

김 현 우 | 한양대학교
건설환경공학과 연구교수
(k4ecohydro@hanyang.ac.kr)



최 민 하 | 한양대학교
건설환경공학과 조교수
(mchoi@hanyang.ac.kr)

하안완충지대를 통한 하천 관리 생태수문모형 및 원격 탐사 기술의 활용성

1. 들어가며

여러분들은 강가에 나무들이 색색별로 어우러져 심겨 있는 아름다운 풍경을 본 적이 있는가?(그림 1). 이렇게 강가에 자연적으로 혹은 인공적으로 심겨진 나무들은 심미적인 가치를 가지고 있을 뿐만 아니라 하천의 수질을 보호할 수 있는 완충지대의 역할을 하고 야생동물의 서식처를 조성하며, 생태 통로로도 이용될 수 있다(박윤식 등, 2008; Yuan et al., 2009).

강가에 식생이 조성되어 있는 지역은 Riparian buffer zone 이라고 하며, 국내에는 하반구역, 하안지역, 초생대 또



(그림 1) 하안완충지대의 아름다운 전경
(출처: hubpages.com/hub/Riparian-Buffer-Zones)

는 수변완충지대 등으로 지금까지 번역, 소개되어 왔다. 분고에서는 riparian의 '강가, 강기슭, 하안'이라는 사전적 의미와

함께, 육상의 비점오염원으로부터 수계를 보호하고 홍수발생시 피해 조절 능력을 갖춘 '완충'의 역할을 강조하기 위하여 하안완충지대로 소개하고자 한다. 하안완충지대의 공식적인 정의는 다양하며 개인 또는 단체의 용어 정의에 따라 상이하다. 하안완충지대 연구의 최고 전문가중 하나인 생태학자 Dr. Richard Lowrance는 하안완충지대를 다음과 같이 정의하고 있다.

“하안완충지대(Riparian buffer zone)란 물과 인접한 환경에서 사는 식물과 다른 생물의 복잡한 조합을 의미한다. 뚜렷한 구분 없이 하천 독(stream bank), 범람원(floodplain), 습지와 더불어 육지와 수생 서식지 사이의 전이 지대를 형성하는 저면 관수된 지역(sub-irrigated area)도 포함할 수 있다. 특수한 경우에 하안완충지대는 야생동물의 하천 주변 서식지가 될 수 있는 산기슭의 일부를 포함할 수도 있다(Lowrance et al., 1985).”

생태학적으로 보면 하안완충지대는 하천과 육지 사이에 존재하는 전이지대로서 습지의 한 종류라고도 할 수 있으며, 인접하고 있는 육지로부터 수계로 흘러 들어가는 유출수의 유속을 저감시켜서 강도를 보호해 준다(Wenger, 1999). 뿐만 아니라 이는 하천의 수질을 보호하기 위해 중요한데, 특히 하천 주변의 비점오염원으로부터 토사나 질소, 인, 제초제, 그리고 다른 오염물질들을 여과 침전시킴으로써 하천의 수질에 직접적으로 영향을 미치는 것을 최소화할 수 있다(박윤식 등, 2008). 또한 하안완충지대는 하천 생물 군집의 에너지 및 양분의 원천이 된다. 특히 99% 이상의 에너지를 목재 쇄설물(Wood Debris)이나 낙엽으로부터 얻어야 하는 상류 및 세류 하천에 있어서는 더욱 중요하다. 하안완충지대는 야생동물의 서식지 및 이동 통로도 사용되는데 이를 통하여 하천 생태계의 생물 다양성을 유지시키는데도 중요한 역할을 한다(Yuan et al., 2009).

2. 효율적 관리를 위한 방안

하안완충지대의 효율적인 관리를 위하여 먼저 완충 효과

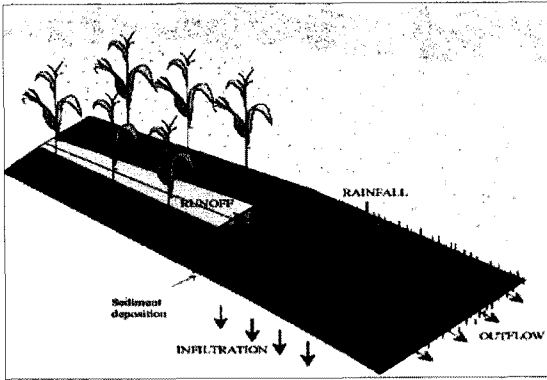
에 영향을 미치는 인자들 중 폭, 경사, 식생의 종류 등 세 가지만 간략히 살펴보도록 하자. 하안완충지대의 폭은 지표면 유출수를 여과하는데 있어서 중요한데, 폭이 넓을수록 높은 완충효과를 기대할 수 있으며 폭이 너무 좁은 경우 지속적인 유지가 어려우며 홍수시 하천 독을 보호하는데도 비효율적일 수 있다. 그러나 폭이 필요 이상으로 넓은 경우 주변지역의 토지 이용에 지장을 줄 수 있다. 지표면의 경사도 하안완충지대의 완충효과에 영향을 미칠 수 있으나(Wenger, 1999), 그 결과는 연구에 따라 상이하다(Yuan et al., 2009). 그러나 하안완충지대의 경사와 폭과의 관계는 명백한데, 기울기가 급할수록 폭이 넓어야 높은 완충효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다(Wenger, 1999). 식생의 종류는 하안완충지대의 수질 정화 효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났는데, 활엽수나 침엽수, 혼효림을 비교해 보아도 큰 차이가 없었으며, 심지어는 잔디가 우점하는 지대와 식생의 종류에 관계없이 임지로 덮여있는 지대를 비교하여 보았을 때도 큰 차이가 없는 것으로 나타났다(Yuan et al., 2009).

이러한 여러 인자들을 고려하여 하안완충지대를 관리하는 것은 또한 친환경적 하천관리 기법의 중요한 요소 중 하나라고 사료된다. 이의 효율적인 관리를 위해서 여러 가지 구체적인 방법을 제안할 수 있으나, 본고에서는 노스캐롤라이나 주립대학에서 개발된 두 개의 생태수문모형과 인공위성 영상을 활용한 방안을 소개하고자 한다.

3. 생태수문모형

3.1 VFSDMOD

Vegetative Filter Strip MODEL (VFSDMOD)은 미국 노스캐롤라이나 주립대학교 농공학과(Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University)의 Dr. John E. Parsons 교수(2005년 10월 작고)의 지도 아래 현재 플로리다 주립대학 농공학과와 부교수로 재직 중인 Dr. Rafael Muñoz-Carpena에 의해 개발된 현장 규모(field scale)의 생태수문모형(그림 2)으로서 인접 지역



(그림 2) VFSMOD 개념도(출처: <http://abe.ufl.edu/carpa/vfsmod/>)

으로부터 하안완충지대로 유입되는 유량과 침투 및 토사 저감의 효율을 모의한다(Muñoz-Carpena et al., 1999).

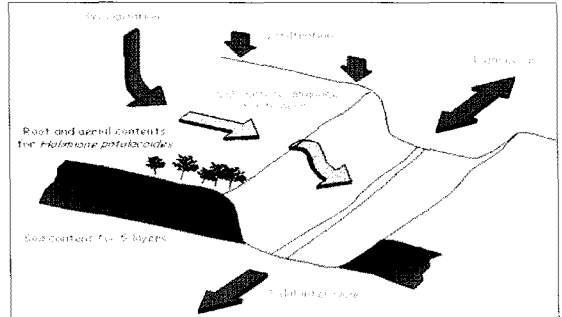
VFSMOD는 하안완충지대의 주 설치 목적인 토사 유출의 저감을 모의하기 위해 개발된 모형이므로 하천 인근 지역으로부터 하천으로 유입되는 유출 특성이나 하안완충지대의 폭, 식생에 관련된 인자들을 분석하는데 유용하게 쓸 수 있는데, 우리나라에서도 최근에 도입되어 적용된 사례가 있다(박윤식 등, 2009). 아직은 현장 규모의 모형이므로 유역이나 더 넓은 규모에 적용시키기 위해서는 수정 및 보완이 필요하다

3.2 DRAINMOD

DRAINage MODEL (DRAINMOD)은 노스캐롤라이나 주립대학 농공학과 Dr. Wayne Skaggs 교수에 의해 개발된 현장 규모의 수문모형으로서 평균 지표면 기울기가 0.001 전후 (1m/1km에 해당)이며 지하수위가 높은 노스캐롤라이나 동부 해안평원지역을 대상으로 개발되었다(Skaggs, 1982).

이 모형은 배수상태가 불량하고 지하수위가 높은 지역의 수문 순환을 모의하는 장기 강우유출모형의 하나이다. 이 모형을 통해서 배수나 토지이용 변경, 그리고 다른 여러 수자원 관리 정책에 따른 유출량 변화가 지하수위, 토양수분의 공간적 분포, 그리고 작물의 생산에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 이 모형은 해안의 염습지를 농지나 시가지로 용도를 변경

하기 위한 목적으로 완전히 혹은 부분적으로 배수시킬 경우, 이 지역의 수문 상태를 습지의 수문학적 기준과 비교하여 추가적인 배수가 필요한지를 판단하는 데에도 유용하게 사용되어 왔다(Chescheir et al., 1992). 또한 전 세계적으로 다양한 토양 및 지리적 조건에서 성공적으로 검증되었고 여러 생태 수문학적인 연구에 적용되어 왔다. 지난 30년 동안 이 모형의 성능은 수자원 관리 정책에 따른 수문현상 및 수질 변화의 예측을 위하여 다양한 공간적 규모(scale)에 적용될 수 있도록 계속해서 개선되어 왔다(Amatya et al., 1997).



(그림 3) DRAINMOD으로 모의되는 해안가 수계 주변 질소의 유입 경로(출처: <http://ecobio.univ-rennes1.fr/eurossam/Final%20report/task12.htm>)

DRAINMOD는 개발 당시에는 현장 규모의 수문모형이었으나, 현재는 유역 규모로 확장되었으며(Amatya et al., 1997), 수문 현상뿐만 아니라 비점오염원에 의한 부영양화의 주변인 하천 내 질소의 농도까지 예측할 수 있도록 개선되었다(Youssef, 2003). 가장 최근 버전인 DRAINMOD 6.0은 원래의 DRAINMOD 수문모형에 DRAINMOD-N(질소) 모형과 DRAINMOD-S(염도) 모형이 새로 제작/연동되어 입력자료들을 쉽게 제작할 수 있도록 Graphical User Interface 형식의 패키지로 일반 및 연구자들에게 제공되고 있다(그림 3). 이 모형은 기본적으로 경사가 낮고 지하수층이 높은 지역을 대상으로 제작되었기에 국토의 2/3가 산지인 우리나라에 전역에 적용하기에는 많은 개선이 필요하다. 이러한 이유로 DRAINMOD가 국내에 적용된 사례는 아직 없으나, 지표면 기울기가 낮은 4대강 하류의 하안완충지대에 잘 적용될 수 있다면 이 지역 토양의 수문특성이나 양분 상태를 분석하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

4. 원격탐사·식생지수

식생지수란 원격탐사 기법을 이용하여 식물의 생물리학적 정보를 얻기 위하여 개발되었는데(채효석 등, 2006), 이는 원격탐사 연구에서는 가장 오래된 도구 중 하나이다. 위성영상의 각 밴드가 식생에 대해 나타내는 특징적 반사치를 이용하여 지표면의 식생 유무와 상태를 표현한다. 일반적으로 생장이 빠른 식생은 클로로필을 비롯한 기타 색소에 가시광선의 붉은 파장을 많이 흡수하고, 근적외선 파장에 대해서는 높은 반사율을 보인다. 식생지수는 단위가 없는 복사값으로서 녹색식물의 상대적 분포량과 활동성, 엽면적지수, 엽록소 함량 및 광합성 흡수복사량(APAR) 등과 관련된 지표로서 사용된다(채효석 등, 2006).

식생지수로 사용되기 위한 조건은 일반적으로 다음과 같다(Huete and Justice, 1999; 채효석 등, 2006).

- 넓은 범위의 식물 상태를 직접적으로 연관시킬 수 있는 여러 생물리학적 변수들에 최대한의 반응을 보일 수 있어야 하며, 수치에 대한 검증이나 보정이 용이하여야 한다.
- 시공간적으로 일정한 비교가 가능할 수 있도록 태양각도, 촬영각도, 대기상태 등의 외부 효과를 정규화하거나 모의할 수 있어야 한다.

- 지형적 효과, 토양 변이, 그리고 고사된 식물이나 가지나 줄기와 같은 목질부의 요인에 따라서 영향을 줄 수 있는 배경 효과를 정규화할 수 있어야 한다.

- 검정과 효율성 향상을 위한 노력의 일환으로 생체량, 엽면적지수 및 광합성 흡수복사량 등 측정이 가능한 식물의 생물리적인 인자들과 연관성이 있어야 한다.

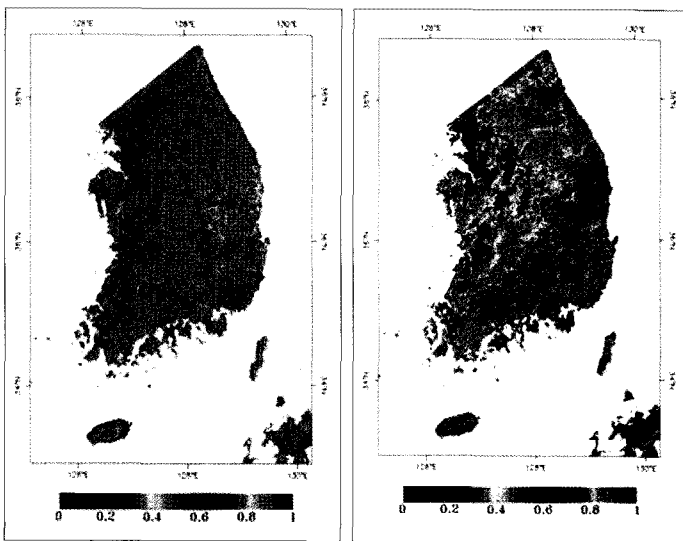
식생지수의 종류는 현재까지 약 20여 종류가 사용되고 있는데, 본고에서는 그 중 가장 널리 사용되고 있는 정규화 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)에 대해 알아보기로 한다. 이는 1974년 Rouse 등에 의해 개발되었고(채효석 등, 2006), 식물의 활력도 및 녹피율에 따른 가시광선 중 붉은색에 해당하는 파장대(Vred)와 근적외선 파장대(NIR) 광선의 반사량 차이와 비를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$NDVI = (NIR - Vred) / (NIR + Vred)$$

정규화식생지수는 일반적으로 -1에서 1 사이의 값을 갖게 된다. 일반적으로 눈, 구름, 토양 등과 같이 식물이 아닌 토지 피복에서는 -1~0에 가까운 값을 가지며, 식물은 0~1 사이의 값을 갖게 된다. 식물이 있는 지역 내에서도 식물의 양이 많거나 건강한 식물이 있는 지역이 노화한 식물이나 병충해 등의 피해를 입은 식물이 있는 지역보다 높은 값을 나타낸다.

즉, 지수값이 0 이상인 지역은 식물로 피복이 된 지역으로, 토지이용상으로 농지, 초지, 산림에 해당되는 지역이라 할 수 있다. 0 이하인 지역은 식물이 피복되지 않은 지역으로, 토지이용상 수역이나 도시 지역에 해당된다 할 수 있다. <그림 4>는 MODIS 인공위성영상으로부터 복원한 2004년 여름철과 겨울철의 남한 지역 식생지수의 공간적 분포이다. 그림에서 보듯이 여름인 7월의 경우 한반도 전역이 0.6부터 1.0에 해당하는 높은 식생 분포를 나타내고 있으며, 반면 12월의 경우 0.2부터 0.6의 상대적으로 낮은 식생분포를 나타내고 있다.

앞에서 언급했듯이 하안완충지대에서 식생




(1) 2004.07.17

(2) 2004.12.26

<그림 4> 정규식생지수로 본 남한 지역 식생 변화

대의 폭은 비점오염원으로부터 수계를 지켜내는데 가장 중요한 요소 중 하나이다. 이러한 식생대의 폭은 자연적 혹은 인위적인 요인으로 변화될 수 있는데 식생지수를 하안완충지대 및 주변 임지의 지도를 작성하는데 적용한다면 하안완충지대의 상태가 어찌지 식별할 수 있는 효율적인 수단이 될 수 있을 것이다(Johansen et al., 2007). 인공위성을 기반으로 한 식생지수를 이용한 방법은 생태수문모형이 가지고 있는 적용 규모(applicable scale)로 인한 공간적인 한계를 뛰어넘을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 인공위성 영상에 따른 해상도의 문제가 발생할 수도 있으므로 연구 목적에 따라 정확도와 해상도를 고려하여 두 가지 방법을 적절히 함께 병행하는 것이 가장 효과적일 것으로 사료된다.

5. 맺으며

하안완충지대는 하천가에 자연적으로 혹은 인공적으로 조성된 식생지역이며, 국내에서는 지금까지 하안식생, 하반구역, 초생대, 수변완충지대 등으로 번역, 소개되어 연구가 진행되고 있다. 본고에서는 홍수로부터 하천가를 물리적으로 보호하고 비점오염원의 유입으로부터 침전, 여과 작용을 통해 하천의 수질을 보호하는 완충의 역할을 강조하기 위하여 '하안완충지대'라는 다소 생소한 용어로 소개되었다. 하안완충지대는 이러한 하천 보호의 역할뿐만 아니라 하천 생태계 내의 생물 다양성 증대, 야생동물의 서식지 및 이동 통로 역할 등 다양한 가치가 인정되고 있으며, 이는 또한 최근에 생태공학적으로 그 중요성이 인식되고 있는 자연 친화적인 하천 정비의 핵심요소 중 하나라 할 수 있다. 이의 효과적 인 조성 및 관리를 위하여 다양한 방법들이 제시되고 있는데, 본고에서는 그 중 노스캐롤라이나 주립대학에서 개발된 두 개의 생태수문모형과 원격탐사를 이용한 식생지수를 통한 방법들이 간략히 소개되었다. 이 두 가지 방법을 통해서 하안완충지대에 대한 연구들이 국내에서도 보다 활발히 진행될 수 있길 기대해 본다. 

참고문헌

- 박윤식, 김종건, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008), VFS-MOD-W 모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선, 한국물환경학회지, 24(4): 473-479.
- 안홍규(2000), 토양의 물리적 특성 및 수분조건에 따른 하반식물의 분포-토양환경과 식생과의 관계를 중심으로, 한국조경학회지, 28(5): 39-47.
- 채효석, 김광은, 김성준, 김영섭, 이규성, 조기성, 조명희 편저(2006), 환경원격탐사, 시그마프레스.
- Amatya, D.M., R.W. Skaggs, and J.D. Gregory(1997), Evaluation of a Watershed Scale Forest Hydrologic Model, Agricultural Water Management, 32(1997): 239-258.
- Chescheir, G.M., R.W. Skaggs, J.W. Gilliam, and R.G. Broadhead (1992), Evaluation of wetland buffers for evaluating treatment of pumped agricultural drainage water, Transactions of the ASAE, 35(1): 175-182.
- Huete, A.R., and C. Justice(1999), MODIS Vegetation Index(MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document, Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
- Johansen, K., N.C. Coops, S.E. Gergel, and Y. Stange(2007), Application of high spatial resolution satellite imagery for riparian and forest ecosystem classification, Remote Sensing of Environment, 110(1): 29-44.
- Lowrance, R, R. Leonard, and J. Sheridan(1985), Managing riparian ecosystems to control nonpoint pollution, Journal of Soil and Water Conservation, 40(1): 87-91.
- Muñoz-Carpena, R., J.E. Parsons, and G.J. Wendell(1999), Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips, Journal of Hydrology, 214(1-4): 111-129.
- Skaggs, R.W.(1982), Field evaluation of a water management simulation model, Transactions of the ASAE, 25(3): 666-674.
- Wenger, S.(1999), A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation, Office of Public Service and Outreach, Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, GA.
- Youssef, M.A.(2003), Modeling nitrogen transport and transformations in high water table soils, PhD Dissertation, N.C. State University, Raleigh, NC. 270p.
- Yuan, Y., R.L. Bingner, and M.A. Locke(2009), A Review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas, Ecohydrology, 2(3): 321-336.