

하천습지 보전 및 관리에서 생지화학적 반응의 중요성



강 호 정 ▶>

이화여대 환경공학과 부교수
hj kang@ewha.ac.kr

습지의 생태 및 환경적 중요성이 널리 부각되며, 하천의 보전, 관리 및 복원에 있어서 하천변 습지에 대한 관심과 연구가 증대되고 있다. 하천변에 존재하는 습지는 지형, 수문, 생물학적 특성 등에 의해 매우 다양한 형태로 존재할 수 있다. 일반적으로 100년에 1회 이상 범람하는 지역을 범람원 (floodplain)이라 부르며, 이외에도 배후 습지, 홍수터, 천변저류지 (Washland)와 같은 용어들도 혼용하여 사용하고 있다. 각 명칭에 대한 정확한 정의가 어려운 것은 범람하는 지역의 경계가 시공간적으로 매우 급속히 변화하며 또 각 용어자체가 인간 중심적인 기능에 근거하고 있기 때문이다. 위의 용어 중 범람원이 일반적으로 가장 넓은 공간적 범위를 표현하는 경우가 많으며, 습지라는 용어는 범람원 내에서 빈번히 침수되는 지역을 의미하는 경우가 많다. 어떠한 명칭을 사용하던지, 국내 선행 연구의 경우 이러한 하천변의 습지들은 대부분 다음의 두 가지 기능들을 중심으로 진행되어 왔다.

첫째, 하천변의 습지의 홍수 조절을 위한 기능이 강조되고 있다. 즉 하천이나 수로에 인접한 저지대의 제방을 낮춤으로써 홍수시 침투 유량의 일부를 저류하여 홍수 방어 기능을 갖추도록 하는 것이다. 네덜란드를 포함한 유럽 대륙의 많은 국가와 미국 미시시피 하구 유역의 경우 이미 제방을 높여 물을 가두려

는 정책을 포기하고 대신 더 많은 범람원을 확보하여 침투 유량의 일부를 저류하거나 범람하도록 하여 하류에서의 홍수를 예방하는 방향으로 정책이 변화하고 있다. 우리나라와 같이 여름철 집중 호우의 문제가 심각하고 하상계수가 높은 상황에서는 이런 정책의 실효성에 대한 의문이 많이 제기되었지만, 최근에는 제방을 높이는 기존의 방식으로는 오히려 더 큰 홍수를 일으킬 수 있다는 인식이 확산되며 범람원을 홍수 조절의 완충지대로 이용하려는 연구와 기술 개발이 진행되고 있다.

둘째, 홍수가 없는 시기에는 이 범람원 지역을 일부 농경지로 사용하거나 철새를 비롯한 조류의 서식지로 조성하여 생물다양성을 높이려는 연구가 진행 중이다. 이를 통해 지역주민의 경제적 이익을 확보하고자 하는 방안으로, 일종의 보호 지역과 개발 지역의 완충지대로서의 기능을 갖도록 하는 것이다. 인구 밀도가 상대적으로 높은 지역의 경우에는 생태학습원이나 다른 준인공 용도로의 사용도 모색되고 있고, 인구밀도가 낮은 지역의 경우에는 습지 식물, 동물, 그리고 철새들의 서식처를 제공하여 생물다양성을 유지하는 것을 주목적으로 연구되고 있다.

이러한 목적에 맞추어 국내 하천변 습지의 연구는 주로 지형적인 요인, 식물 중심의 생태적 연구, 수문 특성, 사회경제적 지표 등을 중심으로 연구가 수행되고 있다 (김 등, 2003). 또한 유량이 증가하여 범람이 시작될 때 습지 식생들의 저항계수를 비롯하여 하변 습지가 수리에 미치는 연구도 활발히 진행되고 있다.

잘 알려져 있는 바와 같이, 습지를 구성하는 주요 요소 및 습지의 분류 기준이 되는 특성은 수리적 특성, 침수에 적응한 식물, 그리고 독특한 토양 특성 등이다. 즉 정의에 의해 습지는 식물의 생장기간 중 일

정 기간 이상동안 침수 혹은 수분으로 포화되어 침수에 저항성이 낮은 육상 식물들이 사멸하는 지역을 말한다. 여기서 성장기간이나 침수 기간은 지역과 위도 그리고 생물군계에 따라 매우 다양하게 나타나므로 각 지역에 적절한 기준을 사용하여야 한다. 둘째로, 부엽식물 (가래, 연꽃, 수련, 통발 등), 정수식물 (갈대, 고마리, 골풀, 달뿌리풀, 부들, 물옥잠 등), 침수식물 (검정말, 물억새, 미나리 등)과 같이 침수에 의해 산소 공급이 제한되어도 적응하여 성장하는 식물들이 우점하는 지역이다.

마지막으로 토양은 침수에 의해 나타나는 습윤토양 (hydic soil)의 특성을 가진다. 광질토 (mineral soil)의 경우 철이나 망간이 환원되면서 침출되어 남은 지역은 옅은 색을 띠고 침출물이 흘러 들어간 지역은 짙은 회색을 띠게 된다. 일시적으로 침수되는 토양의 경우에는 색상혼재토 (mottled soil)이라 불리는 회색 배경에 적홍색 덩어리들의 형태로 나타나고, 장기적으로 침수되는 토양은 글레이 토양 (gleyed soil)이라 불리는 녹색색을 조금 띤 옅은 회색의 토양이 나타나게 된다. 식물 뿌리가 존재하는 부위는 철이 산화되어 붉은 색을 띠기도 한다. 북구 고위도 지역이나 열대습지의 경우에는 분해가 되지 않은 유기물이 흑니토 (muck)나 이탄 (peat)의 형태로 축적되기도 한다.

습지 연구에 있어서 전술한 세 가지 요인 중 일반적으로 수리적 특성에 대한 것이 강조되고 있다. 그 이유는 범람의 강도, 빈도 등이 산소의 공급 속도를 결정하고 이것이 식생의 분포나 토양 내에서 일어나는 다양한 생지화학적 반응에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 대규모에서 일어나는 습지의 변화와 특성을 이해하려면 일단 수리학적 대한 정보가 필요하다. 그러나 더 작은 시공간적 규모에서 일어나는 습지의 특성을 이해하려면 식생 자체의 생태적 특성과 토양에서 일어나는 여러 가지 생지화학적 반응에 대한 정보가 필수적이다.

특히 습지 내에서 발생하는 생지화학적 반응들은 매우 다양하고 시공간적 변이가 매우 크기 때문에 연

구도 쉽지 않고 이에 대한 정보도 부족한 상황이다. 따라서 효과적인 습지의 보전과 관리에 있어서 이 세 가지 측면에 대한 종합적인 고려가 매우 중요하다. 특히 아래에서 살펴볼 습지의 중요한 기능 중 수질개선효과, 탄소 보유 효과 등은 생지화학적 반응과 밀접하게 연관되어 있다.

최근 자연형 하천 복원을 비롯하여 일반적인 생태계의 보존 및 보호와 관련하여 습지에 대한 연구와 관심이 고조되고 있다. 그러나 습지의 중요성에 대해서 논의되는 바가 서로 상이한 관점이나 규모에서 진행되고 있어 많은 경우에 습지의 실제 기능을 충분히 반영하지 못하는 문제점도 제기되고 있다. 습지는 전통적으로 필요 없는 버려진 땅으로 간주되었으나, 최근 20 여 년 간의 연구를 통하여 다양한 환경 생태적 중요성이 밝혀졌다 (Mitsch and Gosselink, 2000). 예를 들어 다음과 같은 습지의 중요성이 알려져 있다:

첫째, 습지는 여러 가지 생물학적, 물리적, 화학적인 방법으로 수체로부터 오염물질을 분해 및 제거하여 비점오염원을 처리하는데 유용하게 이용될 수 있는 수질개선 능력을 가지고 있다.

둘째, 습지는 다양한 생물에게 서식환경을 제공한다. 습지에 있는 풍부한 플랑크톤과 유기성 물질은 수서곤충의 먹이가 되고, 어패류는 묵새와 양서류 및 소형 포유동물의 먹이가 되어 먹이그물을 이루면서 생물종 다양성이 보장되는 생태계가 형성된다.

셋째 습지는 중요한 수문학적 기능을 수행하는데 습지의 토양은 단위 부피 당 보유할 수 있는 물의 양이 많고 자연적으로 형성된 배수관개로가 치밀하고 조직적이어서 우기 또는 홍수 때에 과다한 수분이 습지 토양 속에 저장되었다가 건기에는 지속적으로 주위에 물을 공급해주는 역할을 담당한다. 또한 습지 토양은 표면 유출수를 효과적으로 흡수함으로써 토양 침식을 방지하는 역할도 담당하고 있다.

마지막으로 습지, 특히 이탄습지의 경우는 이산화탄소를 흡수하고 메탄을 발생시켜 전 지구적인 탄소 순환에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 즉 오랜 시

간에 걸쳐 발달한 북구 이탄 습지의 경우에는 낮은 생산성에도 불구하고 이보다 더 낮은 유기물 분해로 인해 전체적으로는 탄소를 보유하고 있는 기능을 한다. 현재 북구 이탄 습지에 저장된 총 탄소의 양은 455 Pg으로 대기 이산화탄소의 총량 790 Pg과 견줄 만한 양이다.

그러나 이러한 습지의 중요성은 모든 습지에서 모든 규모에서 나타나는 것은 아니다. 즉, 실제 습지의 중요성은 습지를 바라보는 규모와 습지에서 얻고자 하는 기능에 따라 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 수질 개선 효과는 상대적으로 소규모로 건설되는 인공습지에서 높은 농도의 유입수가 있을 때 주로 나타나거나 유역 이상의 수준에서 장기에 걸쳐 살펴볼 때 관찰되는 기능이다.

즉 아주 낮은 농도의 오염수가 유입되는 경우에는 처리 효율이 낮을 수 있으며 자연적으로 습지 내에서 유기물 분해를 통해 생성되는 무기물이나 환경요인의 변화에 따라 유출되는 오염물의 양이 더 많을 수도 있다. 특히, 습지는 유기태 물질의 발생처가 되는 경우도 많이 있다. 생물 다양성의 경우에도 습지의 유형에 따라 다른 경향을 보일 수 있다. 일반적으로 소택지형 습지는 육상생태계와 수생태계의 경계에 존재하는 점이지대(ecotone)로서, 두 생태계에 서식하는 동식물이 동시에 존재할 수 있을 뿐 아니라, 양서류, 파충류, 어류, 조류, 무척추 동물 등의 번식이나 서식에 중요한 역할을 담당하여 높은 생물다양성을 보유하고 된다. 그러나 북구 이탄 습지의 경우에는 매우 낮은 생산성으로 인해 실제 식물의 다양성이나 서식 동물이 단순하게 나타날 수도 있다. 마찬가지로 홍수 억제나 토양 침식 방지의 기능도 유역 수준의 광역에서 나타나는 기능으로 단순히 소규모 습지를 하나를 건설하는 것으로 홍수 억제 효과를 얻기는 어렵다. 습지의 수문적인 기능, 즉 집중 강우시 홍수의 저감과 갈수기시 지하수 충전 기능 등은 유역 수준에서 이해할 수 있는 기능이다.

개개의 습지의 경우에는 지하수와의 연결에 따라 지하수 충전기능이나 물의 보유기능을 전혀 가지지

못하는 경우도 있다. 마지막으로 탄소 제거치의 기능의 경우에도 습지의 유형에 따라 다르게 나타날 수 있다. 예를 들어, 온대 지방의 소택지의 경우에는 높은 생산성에도 불구하고 높은 분해율을 가지고 있는 점과 습지의 절대 면적이 넓지 않다는 점 때문에 실제 탄소 수지에 있어서 탄소 흡수에 큰 기여를 하지 못할 수도 있다. 이러한 점 때문에 각 기후대, 습지의 유형, 또 대상지의 규모에 따라 습지의 기능을 명확히 정의하는 것이 중요하다.

전술한 바와 같이 일반적으로 기존의 습지 보전 및 관리에 대한 연구는 수문, 특히 범람의 강도, 기간, 빈도에 연구의 초점이 맞추어져 있었다. 즉 하천과 범람원과의 수문적 연결성을 높여 범람 맥동(flood pulse)을 회복시키는 것이 자연 상태의 하천습지 보전의 핵심이다. 하천습지가 범람되는 기간, 빈도, 그리고 범람이 일어나는 계절 등은 습지 토양 내의 산화환원 전위에 큰 영향을 미치고, 식생의 분포와 천이에 결정적인 역할을 한다.

수위가 높아졌을 때 상당수의 식생은 영향을 받는데 그 이유는 낮은 산소 농도가 뿌리나 싹의 발아에 영향을 미치거나, 광합성율이 감소하거나, 토양의 침식이나 퇴적이 지나치게 일어나거나, 물의 흐름에 의한 물리적인 충격을 가하는 등의 때문이다. 또한 범람은 어떤 식물의 경우 종자의 확산이나 이동에 영향을 미치기도 하고 습지와 범람원 내에서 식물 분포를 뚜렷하게 경계 짓는 역할도 한다. 그러나 습지 식물은 수동적으로 범람의 영향을 받을 뿐 아니라, 거꾸로 수문에 영향을 미치기도 한다. 대표적인 예가 식생이 성장하면서 수리전도도나 침적에 영향을 미치는 것이다.

일단 하천과 범람원의 자연적 연결성이 증대되면 이 둘은 생지화학적 순환과 관련된 반응들이 밀접하게 일어나게 되고 두 생태계의 구조와 기능에 큰 변화가 일어날 수 있다. 예를 들어, 하천에서 유입된 물의 영양 염류의 양은 범람원에 존재하는 식물이나 식물성 플랑크톤의 양과 종류에 큰 영향을 미치게 된다. 인산염과 같은 영양분이 과량으로 유입되면 물의

유동성이 떨어지는 범람원에서는 부영양화가 일어나고 식물 다양성이 매우 낮게 나타날 수 있다. 이와 반대로 범람원에서 일어나는 생지화학적 반응들이 하천으로 유입되는 물의 화학적 특성에 큰 영향을 미칠 수도 있다.

대표적인 것이 물리적인 침전, 다양한 입자나 이온들과의 흡착, 미생물이 매개된 반응, 화학적 산화와 환원, 식물이나 식물성 플랑크톤에 의한 흡수 등이다. 특히 습지의 생태적 구조와 기능과 관련해서는 인과 질소가 큰 관심을 끌고 있다. 그 이유는 이러한 영양분들이 일차생산의 제한요소로 작용하는 경우가 많고 강으로 유입되는 양이 계속 증가하고 있기 때문이다.

먼저 범람원으로 유입되는 인의 경우에는 침적, 흡착, 식물 등의 흡수가 가장 큰 제거 기작이다. 그러나 흡수의 강도가 커지면 거꾸로 보유되던 인이 수체로 다시 용출될 수 있다. 특히 범람되었다가 수위가 낮아진 후 다시 범람이 일어나는 경우 이런 현상이 매우 크게 일어날 수 있다. 이 기작에 대해서는 다음 절에서 좀더 자세히 살펴보도록 하겠다. 인의 경우에는 질소에 비해 지하수의 영향을 크게 받지 않는다. 그러나 범람원의 토양 특성이나 토지 이용도의 여파에 따라 큰 영향을 받을 수 있다.

우리나라의 경우 상당히 많은 하천이 여름철 집중 호우기에 토사 유출로 인해 인의 유입이 증가할 수 있다. 질소의 경우에는 생지화학적 반응이 더욱 복잡하게 나타난다. 수위가 높아진 상태가 오래 지속되면 토양에서 혐기성 조건이 형성되고 적절한 조건하에서 탈질이 활발히 일어나거나 암모니아 상태의 질소가 축적될 수도 있다. 이와 반대로 호기적 조건이 형성되면 질산염의 농도가 높아지고 이는 이후 수체로 쉽게 유출될 수 있다.

또한 질소고정 미생물이 존재하는 경우 습지 내에 지속적으로 질소를 공급하는 현상이 일어날 수도 있다. 우리나라의 경우 질소 비료 사용량이 많고, 대기에서 침적되는 질소의 양도 상당한 것으로 알려져 있어 육상에서 유래하여 하천으로 혹은 범람원을 거쳐

유입되는 질소량이 상대적으로 높을 것으로 추정된다. 이렇게 유입된 질소가 범람원에서, 특히 범람을 전후한 시기에 어떻게 반응할 것인가는 매우 중요한 연구 주제이다.

범람원의 수위 변화는 토양과 수체내의 영양소의 동태에 큰 영향을 미친다. 예를 들어, 범람원이 물에 잠기게 되면 혐기성 상태가 조성되고, 이에 따라 철을 비롯하여 인산염과 결합하고 있던 금속이 환원되면서 용존성이 높아지고 이에 따라 인이 물로 유출되는 현상이 일어날 수 있다.

특히 수위가 높은 상태에서 낮아졌다가 다시 범람이 일어나는 경우 토양입자의 유출, 인산염의 용해 등의 물리 화학적인 반응으로 수체로 이동하는 결국 하천으로 유입되는 인의 농도가 늘어날 뿐 아니라 미생물학적인 반응을 통해서도 인의 용출이 증가할 수 있다. 그림 1-(A)에서와 같이 수위가 낮아지면 습지로부터의 인의 용출이 증대될 수 있다. 그리고 이러한 용출은 단순한 물리-화학적 반응 뿐 아니라, 그림 1-(B)에서와 같이 유기인을 무기화하는 탈인산효소(phosphatase)의 활성도가 급격하게 증가하게 되고, 이것은 나중에 수위가 다시 높아져도 지속되게 된다. 결국 범람이 반복되면서 오히려 범람원에 저장된 인이 수체로 방출될 수도 있는 것이다. 특히 이전에 농경지였던 지역을 자연 범람원으로 복원시킨 경우 이러한 인의 용출이 상당히 오래 지속될 수도 있다.

질산염의 경우에는 범람을 통해 혐기성 상태가 조성되면 탈질화(denitrification)가 일어나서 수체로부터 질산염이 아산화질소나 질소의 기체 상태로 제거될 수 있다. 범람원에서 제거될 수 있는 질산의 양에 대해서는 일부 실측 연구와 모델링이 선행연구로 진행되었으나, 공간적 이질성이 매우 크고 또 지역, 토양, 식생에 따라 크게 변화하는 반응이라 정확한 양은 알려져 있지 않다.

이러한 다양한 생지화학적 반응은 결국 습지의 보전과 관리에 있어서 매우 중요한 결과를 가져온다. 첫째, 다양한 무기 영양소의 공급과 제거는 하천습지 내에 존재하는 식물중에 큰 영향을 미치게 된다. 즉

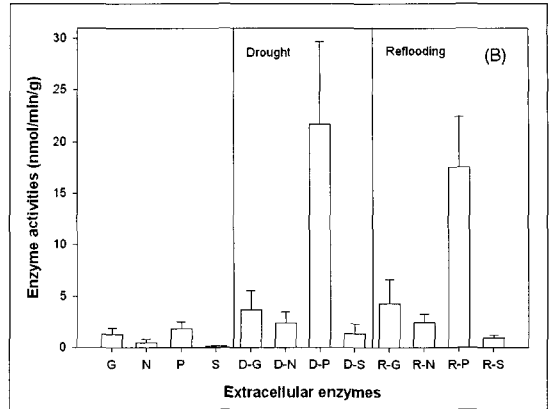
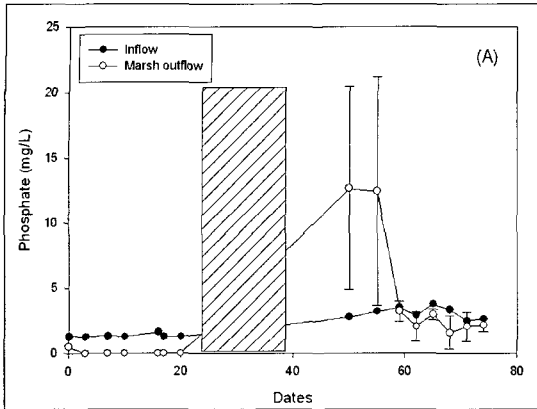


그림 1. (A) 모의 가뭄 (빗금친 기간)에 따른 유입수와 소택지 유출수의 인의 농도 변화. (B) 같은 실험구에서 가뭄 전, 가뭄 중, 가뭄 후 재 범람 시기에 β -glucosidase (G), N-acetylglucosaminidase (N), phosphate (P), arylsulfatase (S)의 변화 양상. (Song *et al.*, 2007에서 변형함)

부영양화된 상태로 식물성 플랑크톤이 우점하는 생태계가 될 것인지, 아니면 높은 식물 다양성을 갖는 생태계가 될 것인지에 영향을 미치게 된다. 둘째, 생지화학적 순환과 관련된 반응은 수질 개선 효과, 특히 무기질소와 무기인과 같은 제한 영양소의 제거 및 생성을 결정짓는 중요한 인자이다. 셋째, 중금속, 농약을 비롯한 유해 화학물질의 분해, 이동 및 저장은 생지화학적 순환과 밀접하게 연관되어 있다. 따라서 향후 하천 습지의 보전과 관리를 위해서는 습지에서 일어나는 생지화학적 현상에 대한 실험적 관찰적 연구에 대한 더 많은 정보가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김형수, 하성룡, 김상단, 박창근, 경민수. 2003. 물과 미래. 39: 52-60.
2. Mitsch, W.J. and Gosselink, J.G. 2000. Wetlands (3rd ed.). John Wiley & Sons.
3. Song, K.Y., Zoh, K.D. and Kang, H. 2007. Release of phosphate in a wetland by changes in hydrological regime. Science of the Total Environment Vol. 380, pp. 13-18.



감사의 글

본 논문은 AEBRC와 KOSEF (R01-2006-000-10569-0)의 지원으로 완성되었음.