

수생식물을 이용한 수질정화¹⁾

변 명 섭²⁾
국립환경과학원

서 론

하천 및 호소 생태계는 비생물적 요소(abiotic factors)인 수변 및 서식환경과 생물적 요소(biotic factors)로써 생산자인 부착조류, 수생 식물, 소비자인 저서성 대형무척추동물, 양서류, 어류 그리고 분해자인 세균과 균류 등으로 구성되어 있다. 수생태계는 위와 같은 생물적, 무생물적 요소들이 서로 간에 복잡하게 얽혀 안정한 생태계를 유지하고 있다. 최근 들어 국내에서도 수질정화와 수생태 개선을 목적으로 다양한 수생식물을 이용하고 있어 수생태계에서 수생식물, 특히 대형수생식물에 의한 수질개선 효과 등에 대하여 알아보았다.

대형 수생식물을 이용한 국내의 대형 인공호, 저수지 등의 수질개선은 주로 유입수에 대한 사전 수질정화를 목적으로 시행되고 있다. 유입수가 흘러드는 곳에 갈대 등 정수성 수생식물을 식재하여 통과시킴으로써 수생식물의 표면에 형성된 생물막을 통하여 생물학적 산화과정에 의한 유기물의 산화, 영양염류의 흡수, 탈질과정 등이 발생하고, 유속이 느려짐으로써 수중의 유기물을 가라앉게 하는 침전작용, 그리고 수중으로 발달한 수생식물에 의한 영양염류의 흡수 등

에 의한 수질정화과정이 형성된다. 이 과정에서 주로 나타나는 기작은 수중 또는 퇴적물 속으로 발달한 근계를 바탕으로 미생물의 생장이 이루어지고 특히 퇴적물 속으로 발달한 근계를 통하여 지상부에서 생성된 산소가 전달됨으로써 세균에 의한 생물학적 산화활동이 강화되고, 세균 등에 의하여 유기물을 분해하는 과정에서 영양염류가 수생식물로 흡수되는 등의 과정이 발생한다.

수질개선에 이용되는 수생식물

수질정화 및 수환경 개선에 이용되는 수생식물

수질정화를 위해 이용되는 수생식물은 우선 생체량의 발달이 현저하게 높아야 한다. 식물체는 수중이나 퇴적물에서 영양염류를 흡수하여 성장하면서 잎과 줄기 등 지상부가 성장하게 되는데 지상부의 생체량이 높을수록 수중과 퇴적물로부터 다량의 영양염류를 흡수하였다고 볼 수 있다. 식물체 조직의 영양성분은 수생식물별로 다소간의 차이를 보이고 있다(표 1).

국내수계에 다량으로 서식하고 있는 갈대(*Phragmites australis*)의 탄소 함량은 정수성 식물이면서 넓은 서식면적을 갖는 줄(*Zizania latifolia*)보다는 낮고 애기부들(*Typha angustifolia*)

1)Improvement of Water Quality and Macrophytes

2)BYEON, Myeong Seop, National Institute of Environmental Research Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Republic of Korea; E-mail: zacco@me.go.kr

표 1. 수생식물종의 생활형별 물질 함량(시료채취: 팔당호)

Life form	Macrophytes	Contents of matters (mg·g ⁻¹ DW)		
		Carbon	Nitrogen	Phosphorus
Emergent	<i>Phragmites australis</i>	435.9	15.3	0.823
	<i>Zizania latifolia</i>	476.1	18.4	0.596
	<i>Typha angustifolia</i>	415.7	6.4	1.037
Floating-leaved	<i>Trapa japonica</i>	439.8	17.6	1.108
	<i>Nelumbo nucifera</i>	288.9	21.1	1.257
Free-floating	<i>Salvinia natans</i>	373.6	22.7	1.030

보다는 높게 나타났다. 반면 애기부들의 인 함량은 정수식물 중에서는 높은 것으로 나타났다, 반면 질소는 줄(*Z. latifolia*)에서 가장 높은 함량을 보이고 있다. 따라서 유입수의 유기물처리가 목적이라면 줄(*Z. latifolia*)을 식재하고, 영양염류 특히 인의 처리가 목적이라면 애기부들(*T. angustifolia*)을 식재하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

부엽식물 중에서는 마름의 유기물 함량이 가장 높게 나타났으며, 연(*Nelumbo nucifera*)은 질소와 인의 함량이 상대적으로 높은 것으로 나타나 정체적 수역에서 수질정화를 목적으로 수생식물을 식재하고자 할 때는 고려해 볼 만하다.

각 수생식물 종별 물질함량의 차이는 있지만 수질개선을 위해서는 연간 지상부 생체량의 발달 정도가 커야 한다. 표 1에서 제시한 수생식물 중에서 단위면적당 줄기와 잎 등 지상부의 생산량이 가장 많은 수생식물은 갈대(*P. australis*), 줄(*Z. latifolia*) 및 애기부들(*T. angustifolia*)로 모두 정수식물에 속한다.

수변 및 수중에 수생식물이 잘 발달되어 있는 팔당호의 경우 갈대(*P. australis*), 줄(*Z. latifolia*) 및 애기부들(*T. angustifolia*) 등 정수식물의 서식면적이 1.08 km²으로 가장 넓은 서식면적을 차지하고 있다(변, 2006). 하수처리장 방류수 등 온수가 배출되거나 보온

시설이 갖춰진 곳에서는 부레옥잠(*Eichhornia crassipes*) 등 부수식물이 유용할 것으로 판단되나(그림 1), 우리나라의 대형 인공호 등에서는 정수성 대형 수생식물을 이용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 내한성이 크고 생체량이 풍부한 미나리(*Oenanthe javanica*)도 고려해 볼만한 것으로 판단된다.

수생식물의 서식조건

수생식물(aquatic plants)의 정의는 학자들에 따라 달리 정의하나 “정상적인 상태에서는 물에서 생육하고 있으며 물 밖으로 나오게 되는 경우에도 그들의 생활사 중 어느 한 시기를 수중에서 생육하게 되는 식물 종류들”로 표현할 수 있다(Muenschner, 1944).

국내의 대형인공호는 상수원, 전력생산, 홍수조절용, 농공업 및 산업 용수 공급용 등 다양한 목적에 의하여 축조되었다. 특히 댐호가 조성된 곳은 주로 경사가 급한 산지로 유입수가 들어오는 지천은 물론 인공호의 호안도 수위변화가 심하여 식생이 조성될 수 없는 조건을 가지고 있다. 반면 호안과 호내에 식생이 잘 발달되어 있는 팔당호의 경우 일수위 변화는 0~63 cm(평균 13 cm)으로 상류에 위치하고 있는 청평댐의 발전방류와 팔당호의 발전방류에 의하여 영향을 받고 있다(공, 1992). 팔당호는 수위변화가 적고 수심의 변화가 가파르지 않아 호안대에 갈대



1. 수위변화가 적은 호수나 하천의 가장자리에 발달하는 애기부들(*T. angustifolia*), 갈대(*P. australis*), 줄(*Z. latifolia*)과 함께 국내 수계에 가장 많이 서식하는 대형 정수성 수생식물이다.
2. 열대지역이 원산지인 부레옥잠(*E. crassipes*). 물 위에 떠서 살며 수중으로 발달한 뿌리가 수중으로부터 직접 영양염류를 흡수하여 성장한다. 동절기에 보온하지 않으면 동사한다.
3. 수위변화가 심하지 않은 정수역이나 늪지에 많이 서식하는 연(*N. nucifera*). 넓은 잎은 수중의 식물플랑크톤의 서식을 억제하고 어류나 수서곤충 등 수중생물에게는 서식 및 피난처를 제공한다. (시계방향으로 설명)

그림 1. 국내 수계에 서식하는 대형 수생식물의 예.

(*P. australis*), 애기부들(*T. angustifolia*) 및 줄(*Z. latifolia*) 등 21종의 정수식물이 서식하고 있으며, 연꽃(*N. nucifera*) 등 5종의 부엽식물, 붕어마름(*Ceratophyllum demersum*) 등 8종의 침수식물 및 통발(*Utricularia vulgaris*) 등 4종의 부유식물이 구성되어 있다(한강수계관리위원회, 2003). 그러나 최근

들어 상류에서 유입된 탁수가 장기간 호내에 머물러 있으면서 침수식물의 서식면적은 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 반면 만수면적이 팔당호(36.6 km²)보다 매우 큰 소양호(70 km²)의 경우는 장마기의 홍수조절, 갈수기의 하천유지용수 방류, 발전방류 등 여러 가지 요인에 의하여 수 십 미터의 수위

변화를 보이기 때문에 호안식생이 전혀 발달할 수 없기 때문에 호안에는 황토와 암반이 노출되어 있다. 호안 식생의 파괴현상은 생물 고유 서식처를 파괴하고 유입수에 대한 자정능력을 감소시키며, 호안의 경관을 저하시키는 결과를 낳는다. 호안 식생의 파괴현상은 파로호, 안동호, 충주호, 합천호 등 국내의 대형 인공호에서 발생하는 공통현상으로 최근에 호수의 경사면에 코코넛 섬유나 스폰지 등의 여재를 설치하고 호소내 수면에 설치한 수초재배섬을 이용해 고농도로 농축한 수초섬내 여과수를 호안으로 살포하여 호안식생을 회복하기 위한 연구가 진행되고 있다(한강수계관리위원회, 2006).

수생식물 식재 및 식재의 방법을 통한 수환경 개선

수생식물을 이용한 하천의 수질개선

하천은 크게 상류, 중류 및 하류로 크게 나눌 수 있다. 최상류는 계류 형태로 이루어

져 있으며 다양한 교목 식생이 발달되어 있어 수온의 상승을 막아 냉수성 어종의 서식처를 제공해 줄 수 있다. 이러한 수환경은 아래로 진행됨에 따라 수온이 상승하고, 강우시 탁수가 유입되며 하상이 높아지고 하도내 식생이 발달하기도 한다.

하천이 진행됨에 따라 중류수역에서는 유역에 도시가 형성되고 하안이 콘크리트 제방 등에 의하여 직선화되며 이에 따라 하상도 고정되는 경향을 보인다. 하안 정비는 다양한 범람원(배후 습지)을 파괴하고 그 결과 수중 및 수변의 생물 다양성은 크게 감소하게 된다. 하안이 직선화되면 유속이 증가하게 되고 수변 식생의 발달도 저하된다. 홍수시에는 저속 유역이 있어야 유영 능력이 약한 낚자루아과 어종이나 치어 등이 피난할 수 있는데 하안의 직선화는 어종의 다양성을 감소시키고 육상과 하천 생태계의 단절이 생기게 된다.

수생식물을 통한 하천의 수질개선은 주로 상중류의 수역에서 이용될 수 있는데 주로

표 2. 수처리에 이용되는 수생식물((g/m²/day)

수종명	수중에서 정화가 가능한 물질					영양염류 제거 능력	수집 능력	운반성	재활용성	내한성	내공해성	맹아력
	질소	인	칼륨	칼슘	마그네슘							
꽃창포						○	○	△	△	△	○	○
애기부들	1.413	0.0248	1.3255	0.3157	0.2302	○	○	△	○	○	○	○
갈대	2.796	0.0425	1.6982	0.1127	0.1443	○	○	△	△	△	○	○
줄	1.9011	0.0384	1.1455	0.0935	0.0834	○	○	△	△	△	○	○
달뿌리풀						○	△	△	△	△	○	○
물억새						○	○	△	△	△	○	○
부레옥잠	1.3557	0.286				△	○	○	×	○	×	○
좁개구리밥	0.243	0.0627				△	○	○	×	○	△	○
마름류	0.150	-				△	△	×	×	△	△	○
미나리	0.734	0.0925				○	○	○	△	△	○	○
연꽃						△	△	×	△	△	×	○
검정말						△	△	×	×	△	△	○

화천군, 2003. “파로호 생태계 실태조사”에서 재인용.

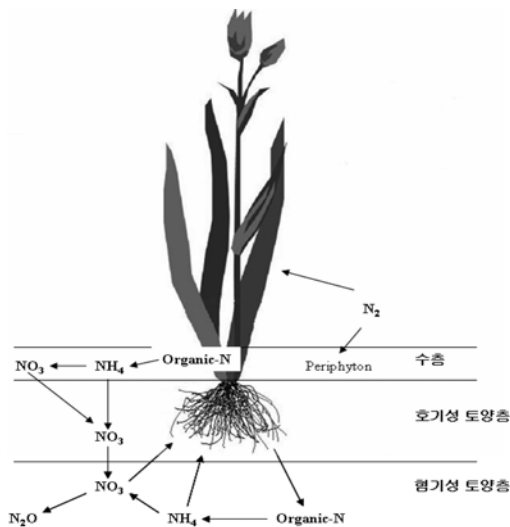


그림 2. 하천수 및 수생식물 뿌리부에서의 질소 순환.

갈대(*P. australis*), 달뿌리풀(*P. japonica*), 줄(*Z. latifolia*), 애기부들(*T. angustifolia*), 고마리(*Persicaria thunbergii*), 미나리(*O. javanica*), 부처꽃(*Lythrum anceps*), 꽃창포(*Iris ensata* var. *spontanea*), 창포(*Acorus calamus* var. *angustatus*) 등을 식재하여 수질정화 및 생물서식공간 제공의 효과를 얻을 수 있다. 수질개선을 위해 이용되는 있는 수생식물은 다음과 같다.

하상에 뿌리를 내리고 성장하는 위의 수생식물은 서식밀도가 높게 성장하는데 수중 및 뿌리에서의 영양염류 제거 과정 중 질소는 다음과 같은 메커니즘에 의해 제거된다.

즉, 수생식물은 뿌리, 줄기, 잎 등에 호흡용 기관을 가지고 있는데 이를 이용하여 산소를 포함한 대기가스를 근계로 이동시켜 뿌리 주변의 토양을 호기성 상태로 만들게 된다. 따라서 뿌리 주변의 토양에 호기성 미생물이 발달하여 질산화, 탈질화 과정을 동시에 일으키는 환경을 만들어 뿌리 주변의 토양에 있는 질소의 제거가 촉진되는 것으로 알려져 있다(함 등, 2005). 탈질에 의해 질소는 대기 중으로 방출됨으로써 수중에서 질

소가 제거되는 효과를 얻을 수 있다. 유입수중에 포함되어 있는 유기물을 분해하는 과정에서 유기인은 무기인 형태로 전환되어 부착생물 등에 의하여 쉽게 재흡수되어 다시 유기인 형태로 전환됨으로 수층 내의 인은 대부분 부족한 상황이 된다. 또한 하천변의 수생식물은 성장하면 수생식물의 뿌리가 하천의 바닥층을 단단하게 고정함으로써 표토의 유실을 방지하는 효과를 갖는다. 일본에서 수생식물을 이용한 대형 호소의 수질개선 작업의 예를 들어본다.

가스미가우라호는 220 km²의 면적으로 일본에서 두 번째로 큰 호수로 유역면적은 2,200 km², 평균수심은 4 m, 최대수심은 8 m이며, 유역에는 약 100만명의 인구가 살고 있다. 가스미가우라호는 주로 이바라끼현을 비롯하여 주변의 각 도, 현의 상수도 용수 및 농공업용수의 수원지로 이용되어 왔고 어업이나 휴식공간으로 이용되어 왔으나, '75년 이후 유역의 도시화가 진행됨에 따라 수질이 악화되기 시작하였다. 영양염류의 농도가 높은 정체수역의 일반적인 현상인 부영양화가 심해져 '72~'78년 사이에는 양식 중이던 잉어가 대량으로 폐사하는 등 심각한 수질문제가 발생하였으며 이러한 현상은 '90년대까지도 지속되었다. 이에 따라 가스미가우라호의 수질을 개선하기 위하여 '95년부터 호소 바닥 일부에 대하여 준설을 통하여 퇴적물내의 영양염류를 제거하였고, 이와 병행하여 호소로 유입되는 하천수의 인과 질소 등 영양염류의 농도를 줄이기 위하여 하천수가 유입되는 곳에 갈대 습지를 조성하여 유입수가 갈대습지를 통과하게 하였다. 그 결과 1999년 이후 가스미가우라호에서는 식물플랑크톤의 대량증식현상(녹조현상)이 거의 나타나지 않았으며, 오히려 과도한 수질의 개선으로 인하여 어획생산량이 감소될까 염려하는 수준까지 되었다. 가스미가우라호

로 유입되는 부분에 설치한 갈대습지를 통과하는 과정에서 수생식물의 표면과 습지에 존재하는 수생세균 등에 의하여 탈질작용이 일어나고 인성분은 식물체와 미소세균에 흡수되어 결국 호수로 들어가는 하천수의 영양염류 농도는 줄어들게 된다. 또한 수생식물의 존재는 유속을 감소시켜 다량의 부유물질을 침전시키는 효과를 가져 올 수 있다.

대형 인공호에서 수생식물 식재를 통한 수질 개선

대형수체의 수질 개선을 위해서는 영양성분이 포함된 물이 호수나 저수지 등 대형수체로 유입되기 전에 처리하는 것이 바람직하다. 하수처리장의 운영이나 대형 인공호의 유입부에 인공습지를 설치하는 것도 영양염류가 대형 수체에 유입하기 전에 처리하여 제거하기 위한 것이다. 일단 대형 인공호에 유입된 영양염류는 화학적 처리가 불가능한데 생태공학적인 방법을 대안으로 제시할 수 있다. 현재 생태공학적인 방법에 의한 수중의 영양염류 제거는 수초를 이용하는 것으로 수중에 수생식물의 뿌리를 노출시켜 퇴적물이 아닌 수체로부터 직접 영양염류를 흡수하여 성장하게 한 후 일정 시기가 지나면 성장과정에서 발생한 지상부 생체량을 제초작업 등을 통해 수역 외로 제거함으로써 수중의 영양염류를 간접 제거하는 것이다. 그러나 생체량이 큰 대부분의 수생식물은 정수식물군에 속하는 것으로 자연적으로 물 위에 뜨지 않는다. 따라서 갈대, 애기부들 등 대형 정수성수생식물을 수중에 띄워서 성장시키기 위하여 부력재를 이용한 수초재배섬을 설치하게 된다(그림 3).

수초재배섬 아래 수중에 뿌리를 노출하고 있는 정수식물은 퇴적층이 아닌 수층에서 직접 영양염류를 흡수한다. 이렇게 설치한 수초재배섬은 팔당호의 경안천 수역과 같이 수

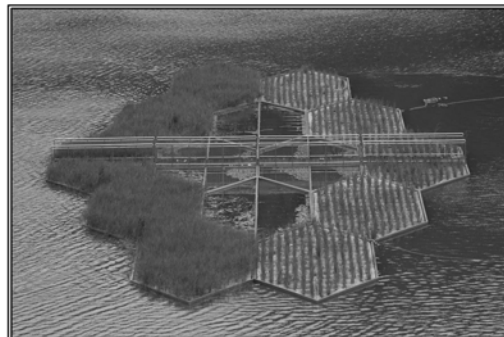


그림 3. 임하호에 설치되어 있는 수초재배섬. 국내 대형 인공호에는 원형, 사각형 등 다양한 형태의 수초재배섬을 설치하여 운영하고 있다.

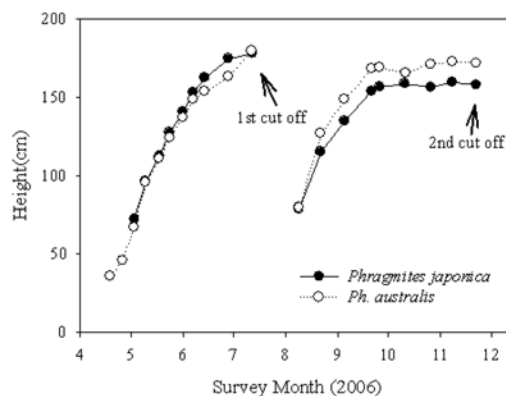


그림 4. 팔당호의 경안천 수역의 수초재배섬에서 수초의 성장(변, 2007).

중에 용존영양염류의 농도가 높은 곳에서는 수초재배섬 위의 수생식물 성장이 양호하게 나타나 연간 2~3회의 제초작업을 통해 최대의 생물량을 얻을 수 있으므로 수중의 영양염류 제거에 효과적으로 이용될 수 있다(그림 4).

반면 소양호, 파로호 등 상류역에 위치하고 있어 오염원이 거의 없는 국내 대형 인공호는 주변 유역에서 유입되는 영양염류의 농도가 높지 않다. 또한 하절기 장마시에 강우와 함께 유역으로부터 유입되는 영양염류도 저층에 머물러 있어 상층으로 영양염류 공급이 안되므로 수초재배섬의 수초의 성장이 제한을 받는다. 이런 경우에는 인공기질

을 수초재배섬 하부에 늘어뜨려 부착미생물이 대량 서식할 수 있는 공간을 제공해 줘 수중의 영양염류를 농축시킬 수 있도록 하거나 또는 수초재배섬에서 인공토양의 역할을 하는 식재매트의 재질을 영양염류를 잘 농축할 수 있는 소재로 선택하거나 rubber coating 수중 미생물에 의한 영양염류의 농축 효율을 향상시켜야 한다.

국내에서는 20여 곳 이상의 대형 인공호와 하구언 등에 수질 및 수생태계 개선을 위하여 수초재배섬을 설치하여 운영하고 있다. 적절한 시기에 제초 작업을 통하여 지상부의 줄기와 잎 등을 제거하면 수중의 영양염류를 제거할 수 있는 효과를 가질 수 있으나 수표면적에 비하여 수초재배섬의 설치면적이 협소하고 설치 후 제초작업 및 시설유지를 위한 지속적인 관리가 미흡하여 소기의 설치 목적을 이루지 못하고 있는 실정이다.

결 언

수생식물을 이용한 수질정화는 국내의 수계 환경에 맞는 적절한 수초종을 선정하는 것이 중요하다. 우선 국내 수계에 가장 많이 서식하고 있으며, 제초작업을 통해 다량의 영양염류를 제거할 수 있도록 지상부 생체량이 풍부하여야 한다. 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 수초종으로는 갈대, 줄, 애기부들 및 달뿌리풀 등을 들 수 있다. 하천변이나 수위 변화가 크지 않은 수역에서는 대형 정수식물이 밀생할 수 있으므로 수생식물에 의한 유속감소로 유입수내 유기물의 침

전 및 분해, 수중에 잠긴 수생식물의 줄기 등에 부착생활하는 미소생물에 의한 분해, 퇴적물 내 수초뿌리부에서의 질소 및 인의 순환 과정 등을 통해 수질이 개선될 수 있다. 수위변화가 심하여 수변식생이 발달하지 못하는 곳에서는 코코넛 섬유 등을 이용하여 식생을 조성함으로써 유입수의 수질을 개선할 수 있으며 이 단계를 거쳐 대형 인공호로 유입된 수체에서는 수초재배섬 등의 시설을 설치함으로써 수중의 영양염류를 간접 제거할 수 있다.

참고문헌

- Muenschner, W. C., 1944. Aquatic plants of United States. 374. Comstock 2. Publishing Company, Inc., Ithaca.
- 공동수, 1992. 팔당호의 육수생태학적 연구. 고려대학교 박사학위 논문.
- 농림부 · 농업기반공사, 2004. 농업용수 수질개선 시험연구(최종보고서).
- 변명섭, 박해경, 정동일, 2006. 대형 수생식물이 팔당호의 물질수지에 미치는 영향. 한국육수학회지 39(1): 85-92.
- 변명섭, 2007. 수초재배섬을 이용한 수환경 개선효과에 관한 연구. 강원대학교 박사학위 논문.
- 한강수계관리위원회, 2003. 팔당호소 생태계 구조조사.
- 한강수계관리위원회, 2006. 한강수계 생태계 복원방법 및 기술표준화 연구.
- 화천군, 2003. 파로호 생태계 실태조사.
- 환경관리공단, 1999. 해외출장 귀국보고서(일본의 수초재배섬 시설현황).