

인공습지를 이용한 비점오염원 처리방법



윤 춘 경 ▶>
건국대학교 환경과학과 교수
chunyoonyoon@konkuk.ac.kr

1. 머리말

얼마 전까지만 해도 수질보전정책의 초점은 점오염원관리에 관한 것이었으며, 그 결과 하수종말처리장과 산업폐수처리장 등의 점오염원처리시설을 확충하여 도시와 주요산업지역을 중심으로 점오염원의 처리에 상당한 효과를 나타내고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 하천과 호소의 수질이 크게 향상되지 못하고 있는데, 그 이유 중의 하나는 비점오염원이 다량 하천 및 호소로 유입되기 때문으로 판단된다. 비점오염원은 수질보전에 심각한 악영향을 줄 수 있을 만큼 양이 많고 공급원 또한 다양하다. 미국의 경우 환경보호청(EPA)에 따르면 비점오염원은 호수 오염의 76%를 차지하며 미국 내의 지표수로 유입되는 오염물질 부하량의 약 65%가 비점오염원으로 알려져 있다(USEPA, 1989). 우리나라의 경우도 환경부 조사에 의하면 팔당상수원의 비점오염배출부하량은 44.5%(2000년), 금강과 영산강·섬진강 수계의 비점오염배출부하량은 각각 36.8%, 48.5%(2004년)에 달하고 있다(환경부, 2005).

유역 내에서의 비점오염원제어를 위한 수질개선시설로는 유역내 토지이용형태에 따라 연못형, 습지형, 침투형, 여과형, 수로형, 장치형으로 크게 6가지로 구분할 수 있다. 이 중에서 인공습지를 적용할 경우 기

존의 수질정화시설에서 처리할 수 있는 정도의 유기물질의 제거효과와 함께 수역의 부영양화를 유발하는 인과 질소 등의 영양물질도 경제적으로 제거할 수 있다는 장점이 있다. 습지를 이용한 수질관리는 처리에 대한 비용이 적게 든다는 경제적인 장점과 방법이 자체가 자연생태계의 일부분으로 기능하며, 오염물질의 제거가 효과적이고 안정적이기 때문에 이와 관련된 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다.

습지는 갈대, 줄, 부들 등의 수생식물과 수생식물을 지지하고 미생물 부착의 매체인 토양, 그리고 오염물질 분해 등 수질 정화에 가장 중요한 기능을 수행하는 미생물 등으로 구성된다. 습지에 대한 대부분의 연구가 고농도의 오폐수를 처리하는 연구에 집중되어 왔고, 저농도 고유량인 비점오염 부하량을 처리하는 연구나 적용사례는 많지 않으며, 또한 우리나라에서 습지를 이용한 수질관리는 도입단계로서 시범사업 성격의 인공습지에 대한 장기간의 현장실험 자료 축적 및 정보교류가 절실히 요구된다. 본 고에서는 국내현장에 적용하여 운영 중인 인공습지 연구내용을 소개하면서 인공습지에 의한 비점오염관리에 관한 독자들의 이해를 돕고자 한다.

2. 인공습지 현장실험

2.1 실험시설

인공습지를 이용한 비점오염원 제어효율을 검증하기 위해 2001년에 충남 당진군의 석문담수호 유입부에 인공습지와 우수지를 각각 4개씩 조성하였으며, 각각의 면적은 0.8ha와 0.08ha이고, 총 면적은 약

3.6ha이다. 실험시설의 개요도는 그림 1과 같으며 습지와 유수지의 배치에 따른 처리효율을 비교하기 위해 습지가 유수지 앞에 놓인 습지-유수지 시스템(cell 2와 cell 4)과 습지가 유수지 뒤에 놓이는 유수지-습지 시스템(cell 1과 cell 3)으로 배치하였다. 월 평균 2회 정도로 시료를 채취하였으며, 수질측정 항목은 수온, pH, DO, BOD5, TSS, T-N, T-P 및 Chl-a 등이다.

인공습지 유입수는 석문담수호로 유입되는 당진천의 물을 펌핑하여 연속적으로 공급하였으며, 습지의 수심은 웨어를 이용하여 성장기(3~11월)와 동절기(12~2월)에 각각 0.3m와 0.5m를 유지하였고, 체류시간은 2~5일을 유지하였다. 평균유입유량은 각 습지에 600~700 m³/day를 적용하여 2006년 현재에도 운영 중이다. 강우기를 포함한 성장기 동안에는 총 4개의 습지에 동일하게 수심을 30cm로 유지하였고, 동절기 동안에는 체류시간증가에 의한 습지의 효율을 평가하기 위해 습지별로 수심을 다르게 적용하였다. Cell-1 습지는 성장기와 동일한 30cm를 유지

하였으며, cell-2 습지는 50cm, cell-3 습지는 40cm, cell-4 습지는 45cm를 유지하였다.

2.2 습지식물

인공습지가 조성된 지역은 석문담수호 유입부의 하안지역으로 인공습지 조성 전 습지 조성지역 식생 조사에 의하면 새섬매자기(*Scirpus planiculmis* Fr. Schm.), 갈대(*Phragmites australis*) 및 기타 육상 식물이 번성하였으며, 평균 피도는 약 20% 정도였다. 주변의 농지조성 예정 지역에 대해 식생조사한 결과 갈대가 우점하였으며 평균 피도는 약 70%였다. 또한 일부 물웅덩이 주변에는 애기부들(*Typha angustifolia* Bory et Chaub.)이 우세하게 출현하였다. 습지를 조성하는 토공작업과정에서 기존에 우점하고 있던 습지식물의 줄기, 뿌리 및 씨앗들이 습지 토양에 포함되어 있었고, 주변의 농지조성 예정지역에는 자생하는 대규모 갈대군락지역이어서 씨앗이 유입되어 좋은 식생원 역할을 할 수 있을 것으로 판단

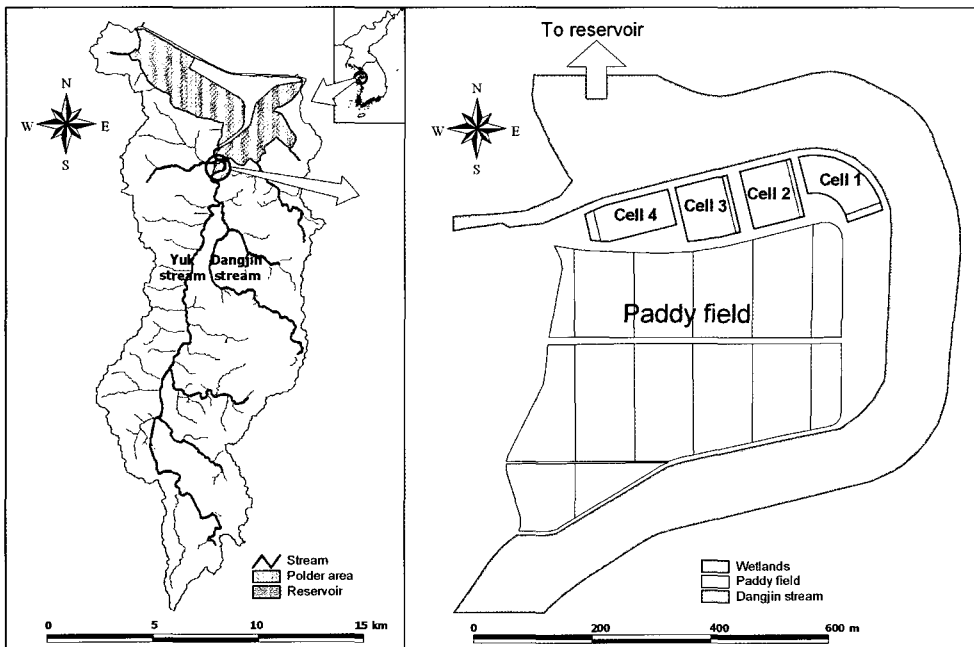


그림 1. 석문담수호 유입부에 조성된 인공습지 개요도

되어 습지조성과정에서 인위적으로 식재하지 않았다. 습지식물의 원활한 자연도래를 위하여 습지식물이 뿌리, 줄기 및 씨앗으로부터 쉽게 발아할 수 있도록 2002년에는 4월부터 5월까지, 2003년에는 4월 한 달 동안 습지토양이 물로 포화될 정도로 유지하면서 물 관리에 주의하였다. 수분이 충분한 습지바닥을 만들기 위해 각 cell마다 물을 약 10cm 유입시킨 후 충분한 지하침투가 이루어져 습지바닥이 물로 포화되었다고 판단되면 웨어와 수문을 이용하여 각 cell의 유입을 통제하는 과정을 반복하면서 습지 바닥이 물로 포화된 상태를 유지하도록 하였다. 본 연구에서는 물 공급을 제외하고는 인위적인 관리를 최소화하기 위하여 습지식물을 제거하지 않았다.

3. 인공습지 운영 결과

3.1 습지식물 자연도래

습지식물의 자연도래를 유도한 결과 2001년도에 토공작업이 끝나고 조성초기인 2002년도에는 갈대, 애기부들, 매자기, 개기장, 물피, 개여뀌등 여러 종의 식생들이 습지 내에서 발견되었고, 각 습지별로 평균 40%정도의 식생피도를 나타내었다. 2003년도가 지나면서 갈대, 애기부들, 새섬매자기 등의 우점종들만 관측되었으며 평균 60%~70%의 식생피도를 나타내었고, 세 번의 생장기를 거친 2004년도 8월 식생조사 결과 각 습지별로 평균 80%~90% 정도의 높은 식생피도가 나타났다. 습지조성 초기에 식재를 실시하지 않았다는 사실을 감안할 때, 조성 후 5년이 경과한 2006년 현재는 식생이 습지에 완전히 정착되었다. 따라서 타 지역에서 인공습지를 조성할 경우에도 본 연구에서와 같이 습지조성 전에 습지조성 예정지 주변에 습지식물들이 자생하고 있다면, 인위적인 식재를 실시하지 않아도 습지토양의 적정 물관리를 통해 습지식물조성이 자연도래에 의해 가능할 것으로 판단된다.

3.2 수질개선

2002년 6월부터 2005년 12월까지 실험결과를 가지고 생장기(3월~11월)와 동절기(12월~2월)로 나누어서 분석 정리한 결과, 각 수질 항목별 유입 및 유출수의 평균농도와 처리효율은 표 1과 같으며 분석시료는 항목별로 200개 내외이다.

BOD5의 경우를 살펴보면 생장기와 동절기의 유입수 평균농도는 3.96mg/L와 4.92mg/L, 유출수 농도는 2.87mg/L와 5.96mg/L로서 오히려 동절기에는 유출수의 농도가 높은 경우도 있었다. 습지에 의한 수질개선은 갈대, 부들 등의 습지식물과 습지식물을 지지하고 미생물 부착의 매체인 자갈과 토양, 그리고 오염물질 및 유기물분해 등 수질정화에 가장 중요한 기능을 수행하는 미생물로 구성되는데, 이 중 미생물의 활동이 온도의 영향을 받는다. 즉, 동절기 기간에는 평균 수온이 4.2℃~4.4℃로써 생장기(20.2℃~20.4℃)에 비해 낮은 수온으로 미생물에 의한 유기물분해가 저조하고, 2월경에 얼음이 녹기 시작하면서 겨울철 고사한 습지 식물체가 분해되어 수체내에서 유기물이 용출되어 유입수에 비해 유출수의 BOD부하가 더 증가한 것으로 판단된다. 인공습지 실험시설의 경우 동절기를 포함하여 유출수 BOD의 경우는 3.0~6.0mg/L의 농도를 나타내었는데, 일반적으로 처리용 습지에서 배경농도가 약 5mg/L인 점과 비교하면 다른 연구결과들의 범위 내에 있음을 알 수 있으며, 이 범위에서의 BOD 농도의 증감변화는 수질관리에 큰 영향을 주지는 않을 것으로 판단된다. 비점오염원 유입수 BOD 농도가 점원오염에 비하여 상대적으로 낮기 때문에, 배경농도를 고려하면 인공습지에 의한 BOD 제거효율은 점원오염에 의한 연구결과에 비하여 낮다는 점에 유의하기 바란다.

TSS의 경우를 살펴보면 생장기와 동절기의 유입수 평균농도는 22.98mg/L와 12.47mg/L, 유출수 평균농도는 7.99mg/L와 9.39mg/L를 각각 나타내었다. 습지의 TSS제거기작은 여과 및 침전과 미생물에 의한 분해 등이 있다. 본 습지와 같이 자유수면형

표 1. 인공습지의 계절별 수질개선 효과

수질항목		농도 (평균 ± 표준편차)	
		성장기	동절기
Temp. (°C)	유입수	20.23 ± 8.29	4.24 ± 1.90
	유출수	20.42 ± 8.82	4.44 ± 1.78
DO (mg/L)	유입수	10.68 ± 3.38	15.17 ± 2.29
	유출수	9.64 ± 4.05	21.77 ± 6.69
BOD ₅ (mg/L)	유입수	3.96 ± 2.28	4.92 ± 3.74
	유출수	2.87 ± 1.59	5.96 ± 4.73
	제거율(%)	24.23±18.64	-21.12±10.77
TSS (mg/L)	유입수	22.98 ± 27.69	12.47 ± 7.41
	유출수	7.99 ± 7.67	9.38 ± 5.74
	제거율(%)	62.66±12.89	22.72 ± 19.42
T-N (mg/L)	유입수	3.29 ± 1.51	5.54 ± 0.71
	유출수	1.51 ± 1.08	3.74 ± 0.87
	제거율(%)	54.11 ± 4.42	32.54 ± 4.44
T-P (mg/L)	유입수	0.30 ± 0.14	0.32 ± 0.09
	유출수	0.15 ± 0.13	0.15 ± 0.08
	제거율(%)	50.55 ± 3.24	53.74 ± 3.63
Chl-a (ug/L)	유입수	24.8 ± 24.02	36.3 ± 25.0
	유출수	9.8 ± 16.13	38.8 ± 34.5

습지 (SF, surface flow wetland)의 경우에는 갈대, 부들, 고랭이, 부착조류등과 같은 습지식물에 의한 유속의 감소로 인해 입자성 물질이 침전되어 대부분의 TSS가 제거되었다고 판단된다. 다른 연구자들에 의하면 이런 물리적인 특성에 의한 TSS의 제거는 기온에 따른 계절적인 영향이 매우 적다고 알려져 있다. 그러나, 본 연구에서 시기적으로 성장기가 동절기에 비해 유입수 평균농도, 유입부하량 및 부하량제거율이 더 높게 나타난 이유는 우리나라의 기후 특성상 7~8월경에 집중호우로 인해 일시적으로 다량의 토사가 습지로 유입되어 TSS부하량이 급격히 증가해도 강우기에 약 90% 정도의 매우 높은 제거율을 나타내어, 성장기에는 TSS의 유입수 평균농도 및 유입부하량이 높아도 안정적인 제거효율이 나타났다. 반면 동절기(12.47mg/L)에는 성장기(22.98mg/L)에 비해 유입수 평균농도가 낮고, 12월초에 습지식물과 부착조류가 고사하고 2월경에는 얼음이 녹으면서 수체가 교란되어 습지바닥에 있는 sediment의 재부

유가 일어나는 등 일시적으로 습지유출수의 TSS가 유입수보다 높아져서 전체적으로 동절기에는 TSS의 처리효율이 낮게 나타났다고 판단된다.

T-N의 경우 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 3.29mg/L와 5.54mg/L, 유출수 평균농도는 1.51mg/L와 3.72mg/L를 각각 나타내어 처리효율은 각각 54%와 33%를 나타내었다. 습지식물은 미생물이 성장할 수 있는 기질을 제공하며, 뿌리로 이동한 산소는 토양으로 확산되어 뿌리주변에 호기층을 형성한다. 유기질소의 무기질화로 생성된 암모니아는 호기층에서 질산화작용으로 질산성질소로 전환되며, 질산성질소는 다시 혐기층으로 확산되어 질소가스로 전환된 후 대기 중으로 이동하게 된다. 이런 질산화와 탈질화를 거쳐 습지에서 질소가 제거되는데, 질산화 및 탈질화 미생물은 온도의 영향을 받기 때문에 동절기 동안 제거율이 성장기에 비해서 낮게 나타났다고 판단된다. 총질소제거에 영향을 주는 요인으로 는 수온이외에도 pH와 체류시간, 탈질화 박테리아에

에너지 공급원이 되는 유기탄소 등이 있다. 본 습지의 경우 실험기간동안 습지의 유입부 및 유출부의 pH범위는 8.11~8.87로써 변화폭이 적어 pH에 의한 질소부하량 제거율의 변화는 적다고 판단된다. 또한 질소 1g을 미생물이 분해하기 위해서는 대략 2.5g의 유기탄소가 필요하다는 연구가 있는데, 성장기를 거치면서 습지에 높은 식생피복도(80~90%)를 형성한 식물들이 고사하면서 형성된 습지 바닥의 유기물층은 탈질화박테리아의 충분한 유기탄소 공급원이 될 수 있다고 판단된다. 마지막으로, 인공습지에서의 체류기간은 중요한 설계인자이자 운영인자로서 다른 연구자들에 의하면 인공습지의 적정 체류시간으로 5~14일을 제시하고 있다. 본 습지에서도 동절기기간에는 습지의 수위를 성장기(0.3m)보다 더 높게(0.5m) 유지시켜 습지의 체류시간을 약 3.5일에서 동절기기간에는 5.5일까지 늘려 주었다. 현재까지의 실험결과를 살펴보면 T-N의 경우 제거효율이 성장기가 동절기에 비해서 더 높게 나타났으나, 동절기에도 상당량의 제거효과가 유지되는 것을 알 수 있다.

T-P의 경우 성장기와 동절기의 유입수 평균농도는 0.30mg/L과 0.32mg/L, 유출수 평균농도는 모두 0.15mg/L로 50%이상의 처리효율이 지속적으로 나타났다. 습지에서의 인의 제거기작은 흡착, 침강, 조류 및 습지식물의 흡수 등 여러 물리적, 화학적, 생물학적 과정에 의해 이루어진다. 본 습지의 경우 실험기간 동안 총인을 형태별로 분석해본 결과 입자성인 약 60%와 용존성인은 약 40%로 나타났으며, 입자성인은 주로 침전하고 용존성인은 식물 및 조류에 의해서 흡수되어 습지에서 총인이 제거되었다고 판단된다. 실험기간 동안 습지의 평균용존산소량은 성장기, 동절기 모두 10mg/L이상의 충분한 호기성 상태를 유지하였는데, 호기성 상태에서 인 이온은 알루미늄 및 철 이온과 같은 금속이온과 결합하여 불용성화합물로 변하여 침전하게 된다. 상대적으로 입자성인의 비율이 높아 주로 침전 및 침강이 의해서 인이 제거되었다고 판단되며, 수온 및 식생피복도에 따른 계절적 차이에 의한 영향은 상대적으로 적어서 동절

기에도 성장기와 유사한 처리효과가 나타난 것으로 판단된다. 일반적으로 습지를 장기간 운영하게 되면 퇴적물의 축적과 오염물질의 포화로 인해 습지의 효율성이 저하되며 인의 경우 습지가 가동된 3~4년 후에는 제거율이 초기보다 낮아지는 것으로 알려져 있다. 본 습지의 경우 아직 운영초기로서 습지의 효율성이 저하되지 않은 상태인데, 앞으로도 운영기간이 늘어나도 동절기와 성장기 모두 높은 처리율을 나타내는지에 대해서는 지속적인 관측이 필요하다.

4. 수질개선용 인공습지 운영시 유의사항

수질개선용 인공습지에 대한 관심이 증대되어 여러 지역에 습지조성계획이 수립되고 있는데, 비점오염처리용 인공습지 조성에서는 다음과 같은 사항들을 유의하여 설계 및 조성해야 한다고 생각한다.

(1) 습지식생조성 : 인공습지를 조성하면서 갈대과 같은 습지식물의 인공식재를 계획하는 경우가 많은데, 본 고에 소개한 사례와 같이 약 3년 정도의 자연도래기간이 경과하면서 습지식물이 충분히 정착하는 경우도 가능하다. 그리고 이 정도의 기간이 지나고 나면 습지식물의 생장이 문제가 아니라 오히려 습지식물을 수확하거나 관리하는데 관심을 가지게 된다. 자연도래를 유도할 경우에는 식물의 성장특성을 파악하여 토양함수비를 포화상태가 되도록 적절히 유지해주는 것이 중요하다.

(2) 습지식생관리 : 인공습지에서 식물의 기능이 중요하나 습지식물은 겨울철에 고사하였다가 봄에 다시 성장하는 특성이 있어서, 다량의 식물고사체가 습지 내에 잔류하게 된다. 이를 관리하고 수질개선효과를 증대시키기 위하여 성장기에 식물의 수확을 시도하는 경우가 있는데, 면적이 넓은 습지에서 수확하는 분량이 많아서 수확 및 처리 과정에 어려움이 있을 뿐 아니라 수확에 의한 수질개선효과 향상효과가 적

어서 습지식물의 수확은 비현실적인 관리방법으로 판단된다.

(3) DO관리 : 인공습지 운영기간이 경과함에 따라 바닥에 식물고사체가 누적되면서 이들을 분해하는데 수중 용존산소가 많이 소모되어 미생물에 의한 분해가 활발한 성장기에는 DO가 낮아지는 상황이 발생할 수 있다. DO가 낮아지면 악취 및 모기발생 문제가 예상된다. 습지내 DO를 일정수준 이상으로 유지하기 위해서는 인공폭기시설의 설치가 가능하겠으나, 자연정화공법의 특성을 유지하기 위해서는 습지내 식물피도를 적정수준으로 유지하고, 습지식물이 자라지 않는 지역은 개방구간(open water)으로 관리하여 조류(algae)들의 광합성작용이나 대기로부터 재폭기(reaeration)가 이루어지도록 운영할 필요가 있다. 조류에 의한 영양물질의 제거효율은 식물에 의한 제거효율보다 높아서 개방구간에서는 수중에 DO 공급 외에도 추가적인 수질개선효과를 기대할 수 있다.

(4) 영양물질 제거 : 바닥의 식물고사체가 누적되

어 분해되면서 영양물질의 용출이 이루어져 총인(T-P) 제거율이 저하될 수 있는데, 반면에 총질소(T-N)는 호기성-혐기성 상태가 각각 질산화-탈질화 과정에 유리하여 오히려 제거효율이 증가하는 경향이 있다.

(5) 생태적 기능 : 인공습지는 수질개선용으로 주로 조성되지만 생태계에 서식처 제공의 기능도 중요하게 작용한다. 물과 습지식물이 조성하는 습지서식지는 자연생태계가 개발에 의하여 손실되어 가는 상황에서 대체서식지로서의 역할을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 환경부(2005). 비점오염원관리 업무편람.
 U.S.EPA(1989). Nonpoint sources: Agenda for the Future. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington. 