

## 하천식생 이입현상의 원인 별 유형화 및 연구 방향

# Cause-based Categorization of the Riparian Vegetative Recruitment and Corresponding Research Direction

우효섭<sup>1\*</sup> · 박문형<sup>2</sup>

<sup>1</sup>광주과학기술원 지구환경공학부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 수자원하천연구소

Hyoseop Woo<sup>1\*</sup> and Moonhyeong Park<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju 61005, Korea

<sup>2</sup>Hydro Science and Engineering Research Institute, KICT, Goyang 10223, Korea

Received 21 September 2016, revised 23 September 2016, accepted 26 September 2016, published online 30 September 2016

**ABSTRACT:** This study focuses on the categorization of the phenomenon of vegetative recruitment on riparian channels, so called, the phenomenon from “white river” to “green river”, and proposes for the corresponding research direction. According to the literature review and research outputs obtained from the authors’ previous research performed in Korea within a limited scope, the necessary and sufficient conditions for the recruitment and retrogression of riparian vegetation may be the mechanical disturbance (riverbed tractive stress), soil moisture (groundwater level, topography, composition of riverbed material, precipitation etc.), period of submergence, extreme weather, and nutrient inflow. In this study, two categories, one for the reduction in spring flood due to the change in spring precipitation pattern in unregulated rivers and the other for the increase in nutrient inflow into streams, both of which were partially proved, have been added in the categorization of the vegetative recruitment and retrogression on the riparian channels. In order to scientifically investigate further the phenomenon of the riparian vegetative recruitment and retrogression and develop the working riparian vegetative models, it is necessary to conduct a systematic nationwide survey on the “white to green” rivers, establishment of the categorization of the vegetation recruitment and retrogression based on the proof of those hypotheses and detailed categorization, development of the working mathematical models for the dynamic riparian vegetative recruitment and retrogression, and adaptive management for the river changes.

**KEYWORDS:** Adaptive management, Dynamic riparian vegetation model, Green river, Riparian vegetation, White river

**요 약:** 본 연구는 총적하천의 식생이입 현상, 즉 경관생태적으로 하천이 화이트리버에서 그린리버로 변하는 현상을 원인 별로 구분하고, 구분된 각각의 유형을 설명하고, 앞으로의 연구방향을 제시하는 것이다. 문헌연구와 과거 필자들이 제한된 범위에서 시행한 관련 국내 연구성과에 의하면 사주 상 하천식생 이입과 퇴행의 필요/충분 조건은 기계적 교란 (하상소류력), 토양습윤 (지하수위, 지형, 하상재료 구성, 강수 등), 침수기간, 극단적 기후, 그리고 영양염류의 유입 등이다. 본 연구에서 사주 상 하천식생 이입과 퇴행의 원인 별 유형으로서 부분적으로 입증된 가설인 불철 강우양상 변화로 인한 비조절하천에서 홍수 저감과 하천에 영양물질 유입증가 유형을 추가하였다. 하천식생 이입과 퇴행 현상을 과학적으로 더 규명하고 실제 이용가능한 하천식생모형의 개발을 위해서는 화이트리버가 그린리버로 바뀌는 현상의 전국적인 현황조사, 가설의 검증과 세분화를 통한 원인 별 유형 정립, 동적 하천식생 모델링 기법 개발, 변화에 따른 적응관리 등에 대해 연구가 필요하다.

**핵심어:** 적응관리, 동적 하천식생모형, 그린리버, 하천식생, 화이트리버

\*Corresponding author: hswoo@gist.ac.kr, ORCID 0000-0003-3708-8053

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

문순기후의 영향을 받는 우리나라 하천은 인간활동의 영향이 하천식생이입에 직접적인 영향을 주기 전까지는 이른바 ‘화이트리버’였다. 그러나 댐 건설, 제방축조 같은 하천정비, 보 건설, 골재채취, 영양물질 유입, 강수량상의 변화 등 인위적 영향으로 하천의 유형, 유사이송, 지형 등에 직접적인 영향을 줌에 따라 점차적으로 이른바 ‘그린리버’로 바뀌고 있다 (Woo et al. 2008). 여기서 화이트리버는 사주나 홍수터가 모래나 자갈 등 흰색 재료로 구성된 하천을, 그린리버는 흰 색의 사주나 홍수터가 녹색의 식생으로 덮인 경관을 상징적으로 지칭한다.

놀라운 것은 최근 2010년대 우리 하천은 1980년대와 비교하여 화이트리버의 60%가 그린리버로 바뀌었다는 것이다. 이는 우리나라 국토환경의 중요한 축을 차지하는 하천의 상당부분이 전통적인 모래/자갈 하천에서 식생이 가득 들어찬 하천으로 바뀌었다는 것이다. 위와 같은 화이트리버가 그린리버로 바뀌는 현상은 공학적, 생태적, 경관적으로 여러 변화를 야기하며, 이에 대해서는 최근 발표된 관련 논문 (Woo et al. 2015, Woo et al. 2016)을 참고할 수 있다.

본 연구는 위와 같이 하천식생 이입현상을 원인 별로 구분하고 각각의 유형에 대해 기존 연구성과를 요약하고 앞으로 연구가 필요한 분야를 제시하는 것이다. 하천 식생이입현상의 원인 별 유형화는 Woo et al. (2016)에 기초하였으며, 그에 따른 연구분야 제시는 처음으로 구체적으로 제시하는 것이다.

## 2. 관련 연구 성과 및 원인 별 유형화

국내에서 하천 내 식생, 구체적으로 홍수터 및 사주 상 식생의 이입과 활착 현상에 대한 체계적인 문헌조사는 2000년대 후반에 처음 이루어졌다 (Woo 2009). 여기서 자연상태 하천에서 홍수터 (floodplain)는 하천지형적으로 강터 (river bank)에서 하곡의 시작부까지 홍수시 침수되는 구역을 의미하며, 사주 (bars)는 통상 강터 내 하도에 나타나는 실트/모래/자갈 둔덕을 의미한다. 그러나 우리나라 하천은 대부분 제방으로 정비되었고 일부 하천은 저수로가 인위적으로 형성되었으므로, 본 연구에서는 홍수터, 사주를 별도로 구분하지 않고 식생이입이 가능한 하천 내 둔덕을 의미한다. 이 연구에서는 국내외 관련 문헌 약 50개

를 조사하여 1980년대부터 시작된 하천식생이입 관련 연구를 1) 현지 조사 및 시험 연구, 2) 기초 실험 및 분석 연구, 3) 홍수터 식생모형 연구, 4) 홍수터 및 사주 복원 연구 등으로 나누어 정리하였다. 위와 같은 각각의 구분에 대해 다시 1) 조절하천, 2) 비조절하천, 3) 수목성장과 지하수위 (토양습윤), 4) 씨앗의 분산 (hydrochory) 등으로 나누어 세분하였다.

이와 같은 분류 별 주요 내용을 요약하면, 우선 이 분야 최초의 연구로서 1984년 Williams와 Wolman 연구 (Williams and Wolman 1984)는 큰 의미가 있다. 이들은 모래하천에 댐을 건설하여 홍수를 조절하면 하류하천에 식생이입 기회가 커지는 현상을 최초로 문헌에 보고하였다. 동시에 댐에 의한 상류에서 토사공급의 저감과 지하수위의 감소는 기존 식생성장에 부정적인 영향을 주는 것으로 보고하였다. 국내에서는 Choi et al. (2005)이 최초로 황강댐 하류하천에 대해 댐에 의한 유황조절과 그에 따른 식생이입의 가속화 현상을 조사하였다. 다음으로 강조할 가치가 있는 것은 Mahoney and Rood (1998)의 ‘Recruitment Box Model (RBM)’이라 불리는 홍수터 식생모형이다. 이 모형은 하천에 홍수가 줄어드는 속도는 주변 홍수터의 지하수위 감소율에 영향을 주고, 이는 궁극적으로 홍수터 상 식생뿌리의 성장속도와 비교되어 전자가 후자보다 큰 경우 홍수터 식생 생장은 불가하다는 점에서 시작한다. 비교적 최근에 Benjankar (2006)는 최초로 홍수터 식생이입 모의를 위해 수리적인 요소인 하상소류력을 교란인자로 간주하고 식생천이를 고려한 홍수터 식생모형(Floodplain Vegetation Model)을 개발하였다. 이 모형은 그 후 지속적으로 보완되었으며, 2012년에 낙동강 구간에 대해 적용되었다 (Egger et al. 2012).

이 연구 (Woo et al. 2009)의 결론 성격으로 하천 식생이입의 기본요건은 종자의 퍼짐, 발아, 생장 등을 모두 만족하는 것이며, 이에 대한 필요/충분 조건으로 기계적 교란 (하상소류력), 토양습윤 (지하수위, 지형, 하상재료 구성, 강수 등), 침수기간, 극단적 기후, 그리고 영양염류의 유입 등을 제시하였다.

위와 같은 기존 연구성과의 고찰을 바탕으로 국내 관련 자료 특히 경년 별 항공사진자료의 비교분석, 제한된 범위의 현장조사 등을 통해 1차적으로 보고된 하천식생이입의 원인 별 유형은 다음과 같다 (Woo et al. 2009).

- 패턴 1: 유향과 유사의 변화 (조절하천)
  - 패턴 1-1: 댐에 의해 봄철 홍수발생 억제로 토양수분과 '신선한' 유사공급 제한(국내의 경우 제한적)
  - 패턴 1-2: 댐에 의해 여름철 홍수발생 억제로 하상안정 (국내의 경우 보편적)
- 패턴 2: 하도의 인위적 교란 (골채채취, 하천정비, 보 건설, 경작지 홍수터 편입 등)
- 패턴 3: 하천에 영양물질 유입증가 (비점오염물질 형태로 유입하여 하천식생 생장 촉진)

그러나 위와 같은 유형구분은 그 당시 제한적으로 조사된 성과를 토대로 한 것으로 보완할 필요가 있다.

### 3. 원인 별 유형화의 검토

2009년의 하천식생이입 현상의 원인 별 유형구분은 추가적인 조사연구를 통해 2016년에 패턴 1을 다음과 같이 세분화 되었다 (Woo et al. 2016).

- 패턴 1: 유량과 유사량 흐름의 변화
  - 패턴 1-1N: 용설 시 댐에 의한 봄철 홍수저감 (미국 중서부, 태평양 연안 북서부 등)
  - 패턴 1-1P: 강우양상 변화로 인한 비조절하천에서 봄철 홍수 저감 (가설)**
  - 패턴 1-2: 몬순기후 지역의 댐에 의한 여름철 홍수저감 (한국 등)
- 패턴 2: 하도의 인위적 교란 (골채채취, 하천정비, 보 건설, 경작지 홍수터 편입 등)
- 패턴 3: 하천에 영양물질 유입증가 (비점오염물질 형태로 유입하여 하천식생 생장 촉진) (가설)

위에서 패턴 1-1은 봄철 유량과 유사량 흐름의 변화를 의미하며, 이중 N은 식생이입에 부정적, P는 긍정적 효과를 의미한다. 따라서 2009년 분류와 비교하여 패턴 1-1P가 추가된 셈이다. 또한 패턴 1-1P와 패턴 3은 아직 가설 수준으로서, 패턴 1-1P에 대해서는 Woo et al. (2015)이, 패턴 3에 대해서는 Woo et al. (2016)이 완전하지 않지만 각각의 가설을 입증하려고 하였다.

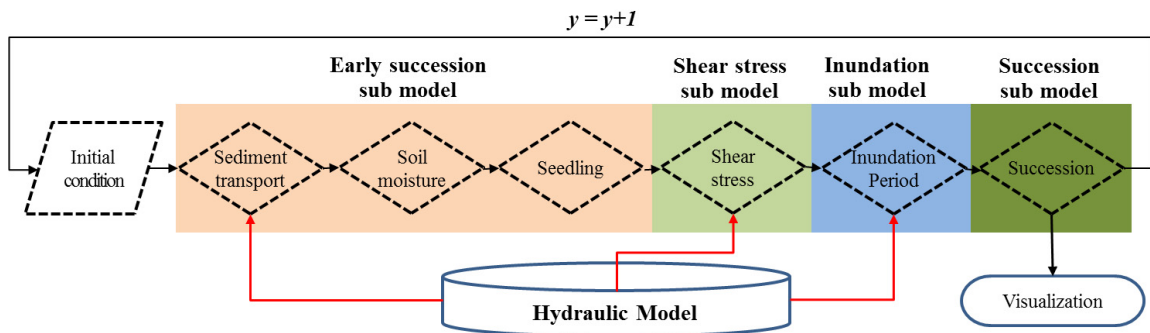
### 4. 필요한 연구 분야

앞서 설명한 대로 화이트트리버가 그린리버로 바뀌는 현상, 즉 하천의 식생 이입/활착 현상은 조도증가, 유사퇴적에 따른 통수단면 감소 등 통수능에 부정적인 영향을 미치는 반면, 생태적인 면에서는 다양한 생물서식처를 제공하여 종다양성에 기여하기도 한다. 반대 급부로 모래하천에 서식하던 생물들은 서식처 잃기도 한다. 무엇보다도 이러한 현상은 국내 일부 하천에 국한된 것이 아니라 전국적에 걸쳐 발생하고 있으며, 앞으로도 지속적으로 발생할 것이라는 점이다. 따라서 하천기술자들과 하천생태학자들은 1) 화이트트리버가 그린리버로 바뀌는 현상의 전국적인 현황조사, 2) 가설의 검증과 세분화를 통한 원인 별 유형 정립, 3) 식생 이입/퇴행/천이 현상의 모델링 기법 개발, 4) 변화에 따른 적응관리 등에 대해 연구가 필요하다. 각각의 연구대상에 대해 구체적인 연구 조사 및 개발 항목들은 다음과 같다.

- 현황조사: 하천의 식생 이입/활착 현상의 확산 정도를 조사한 성과는 Park et al. (2008)과 최근의 Woo et al. (2015)로서, 이 모두 일부 하천을 대상으로 항공사진을 이용한 성과이다. 원인 별 유형 등에 대한 구체적인 연구를 위해서는 전국 일정규모 하천 (국가 및 지방 하천) 모두에 대해 항공사진을 이용한 전수조사가 필요하다.
- 유형 정립: 앞서 제시한 패턴 1, 2, 3은 국내외 자료와 부분적인 현장조사 성과를 이용한 것으로서, 각 유형 별 상호관계 등이 제시되지 못하고 있다. 나아가 아직 가설 수준인 유형들을 다양한 연구를 통해 확인할 필요가 있다. 또한 가능한 새로운 유형 제시가 필요할 수 있다.
- 하천식생모델링: 지금까지 문헌에 가용한 모형은 식물생리에 기반을 둔 Mahoney와 Rood의 RBM과 물리적 교란에 기초하고 식생천이 현상을 경험적으로 모형화한 Egger의 FVM 등이다. 식생조건 (식생 종 및 생리특성 등), 기상조건 (강수 및 기온 조건 등), 흐름 및 유사조건, 지형조건 (표고 및 재료 특성 등)을 이용하여 총적하천의 식생 이입, 활착, 천이, 퇴행 등을 상당한 수준으로 모의할 수 있는 모형이 있어야 과학적인 하천식생 관리가 가능할 것이다. 특히 현재 4대강 대부분이 반 자연적으로 식생화되었으므로 지속

**Table 1.** Major components in the early and the later succession model (Woo et al. 2014)

Contents	Early succession model	Later succession model
Succession stage		
Environment factors	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydraulic condition: water surface elevation, inundation period, shear stress, etc.</li> <li>River bed condition: saturation, groundwater level, etc.</li> <li>Water quantity condition: water temperature, TN/TP, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hydraulic condition: water surface elevation, inundation period, shear stress, etc.</li> <li>River bed condition: saturation, groundwater level, etc.</li> <li>Water quantity condition: water temperature, turbidity, TN/TP, BOD, etc.</li> <li>Geologic condition: suspended load, bedload, erosion &amp; deposition, movement of sand bars, etc.</li> </ul>
Characteristics of hydraulic model	<ul style="list-style-type: none"> <li>High resolution to compute the early succession condition</li> <li>Capacity to simulate the low flow condition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacity to simulate the middle or the high flow condition</li> <li>Simulation of sediment transport &amp; bed elevation changes</li> </ul>



**Fig. 1.** Schematic flow diagram of the riparian vegetation modeling (Woo et al. 2014).

가능한 하천식생관리를 위해서는 이 같은 모의도구가 필요하다. Table 1은 하천식생의 천이를 모델링하는데 필요한 주요 인자와 흐름모형의 특성을 초기천이와 후기천이로 구분하여 정리하였다. 흐름모형 부분의 특징을 구체적으로 살펴보면 초기천이를 예측하기 위해서는 저류량 및 미소한 흐름변화 계산이 가능해야 한다. 현재까지 개발된 흐름모형은 주로 홍수위 계산에 초점을 맞추고 있으므로, 미소축척의 흐름계산이 가능한 모형을 개발할 필요가 있다. 또한 후기천이 단계에서는 식생의 성장에 따른 흐름저항 변화 및 침식퇴적 특성 변화 등을 반영할 수 있도록 개발되어야 할 것으로 보인다. Table 1에 제시된 제한인자와 흐름모형에 대한 개별적 연구와 함께 이들을 망라한 하천

식생모델링 도구에 대한 연구도 수행되어야 한다. Fig. 1은 최종적으로 구현되어야 될 하천식생모형의 중요 요소들을 흐름도의 형식으로 정리한 것이다.

- 적응관리: 낙동강 상류 화회마을 직하류에 형성된 구담습지는 상류에 안동댐, 임하댐의 건설로 만들어진, 즉 인위적 영향을 받아 형성된 습지이다(패턴1-2). 그럼에도 불구하고 지금은 환경부에서 보전습지로 지정되었을 정도로 귀중한 하천서식처가 되었다. 또한 한강 하류 일산지역에 있는 장항습지(환경부에서 보전습지로 지정되었음)도 사실상 1986년 신곡수중보 건설의 산물이다. 이 같이 하천의 식생이입 현상(그린리버)은 국토환경에 다양한 영향을 주고 있다. 아직 가설 수준이지만 특히 패턴 3의 경우 농촌 중소하천에서 전

국적으로 나타나고 있는 현상으로서, 2000년대 전까지 우리의 기억에 남아있었던 모래와 자갈 사이로 물이 흐르는 산지, 농촌의 중소하천의 이미지는 사라져가고 있다. 즉 국토경관 변화 차원에서 식생이입 현상을 적응관리 할 필요가 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 충적하천의 식생이입 현상, 즉 경관적으로 하천이 화이트리버에서 그린리버로 변하는 현상을 원인 별로 구분하고, 구분된 각각의 유형을 설명하고, 앞으로의 연구방향을 제시하였다. 하천식생의 이입이나 퇴행 현상은 세계적으로 1980년대 미국 Williams and Wolman (1984)의 선구적인 연구에서 국내의 경우 2000년대 중반 황강 댐 하류하천에 대해 처음으로 시작되었다. 많은 관련 연구성과에서 얻어진 결과로서 하천식생 이입과 퇴행의 필요/충분 조건은 기계적 교란(하상소류력, 토양습윤(지하수위, 지형, 하상재료 구성, 강수 등), 침수기간, 극단적 기후, 그리고 영양염류의 유입 등)이다.

본 연구에서 제시된 하천식생 이입과 퇴행의 원인 별 유형 중에서 아직 가설단계인 것은 패턴 1-1P: 강우양상 변화로 인한 비조절하천에서 봄철 홍수 저감과 패턴 3: 하천에 영양물질 유입증가(비점오염물질 형태로 유입하여 하천식생 성장 촉진)로서, 과학적으로 충분히 입증한다면 국내 비조절 중소하천의 가속적인 식생이입현상을 설명하는데 유용할 것이다. 하천식생 이입과 퇴행 현상을 과학적으로 더 규명하고 실제 이용 가능한 하천식생모형의 개발을 위해서는 화이트리버가 그린리버로 바뀌는 현상의 전국적인 현황조사, 가설의 검증과 세분화를 통한 원인 별 유형 정립, 동적 하천식생 모델링 기법 개발, 변화에 따른 적응 관리 등에 대해 추가연구가 필요하다.

## References

Benjankar, R. 2006. Quantification of Reservoir Operation-based Losses to Floodplain Physical Processes and Impact on Floodplain Vegetation at Kootenai River, USA. Doctor Dissertation, University of Idaho, Boise, Idaho, USA.

Choi, S.-U., Yoon, B. and Woo, H. 2005. Effects of dam-induced flow regime change on downstream river

morphology and vegetation cover in the Hwang River, Korea. *River Research and Applications* 21: 315-325.

Egger, G., Politi, E., Woo, S., Cho, K.-H., Park, M., Cho, H., Benjankar, R., Lee, N.-J. and Lee, H. 2012. Dynamic vegetation model as a tool for ecological impact assessments of dam operation. *Journal of Hydro-environment Research* 6: 151-161.

Mahoney, J.M. and Rood, S.B. 1998. Steamflow requirements for cottonwood seedling recruitment in integrative model. *Wetlands* 18: 634-645.

Park, B.J., Jang, C.L. Lee, S.H. and Jung, K.S. 2008. An investigation of changes in the area of riparian bars and vegetative area downstream of dam. *Journal of Korea Water Resources Association* 41: 1163-1172. (in Korean)

Williams, G.P. and Wolman, M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial channels. USGS Professional Paper 1286, Washington D.C., USA.

Woo, H. 2008. White river? Green river? *Magazine of Korea Water Resources Association* 41(12): 38-47. (in Korean)

Woo, H., Cho, K.-H., Park, M. and Cho, H. 2014. Research trends and pending issues in Korea on the computer simulations of riparian vegetation recruitment, *Proceedings of Annual Conference of Korea Society of Civil Engineering*, Daegu, Korea. (in Korean)

Woo, H., Kang, J., Cho, H.J., Choi, Y.S. and Park, M. 2015. A Preliminary verification of the influences of hydrologic regime change and nutrients influx on vegetation recruitment on riparian bars. *Journal of Ecology and Resilient Infrastructure* 2: 284-290. (in Korean).

Woo, H., Kang, J.G., Cho, H.J., Choi, Y.S. and Park, M. 2016. Possible causes for vegetation recruitment on riverine bars and an experiment on the effect of nutrients inflows on rapid growth of vegetation in Korea. *Proceedings of River Flow 2016*, Saint Louis, USA.

Woo, H., Park, M. and Kim, W. 2015. From white rivers to green rivers - why and how are they changed? *Proceedings of the 36th Biennial Congress of IAHR*, Hague, the Netherlands.

Woo, H., Park, M. and Cheong, S.J. 2009. A preliminary investigation on patterns of riparian vegetation establishment and typical cases in Korea. *Proceedings of Annual Conference of Korea Water Resources Association*, Yongpyeong, Korea. (in Korean)