

수생식물의 영양염류 제거능¹⁾

주 은 정²⁾

서울대학교 생물교육과

머리말

세계의 수많은 습지들은 단순히 하수를 처리를 위한 용도로 남용되어 왔으며 산업이 고도화되고 인구가 집중됨에 따라 점오염원 및 비점오염원에 의해 오수가 습지로 유입되는 양은 더욱 늘어났다. 또한 무분별한 개발로 인하여 다양한 생물종의 서식지인 습지가 소실되거나 변형되고 그 결과, 습지의 자연정화능이 파괴되어 수질 악화는 더욱 가속화되었다.

최근 인공 습지(constructed wetland)를 이용한 수질 정화 방법이 미국과 영국을 중심으로 활발히 연구되고 있는 추세인데 질소와 인 같은 영양염류의 제거에 있어 다른 수처리 방법에 비해 효과적이라고 알려져 있다. 질소, 인은 습지 부영양화의 주요한 원인물질이지만 고등식물에게는 없어서는 안 되는 필수 영양원이다. 따라서 습지식물의 영양염류 흡수는 수처리를 위한 인공 습지에서 중요한 과정 중 하나이다. 습지 식물들은 많은 양의 영양염류를 제거할 수 있으며 에너지 소비량이 적고 사용한 식물을 자원으로 이용할 수 있다는 장점이 있다(이와김, 1999; Brix, 1997).

미생물의 경우, 생산성이 높아 오염물질을 더욱 빠르게 흡수할 수도 있으나 이들은 단기간에 다시 분해되어 원래의 유기물로 돌아갈 수 있다. 일년에 몇십회씩 반복될 수도 있는 문제이다. 그러나 대형 수생식물의 경우, 이러한 회전이 느리다. 대부분 1년의 사이클을 가지고 있으므로 봄부터 가을에 걸쳐 성장하는 동안 받아들인 영양염은 늦은 가을, 말라 죽을 때까지 방출하지 않는다. 따라서 영양염이 대형 식물 체내에 고정되어 있는 동안은 유해한 플랑크톤 발생이 억제되게 된다. 또한 식물 플랑크톤의 인위적 제거가 대단히 어려운데 반하여 대형 수생식물의 제거는 매우 용이하므로 효율적인 방법이라고 할 수 있다(津田松苗, 1995).

수생식물은 크게 부유식물, 부엽식물, 정수식물, 침수식물로 나누어 구분할 수 있다. 부유식물은 잎이 수면 또는 수면 위에 있고 뿌리가 물속에 있는 식물로 부레옥잠, 생이가래, 개구리밥 등이 이에 해당한다. 부엽식물은 수련, 어리연꽃, 마름과 같이 뿌리는 물 밑 저토에 있으면서 잎을 수면 위에 띄우는 식물을 말하며 정수식물은 뿌리를 저토에 두고 줄기 잎 등이 물위로 올라오는 갈대, 줄, 부들 등을 말한다. 침수식물은 검정말, 물수

1) The Nutrient Removal Ability of Aquatic Plants

2) JU, Eunjeong, Department of Biology Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea;

E-mail: betula09@snu.ac.kr

세미, 나사말 등 몸 전체가 물 속에 있는 식물이다. 그 중 수질 정화에 가장 많이 이용되는 것은 부유식물인 부레옥잠(water hyacinth)으로 국내외에서 많은 연구가 진행되어 있으며 실제 오수 처리 시스템에 이용되고 있다. 이는 침수식물이나 정수식물에 비하여 제거가 용이하면서도 같은 부유식물 중에서도 생체량이 크기 때문이다. 뿐만 아니라 부유식물인 개구리밥이나 정수식물인 갈대, 부들, 몇몇 침수식물 등도 영양염류 제거를 위하여 활발히 연구되고 있다.

수생식물의 영양염류 흡수 기작

질소

습지에서의 질소의 제거는 식물과 부착미생물에 의한 흡수(Uptake), 암모니아의 휘발(ammonia Volatilization), 또는 질산화와 탈질 반응(Nitrification/Denitrification)의 3가지 기작에 의해 일어난다. 식물은 흡수를 통해 직접적인 질소를 제거하기도 하지만 뿌리 주위에 산소를 공급하여 질산화와 탈질 반응을 촉진시키므로 매우 중요한 역할을 하고 있다(Reed *et al.*, 1995).

질소가 습지에 들어오는 형태는 흔히 유기질소(organic N), 암모니아(NH_3 또는 NH_4^+), 질산염(NO_3^-), 아질산염(NO_2^-) 등이며 습지의 질소 형태는 물리적, 화학적 상태에 따라 쉽게 변화된다(그림 1). 도시 폐수의 총질소 농도는 대략 15~50 mg/l 정도이며 이 중 60% 정도는 암모니아의 형태이다(Reed *et al.*, 1995). 유기질소는 일반적으로 폐수 중 유기물과 함께 흘러 들어오는데 쉽사리 부패되어 암모니아로 변화된다(ammonification). 호기성 환경에서는 세균이 암모니아성 질소를 아질산염과 질산염으로 산화시킨다. 아질산염의 경우, 매우 불안정하여 쉽게 질산염으로 변화되는 성질을 가지고 있다. 습지 식물

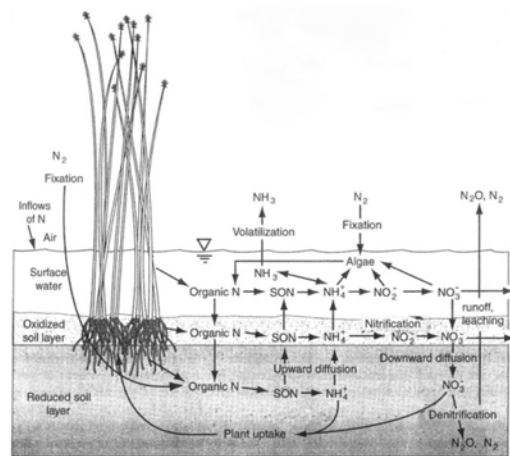


그림 1. 습지 식물의 질소 흡수 기작(Mitsch and Gosselink, 2000).

은 암모니아 이온과 질산염 형태의 질소를 흡수하여 체내 단백질로 저장하게 되는데 그 중 질산염의 형태를 더 쉽게 섭취한다(Mitsch and Gosselink, 2000; Tchobanoglous *et al.*, 2003).

인

인은 질소와 마찬가지로 생물 성장에 필수적인 요소이며 습지의 종류에 따라 제한 요인이 되기도 하나 오염된 습지에서는 상황이 다르다. 생활 하수 및 산업 폐수, 자연 유수에 의해 들어오는 인 화합물이 습지에 유해한 조류의 급성장에 영향을 주므로 현재 관심의 대상이 되고 있다(Tchobanoglous *et al.*, 2003). 습지 내 인의 형태는 pH에 따라 달라지는 경향이 있으며(Mitsch and Gosselink, 2000) 기체상태로는 변형되지 않고 질소에 비하여 제거가 다소 어렵다(Fisher and Acreman, 2004). 주로 흡착과 침전에 의해 제거되지만 식물과 부착 및 미생물의 흡수에 의한 제거 또한 매우 효율적이다. 식물이 흡수할 수 있는 형태의 인은 올도인산염(orthophosphates)으로 PO_4^{3-} , H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} 등이며(그림 2) 식물에 의해 인이 흡수되었

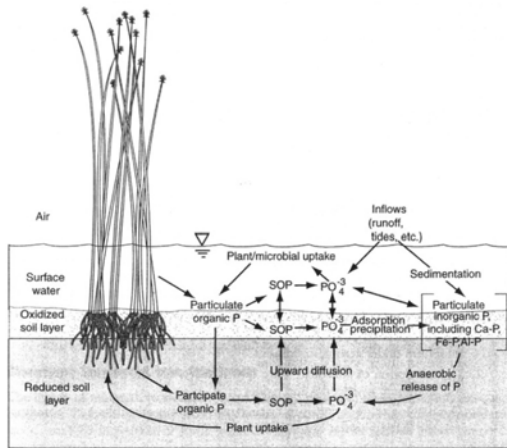


그림 2. 습지식물의 인 흡수 기작(Mitsch and Gosselink, 2000).

을 때 식물을 제거하지 않으면 흡수된 인은 이듬해 다시 방출되게 된다. 꾸준히 제거되고 잘 관리되었을 때 부레옥잠 또는 기타 수생식물에 의해 50~70%까지 인이 제거될 수 있다(Reed *et al.*, 1995).

수생식물의 종류에 따른 영양염류 흡수능

부유식물(Free-floating plant)

부유식물은 광합성부위가 물위에 떠 있고 뿌리를 수중으로 내리고 있는 형태를 가지고 있으며 수중으로 내린 뿌리를 통하여 영

표 1. 수생식물의 영양염류 흡수능(Brix, 1994)

식물 종류	영양염류 흡수능 (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	
	N	P
파피루스(<i>Cyperus papyrus</i>)	1100	50
갈대(<i>Phragmites australis</i>)	2500	120
큰잎부들(<i>Typha latifolia</i>)	1000	180
부레옥잠(<i>Eichhornia crassipes</i>)	2400	350
물상치(<i>Pistia stratiotes</i>)	900	40
솔잎가래(<i>Potamogeton pectinatus</i>)	500	40
붕어마름(<i>Ceratophyllum demersum</i>)	100	10

표 2. 부유식물의 영양염류 함량(Reddy and DeBusk, 1987)

식물 종류	조직의 영양염류 함량(g/kg)	
	N	P
부레옥잠(<i>Eichhornia crassipes</i>)	10-40	1.4-12.0
물상치(<i>Pistia stratiotes</i>)	12-40	1.5-11.5
피막이속(<i>Hydrocotyle</i> sp.)	15-45	2.0-12.5
좁개구리속(<i>Lemna</i> sp.)	25-50	4.0-15.0
생이가래속(<i>Salvinia</i> sp.)	20-48	1.8-9.0

양염류를 흡수한다. 뿌리가 얼마나 성장하는 가는 영양염류 제거능에 영향을 미친다(USEPA, 1988). 부유식물들은 대부분 부영양화된 습지에서 생산성이 높기 때문에 수질오염의 제거에 유용하다. 생장기간 동안 이러한 식물들은 많은 오염물질들을 조직에 저장한다(Reddy and DeBusk, 1987).

1. 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*)

부레옥잠은 아메리카 대륙의 열대지방이 원산지인 다년생 관상식물로서, 잎줄기에 공기주머니가 달려있어 물위를 떠서 살아가는 식물이다. 부레옥잠은 살아있는 수질정화장치로 표현될 만큼 영양염류 및 유기성 오염물질의 제거에 효율적인 것으로 학계에 널리 보고되어 있다(정, 2003; Reddy and DeBusk, 1987). 부레옥잠은 식물의 흡수, 암모니아 휘발, 질산화/탈질 과정 모두를 통해 질소의 제거한다. 그 중 직접 흡수해서 제거되는 것이 가장 중요한 과정이다. 일반적으로 부레옥잠의 생장률은 220 kg/ha·d(건중량)이며 그 중 질소 비율은 10 kg/ha·d으로 알려져 있다(Reed *et al.*, 1995). 그러나 많은 수처리 시스템에서 그 이상의 질소가 제거되기도 하는데 그 주요한 이유 중 하나는 부레옥잠의 뿌리가 산소와 탄소를 공급하여 탈질화에 적절한 환경을 만들어주기 때문이다(USEPA, 1988).

인의 경우 도시 하수의 30~50%까지도 흡

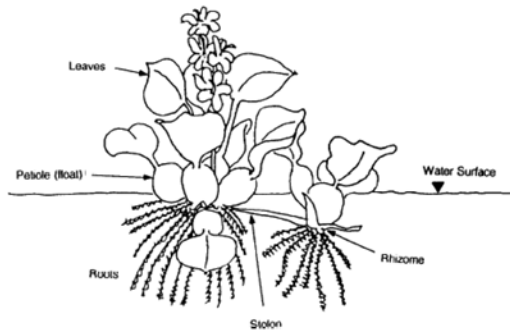


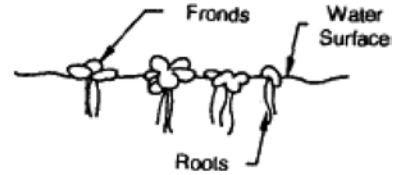
그림 3. 부레옥잠의 형태.

수할 수 있으며 식물에 의한 흡착이 매우 중요한 기작이다. 그러나 흥미로운 점은 인을 최대한 흡수시키기 위해서는 일정 비율의 질소를 유지시켜 주어야 한다는 것이다. 질소가 부족할 경우, 식물은 조직내 영양염류 함량의 균형을 맞추어 수가 없게 되므로 이용 가능한 인이라도 흡수를 할 수 없게 된다. 부레옥잠의 경우 필요한 N:P는 6:1 정도이다 (Reed *et al.*, 1995). T-N 및 T-P의 제거효율이 가장 높은 밀도는 3 kg/m^2 이며 제거량은 $72 \text{ mg T-N/kg} \cdot \text{day}$, $8.6 \text{ mg T-P/kg} \cdot \text{day}$ 라는 국내 연구 보고가 있다(정, 2003).

2. 개구리밥(Duckweed)

개구리밥은 Lemnoidea와 Wolffioideae의 두 아과로 분류되며 Lemnoidea에는 *Spirodela*와 *Lemna*의 2속이 있고 Wolffioideae에는 *Wolffia* 등 4속이 있으나 우리나라에서는 개구리밥(*Spirodela polyrrhiza*)과 좁개구리밥(*Lemna aequinoctialis*)의 두 종이 분포하는 것으로 기록되고 있다(장 등, 1990).

작은 잎과 뿌리를 가지고 있는 개구리밥 종들은(그림 4) 대부분 오염 제거를 위한 실험을 하고 있거나 이미 이용되고 있다. 가장 작고 간단한 형태의 현화식물로서 가장 빠른 생식주기를 가지고 있다. 엽상체가 나누어져서 번식을 하게 되며 하나의 엽상체는 생활사 동안 10~20개의 엽상체를 만들어낸



MORPHOLOGY

그림 4. 개구리밥의 형태.

다. 부레옥잠에 비하여 비교적 낮은 온도(최소 7°C)에서도 잘 견디기 때문에 전 세계적으로 퍼져 있다(Reed *et al.*, 1995).

연간 22 mt/ha 가 생산되며 그 중 880 kg/ha 정도의 질소가 포함되어 있고 220 kg/ha 정도의 인이 포함되어 있다. 다소 낮은 기온에서도 생산량이 적어지긴 하나 우점해 있을 수 있다는 장점이 있다. 습지에 개구리밥이 우점해 있으면 조류의 성장을 막을 수 있으나 암모니아성 질소의 회발은 잘 되지 않으므로 지속적으로 추수해 주는 것이 좋다. 개구리밥은 뿌리가 거의 없으므로 부레옥잠과 같은 질산화/탈질 과정의 촉진은 일어나지 않는다고 볼 수 있다.

정수식물

정수식물은 호수와 하천 주변에서 넓게 분포한다. 대부분이 다년생이어서 지하경에서 새로운 개체가 형성되는 특징이 있기 때문에 짧은 기간 동안에 넓은 분포역을 가진다. 따라서 생산성이 높고 영양염류를 저장하는데 있어 효율이 매우 높다. 특히 부들속(*Typha* sp.), 갈대속(*Phragmites* sp.), 고랭이속(*Scirpus* sp.), 골풀속(*Juncus* sp.), 개기장속(*Panicum* sp.)는 여러 연구자들에 의해 오수 처리 관련 연구가 이루어져 있다(Reddy and DeBusk, 1987). 유럽에서 가장 흔하게 이용되는 정수식물은 갈대이며 골풀, 만나풀, 붓꽃 등도 이용되고 있다. 미국에서는 매자기와 부들이 많이 이용된다(안과 공, 1995). 국내에서도 줄

표 3. 침수식물의 영양염류 함량(문 등, 1999; 신 등, 2001; Reddy and DeBusk, 1987)

식물 종류	조직의 영양염류 함량(g/kg)	
	N	P
부들(<i>Typha</i>)	5-24	0.5-4
골풀(<i>Juncus</i>)	15	2
고랭이(<i>Scirpus</i>)	8-27	1-3
갈대(<i>Phragmites</i>)	18-21	2-3
올방개(<i>Eleocharis</i>)	9-18	1-3
줄(<i>Zizania latifolia</i>)	14-40	0.5-1.6

(*Zizania latifolia*), 애기부들(*Thypha angustifolia*), 갈대(*Phragmites communis*), 큰고랭이(*Scirpus tabernaemontani*), 달뿌리풀(*Phragmites japonica*) 등의 영양염류 제거 효율에 관한 연구가 이루어진 바 있다(권과 박, 2003; 나 등, 1996; 문 등, 1999; 신 등, 2001).

침수식물은 오수의 구성, 부하율, 수심, 퇴적층의 특징, 근권으로의 산소투과율 등에 따라 영양염류 흡수율이 달라질 수 있다. 또한 다양한 환경에서 자랄 수 있으며 식물의 조직에 다양한 범위의 영양염류 함량을 포함하기도 한다.

침수식물은 습지에서 다양한 물리적, 생물화학적 기능을 제공한다. 유입수의 흐름을 느리게 하여 미생물이 부착할 수 있는 표면적을 증가시키며 성장과 번식에 필요한 영양염류를 뿌리로부터 흡수하여 오염된 습지의 질소와 인을 제거하는 역할을 하기도 한다. 뿐만 아니라 침수식물의 통기조직은 대기 중의 산소를 뿌리로 전달할 수 있으며 뿌리로부터 방출된 산소는 뿌리주변에 호기성 상태를 유지시켜 유기물의 분해와 질산화를 높여 준다(양, 2006; Cooper and Boon, 1987). 이러한 침수식물의 특징을 이용하여 Kickuth(1984)는 수처리에서 근권법(Root Zone Method)을 제안하였는데 이는 침수식물에 의해 산소가 제공되는 근권에서 미생물에 의해 오염물질을 제거하는 방법이다.

침수식물

침수식물은 뿌리가 저토에 있으면서 식물 전체가 물속에 있는 형태를 가지고 있는 식물이다. 일반적으로 광합성부가 물속에 있지만 어떤 식물의 경우 물 위로 올라오기도 한다. 침수식물에 수질 개선능이 있으나 무산소 상태에 취약하고 조류의 방해를 받으므로 다소 제약이 있다. 침수식물은 광합성 과정을 통해 암모니아를 제거할 수 있다. pH가 높아지면 암모니아를 가스 형태로 날려보내기도 하는데 암모니아는 어류에게 있어 독성이 있는 질소 형태이다. 그러나 침수식물의 영양염류 제거능에 대한 연구는 다른 식물에 비해 다소 저조한 편이다(USEPA, 1988).

맺음말

경제가 성장함에 따라 사람들은 점차 삶의 질을 생각하는 방향으로 눈을 돌리게 되었다. 하수처리에 있어 단순히 하수처리장을 건설하여 유독한 물질들만을 간단히 없애는 수준에서 벗어나 수생식물을 통한 친환경적이면서도 경관친화적인 방법을 찾고 있다. 수생식물을 이용한 영양염류의 제거는 부영양화를 막아 습지의 생태적 균형과 경관을 파괴하는 조류의 비정상적 증식을 억제할 수 있다는 장점 이외에도 수려한 경관을 제공하며 습지 생물들의 서식처가 될 수 있다는 점 등 여러 가지 부차적인 이익을 가져온다. 그러나 우리나라는 미국이나 일본, 유럽 등지에 비하여 실용화되어 있지 못한 상태이다. 따라서 이를 위한 파일럿 연구나 실제 시스템에서의 적용 연구 등이 더욱 필요하다고 할 수 있겠다.

참고문헌

권애량, 박철휘, 2003. 수생식물을 이용한 수질

- 정화에 관한 연구. 대한환경공학회지, 415-420.
- 나규환, 권성환, 이장훈, 1996. 수생식물을 이용한 수질정화에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 22(3): 49-55.
- 문형태, 남궁정, 김정희, 1999. 대형수생식물의 물질생산과 질소와 인의 흡수량. 환경생물학회지, 17(1): 27-34.
- 신정이, 차영일, 박석순, 2001. 하천의 생태적 복원을 위한 수변식물의 영양염류 제거효율에 관한 연구. 대한환경공학회지, 23(7): 1231-1240.
- 안윤주, 공동수, 1995. 생이가래를 이용한 영양물질의 제거방안 연구. 대한환경공학회지, 17(6): 593-603.
- 양홍모, 2006. 하천수정화 여과습지에서 성장하는 갈대의 영양염류 흡수량. 한국환경복원녹화기술학회지, 9(1): 59-99.
- 이용두, 김현희, 1999. 식물을 이용한 오수의 고도처리에 관한 연구. 한국환경과학회지, 8(1): 75-81.
- 장남기, 오인혜, 김희백, 유해미, 어은주, 1990. 개구리밥과 식물의 질소대사에 관한 연구. 한국생태학회지, 13(3): 215-224.
- 정순형, 2003. 부레옥잠을 이용한 생활하수의 고도처리에 관한 연구. 대한위생학회지, 18(3): 69-77.
- 津田松苗, 1995. 水質汚濁의 生態學. 文知社, 서울.
- Brix, H., 1994. Functions of macrophytes in constructed wetlands. Water Science and Technology, 29(5): 71-78.
- Brix, H., 1997. Do microphytes play a role in constructed treatment wetlands? Water Science and Technology, 35(5): 11-17.
- Cooper, P. F. and Boon, A. G., 1987. The use of Phragmites for Wastewater treatment by the Root Zone Method: The UK approach. In: Aquatic plants for water treatment and resource recovery, Reddy, K.R., Smith, W.H. (Eds.), Magnolia Publishing Inc., Orlando, Florida.
- Fisher, J., Acreman, M. C., 2004. Wetland nutrient removal: a review of the evidence. Hydrology and Earth System Sciences, 8(4): 673-685.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G., 2000. Wetlands. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Reddy, K. R., DeBusk, W. F., 1987. Plant Nutrient Storage Capabilities. In: Aquatic plants for water treatment and resource recovery. Reddy, K.R., Smith, W.H. (Eds.), Magnolia publishing Inc., Orlando, Florida.
- Reed, S. C., Crites, R. W. and Middlebrooks, E. J., 1995. Natural systems for waste management and treatment. McGraw-Hill, New York.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D., 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. McGraw-Hill Professional, Boston.
- USEPA, 1988. Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. pp. 47-76.