를 분석하였다. 수질 측정 항목은 BOD, COD, SS, TN, TP, Chl-a를 Standard Method(APHA, 2005)와 수질공정시험법에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 월별 수질정화효율

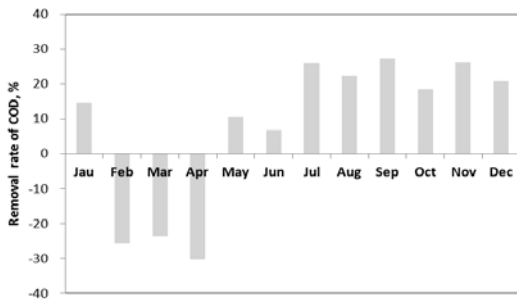
3.1.1 유기물질 및 부유물질

인공습지에서 유기물은 주로 입자형태의 유기물질의 습지 내 침강, 식물체와 media 등에 의한 부착, 미생물에 의한 분해와 같은 물리적, 생물학적 제거 기작이 복합적으로 작용하여 제거된다(강창국 등, 2010). 인공습지의 5년간 월별 유기물질 및 부유물질의 처리효율을 분석한 결과 Fig. 2에서 보는 바와 같다. BOD의 처리효율은 -19.11~37.72% 범위로 월별 편차가 높은 편이었으며, 2월, 3월, 4월은 다른 월에 비해 처리효율이 (-)값을 나타냈다.

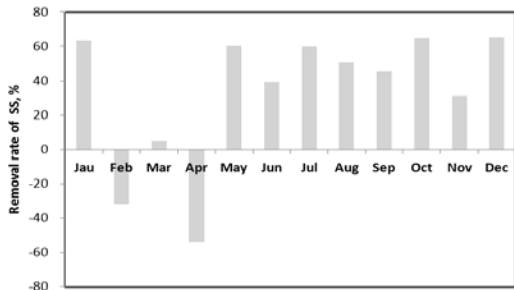


(a) BOD

Fig. 2. Monthly removal efficiency of BOD, COD and SS in the constructed wetland



(b) COD



(c) SS

Fig. 2. Monthly removal efficiency of BOD, COD and SS in the constructed wetland (continued)

COD의 처리효율은 -30.14~27.38% 범위로 BOD 보다 상대적으로 월별 편차가 높게 나타났다. 이러한 원인을 최지용(2008)은 유입유량, 수질 변화 등 외부적인 요인과 습지 시스템 내부 처리기작의 효율 변화가 작용하였을 것이라 판단하였으며, 서동철 등(2011)은 유입수 BOD보다 유출수 중 BOD가 증가되었으며 습지내 수생식물의 생육이 안정화 되지 않고 낮은 수온으로 인해 미생물의 활성이 왕성하지 않았기 때문이라고 하였다. SS의 처리효율은 -54.07~64.82% 범위로 월별 편차가 높았으며, 2월과 4월은 처리효율이 (-) 값을 나타냈다. SS의 처리효율은 상대적으로 높게 나타내는데, 이는 인공습지가 SS 처리효과에 우수한 장치라 판단된다.

3.1.2 영양염류

습지 내에서 질소의 제거는 질산화와 탈질화,

암모니아 탈기, 습지식물에 의한 흡수 등의 과정을 통해 무기질소로 변환시켜 습지의 수체에는 비교적 낮은 농도의 무기질소 농도를 유지할 수 있게 된다. 퇴적된 식물 사멸체의 분해 또는 토양내의 유기물질의 분해를 통해 용존유기질소의 대부분은 다시 수체 내로 유입된다. 이러한 용존 유기질소의 대부분이 분해에 저항력을 가지고 있어서 유출수의 질소는 유기질소 형태가 무기질소 형태에 비하여 높다. 미생물의 활동성에 따라 이러한 유기질소는 암모니아성 질소로 전환되어 다시 무기질소 형태로 전환된다(서동철 등, 2009 ; 고대현 등, 2010). 인공습지의 5년간 월별 영양염류 및 조류물질의 처리효율을 분석한 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같다. TN의 처리효율은 23.11~47.20% 범위로 평균 36.8%의 처리효율로 다른 오염물질에 비해 상대적으로 높고, 계절적 영향을 민감한 반응을 받지 않는 것으로 나타났다. 1월, 2월, 3월의 처리효율이 상대적으로 높았고, 8월, 9월, 11월에서 처리효율이 낮게 나타났다. Gerke 등(2001)은 인공습지의 질소제거에 관한 실험 연구를 통하여 여름에는 질산화를 증가시키는 것이 질소의 처리효율을 높일 수 있고, 겨울의 경우 질산화와 탈질 모두를 증가시켜야만 질소의 처리효율을 높일 수 있다고 보고하였다.

인은 습지내의 구성 물질로 존재하기 때문에 습지 내에서의 완전한 제거는 습지식물을 제거하거나 침전층의 준설을 통해서만 이루어진다. 즉 습지 내에서의 인의 제거는 흡착, 침전, 식물흡수, 미생물에 의한 흡수 등의 기작에 의한 것으로 판단되고 있다(Sundaravadivel 등, 2001). TP의 처리효율은 10.80~56.74% 범위로 평균 38.2%의 처리효율로 TN의 평균보다는 상대적으로 낮게 나타났다. 일반적으로 인의 처리효율은 봄철에 높지만 본 연구에서는 수온이 증가함에 따라 미생물 활동이 활발해 지고, 식생의 분해가 시작되는 4월에 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 이상기온으로 인하여 기온이 낮아지면서 미생물의 활성이 저하되어서 인 제거의 주요기작인 미생물에 의한

분해가 제대로 이루어지지 못하여 효율이 낮아진 것으로 판단된다. 그리고 8월, 9월, 11월로 갈수록 처리효율이 감소하는 경향은 식생 및 조류 등이 성장하면서 수층으로 유리된 인산염을 이용하기 때문으로 판단된다.

식물에 의한 인의 흡수는 생장기가 시작될 때 가장 많으며, 최대 성장률에 도달할 때까지 흡수하는 것으로 알려져 있다. 다른 오염물질에 비해 상대적으로 높고, 계절적 영향을 민감한 반응을 받지 않는 것으로 나타났다. 1월, 2월, 3월의 처리효율이 상대적으로 높았고, 8월, 9월, 11월에서 처리효율이 낮게 나타났다. 조류의 생육환경은 호소, 저수지 등의 정체수역 중 빛의 투과되는 유광층부에 서식하며, 계절에 따라 우점종이 바뀐다(이용운 등, 1999).

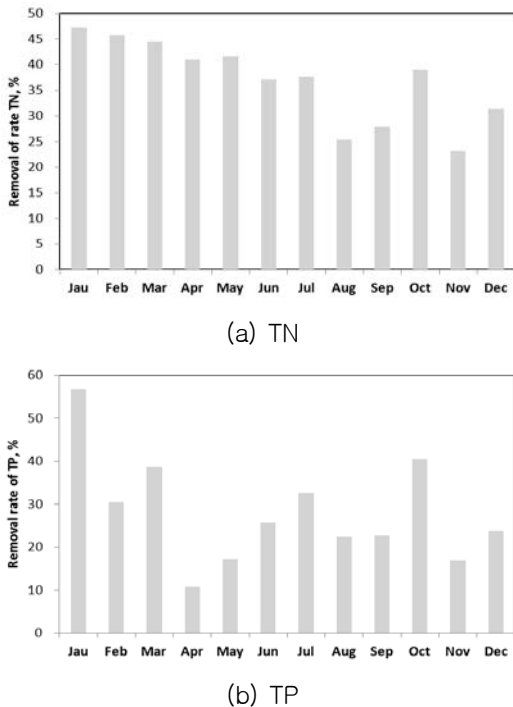


Fig. 3. Monthly removal efficiency of TN and TP in the constructed wetland

3.2 계절별 수질정화효율

3.2.1 유기물질 및 부유물질

복내 바이오파크 인공습지의 5년간 계절별 유기물질 및 부유물질의 처리효율을 분석한 결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같다. BOD의 처리효율은 여름, 가을 및 겨울이 각각 25.91%, 28.65% 및 9.60%였으며, 봄에는 유출수의 BOD가 유입수의 BOD보다 높게 나타났다. 여름과 가을의 BOD 처리효율은 연평균 14.68%보다 약 2배 높은 효율을 나타내었으며, 이는 수생식물이 왕성하게 생육함에 따라 처리효율이 높게 나타난 것으로 판단된다. COD의 처리효율은 여름, 가을 및 겨울이 각각 18.14%, 24.01% 및 2.06%였으며, 봄에는 유출수의 COD가 유입수의 COD보다 높게 나타났다. 봄철 BOD와 COD의 오염물질 처리효율이 낮은 결과는 일반적인 습지의 경우 겨울철에 고사된 수생식물들에 의한 보존효과가 있는 반면 복내 바이오파크 인공습지의 경우 매년 10월에 성장한 수생식물을 제거하여 고사된 수생식물이 인공습지 내 표면을 덮어서 생성할 수 있는 보존효과 없이 미생물의 활성이 회복되지 않았기 때문이며, 동절기의 안정적인 BOD와 COD 등의 유기물 처리를 위해서는 습지생태계를 수생태학적인 면에서 유지할 수 있는 수생식물 제거 방안과 동절기 수생식물의 관리를 위한 검토가 필요할 필요가 있다.(서동철 등, 2011). 더불어 습지에서 정확한 유기물의 기원 및 제거 기작을 파악하기 위해서는 BOD나 COD와 함께 TOC(DOC)와 유기물 성상을 분석할 필요가 있다(김영운 등, 2009)

SS의 처리효율은 여름, 가을 및 겨울이 각각 52.65%, 50.77% 및 47.67%로 매우 높았으며, 봄에는 28.78%로 다른 계절에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. Manios(2003)의 연구에서 인공습지에 습지식물의 식재여부는 부유물질의 제거에 있어서 별다른 차이를 나타내지 않는다고 보고하고 있으나, 이는 지역의 강우 형태와 기후조건 등에 따라 다를 수 있으며, 일반적으로 인공습지의 SS 처리효율은 수생식물의 생육 상황과 밀접한

관계가 있고 습지 유입부 근처의 약 12~20%의 면적에서 대부분이 제거되는 것으로 알려져 있다 (Brix, 1993 ; Waston 등, 1989).

생육환경을 제공하여 오염물질의 처리효율을 향상시키는 것으로 알려져 있다(서동철 등, 2006 ; Vymazal, 2005).

3.2.2 영양염류

복내 바이오파크 인공습지의 5년간 계절별 영양염류의 제거효율을 분석한 결과는 Fig. 5에서 보는 바와 같다. 습지에서의 질소 제거는 주로 세 가지 과정을 통해 이루어진다. 즉 유기질소가 ammonification과정을 통하여 암모니아성 질소로 변환된 후 질산화 미생물에 의해 질산성 질소로 질산화된 후 질산화 미생물에 의해 질산성 질소로 질산화된 질소제거과정과 식물에 의한 질소의 흡수, 암모니아의 휘발 등의 과정을 통하여 이루어진다 (Brix, 1993). 이러한 과정 중 어떤 과정이 질소 제거의 주된 기작인지 여부는 인공습지의 형태, 유입 폐수의 형태 등 여러 인자에 의해 달라질 수 있지만, 주로 질산화/탈질을 통한 미생물에 의한 제거가 주된 기작이라고 보고되고 있다(Watson 등, 1989). TN의 처리효율은 봄, 여름, 가을 및 겨울이 각각 42.28%, 33.74%, 29.99% 및 42.54%로 나타났으며, 봄과 겨울이 5년간 평균 36.8%보다 높게 나타났다. 여름과 가을의 처리효율이 상대적으로 낮게 나타난 이유는 이 시기에는 장마철기간으로 강우에 의해 일시적인 비점오염원 부하량이 급격하게 증가하였기 때문이었던 것으로 판단된다 (서동철 등, 2011). 일반적인 비점오염원 발생특성은 강우시 일시적으로 부하량이 급격하게 증가하며 상대적으로 질소 농도는 감소되어 실제 오염물질의 처리효율을 감소시키게 되나 TN 처리량적 측면에서는 오히려 처리량이 약간 증가하게 되는 것으로 알려져 있다(서동철 등, 2008 ; Vymazal, 2007). TP의 처리효율은 봄, 여름, 가을 및 겨울이 각각 22.68%, 26.83%, 26.41% 및 40.58%로 나타났으며 겨울의 처리효율이 40.58%로 5년간 평균 28.2%보다 상대적으로 높게 나타났다. TP의 평균 처리효율은 다른 오염물질에 비해 상대적으로 낮았지만, 계절적 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다. 강창국 등(2010)의 연구에서 TP의 유입수와

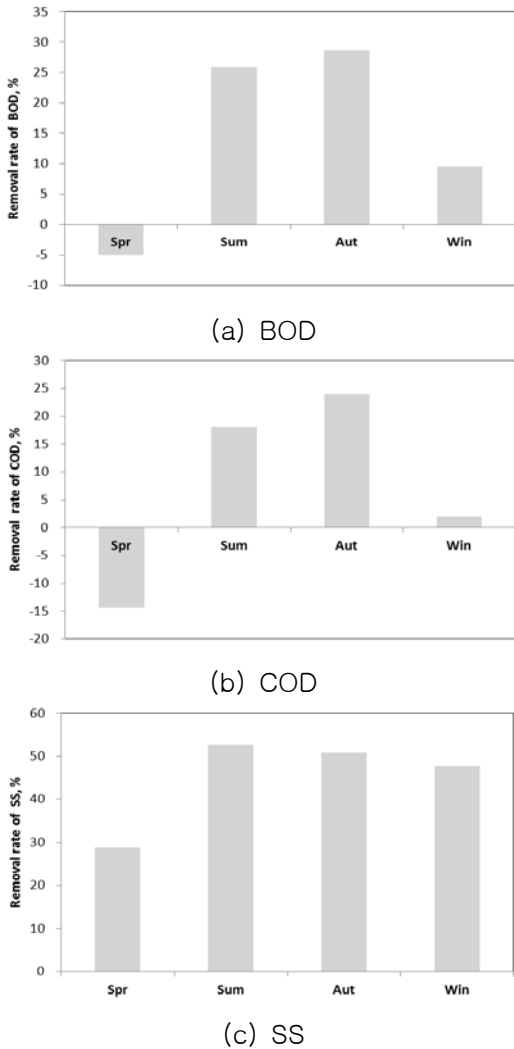


Fig. 4. Removal efficiency of BOD, COD and SS in the constructed wetland on seasons

또한 수생식물은 자유수면형 습지에서 수질의 흐름을 지체시켜 체류시간을 연장시키는 역할을 하여 SS의 침전율을 높여주고, 인공습지 내에서 성장하면서 영양물질을 흡수 이용하여 오염물질을 직접적으로 처리할 뿐만 아니라 미생물에 적합한

유출수의 농도를 비교할 경우 최대 58%의 농도 저감을 보이는 것으로 나타나 인공습지가 인 제거에 비교적 우수한 처리 능력을 가지고 있다고 보고하였다. 습지에서 인은 다양한 인산염의 형태로 존재하며 이러한 인산염은 대부분이 습지 바닥층으로 침전되거나 식생의 뿌리나 줄기 등에 흡착되어 제거된다(양홍모, 2003). 조류의 성장은 호소 내의 오염물질 형태라는 관점에서 볼 때, 무기물질에서 유기물질로의 전환을 의미한다. 따라서 호소내의 COD 농도는 Chl-a 농도와 높은 상관성을 나타낸다(이광식, 2003).

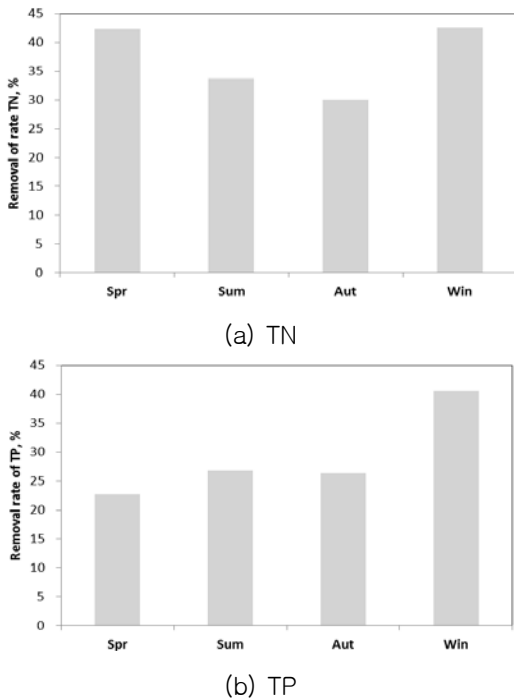


Fig. 5. Removal efficiency of TN and TP in the constructed wetland on seasons

3.3 연평균별 수질정화효율

3.3.1 유기물질 및 부유물질

북내 바이오파크 인공습지의 연평균 BOD, COD, SS의 수질정화효율을 평가한 결과는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 북내 바이오파크 인공습

지의 BOD 설계 효율은 평상시 50%, 강우시 30%이다. BOD의 처리효율은 2006년 31.14%, 2007년 10.67%, 2008년 5.56%, 2009년 6.16%로 나타나 점차 감소하는 경향을 나타내다 2010년 17.49%로 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 2006년 처리효율보다 낮게 나타났으며, 설계 효율보다는 약 3배정도 낮다. COD의 처리효율은 2006년 29.33%, 2007년 4.97%, 2008년 -0.35%, 2009년 -7.83%로 나타나 점차 감소하는 경향을 나타내다 2010년 14.00%로 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 SS의 처리효율은 2006년 45.90%, 2007년 55.88%, 2008년 54.34%로 증가하다 2009년 32.99%로 감소하여 2010년 43.16%로 증가하는 경향을 나타냈다. 북내 바이오파크 인공습지는 수질 정화 목적으로 조성되어 운영되고 있지만 SS를 제외한 BOD, COD에서 뚜렷한 처리효율을 나타내고 있다고 볼 수는 없다.

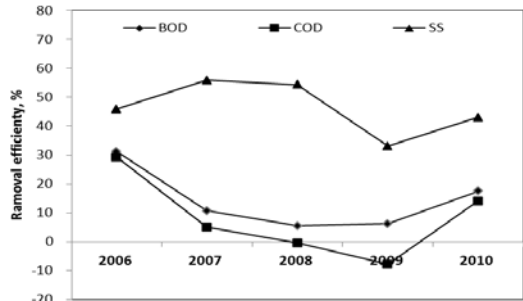


Fig. 6. Removal efficiency of BOD, COD and SS for 5 years in constructed wetland

3.3.2 영양염류

Fig. 7은 북내 바이오파크 인공습지의 연평균 TN와 TP의 처리효율을 나타낸 것이다. 북내 바이오파크 인공습지의 TN 설계 효율은 평상시 50%, 강우시 30%이다. TN의 처리효율은 2006년 31.60%, 2007년 25.67%, 2008년 63.36%, 2009년 27.13%, 2010년 52.69%로 나타나 2008년과 2010년에 평상시 설계 효율인 50%보다 높게 나타났다. TP 설계 효율은 평상시와 강우시 40%이며, 북내 바이오파크 인공습지의 TP 처리효율은 2006

년 37.06%, 2007년 26.74%, 2008년 50.18%, 2009년 21.26%, 2010년 17.49%로 나타나 2008년에 설계 효율인 40%보다 높게 나타났다.

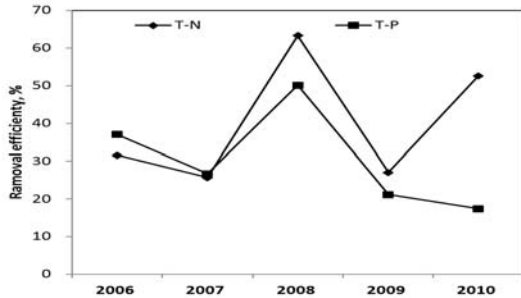


Fig. 7. Removal efficiency of TN and TP for 5 years in constructed wetland

4. 결 론

본 연구에서는 오염물질을 효과적으로 처리하기 위해 설치·운영 중인 복내 바이오파크 인공습지를 대상으로 수질정화효율을 평가하였다. 2006년 1월부터 2010년 12월까지 5년간에 걸쳐 인공습지의 수질변화를 모니터링한 연구이며 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 인공습지의 5년간 월별 오염물질의 처리효율을 분석한 결과 BOD는 -19.11~37.72% 범위, COD는 -30.14~27.38% 범위로 월별 편차가 높게 나타났고 SS는 -54.07~64.82% 범위로 나타났다. TN은 23.11~47.20% 범위로 평균 36.8%으로 다른 오염물질에 비해 상대적으로 처리효율이 높은 것으로 나타났으며, 계절적 영향에 민감한 반응을 받지 않는 것으로 나타났다. 그리고 TP는 10.80~56.74% 범위로 평균 38.2%의 처리효율로 TN의 평균보다는 상대적으로 낮게 나타났다.
2. 복내 바이오파크 인공습지의 5년간 계절별 오염물질의 처리효율을 분석한 결과 BOD, COD, SS의 처리효율이 봄에 비해 여름, 가

을 그리고 겨울이 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 매년 10월에 성장한 수생식물을 제거하여 고사된 수생식물이 인공습지내 표면을 덮어서 생성할 수 있는 보온 효과가 없어 미생물의 활성이 회복되지 않았기 때문으로 판단된다. TN의 처리효율은 봄과 겨울이 5년간 평균 36.8%보다 높게 나타났으며, TP의 평균 처리효율은 다른 오염물질에 비해 상대적으로 낮았지만, 계절적 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

3. 복내 바이오파크 인공습지의 연평균 BOD, COD의 처리효율은 2006년부터 2009년까지 점차 감소하는 경향을 보였으며 2010년 소폭 증가하였다. 그리고 SS는 2006년부터 2008년까지 증가하다 2009년 감소하여 2010년 다시 증가하였다. 하지만 복내 바이오파크 인공습지는 수질 정화를 목적으로 조성되어 운영되고 있지만 SS를 제외한 BOD, COD에서 뚜렷한 처리효율을 나타내고 있지 않았다. TN의 처리효율은 2008년과 2010년에 평상시 설계 효율인 50%보다 높게 나타났으며, TP는 2008년에 설계 효율인 40%보다 높게 나타났다.
4. 복내 바이오파크 인공습지의 5년간 수질정화효율을 분석한 결과 전체적으로 수질의 변화는 매우 편차가 크게 나타났다. 이러한 원인은 유입수량, 수질변화 등 외부적인 요인과 습지 시스템 내부 처리기작의 효율 변화와 더불어 월 2회 이루어지고 있는 수질 조사로 인하여 수질정화효율의 정확한 평가가 어렵기 때문이다. 하지만 인공습지의 조성 목적이 수질 정화이기 때문에 설계 효율보다 낮게 나타난 오염물질에 대하여 처리효율을 향상시킬 수 있도록 효율적인 관리 방안이 마련되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

강창국, Marla C. Maniquiz, 손영규, 김이형.

2010. 농업지역 내 FWS 인공습지의 수질정화효율 분석. 한국습지학회지 12(3): 39-47.
- 고대현, 정윤철, 서성철. 2010. 인공습지에서 오염물질 제거기작 및 국내외 연구동향. 대한환경공학회지 32(4): 379-392.
- 김영운, 이광섭, 이석모, 강대석, 성기준. 2009. 낙동강 수계 자연습지의 계절별 수질변화특성 분석. 한국물환경학회지 25(5): 713-719.
- 남귀숙, 배요섭, 김형중, 이상준, 이광식. 2004. 농업용 저수지 수질개선을 위한 지하흐름 갈대 인공습지의 적용. 한국수처리학회지 6(4): 59-69.
- 박재홍, 권수열. 2005. 인공습지에 의한 축산폐수의 처리시 계절적 영향. 한국습지학회지 7(3): 33-39.
- 서동철, 강세원, 김현욱, 한명자, 임병진, 박종환, 김갑순, 이영재, 최익원, 허중수, 조주식. 2011. 북내바이오파크 인공습지의 오염물질 처리효율 평가. 한국토양비료학회지 44(2): 263-270.
- 서동철, 박미령, 김형준, 조인재, 이홍재, 성성진, 조주식, 허중수. 2006. 자연정화공법에 의한 농촌 전원 독립가구 하수처리장치 개발. 한국환경농학회지 25(3): 202-210.
- 서동철, 박우영, 인종서, 박찬훈, 이홍재, 김홍출, 이상원, 이도진, 조주식, 허중수. 2008. 자연정화공법에 의한 인공습지 하수처리장에서 하수처리 공정개선에 따른 질소 및 인의 처리효율 향상 방안. 한국환경농학회지 27(1): 27-34.
- 서동철, 조인성, 임석천, 이병주, 박성규, 천영석, 박종환, 이홍재, 조주식, 허중수. 2009. 장기 모니터링을 통한 환경친화형 인공습지 하수처리장의 수질정화효율 평가. 한국환경농공학회지 28(2): 97-105.
- 신재석, 김성철, 조광주, 최충호, 최인욱, 박정자, 박구현. 2009. 바이오산업폐수처리수의 재이용을 위한 hybrid 인공습지 시스템의 적용가능성 연구. 한국습지학회지 11(1): 115-121.
- 안태웅, 최이송, 오종민. 2009. 비점오염 제어를 위한 집약형 습지의 수질정화효과에 관한 연구. 한국수처리학회지 17(2): 143-151.
- 양홍모. 2003. 하천고수부지 수질정화 자유수면인 인공습지의 초기운영단계 인 제거. 한국환경농공학회지 22(4): 251-251.
- 유훈선, 강동환, 권병혁. 2009. 고흡만 간척지 내 인공습지에 의한 농경배수 정화효율에 관한 연구. 한국습지학회지 11(3): 37-47.
- 이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일. 2003. 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안. 한국환경농학회지 22(2): 166-171.
- 이용운, 정선용, 배상옥, 문양수. 1999. 조류 출현종 및 거동. 환경영향평가 8(4): 37-45.
- 정용준. 2006. 하수종말처리장 방류수와 비점오염원 처리를 위한 주암호 인공습지 2년 운영사례. 한국물환경학회지 22(6): 1031-1037.
- 정용준, 임기성. 2006. 습지여상시설을 이용한 하천수질정화. 한국물환경학회지 22(3): 456-461.
- 조주식. 2008. 주암호 등 상수원 상류지역 인공습지의 저감효율 분석 및 최적 관리방안. 국립환경과학원 영산강물환경연구소, pp 37-40.
- 조주식. 2009. 수계 특성에 맞는 인공습지 설치를 위한 표준 모델 선정. 국립환경과학원 영산강물환경연구소, pp 9-12.
- 최돈혁, 강호, 최광순. 2010. 시화호 인공습지의 수질정화기능 향상을 위한 사례연구. 한국습지학회지, 12(2): 25-33.
- 최윤영, 현길수, 김현철. 2005. 비점오염 차단시설을 이용한 유출저감 및 수질개선 효과. 한국수처리학회지 13(2): 47-56.
- 최익원, 문성동, 서동철, 강세원, 임병진, 박종환, 김갑순, 이준배, 허중수, 조주식. 2011. 비점오염원 저감을 위한 봉산 인공습지의 오염물질 정화효율 평가. 한국토양비료학회지 44(6): 1089-1094.
- 최지용. 2008. 비점오염 저감을 위한 인공습지의 효율제고 방안. 경기개발연구원 경기논단 여름호: 163-181.
- 최지용, 신창민. 2002. 비점오염원 유출저감을 위

- 한 우수 유출수 관리 방안. 한국환경정책평가연구원. pp 22-28.
- 함종화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 이광식. 2004. 비점오염원 제어를 위한 인공습지의 계절별 처리효율비교. 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, pp 93-96.
- Brix, H. 1993. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance, In *Constructed wetlands for Water Quality Improvement*. Moshiri, G. A., Ed.; Lewis Publishers. pp 231-233.
- DLWC(Department of land and Water Conservation). 1998. *The constructed wetlands manual*, New South Wales, Australia. pp 167-171.
- Gerke, S., Baker, L. and Xu, Y. 2001. Nitrogen transformation in a wetland receiving lagoon effluent: sequential model and implications for water reuse. *Water Res*, 35(16): 3857-3866.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L. 1996. *Treatment wetland*. CRC press, FL, pp 32-34.
- Kröpfelová, L., Vymazal, J., Švehla, J., Štichová, J. 2009. Removal of trace elements in three horizontal sub-surface flow constructed wetlands in the Czech Republic. *Environmental Pollution* 157: 1186-1194.
- Lizama, A. K., Fletcher, T. D., Sun, G. 2011. Removal processes for sraenic in constructed wetlands. *Chemosphere* 84: 1032-1043.
- Luedritz, V., Eckert, E., Lange-Webber, M., Lange, A. and Gersberg, R. M. 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 18: 157-171.
- Manios, T., Stentiford, E. I. and Millner, P. 2003. Removal of total suspended solids from wastewater in constructed horizontal flow subsurface wetlands. *J. Environ. Sci. Health; Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering A38(6)*: 1073-1085.
- Sundaravadivel, M. and Vigneswaran, S. 2001. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Cri. Rev. Environ. Sic. Technol* 31(4): 351-409.
- USEPA. 2000. *Design Manual; Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters*. U.S. EPA 625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, pp 12-20.
- Vymazal, J. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecol. Eng* 25: 478-490.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrient in various types of constructed wetland. *Sci. Total Environ* 380: 48-65.
- Watson, J. T., Reed, S. C., Kadlec, R. H., Knight, R. L. and Whitehouse, A. E. 1989. Performance expectations and loading rates for constructed wetlands, In *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural*, Hammer, D. H., Ed.; Lewis Publishers, pp 231-234.
- Ye, F. and Li, Y. 2009. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering* 35: 1043-1050.

○ 논문접수일 : 2012년 04월 10일

○ 심사의뢰일 : 2012년 04월 16일

○ 심사완료일 : 2012년 10월 09일