

하천범람지에 형성된 습지의 기능 평가 연구

- HGM 기법의 적용 -

구분학

해천대 조경과

I. 서론

습지는 영구적으로 또는 계절적으로 습윤 상태를 유지하고 있고, 특별히 적응된 식생이 서식하고 있는 곳이며(Cylinder *et al.*, 1995), 육지 특성을 지닌 내륙(Upland; terrestrial system)과 수생태계(deep water; aquatic system) 사이의 일종의 전이지대로서(Cowardin *et al.*, 1979), 종다양도가 높은 생태계이다(Mitsch and Gosselink, 1993). 또한 습지는 지구상에서 가장 영양물질이 풍부하고 생산성이 높은 생태계로 인식되고 있으며, 여러가지 생태적 기능을 제공한다(Mulamootti *et al.*, 1996).

점차 습지의 중요성에 대한 인식이 증대됨에 따라 습지 생태계의 중요성을 강조하고 보전·복원하기 위한 노력이 절실하며 그 이론적인 바탕으로 습지의 기능과 중요성을 평가할 수 있는 방법의 개발이 요구된다. 이와 관련하여 선행연구에서 자연환경에 대한 습지의 모델을 구성한 사례가 있으며(구분학과 김귀곤, 1999), 국내외의 습지 기능평가를 위한 평가 모델에 대한 고찰(구분학과 김귀곤, 2001a)과 일반적 수준의 기능 평가를 위한 RAM 적용 평가 사례(구분학과 김귀곤, 2001b) 등이 있다.

이러한 시각에 따라 본 연구는 습지를 대상으로 단위 생태계로서의 습지의 기능을 분석하고 평가하기 위한 방법론 고찰에 주된 목적이 있다. 이러한 연구는 기존의 습지내 생물상 등 기초 자료 및 지식 습득에서 탈피하여, 도시공간이나 전원공간에 인공 습지를 조성할 때 환경 조건에 따라 적절한 형태 및 기능을 지니는 습지를 도입하기 위한 이론적 근거로 판단된다. 특히 본 연구에서 고찰하고자 하는 평가 기법은 미공병단에서 개발 행위 허가를 위한 습지 기능 평가 도구로 사용되고 있는 HGM 기법에 근간을 두고 있으며, 습지의 정밀한 기능을 평가하기 위한 기법으로 적합하다. HGM

모델의 적용을 위하여 별도의 습지 유형 분류 체계와 독립적인 변수가 설정되는데, 본 연구에서는 이러한 HGM 모델의 기능별 평가 변수와 평가 지표를 고찰함으로써 우리나라의 습지 기능 평가 도구로서의 활용가능성을 확인하고자 한다.

II. HGM 기법의 평가 변수 및 지표

1. Temporarily Store Surface Water

일시적이고 단기적인 물의 저장능력을 나타낸다. 주로 유역 내 강우에 의해 결정되며 제방 등을 통해 범람하거나 지표수 형태로 유입되는 물의 동태를 의미한다. 강우량, 주변 유역으로부터의 지표수 유입, 지하수 유입 등으로 구성된다. 하천의 범람으로 생성된 습지에게 특히 중요한 기능이다.

$$FCI = [(V_{FREQ} \times V_{STORE})^{1/2} \times \frac{(F_{SLOPE} + V_{ROUGH})}{2}]^{1/2}$$

와 같이 나타낼 수 있다. V_{FREQ} 은 물을 습지로 운반하는 능력을 의미하며, 발생 빈도에 따라 결정된다. V_{STORE} 는 지표수 저장량을 나타내며 제방 축조, 성토, 기타 변경 행위에 의한 저장량 감소를 반영한다. V_{ROUGH} 와 V_{SLOPE} 는 물이 습지를 통과할 때 유속을 저감하는 능력을 의미한다.

2. Maintain Characteristic Subsurface Hydrology

습지가 지하수를 저장하고 운반하는 능력을 의미한다. 강우, 지표수 및 지하수유입, 하천 범람 등에 의해 영향을 받는다. 습지가 지니는 지하수 저장능력의 중요성은 대체로 3가지로 요약된다. 첫째, 생물지화학적 순환과정과 식생 군락 및 동물 군집에 영향을 준다. 둘째, 하

천의 수문 조건을 지배하며 수원으로 작용하며 이는 야생생물의 서식처와 다양성 등에 영향을 끼친다. 마지막으로 지하수위의 계절적 변화로 인해 홍수 저장능력을 증대시킬 수 있는 토양 공극을 발생한다. 이러한 인자들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = K_{SAT} \times A \times \left(\frac{dh}{dl} \right)$$

여기서 Q : 시간당 저장능력;

K_{SAT} : saturated hydraulic conductivity;

A : 물이 이동하는 면적;

dh/dl : 물의 흐름에 따른 수문 경사 또는 수두의 변화를 의미한다.

K_{SAT} 는 토양 특성과 토양 속을 이동하는 유체의 특성에 의해 결정된다. 단, 본 연구에서는 다양한 유체는 존재하지 않고 단지 물만 있으므로 K_{SAT} 값에 영향을 주는 요소는 토양 특성뿐이다. 수문경사 dh/dl는 물이 토양 속으로 흐르게 하는 힘으로 인식할 수 있다. 서로 다른 수문전도도를 갖는 토양에서는 수문경사가 같더라도 물의 이동능력이 다르게 된다. (예를들면 같은 수문경사를 갖는 사질토와 점질토의 경우 수문전도도가 높은 사질토에서 더 빠른 속도로 이동하게 된다.) 관계식은 로 나타낸다.

$$FCI = \frac{(V_{SOILPERM} \times V_{WTSLOPE})^{1/2} + \left(\frac{V_{PORE} + V_{WTF}}{2} \right)}{2}$$

첫째 부분은 upland에서 습지를 통해 하천 등 유로를 따라 이동하는 지하수의 속도이다. $V_{SOILPERM}$ 은 수문 전도도를 의미하며, $V_{WTSLOPE}$ 는 수문경사를 의미한다. 두번째 부분은 지하수의 저장 능력을 의미한다. 주로 지하수위의 계절적 변화 V_{WTF} 와 토양의 공극률 V_{PORE} 에 의해 영향을 받는다.

3. Nutrient cycling

질소 원소를 환원 상태에서부터 질소산화물로 전환하는 능력을 비롯하여 생물이 삶을 영위하기 위해 carbon dioxide, water, phosphorus, nitrogen 등의 무기물이나 무생물 요소를 carbohydrates, fats, proteins 등의 유기체 형태로 변형하는 능력으로서, 광합성, 미생물 분해, 기타 생태계내에서 생산자, 소비자, 분해자에 의해 이루어지는 생지화학적 과정을 포함한다. 모델은 다음과 같이 나타낸다.

$$FCI = \left(\frac{V_{TBA} + V_{SSD} + V_{GVC}}{3} + \frac{V_{OHOR} + V_{AHOR} + V_{WTD}}{3} \right) \times 1/2$$

첫째 특성은 V_{TBA} , V_{SSD} , V_{GVC} 등은 식생 군집의 각 층의 존재여부를 나타낸다. 다음 특성은 장기적인 또는 단기적인 부산물이나 토양 요소로서 V_{OHOR} , V_{AHOR} , V_{WTD} 등이다. 이 두 요소들은 물질 순환과정에서 생산, 분해 과정을 통해 각각 독립적으로 수행되며 동등한 가치를 지닌다. 홍수 범람된 빠른 유속의 흐름은 짧은 시간에 detrital components을 물리적으로 제거할 수 있다.

4. Remove and Sequester Elements and Compounds

습지 내로 유입된 영양물질, 오염원, 기타 elements 및 compounds를 완전 제거하거나 일시적으로 활성화를 억제하는 능력이다.¹⁾ 모델은

$$FCI = \left(\frac{V_{FREQ} + V_{WTD}}{2} \times \frac{V_{CLAY} + V_{REDOX} + V_{AHOR}}{4} \right)^{1/2}$$

로 나타내며, 앞부분에서 V_{FREQ} 는 elements와 compounds가 총적토로부터 유입되는지 여부를 나타내며, V_{WTD} 는 지하수가 elements와 compounds를 제거하는 생지화학적 과정에 관여하는 수체를 유지하는데 기여하는지를 나타낸다. 뒷부분의 각 변수는 각각 elements와 compounds를 제거하는 메카니즘으로서 V_{CLAY} , V_{AHOR} , V_{OHOR} 는 점토와 유기물에 의한 토양의 흡수능을 나타낸다.

5. Retain particulates

유속의 감속 등 물리적인 과정을 통해 물속에 함유된 무기물과 유기물 입자를 제거하는 기능으로서 연간 단위면적당 입자의 제거량으로 나타낸다($g/m^2/yr$). 모델은 로 나타내며 앞부분에서 V_{FREQ} 는 유역이나 수로의 변화가 수문 발생 주기에 영향을 미치는 정도를, V_{STORE} 는 물리적인 구조의 변화에 의해 홍수기에 일시적으로 지표수 저장능력이 감소되는 정도를 각각 의미한다. V_{ROUGH} 와 V_{SLOPE} 는 습지 내 유속의 저장 능력이다.

6. Export Organic Carbon

습지 내에서 생성된 유기탄소를 배출시키는 기능으로서 여과, 용출, 대체, 침식 등을 포함한다. 연간 단위면적당 제거되는 탄소량으로 나타낸다($g/m^2/yr$). 모델은

$$FCI = ((V_{FREQ} + V_{SURFCON})^{1/2} \times (\frac{V_{OHOR} + V_{WD}}{2}))^{1/2}$$

로 나타내며, V_{FREQ} 와 $V_{SURFCON}$ 는 습지로부터 유기탄소가 배출되는 메카니즘이 발생하는지 여부를 설명한다. 홍수가 발생하지 않거나 습지의 표면유수가 수로에 연결되지 않을 경우 유기탄소의 배출은 심각하게 감소된다. V_{OHOR} 와 V_{WD} 는 용해되거나 입자상태의 유기탄소로서 각각 유기탄소의 배출량을 저감시키는 기능을 한다.

7. Maintain characteristic plant community

식생의 종구성과 물리적 특성을 의미하며, 식물의 종구성과 물리적 특성에 의해 나타나는 식물 군집의 동태와 구조가 중요하다. 현재의 상태를 나타내는 현존 식물군집과 식물군집 특성이 미래에도 유지될 수 있는지를 결정하는 물리적 인자를 동시에 고려하며, 식생구조와 풍부도 및 ordination 분석 등을 바탕으로 다음 식과 같이 모델을 작성한다.

$$FCI = \left(\frac{V_{TBA} + V_{TDEN} + V_{COMP}}{2} \times \frac{V_{SOILINT} + V_{FREQ} + V_{WTD}}{3} \right)^{1/2}$$

앞부분에서 V_{TBA} 와 V_{TDEN} 는 입목의 구조적 성숙도를 나타낸다. 그 결과는 다시 V_{COMP} 와 산술평균으로 식물 군락이 구조 및 종구성상 얼마나 자연 상태에 가까운지를 나타낸다. 예를들어 basal area가 낮고 식생 밀도가 높은 경우 성숙되지 않은 상태를 의미하며 F_{CI} 값이 낮게 나타난다. 반면에 높은 basal area와 낮은 식생 밀도는 상대적으로 성숙된 입목을 의미하며 높은 F_{CI} 값을 나타낸다. 뒷부분은 현재와 미래의 식생구조와 구조에 영향을 끼치는 무생물 요소를 고려한다.

8. Provide Habitat for Wildlife

습지가 야생동물의 일생 중 어느 한 시기에 서식처를

제공하고 부양할 수 있는 능력을 의미한다. 특히 조류 상에 초점을 두고 있으며, 조류의 서식조건을 충분히 갖춘다면 다른 동물상의 서식조건에도 부합될 수 있을 것으로 본다. 모델은

$$FCI = \left(\frac{(V_{FREQ} + V_{MACRO})}{2} + \frac{(V_{TRACT} + V_{CNNEVT} + V_{CORE})}{3} \right) \times \frac{(V_{COMP} + V_{TBA} + V_{TDEN} + V_{SANG}) + (\frac{V_{LOG} + V_{OHOR}}{2})}{5}^{1/2}$$

로 나타내며, 수문, 생물군집, 경관 등의 3요소로 구분할 수 있다. 수문 요소에서 V_{FREQ} 는 습지 지표로 물을 이동시키는 능력을 나타내며, V_{MACRO} 는 물을 저장하는 능력을 의미한다. V_{FREQ} 는 습지를 거점으로 하는 야생 동식물에게 규칙적으로 수문조건을 제공하며 어류를 비롯한 수생생물이 규칙적으로 범람원에 접근할 수 있는지의 여부를 의미한다. V_{MACRO} 는 어류 및 수생 동식물에게 필요한 습지 표면의 복잡성으로서 다양한 생태계의 지표이다.

생물군집(죽은 잔해 포함)을 의미하는 V_{COMP} , V_{TBA} , V_{TDEN} , V_{LOG} , V_{OHOR} , V_{SNAG} 들은 식물 군집의 구조를 나타낸다. 생명체 영역은 V_{COMP} 로 나타내는데, 자연상태에 가까운 유사도를 의미한다. V_{TDEN} 와 V_{TBA} 는 입목의 성숙도로서 천이 계열을 나타내며, V_{TDEN} 와 V_{TBA} 는 삼림 구조를 의미하는 지표이다. V_{LOG} 는 은신처, 식량, 야생동물의 다양성을 높일 수 있는 재생산 가능한 sites의 양을 의미한다. 낙엽 등의 부산물은 V_{OHOR} 로 나타내며 무척추동물이나 작은 포유류의 서식처를 나타낸다. 쓰러진 나무의 잔해나 그루터기를 의미하는 V_{SNAG} 은 서식처로서 매우 중요한 요소인데, 조류를 위한 햇대, 작은 공동이나 동굴, 식량 공급원 등의 기능을 포함하고 있다.

경관 특성으로서 습지의 넓은 면적 전체(V_{TRACT}), 내부 핵심 구역(V_{CORE}), 주변 서식처($V_{CONNECT}$) 등은 습지와 습지가 위치한 경관의 광범위한 속성을 나타낸다. 유용한 서식처가 많을수록 더 많은 야생동물이 발생하게 되는데, 특히, 규모/형태라는 요소와 습지의 격리성이라는 요소로 구성된다. V_{SIZE} 와 V_{CORE} 는 습지의 규모와 형태를 나타내며 함께 고려된다. $V_{CONNECT}$ 는 습지가 인근 서식처로부터의 격리성을 나타낸다.

III. 결론

육상생태계나 하천생태계의 전이공간으로서의 습지생태계는 다른 생태계에 비해 다양하고 생산성이 뛰어난 생태계로 알려져 있다. 이러한 습지가 지난 60년대까지만 해도 버려진 땅으로서 매립에 의한 형질변경의 대상으로 인식되었고, 특히 국내에서는 90년대 초반까지 습지의 기능에 대해 주목하지 못했지만, 근래 새롭게 습지의 기능과 가치를 재평가하게 되어 습지의 보전 및 관리전략이 마련되고 있다.

이와같은 인식에서 본 연구는 습지를 대상으로 단위 생태계로서의 습지의 기능을 분석하고 평가하기 위한 방법론 고찰에 목적을 두고 수행되었다. 특히 일반적 기능평가를 통해 보전 가치가 입증된 습지 및 습지와 관련된 행위 허가를 위한 정밀 기능평가에 적합한 HGM 기법의 변수와 지표를 고찰함으로써 국내에 도입·적용 가능성을 확인하고자 하였다.

본 연구에서 설정한 평가 변수와 지표들은 외국의 습지 관련 행위 허가에서 적용하기 위해 개발·수정된 것으로서 이후 국내의 주요 습지를 대상으로 한 사례연구를 통해 변수 및 지표의 타당성을 검증할 필요가 있다.

주 1. Elements는 식물생육에 필수적인 성분들(질소, 황, 칼륨 등)과 농축되면 식물에 해가 될 수 있는 중금속을 포함하며, Compounds는 살충제를 비롯한 여러 가지 유입 물질을 포함한다.

인용문헌

1. Ainslie, W.B., R.D. Smith, B.A. Pruitt, T.H. Roberts, E.J. Sparks, L. West, G.L. Godshalk, M.V. Miller. 1999. A Regional Guidebook for Assessing the Functions of Low Gradient, Riverine Wetlands in Western Kentucky. Technical report WRP-DE-17. USACE.
2. Brinson, M.M. 1993. Hydrogeomorphic Classification for Wetlands. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4. U.S. Army Corps of Engineers.
3. Brinson, M.M., R.D. Rheinhardt, F.R. Hauer, L.C. Lee, W.L. Nutter, R.D. Smith, D. Whigham. 1995. A Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessments to Riverine Wetlands. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-11. U.S. Army Corps of Engineers.
4. Carter, V. 1999. "Technical Aspects of Wetlands : Wetland Hydrology, Water Quality, and Associated Functions." United States Geological Survey Water Supply Paper 2425. U.S. Geological Survey.
5. Hruby, T., T. Granger, K. Bruner, S. Cooke, K. Dublanica, R. Gersib, L. Reinelt, K. Richter, D. Sheldon, E. Teachout, A. Wald and F. Weinmann. 1999. Methods for Assessing Wetland Functions. Volume I : Riverine and Depressional Wetlands in the Lowlands of Western Washington. WA State Department Ecological Publication #99-115.
6. Mulamootil, G., B.G. Warner and E.A. McBean. 1996. Wetlands : Environmental Gradients, Boundaries, and Buffers. Lewis Publishers.
7. Smith, R.D., A. Ammann, C. Bartoldus, M.M. Brinson. 1995. An Approach for Assessing Wetland Functions Using Hydrogeomorphic Classification, Reference Wetlands, and Functional Indices. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-9.
8. US Army Corps of Engineers. 1996. National Action Plan to Develop the Hydrogeomorphic Approach for Assessing Wetland Functions. Regulatory Program of the US Army Corps of Engineers.
9. USEPA. 1998. Wetland Biological Assessments and HGM Functional Assessment. Wetland Bioassessment Fact Sheet 6. USEPA.
10. USGS. 1999. Restoration, Creation, and Recovery of Wetlands Wetland Functions, Values, and Assessment. National Water Summary on Wetland Resources. United States Geological Survey Water Supply Paper 2425.
11. WRAP. 2000. "Guidelines for Conducting and Reporting Hydrologic Assessments of Potential Wetland Sites". Wetlands Regulatory Assistance Program. ERDC TN-WRAP-00-01.
12. 구분학, 김귀곤(1999) 습지형 비오톱 기능 모델 구성 : 방동소택지를 사례로. 한국환경복원녹화기술학회지 2(2) : 1-8.
13. 구분학, 김귀곤(2001a) 습지기능 및 가치 평가를 위한 방법론에 대한 고찰. 한국환경복원녹화기술학회 하계 학술발표논문집 : 42-46.
14. 구분학, 김귀곤(2001) RAM(일반기능평가기법)을 이용한 내륙 습지 기능 평가. 한국환경복원녹화기술학회지.