

하천과정과 식생 - 연구동향과 시사점

Fluvial Processes and Vegetation - Research Trends and Implications

우효섭^{1*} · 조강현² · 장창래³ · 이찬주⁴

¹광주과학기술원 지구환경공학부 교수, ²인하대학교 자연과학대학 생명과학과 교수, ³한국교통대학교 공과대학 토목공학 전공 교수, ⁴한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

Hyoseop Woo^{1*}, Kang-Hyun Cho², Chang Lae Jang³ and Chan Joo Lee⁴

¹Professor, School of Earth Science and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju 61005, Korea

²Professor, Department of Biological Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Professor, Department of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Chungbuk 27469, Korea

⁴Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 5 June 2019, revised 19 June 2019, accepted 19 June 2019, published online 30 June 2019

ABSTRACT: We've reviewed existing studies on the interactions among vegetation, hydrology, and geomorphology in the stream corridors, adding one more factor of vegetation in the traditional area of hydro-geomorphology. Understanding of the interactions among those three factors is important not only academically but also practically since it is related intimately to the restoration of river corridor as well as management itself. Studies of this area started from field investigations in the latter part of the 20th century and focused on the flume experiments and then computer modelling in the 1990s and 2000s. Now, it has turned again to the field investigations of specific phenomena of the vegetative-hydrologic-geomorphologic interactions in detailed micro scales. Relevant studies in Korea, however, seem to be uncommon and far behind the international status quo in spite that practically important issues related directly to this topic have been emerged. In this study, we propose, based on the extensive literature review and authors' own knowledge and experiences, a conceptual diagram expressing the interactions among vegetation, flow (water), sediment, and geomorphology. Existing relevant studies in Korea since the 1990s are classified according to the categorization in the proposed diagrams and then briefly reviewed. Finally, considering the practical issues of riparian vegetation that have emerged recently in Korea, we propose areas of investigation needed in near future such as, among others, long-term and systematic field investigations and monitoring at multiple river corridors having different attributes on vegetative-hydrologic-geomorphologic interactions, including vegetative dynamics for succession.

KEYWORDS: Fluvial processes, Riparian vegetation, Vegetation recruitment, Vegetative-hydrologic-geomorphologic interactions, Hydro-geomorphology

요약: 본 연구는 전통적 수문지형학 범주에서 식생요소를 추가하여 식생-수문-지형 간의 상호작용을 연구한 국내외 성과를 정리, 분석한 것이다. 이 분야는 전통적 하천관리는 물론 하천복원과도 직접적으로 관련되어 있어 학술적으로나 실무적으로나 중요하다. 이 분야 연구는 20세기 중후 반부터 시작하여 현지조사-실내실험/수치모형의 단계를 거쳐 21세기 들어 다시 현장에서 정밀, 장기 조사 단계로 가고 있다. 그러나 이 분야 국내 관련연구는 매우 미흡하다. 본 연구는 국내외 관련 연구성과를 분석하고 저자들의

*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.

지식과 경험을 토대로 식생-수문-지형 간 상호작용을 설명하는 개념적 모형과 그에 따른 6개의 유형을 제안하였다. 국내 관련연구는 제안된 6개 유형에 따라 분류하고 검토하였다. 다음 국내에서 실제 나타나는 하천식생 관련이슈들을 고려하여 향후 시급히 필요한 연구로서 식생-수문-지형 간 상호작용의 이해를 위해 특성이 서로 다른 복수의 하천에서 이에 대한 장기적, 체계적, 집중적 조사연구(모니터링) 등 다수를 제안하였다.

핵심어: 하천과정, 수변식생, 식생이입, 식생-수문-지형상호작용, 수문지형학

1. 서론

충적하천기술 관련 고전적 저술 중 하나인 Sedimentation Engineering (Vanoni edited 1977)에서 ‘충적하천은 조각가인 동시에 조각품’이라 하였다. 충적하천의 흐름(물)은 하천형태를 만드는 조각가이면서 동시에 조각된 하천형태에 의해 흐름 자체도 변화한다는 의미이다. 이는 고전적 수문지형학(hydro-geomorphology)의 범주에서 이야기하는 것이다. 20세기 후반부터 흐름과 하천형태의 관계에서 추가적으로 식생이라는 제3의 요소를 고려한 삼각관계에 대해 연구가 시작되었다 (Gurnell 2014). 이른바 식생수문지형학(Vegetative Hydro-geomorphology) 이다.

수변(river corridor)에 자라는 식생은 하천지형 과정에 영향을 주고 동시에 반응한다. 여기서 수변은 하도, 하안 및 홍수터 모두를 망라하지만, 본 논문에서는 특히 하안 및 홍수터를 지칭한다. 구체적으로 지표 위 식생은 흐름과 유사이송에 영향을 주고, 지표 아래 뿌리는 저층의 수리, 기계적 성질에 영향을 주어 그에 따라 지표면의 습윤 및 침식성에 영향을 준다. 또한 하천을 구성하는 사립자의 크기와 혼합특성이 달라서 흐름에 주는 효과가 다르듯이, 식생도 초본류와 목본류 차이, 패치와 군락의 분포, 여름철과 겨울철 등 계절에 따라 그 효과가 달라진다. 이와 같은 식생-수문-지형 간의 상호작용으로 인한 하천변화는 기후라는 독립적 영향요인의 변화나 하천이 인위적인 충격을 받는 경우 더 커지게 되며, 이에 따른 하천의 보전과 관리에 부정적 영향을 줄 수 있다.

하천정비, 댐이나 보 건설, 골재채취, 영양물질 유입 등 하천에 미치는 인위적인 충격은 유향, 유사이송, 지형 등에 직접적인 영향을 주어서 모래, 자갈 등 ‘하안’ 재료로 구성된 하천이 ‘푸른’ 식생으로 덮인 하천으로 변할 수 있다. 이른바 화이트리버의 그린리버화 현상이다 (Woo 2008). 놀라운 것은 2010년대 국내하천은

특히 댐 건설 등으로 1980년대와 비교하여 화이트리버의 60%가 그린리버로 바뀌었다는 것이다 (Park et al. 2008). 이는 우리나라 국토환경의 중요한 축을 차지하는 하천의 상당부분이 전통적인 모래/자갈 하천에서 식생이 가득 하천으로 바뀌었다는 것이다. 위와 같은 화이트리버가 그린리버로 바뀌는 현상은 공학적, 생태적, 경관적으로 여러 변화를 야기할 수 있다. 구체적으로 치수측면에서 하천에 과다한 식생 이입 및 활착은 홍수터 통수능을 줄여서 홍수위험을 높이고, 수로의 안정성을 해치며, 나아가 홍수터 표고를 높일 수 있다. 환경측면에서 하천지형 및 흐름을 다양화하여 물리적 서식처 특성이 다양해지고, 나아가 종 다양성을 높일 수 있다. 영산강 상류 담양습지, 한강 하류 장항습지 등 인위적인 유향 및 유사이송 변화로 하류에 습지가 형성되어 국가적으로 보호구역으로 지정하는 것들이 대표적인 예라 할 수 있다. 경관 측면에서 넓은 모래밭과 자갈밭을 특징으로 하는 우리 하천의 고유한 경관특성은 ‘영원히’ 변모하게 된다.

또 다른 실질적 문제로서 현재 전국의 주요하천은 이른바 ‘4대강 살리기 사업’으로 하천부지(과거 홍수터 일부)가 대부분 ‘초지화’ 되었으나 위와 같은 식생-수문-지형 간 상호작용으로 앞으로 어떻게 변화할 것인지 예측하기 어렵다. 더욱이 이를 이른바 ‘재자연화’ 하는 경우 수변식생 변화의 과학적인 예측은 필수적이다.

마지막으로 하천습지의 관리 측면에서 식생 수문지형학적 관점의 접근이 매우 중요하다. 국내에서 정부가 지정한 내륙습지 중 일부는 하천습지로서, 이중 영산강 담양습지, 섬진강 잠실습지, 한강하구의 장항습지 등은 댐, 보 등 하천개발사업 후 새롭게 생성된 사실상 인위적으로 유인된 습지이다. 정부가 습지로 지정하지 않았지만 낙동강 상류 구담습지도 마찬가지이다. 이러한 습지의 보전을 위해서는 가장 기본적인 것이 습지의 생성 원인 및 과정, 향후 변화방향에 관한 지식이며, 이는 하천의 식생-수문-지형의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 한다.

본 연구에서는 비교적 새롭게 등장한 식생수문지형학 관점에서 국내외 연구동향을 검토한다. 그 결과를 토대로 이 분야에서 시급하게 필요한 연구 분야와 방향을 제시한다. 본 연구는 어느 한 분야에서 새로운 연구 성과를 도출하기 보다는 국내외 관련연구를 검토하고 그 시사점을 도출하는 것이 목적이다.

본 연구에서 국제문헌은 그 수와 내용, 범위 등이 방대하여 효율적인 검토를 위해 식생-수문-지형 간 상호작용, 또는 식생수문지형학에 대한 그 동안의 연구성과를 분석, 요약한 이른바 ‘state-of-the-art review’ 성격의 논문들을 중심으로 검토하였다. 다만 국내 관련문헌은 수십 편 수준이라 판단하여 대부분 검토하려고 노력하였다. 본 연구의 의의는 국내외 관련 연구자료, 특히 국내 연구자료의 집대성, 논리적 유형화를 통한 기존연구성과의 분류 및 분석, 하천 보전 및 관리 차원에서 시사점, 그리고 바람직한 연구방향 등을 제시하였다는 점에서 찾을 수 있을 것이다.

2. 국내외 연구동향

2.1 국제연구동향

하천의 흐름과 형태의 상호작용에 관한 자연과학분야인 하천의 수문지형학은 사실상 1950년대 미국의 Lane (1957)과 Leopold와 Wolman (1957) 등의 연구로 정립되었다. 여기에 식생이라는 제3의 요인이 처음 고려된 연구는 놀랍게도 같은 시기의 Mackin (1956)의 연구이다. 그는 미국 아이다호 주의 Wood River에서 다지하천과 사행하천의 변화는 목본류와 초본류라는 홍수터식생의 유형변화에 직접 연관되어 있음을 관찰하였다. 그 후 Williams (1978)은 네브라스카 주 Platte River에서 모래하천에 댐이 건설되어 홍수가 조절되면 하류하천의 하폭이 대폭 줄어들고 식생이입 기회가 대폭 커지는 현상을 최초로 문헌에 보고하였다. 이러한 연구는 Williams과 Wolman (1984)이 미국 전역을 대상으로 확대하였다. 동시에 그들은 댐에 의한 상류에서 토사공급의 저감과 지하수위의 감소는 홍수터 기존 식생성장에도 부정적인 영향을 주는 것을 확인하였다. 이후 생물지형학 (bio-geomorphology)라는 용어가 처음 등장하였지만 (Viles 1988), 이 용어는 하천 외에 다양한 지형 현상에도 적용되므로 그 후 하천지형 분야에서 보편적으로 사용되지 않았다.

위와 같은 연구 이후 식생수문지형학 관련 연구는 비교적 활발하게 진행되었으며, 1990년대까지는 주로 현장조사 위주였으나 2000년대 들어와 현장과 실험실은 물론, 물리 및 수치 모형 연구로 발전하였다 (Gurnell 2014). 본 연구에서는 위와 같은 많은 관련연구를 하나하나 검토하여 분석, 제시하기 보다는 관련연구의 진행과정과 상황을 정리, 분석, 소개하는 검토 논문들을 중심으로 제시한다.

Osterkamp와 Hupp (2010)는 ‘하천과정과 식생-과거와 현재의 리뷰 및 미래의 예견’이라는 논문에서 저지대 식생 (bottomland vegetation)은 하천지형 과정에 의해 조절되면서 동시에 지형과정을 조절하는 효과가 있음을 강조하였다. 여기서 저지대 (bottomland)는 주수로 바깥의 평상시 고수위보다 1 m 안팎 높은, 수문영향을 자주 받는 평탄지역으로서, 육상식생의 영향을 받는 상대적으로 높은 홍수터 구역은 제외된다. 그들의 연구는 하천식생과 저지대 지형 및 과정 간 상호작용에 관한 200개 정도의 기존문헌을 조사, 분석한 연구이다. 그들은 결론적으로 수변식생 현상과 하천지형 간 관계는 서로 밀접히 연결되어 있으며, 물은 흐름이든 지하수이든 수변식생의 분포특성에 가장 중요한 영향요인을 강조하였다. 동시에 수변식생은 하천에서 침식과 퇴적에 큰 영향을 주고 하천안정에 중요한 역할을 한다는 점을 강조하였다. 위와 같은 수문(물, 흐름), 지형, 식생 간의 상호작용에서 수문현상이 하천의 지형 및 과정은 물론 식생형태에 중요한 영향을 주며, 동시에 유일한 독립변수임을 강조하였다. 여기서 수문현상은 지표수 흐름 및 유사이송과 지하수(흐름)를 망라한다.

Gurnell (2014)은 ‘하천시스템 기술자로서 식생’이라는 제목으로 과거 반세기 정도의 식생 수문지형학 분야의 연구성과를 집약하였다. Gurnell은 이 분야 연구를 1) 층적하천 거동의 조절자로서 식생, 2) 수변에서 식생에 대한 물리·환경적 조절, 3) 다양한 하천여건에서 식생이 관여하는 지형변화, 4) 하천형태와 동역학에 미치는 식생의 영향 등으로 나누어 300개 가까운 기존 관련 연구성과를 분석하여 소개하였다. 이 연구에서 식생수문지형 연구는 1990년대 야외관찰부터 시작하여 수로실험, 모델링 노력 등의 단계를 거쳐 2010년 이후 다시 현장관찰이 강조되었음을 확인하였다. 결론적으로 이 연구는 한 하천에서 수생 및 하안 식생은 그 하천의 환경, 특히 기후특성과 수문 및 하천 관련 제한조건

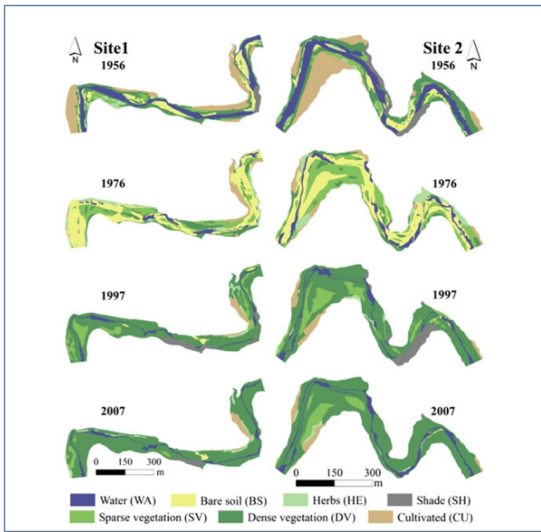


Fig. 1. Land cover maps for the pre-regulation (1955) and post-regulation periods (1976, 1997, and 2007) at two study reaches in Spain (Adopted from Fig. 3 in Garófano-Gómez V. et al. 2012).

을 반영한 결과이며, 식생은 수중이건 육상이건 하천유사를 포착하고 안정하게 하여 새로운 초기지형을 만들어 주며, 이렇게 형성된 초기지형과 식생은 다시 다른 식생종의 이입과 성장을 촉진하는 과정을 거쳐 식생은 하천지형을 변화시킨다고 하였다. Fig. 1은 Gurnell의 논문에서 소개한 사례로서, 스페인의 조절하천에서 식생이입과 그에 따른 하도변화를 보여준다.

비교적 최근에 Solari 등 (2016)은 ‘하천식생과 수문지형 간 상호작용의 모형의 발전’이라는 논문에서 그동안 하천식생과 수문지형 간 관계의 모형화에 관련된 100개 정도의 문헌을 검토, 분석하였다. 그 결과 이 분야 연구는 수리-지형 과정 (마찰, 유사이송, 강턱침식 등)과 생태과정 (씨앗 분산, 식생 생존, 성장, 천이, 사멸 등)으로 크게 둘로 나눌 수 있으며, 식생-지형-지하수 연계모형이 추가될 수 있다고 하였다. 여기서 ‘강턱’은 강가의 둔덕 (bank)을 지칭한다. 구체적으로 그들은 Fig. 2와 같이

- 식생→수문지형: 흐름저항, 유사이송, 강턱역학 (이 경우 식생은 비생물적 성격 임)
- 수문지형→식생: 씨앗분산, 이입, 성장, 천이, 사멸
- 식생↔수문지형 (상호작용): 식생형태와 하천평면형의 동역학
- 식생과 지하수의 상호작용: 지하수 흐름, 식생 성장과 상호작용, 생지화학과정

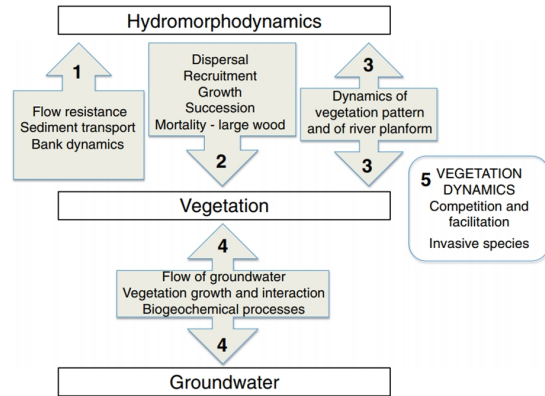


Fig. 2. Interactions among flow, sediment, morphology, and vegetation (Groundwater is auxiliary added) (Adopted from Solari et al's Fig. 2, 2016).

- 식생 동역학: 식생 간 경쟁 및 공생, 외래종 등으로 유형화하였다. 그들은 결론적으로 그동안 많은 연구가 진행되었지만 앞으로 더 연구가 필요한 분야로서, 식생과 난류구조 간 상호작용 및 그에 따른 유사이송, 강턱과 식생 간 상호작용 (퇴적/침식), (끌려 내려온) 유목 (LWD)과 지형 간 과정, 지형과정과 직접적인 상호작용에서 식생변화의 고려, 수변식생군에 미치는 수문지형 효과의 고려, 집약된 유역규모의 수문지형모형에서 공생과정과 연계, 지하수동역학과 생태수문모형과의 연계 등을 제시하였다.

2.2 국내연구동향

국내에서 총적하천의 식생, 흐름, 지형 간 관계를 처음으로 조사한 사례는 낙동강 지류 황강의 합천댐 하류 구간 (Woo et al. 2002)으로서, 그들은 댐 하류하천의 사주 상 식생이입과 식생하중도의 침식현상을 현장 관찰하여 댐에 의한 여름철 홍수 소멸 (합천댐의 경우 1989년 준공 이후 사실상 조절방류를 하지 않았음)에 의한 결과로 보았다. 이른바 화이트리버와 그린리버 현상이다. Fig. 3은 황강에서 고립된 식생사주와 침식에 의해 소멸하는 현상을 보여준다.

국내에서 식생-수문-지형 간 상호작용에 관한 문헌조사 연구는 2000년대 후반에 처음 이루어졌다 (Woo 2009). 이 연구에서는 주로 외국의 관련문헌 약 50개를 조사하여 1980년대부터 시작된 하천식생이입 관련 연구를 1) 현지조사 및 시험 연구, 2) 기초 실험 및 분석 연구, 3) 홍수터 식생모형 연구, 4) 홍수터 및 사주 복원 연구



Fig. 3. An isolated small island with vegetation and an erosion of vegetative island in Hwang-gang River (Adopted from Woo et al's Fig. 3, 2002).

구 등으로 나누어 정리하였다. 여기서 식생이입 관련 현 지조사 연구는 다시 1) 조절하천, 2) 비조절하천, 3) 수목 성장과 지하수위(토양습윤), 4) 씨앗의 분산(hydrochory) 등으로 세분화하였다. 이 연구의 결론 성격으로 식생이입의 기본조건으로 하상소류력, 토양습윤, 침수기간(및 시기), 이상기후, 영양염류 유입 등을 꼽았다.

한편 Woo와 Park (2016)은 위와 같은 연구성과 고찰을 바탕으로 국내 관련자료, 특히 경년 별 항공사진자료의 비교분석과 제한된 범위의 현장조사 등을 통해 사주상 하천식생이입의 원인 별 유형을 보완, 제시하였다.

- **유형 1:** 유량과 유사량 흐름의 변화
 - 유형 1-1N:** 상류 댐에 의한 봄철 홍수억제로 하류 홍수터에 신선한 토사 및 습윤 공급이 중단되어 홍수터에 식생 발아 및 성장 억제 (미국 중서부, 태평양 연안 북서부 등)
 - 유형 1-1P:** 강우양상 변화로 인한 비조절하천에서 늦봄-초여름 작은 홍수 저감으로 발아된 유식물 활착기회 향상 (국내, 일본 등 몬순기후 지역) (가설)
- **유형 1-2 (조절):** 몬순기후 지역에서 상류 댐에 의한 여름철 홍수저감으로 하류하천 사주에 식생활착기회 대폭 향상
- **유형 2:** 하도의 인위적 교란 (골재채취, 하천정비, 보건설, 경작지 홍수터 편입 등)으로 하천 내 식생이입 촉진
- **유형 3:** (중소)하천에 영양물질 유입증가 (비점오염물질 형태로 유입) 하천식생 성장 촉진 (가설)

3. 식생-수문-지형 간 상호작용의 개념화

3.1 하천의 식생수문지형 인자 간 상호관계

위와 같은 다양한 연구 중에 식생-수문-지형 간 상호작용 또는 하천에서 식생수문지형 과정의 지배적인 인

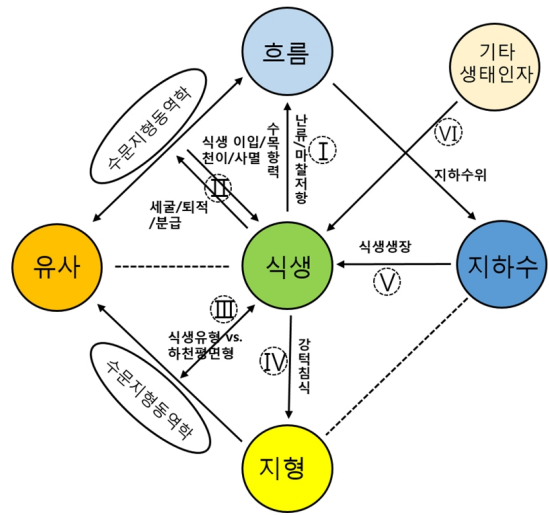


Fig. 4. Conceptual diagram of interactions among flow (water), sediment, geomorphology, and groundwater.

자들을 중심으로 상호 인과관계를 도식적으로 표시하면 다음 Fig. 4와 같다. 이 개념도는 기존의 전통적 하천수리학과 생태 하천수리학 간의 관계를 묘사한 그림 (Woo et al.'s Fig. 13.1, 2015a; Woo and Choi 2013, Fig. 17.1)에서 수공구조물 (structures)과 동물 (fauna)을 제외하고, Solari 등의 모식도 (Fig. 2)에서 수문지형인자를 나누어 구분하여 해당하는 일방향 영향이나 쌍방향 영향을 그린 것이다. Fig. 4에서 수문지형동역학 (hydro-morphodynamics)은 흐름-유사-지형 간 동적 과정을 의미하는 것으로서, 이 그림에서 흐름, 유사, 지형이라는 세 인자를 각각 구분하여 그렸기 때문에 각 인자를 아우르도록 표기한 것이다. Fig. 4에서 각각의 영향이나 상호작용을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

- **유형 I. 식생이 흐름에 주는 효과:** 이 경우 식생은 비생물로 간주되며, 식생유형별 (초본류, 목본류) 수심과 상대크기, 투영면적, 강성 등에 따라 마찰저항, 항력, 난류특성 등이 달라진다.
 - I-1: 식생 마찰저항 (매닝의 조도계수 같이 개별식생이 아닌 식생군으로 거시적 접근)
 - I-2: 수목항력 (개별식생의 흐름저항 특성을 동역학적으로 묘사)
 - I-3: 식생과 난류 (식생에 의한 난류 변화)
- **유형 II. 식생과 유사흐름 (sediment-laden flow) 간 상호작용:** 유사흐름은 씨앗을 분산시키고, 식생의

이입, 성장, 천이, 사멸에 영향을 준다. 반대로, 식생은 난류에 영향을 주어 유사이송에 교란을 주고, 이는 세굴 및 유사의 퇴적/분급을 촉진한다.

II-1: 유사흐름은 씨앗의 분산, 세굴, 매물 등을 통해 식생이입에 직접적인 영향을 줌

II-2: 식생은 난류교란을 통해 흐름과 유사이송에 영향을 줌

- **유형 III. 식생과 유사지형 간 상호작용:** 식생(군락)은 하천지형의 평면형을 변화시키고(단일, 사행, 망상 하천), 동시에 지형은 수변에 서식하는 식생(군락)의 유형을 변화시킨다.

- **유형 IV. 식생이 지형에 주는 효과:** 이 경우도 비생물적 영향이며, 식생뿌리는 강터(하안)을 보호하여 하천지형을 안정하게 한다.

- **유형 V. 지하수가 식생생장에 주는 효과:** 지하수위는 바로 토양습윤에 영향을 주고 그에 따라 식생생장 및 사멸에 영향을 준다.

- **유형 VI. 생태적 효과:** 식물종 간 관계나 식물과 영양물질 간 관계 같은 생태학적 상호작용을 의미하는 것으로서, 본 연구의 본질에서 벗어나지만 식생-수문-지형 상호작용에 영향을 줄 수 있으므로 이 그림에서 외곽에 표시하였다.

마지막으로 Fig. 4에서 충적하천에서 하도흐름은 하천수위를 결정하며, 그에 따라 지하수위에 직접 영향을 준다.

여기서 유형 II와 III은 기본적으로 식생-수문-지형 간 상호작용을 대상으로 한 것으로서 사실상 본 연구의 하이라이트이다. 또한 엄밀한 의미에서 흐름(물)과 유사, 지형 세 인자 중 어느 두 인자만 상호작용을 하는 경우를 상정할 수 없기 때문에 식생-수문-지형 간 상호작용을 유형 II(식생-물-유사 간 상호작용)와 III(식생-유사-지형 간 상호작용)으로 구분하는 것은 자의적으로 보일 수 있다. 그럼에도 불구하고 여기서는 다양한 인자 간 상호작용을 지배적으로 관련된 인자들끼리 집합화 하여 분석, 개념화하는 접근방식 이해하기 쉽기 때문에 두 유형을 구분하여 표시하였다.

3.2 국내 관련 연구성과의 분류

위와 같은 다섯 인자 간 상호작용의 모식도를 기준으로 국내에서 관련 연구가 처음 시작된 1990년대 이후 국내 등재학술지에 게재된 연구성과를 중심으로 분류하면 다음과 같다.

- 유형 I-1. 식생에 의한 마찰저항의 변화

이 분야 연구는 하천에서 홍수위계산 등 실무적으로 중요하다. 국내 대표적인 연구 중 하나는 실험수로에서 초본류를 실제 키워서 실험한 것으로서, Lee et al. (2012a)의 연구를 들 수 있다. 그들은 달뿌리풀, 물억새, 갈대 등의 식생을 가지고 완전 침수 및 부분 침수 조건으로 나누어 각 식생에 대해 VR(평균유속과 수리반경의 곱) 대 n(매닝조도계수) 관계를 도출하였다. 이 연구의 중요한 결과 중 하나는 식생 별로 강성영향이 다르고 또한 같은 식생이라도 계절별로 다르기 때문에 이를 구분하여 조도계수 n을 추정하여야 한다는 점이다. 다음 Lee et al. (2012b)은 700개 이상의 현장 실측자료를 이용하여 초본, 관목, 교목 등 각 식생 별로 Darcy-Weisbach의 조도계수를 추정하는 경험식을 제시하였다.

- 유형 I-2 수목항력

이 분야 연구로 Lee와 Yu (1997)와 Im et al. (2011)이 수행한 현장실측 연구가 있다. 그들은 하천에 자생하는 교목(주로 버드나무류)를 대상으로 굴삭기를 이용한 실제 인발시험을 통해 교목의 수종, 수령 별 전도모멘트를 측정하였다. 이 연구는 하천에서 식생에 의한 흐름저항을 수목 별로 산정할 수 있는 자료를 제공한 것이다. 식생의 흐름저항 효과를 개별 수목 별로 계산하는 것은 특히 수심평균 2차원 하천모형을 이용하기 위해 필요하다. Kim et al. (2010)은 개별 식생의 형상을 단순화하여 항력을 유도하고 이를 2차원흐름모형에 반영하여 계산한 결과 실제 단단면, 복단면 수로실험에서 얻은 결과와 비교적 일치하는 것을 확인하였다. Kim et al. (2011)은 기존의 2차원 하천수치모형에서 식생에 의한 항력을 직접 계산하여 반영한 결과와 수리모형실험에서 얻어진 결과를 비교하여 개별 식생의 항력을 반영하는 방법론의 유용성을 확인하였다.

I-3. 식생과 난류(식생에 의한 난류 변화)

식생흐름에서 난류모의는 주로 평균유속과 난류구

조의 연직분포, 특히 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식의 해에 초점이 맞추어졌다 (Woo and Choi 2013). 국내에서 이 분야 연구로 Choi and Kang (2004)은 식생흐름의 난류의 연직분포를, Kang and Choi (2006)는 나아가 복단면 수로 횡단면에서 평균유속과 2차류의 분포 등을 모의하였다. 그러나 아직 이 분야 연구는 식생, 난류, 유사의 상호작용에 따른 홍수터나 사주 상 퇴적과 세굴 특성을 모의하는 데까지 나아가지 못하고 있다.

유형 II. 식생과 유사흐름 간 상호작용

이 유형은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 수문흐름이 식생의 이입, 천이, 사멸 등을 가속화하거나 그 반대로 식생의 존재 자체가 유사의 세굴, 퇴적, 분급 현상 등을 가속화하는 것을 말한다. 이러한 상호작용에 대한 현지 조사를 통한 대표적인 연구로 Lee et al. (2019a)의 연구를 들 수 있다. 그들은 내성천 영주댐 하류부터 낙동강 합류점까지 57 km 구간에 대해서 2012년부터 2018년에 걸쳐 기초 수문자료는 물론 하천지형 및 식생분포 자료를 수집하였다. 여기서 영주댐은 모니터링 기간 중인 2016년에 완공되었으나 그 동안 담수를 하지 않고 바로 하류로 방류하여 사실상 자연유황 상태를 유지한 것으로 볼 수 있다. 이러한 장기 모니터링을 통해 얻은 결론은 1) 내성천의 식생이입은 1987년부터 부분적으로 시작되었으며, 2013년 이전에는 하류구간에서, 그 이후부터는 상류구간으로 확대되었으며, 2) 상당수의 구간에서 초본류에서 목본류로 천이가 진행되었고 그에 따라 하천지형이 변화되었으며, 3) 하상재리는 조립화 되었으며 하상은 대체로 저하되었으며, 이는 식생이입의 영향으로 홍수터 (사주)식생의 흐름저항이 커지면서 하도에 흐름이 집중된 결과로 보인다 등이다.

II-1: 유사흐름과 식생이입

이 분야 연구는 국내에서 상대적으로 많이 수행되었다. 앞서 소개한 합천댐 하류 황강 사례는 그 후 Choi et al. (2004, 2005)에 의해 댐 건설로 인한 홍수량 및 소류력 감소와 그에 따른 식생이입 가속화 현상으로 보고하였다. 이어 Park et al. (2008)은 이러한 식생이입 현상을 전국을 대상으로 항공사진 자료 등을 이용하여 정량적으로 조사하였다. 그 결과 사주면적은 댐 건설 전에 하천 전체면적의 38%에서 후에 17%로 50% 정도 감소

하였으며, 이와 반대로 식생면적은 전에 11%에서 후에 24%로 두 배 이상 증가한 것으로 나타났다. 이에 대한 원인은 구체적으로 제시하지 않았으나, 전술한 합천댐 경우와 같이 댐에 의한 여름철 홍수 저감 및 그에 따른 하류하천 사주상 소류력 감소와 식생이입 가속현상으로 추정된다.

한편 2010년 전후로 하천에서 식생의 이입, 성장, 천이, 소멸 등에 관한 국제공동연구로 수행된 동적 수변 식생모형 연구에서 Egger et al. (2012)은 전술한 소류력 감소요인 이외에 경협척에 의한 식생천이 모의 모듈도 추가하여 같은 낙동강 상류 안동댐과 임하댐 하류 구간을 대상으로 모의하여 모형과 방법론의 적용성을 검증하였다. Woo et al. (2013)은 같은 구간에 2차원 흐름 모형을 적용하여 댐건설 전후로 나누어 하회마을 구간 등에서 가속화된 식생이입 현상을 댐에 의한 유황변화 및 그에 따른 소류력 감소, 그리고 사주의 지하수위 변화 등을 고려하여 모의하였다. 위 두 연구사례에서 이용된 수변식생모형은 Benjankar et al. (2011)이 개발한 식생 발아기와 유식물기에 흐름에 의한 사주표면의 세굴이나 매몰 등 사립자 이동조건을 기준으로 하는 한계소류력 모형에 기초한 것이다.

위와 같은 인위적 유황변화가 있는 조절하천이 아닌 비조절하천에서 어느 기간에 걸쳐 홍수량 감소로 급속히 식생이 이입되는 사례도 연구되었다. 이는 앞서 소개한 식생이입 현상의 원인 별 유형에서 유형 1-1P에 해당하는 것으로서, Jin and Cho (2019)는 청미천을 대상으로 2006년부터 2016년에 이르기까지 여름철 홍수량의 감소현상을 확인하였다. 특히 2013년에는 연최대 홍수량이 $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하로 대폭 감소한 결과 대부분의 하천구간에서 달뿌리풀이 이입된 것으로 나타났다. 그들은 결론적으로 청미천에서 식생분포는 홍수량 및 침수빈도와 밀접하게 연관되어 있다고 보고하였다. 한편 Lee et al. (2019b)은 인위적인 유황변화가 없는 낙동강 상류 내성천에서 연 최대 홍수량의 급격한 감소에 따른 식생이입현상을 현지와 항공사진 등을 조사하고, 2차원 하천모형을 적용하여 소류력 분포를 계산하여 실제 식생이입 현상과 비교하였다. 이 연구는 유황이 조절되지 않은 자연상태 하천에서 계절별, 특히 식생의 발아/유년기인 늦봄-초여름에 홍수로 인한 사주교란이 줄어들게 되면 식생이입이 가속화된다는 가정을 부분적으로 확인한 것이다.

골재채취로 인한 하천교란과 그에 따른 가속적인 식생이입 현상에 대한 연구로는 Kong et al. (2016) 연구를 들 수 있다. 그들은 금강 상류와 보청천 등에서 대규모 골재채취 후 버드나무 등 식생이 이입한 현상을 조사하였다. 다만 식생이입 현상에 대한 구체적인 설명은 없었으므로 일반적으로 추론하면 골재채취는 결국 사주표고를 낮추어 지하수위에 근접하거나 그 아래로 내려가게 되어 다른 환경 여건 변화가 없는 경우 식생이입에 좋은 조건을 제공했을 것으로 보인다 (Woo et al 2015a, p. 627).

유형 II-2. 식생에 의한 유사의 세굴, 퇴적 및 분급

이 분야에서 비교적 이른 기초적 실험연구로서 Lee (2002)는 실험수로에서 식물군락에 의한 유사거동 양상을 관측하였다. 구체적인 실험적 연구로서 Jang (2016)은 식생에 의한 하도변화와 하상토 분급특성을 파악하였다. 실험결과 예측한 대로 식생밀도가 증가함에 따라 유사량은 감소하였으며, 하상고는 불규칙하게 변하고 하상토 표층에서 유사입경은 작아진 것으로 나타났다. 나아가 식생대에서 유사가 포착되거나, 식생대와 주흐름 사이에 경계층 흐름이 발생하여 유사가 퇴적되며, 식생대에서 흐름의 방향이 변화되어 표층에서 하상토 입도는 불규칙하게 분포하는 것을 확인하였다.

유형 III. 식생과 유사지형 간 상호작용

이 유형의 상호작용은 식생(군락)의 유형은 단일하천과 망상하천 간 변화 등 하천의 평면형을 변화시키고, 동시에 지형은 식생유형을 변화시키는 것이다.

이 분야 국내연구로는 장창래의 수리모형 연구가 탁월하다. Jang (2013)은 실내실험을 통해 식생하도의 지형변동 특성을 분석하였다. 그는 실험실 수로에 인공식생이 아닌 실제 살아있는 알팔파를 홍수터(모형)에 식재하여 하도의 세굴 및 저수로 강터의 고착화 현상을 확인하였다. 그에 따라 하도의 망상화(다지화) 정도는 감소하였지만 하도 자체의 교란현상은 증가한 것으로 나타났다. 이 결과는 유사이송량이 실제 하천의 유사이송 능력보다 큰 경우 일반적으로 다지하천이 발달하지만 홍수터에 식생이 이입, 활착한 경우 다지하천은 다시 단일유로 하천으로 변하는 실제현상과 일치한다. Kim et al. (2014a)은 식생이 있는 하천에서 2차원 수치모의를 통해 식생과 하천지형 간의 상호작용을 연구하였다.

그 결과 교호사주가 발달하는 조건에서 식생 이입 및 활착은 사주의 이동을 감소시키며, 망상하도가 발달하는 조건에서 식생은 지형변화에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전술한 Jang (2013)의 연구 결과와 유사한 것이다.

유형 IV. 식생이 지형에 주는 효과

이 유형의 대표적인 현상은 이른바 강턱침식이다. 그러나 이에 관한 연구는 국내문헌에서 보이지 않는다.

유형 V. 지하수가 식생생장에 미치는 효과

이 유형의 연구는 Woo et al. (2011) 연구에서 찾을 수 있다. 그들은 비 조절하천에서 식생활착에 영향을 미치는 인자 중에서 수위, 수온, 강우, 토양수분, 토양입경 등의 상호연관성을 파악하고자 경북 내성천의 하류를 시험하천구간으로 선정하고, 289일간 모니터링 및 조사 분석을 실시하였다. 그 결과 내성천 시험하천구간은 지하수위가 하천수위보다 20~30 cm 가량 높게 나타나는 이득하천이며, 지하수 수온은 일별, 계절별 차이가 5°C 미만이었으며, 하천수온은 식생활착이 본격적으로 시작되는 5월부터 10°C 이하로 떨어지지 않았다. 토양수분의 영향인자는 하층은 지하수위, 상층은 강우이며, 상하층은 모두 토양입경에 영향을 받는 것으로 나타났다. 토양수분측정지점 6곳에서 지하 1 m까지의 층적도는 D_{50} 이 0.07~1.4 mm의 모래이며, 이 입경 범위에서 가능한 모세관 높이는 약 14~43 cm 범위로 추정되었다. 따라서 이 구간에서 토양습윤은 식생 이입 및 활착에 제한조건이 되지 않는 것으로 나타났으며, 그 당시 식생이입이 상당히 진행된 것은 Fig. 4의 유형 II-1 현상으로 추정된다. 우리나라 모래하천에서 식생이입의 필요조건으로서 토양습윤, 또는 지하수위의 중요성은 Kim et al. (2014c)의 연구에서 잘 나타난다. 그들은 낙동강 상류구간을 대상으로 하안식생의 분포와 환경특성 연구를 현지조사 중심으로 수행한 결과, 하천의 평수위 기준 상대표고, 유기물함량, 모래질 함량 중에서 상대표고가 가장 큰 영향을 주는 것을 확인하였다.

유형 VI. 생태학적 효과

이 유형의 연구로서 Woo et al. (2015b)은 근래 들어 도시나 농촌의 중소하천에 식생이입 및 성장이 급속도로 활발하게 진행되는 현상을 설명하기 위해 질소, 인

같은 비점오염물질의 하천유입과 식생생장을 실험하였다. 그들은 이러한 가설을 검증하기 위해 한 쌍의 실험수로에 갈대를 심고 여름 동안 갈대성장을 관찰한 결과 질소화합물이 3.5 mg/L 정도 함유된 오염수를 주기적으로 흘린 수로의 경우에서 그렇지 않은 경우보다 약 30% 이상 갈대성장이 큰 것을 확인하였다. 그 밖에 이 유형의 연구는 일일이 다 확인하기 어렵고, 그중 몇 개 예를 들면, 수변식생의 종 및 분포 특성과 고도 (Kim et al. 2014b), 수변식생과 매토종자 간 관계 (Cho et al. 2018), 현지조사 중심으로 식생과 생지화학 인자간 관계 연구 (Lee et al. 2002) 등이다.

4. 연구동향에서 본 시사점

앞서 소개한 식생수문지형학 분야에서 국제적 연구 동향을 검토한 Osterkamp, Gurnell, Solari 등 세 논문은 각각 다음과 같은 제언적 결론을 제시하였다. 먼저 Osterkamp 등은 유사이송을 포함한 지표수와 지하수 흐름, 즉 수문현상은 하천의 지형 및 과정은 물론 식생 양상에 가장 중요한 역할을 하며, 동시에 유일한 독립 변수로서 작용함을 강조하였다. 이는 하천과정과 식생 간의 동적 상호작용에서 수문요소의 지배성을 강조한 것이다. 그들이 제시한 미래의 연구분야는 다양한 시공간 규모에서 토양-지형 과정과 식물생태적 관계, 지표면에서 침투와 식물 간의 관계, 외래종의 이입 및 확장 과정 및 대책, 기후변화로 인한 강수 및 기온 변화와 그에 따른 식생 및 하천과정 관계 변화 등이다.

다음 Gurnell 등은 식생수문지형학 연구는 처음에 현장조사로 시작하여 실험-모델링 등을 통해 현장의 현상을 재현하고, 최근 들어 다시 현장에서 정밀한 조사를 통해 상호 보완하는 과정을 밟고 있음을 강조하였다. 그들은 한 하천에서 수생, 하안 식생은 결과적으로 그 하천의 기후특성과 수문관련 제한조건을 반영한 것이라 하였다. 향후 더 많은 연구가 필요한 분야로서 지금까지 초점을 맞춘 습윤지역을 벗어나 건조지역의 식생-수문-지형 연구를 들었으며, 나아가 시공간적으로 서로 다른 규모에서 식생, 수문(흐름), 지형 인자들 간 연결성과 특히 소규모 식생-패치-지형 상호작용에 대한 연구를 들었다.

마지막으로 Solari 등은 앞으로 연구가 더 필요한 분야로서 식생과 난류구조 간 상호작용 및 그에 따른 유사

이송, 강덕과 식생 간 상호작용(퇴적/침식), (쓸러 내려온) 유목과 미지형 간 관계, 지형과정과 직접적인 상호작용에서 식생변화의 고려, 수변식생군에 미치는 수문 지형 효과의 고려, 집약된 유역규모의 수문지형모형에서 공생과정과 연계, 지하수동역학과 생태수문모형과의 연계 등을 들었다.

본 연구에서 국내 관련연구를 분석한 결과 무엇보다도 국내의 식생-수문-지형 간 상호작용에 관한 연구는 외국과 비교할 때 연구의 범위, 양, 내용 등에 비해 상대적으로 적음을 알 수 있다. 그러나 조절하천의 급속한 증가, 다양한 인위적 영향의 확대, 정부 대형하천사업의 표류 등 국내 하천 여건으로 인해 하천변화와 그에 따른 하천식생환경이 가속적으로 변하고 있음을 감안하면 안타까운 실정이다.

또한 국내에서 하천습지를 지정하고 보전하려는 노력이 진행되고 있으나, 그러한 습지들의 생성 원인, 과정, 추후 진행방향 등 이른바 식생 수문지형학적 검토 없이 진행되고 있다. 전술한 바와 같이 국내 하천습지는 기존에 하천공간이 넓게 분포하는 구간을 중심으로 대부분 인위적인 유황 및 유사량 변화로 시작된 사실상 인위적 습지로서, 이에 대한 체계적인 관리를 위해서는 식생 수문지형학적 검토가 우선일 것이다.

특히 국내 하천 홍수터(또는 사주)의 급속한 물리적, 생태적 변화를 감안하면 그림 4에서 국내하천 여건 상 시급하게 연구되어야 할 분야 중 하나는 유형 II가 될 것이다. 이를 위해 무엇보다도 먼저 하여야 할 것은 Lee et al. (2019a)의 연구 같이 장기간에 걸쳐 몇 하천에 대해 집중적으로 식생과 하천과정 관련 조사를 통해 관련 자료를 축적하는 것이다. 동시에 실무에서 충분한 신뢰를 가지고 적용할 수 있는 동적 수변식생모형의 개발이 요구된다. 이는 이미 Woo와 Park (2016)에 의해서 Fig. 5와 같이 제안되었다.

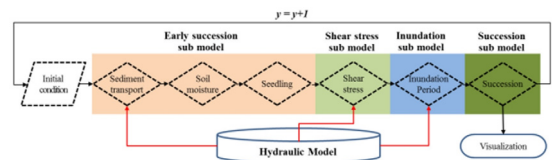


Fig. 5. Schematic flow diagram of the riparian vegetation modeling (Adopted from Woo and Park's Fig.1, 2016).

5. 요약 및 결론

본 연구는 하천과정과 식생에 관한 총설적 연구이다. 즉 전통적 수문지형학 범주에서 식생요소를 추가하여 식생-수문-지형 간 상호작용을 연구한 국내의 성과를 정리, 분석한 것이다. 국내에서 1960년대 이후 국토개발의 진전과 더불어 추진된 다양한 이치수용 하천사업, 구체적으로 그 동안 집약적으로 추진된 댐개발과 하천정비 등은 외국의 어느 지역 이상으로 하천에 인위적 영향을 주고 그에 따라 식생-수문-지형 간 관계에 커다란 영향을 주었으며, 앞으로도 그 영향은 지속될 것이다. 더욱이 근래 기후변화로 인한 계절별 강수량상의 변화와 하천에 비점오염물질의 유입 등 제2,3의 영향은 식생-수문-지형 관계에 가속적인 변화를 주고 있다고 추론할 수 있다. 하천식생관리 문제가 전통적 하천관리는 물론 하천복원과도 직접적으로 관련되어 있음을 고려하면 이러한 가속적, 지속적 하천영향은 간과하면 안 될 것으로 판단된다.

그러나 이 같은 엄중성에 비해서 국내 관련연구는 상대적으로 매우 미약하다. 1990년대에 가속적인 하천식생 이입현상이 처음 학계에 보고된 이후 지금까지 관련 연구는 논문으로 십 수 편을 넘지 못하고 있다. 더욱이 대부분의 관련 연구자들은 일부 국가연구개발 사업에 참여했던 연구진에 한정되었으며, 특히 전통적 수문지형학 분야 전문가들의 참여가 미진하였다.

이러한 상황을 조금이라도 타파하고 식생-수문-지형 관계 연구를 확대하기 위해 필자들은 가까운 미래에 다음과 같은 분야의 조사연구의 추진을 제안한다.

- 식생-수문-지형 간 상호작용과 천이과정을 설명할 수 있는 식생 간 상호작용의 이해를 위해 특성이 서로 다른 복수의 하천에서 그러한 상호작용에 대한 장기적, 체계적, 집중적 조사연구 (모니터링)
- 그러한 상호작용을 충분한 신뢰도를 가지고 모의, 예측할 수 있는 동적 수변식생모형의 개발
- 개발된 수변식생모형과 기존 하천모형을 연계한 '완전한' 동적 수변식생모형의 개발 (과학적 하천관리 및 복원에 적용)
- 비점오염물질 형태로 유입하는 영양염류와 하천식생 성장 간 관계의 조사연구
- 근래 들어 기온, 강수 등 기후요소 변화와 하천식생 이입과의 관계 규명
- 국내 하천습지의 생성 원인, 과정, 미래추이 등에 대

한 식생 수문지형학적 연구

- 기타 Fig. 4에서 제시된 개별적 관계의 조사연구

감사의 글

본 연구는 제1 저자가 연구책임자로 있는 '친환경 신소재를 이용한 고강도 제방 기술개발 연구사업 (2016. 6-2021. 5)' (#17AWMP-B114119-02) 연구사업에서 제방을 포함한 하천에서 식생과 수문지형 간 관계 연구의 성과로 나온 것으로서, 이 연구사업을 지원한 국토교통과학기술진흥원에 깊은 감사를 표한다.

References

- Benjankar, R., Egger, G., Jorde, K., Goodwin, P. and Glenn, N.F. 2011. Dynamic floodplain vegetation model development for the Kootenai River, USA. *Journal of Environmental Management* 92: 3058-3070.
- Choi, S.U. and Kang, H. 2004. Reynolds stress modelling of vegetated open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, 42(1), 3-11.
- Cho, H.-J., Jin, S.-N., Lee, H., Marrs, R.H., and Cho, K.-H. 2018. The relationship between the soil seed bank and above-ground vegetation in a sandy floodplain, South Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure*, 5(3): 145-155. (in Korean)
- Choi, S.-U., Yoon, B. M., Woo, H. and Cho, K.-H. 2004. Effect of flow-regime change due to damming on the river morphology and vegetation cover in the downstream river reach: a case of Hapchon Dam on the Hwang River. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(1). pp. 55-66. (in Korean)
- Choi, S.-U., Yoon, B.M. 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*, John Wiley & Sons 21: 315-325.
- Egger, G., Politti, E., Woo, H. Cho, K.H. Park, M.H., Cho, H.J., 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.
- Garófano-Gómez, V., Martínez-Capel, F., Bertoldi, W., Gurnell, A., Estornell, J. and Segura-Beltrán, F. 2013. Six decades of changes in the riparian corridor of a Mediterranean river: a synthetic analysis based on historical data sources. *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(4): 536-553.
- Gurnell, A. 2014. Plants as river system engineers. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 39: 4-25.

- Im, D., Kim, W., Choi, S.-U. and Kim, Y. 2011. Investigation of critical breaking moment through field tree-pulling test, *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 31(4B): 323-332. (in Korean)
- Jang, C.L. 2013. Experimental analysis of the morphological changes of the vegetated channels. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(9): 909-919. (in Korean)
- Jang, C.L. 2016. Experimental study on the sediment sorting processes of the bed surface by geomorphic changes in the vegetated channels. *Journal of Korea Water Resources Association* 49(1): 73-81. (in Korean)
- Jin, S.N. and Cho, K.H. 2019. Expansion of riparian vegetation due to change of flood regime in the Cheongmi-cheon Stream, Korea. *Ecology and Resilient Infrastructure* 3(4): 322-326. (in Korean)
- Kang, H. and Choi, S.U. 2006. Turbulence modelling of compound open-channel flows with and without vegetation on the floodplain using the Reynolds stress model. *Advances in Water Resources*, 29: 1650-1664.
- Kim, T.B., Bae, H.D. and Choi, S.-U. 2010. Development and application of depth-integrated 2-D numerical model for the simulation of hydraulic characteristics in vegetated open-channel. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 30(6B): 607-615. (in Korean)
- Kim, J.S., Kim, W. and Km, H.J. 2011. Application of depth-averaged 2-D numerical model for the evaluation of hydraulic effects in river with the riparian forest. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 31(2B): 165-173. (in Korean)
- Kim, H.S., Park, M.H. and Woo, H. 2014a. Numerical experiments of vegetation growth effects on bed change patterns. *Ecology and Resilient Infrastructure* 1(2): 68-81. (in Korean)
- Kim, H.J., Shin, B.K. and Kim, W. 2014b. A study on hydro-morphology and vegetation features depending on typology of natural streams in Korea. *Korean journal of Environment and Ecology* 28(2): 215-234. (in Korean)
- Kim, U.J., Cho, K.H. and Kang, J.K. 2014c. The study of correlation between riparian environment and vegetation distribution in Nakdong River. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(4): 321-330. (in Korean)
- Kong, H.Y., Kim, S., Lee, J., Lee, J. and Cho, H. 2014. Riparian environment change and vegetation immigration in sandbar after the sand mining. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(2): 135-141. (in Korean)
- Lane, E.W. 1957. A Study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible material. *US Army Corps of Engineers, Missouri River Division, Sediment Series, 9. US Army Corps of Engineers: Washington, DC, 106.*
- Lee, S.H. 2002. A study of the relationship between instream vegetation and sediment transport by a hydraulics model experiment. *Journal of Korea Water Resources Association* 35(6): 753-762. (in Korean)
- Lee, J.W. and Yu, D.Y. 1997. Resistance test of riparian trees. *Journal of Korea Water Resources Association* 30(30): 211-223. (in Korean)
- Lee, M.J., Lee, S., Ji, Y.Y., Kim, H. J. and Song, H.K. 2002. Riparian vegetation around Pyeongchang-gun, an upper stream of Namhangang. *Korean Journal of Environmental Biology* 20(1): 55- 65. (in Korean)
- Lee, D.S., Lee, D.H. and Kim, M.H. 2012a. Roughness coefficients evaluation of the Korean riparian vegetation. *Journal of Korean Society of Civil Engineers, Hydro-engineering* 32(6B): 345-354. (in Korean)
- Lee, J.S., Julien, P.Y., Kim, J.H. and Lee, T.W. 2012b. Derivation of Roughness coefficient relationships using field data in vegetated rivers. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(2): 137-149. (in Korean)
- Lee, C.J., Kim, D.G., Hwang, S.Y., Jeong, S.J., Cho, Y. J., and Kim, S.N. 2019a. Dataset of long-term investigation on change in hydrology, channel Morphology, landscape and vegetation along the Naeseong Stream (II). *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(1): 34-48. (in Korean)
- Lee, C.J., Woo, H. and Jang, C.L. 2019b. Effect of flow regime on accelerated recruitment and establishment of vegetation in unregulated sandy rivers – a case study at Naeseong-cheon Stream in Korea. *Proceedings of the 38th IAHR Congress, Panama City, Panama. (To be presented)*
- Leopold, L.B. and Wolman, M.G. 1957. River channel patterns-braided, meandering and straight. *US Geological Survey Professional Paper 282B. US Geological Survey: Reston, VA: 39-85.*
- Mackin, J. 1956. Causes of braiding by a graded river. *Bulletin of the Geological Society of America* 37: 1717-1718.
- Osterkamp, W.R. and Hupp, C.R. 2010. Fluvial processes and vegetation - Glimpses of the past, the present, and perhaps the future. *Geomorphology* 116: 274-285.
- Park, B., 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)
- Solari, L., Oorschot, M. van, Belletti, B., Hendricks, D., Rinaldi, M. and Vargas-Luna, A. 2016. Advances on modelling riparian vegetation - Hydromorphology interactions. *River Research and Applications* 32(2): 164-178.
- Vanoni, V. edited. 1977. *Sedimentation Engineering. ASCE-Manuals and Practices on Engineering Practice – No. 54: 114.*
- Viles, H.A., 1988. Cyanobacterial and other biological influences on terrestrial limestone weathering on Aldabra: implications for landform development. *Bulletin of the Biological Society of Washington* 8: 5-13.
- Williams, G.P. 1978. Case of the shrinking channels – the

- North Platte and Platte Rivers in Nebraska. US Geological Survey, Circular 781(781), Department of the Interior, Washington, D. C., USA.
- Williams, G.P. and Wolman, M.G. 1984. Downstream effects of dams on alluvial channels. USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, Washington, D. C., USA.
- Woo, H., Yu, D.Y., Ahn, H.K. and Choi, S. U. 2002. A Preliminary study on vegetation growth on sandbars and scours in the Hwang River. Proceedings of KSCE Annual Conference: 1693-1696. (in Korean)
- Woo, H. 2008. White river, green river? Magazine of Korea Water Resources Association 41(12): 38-47. (in Korean)
- Woo, H. 2009. Literature study of vegetation recruitment on riverine bars (I, II) -Investigation on the process of white river to green river. Magazine of Korea Water Resources Association 42(8): 37-53. (in Korean)
- Woo, H. and Choi, S. U. 2013. Ch. 17 Hydraulic modeling of floodplain vegetation in Korea: development and applications. Ecohydraulics – an integrated approach, Ina Maddock et al edited, Wiley Blackwell.
- Woo, H., Jeong, S.J. and Cho, H.J. 2011. A field survey and analysis of ground water level and soil moisture in a riparian vegetation zone. Journal of Korea Water Resources Association 44(10): 797-807. (in Korean)
- Woo, H., Kim, J.S., Cho, K.H. and Cho, H.J. 2014. Vegetation recruitment on the ‘white’ sandbars on the Nakdong River at the historical village of Hahoe, Korea. Water and Environment Journal 28(4): 577-591.
- Woo, H., Kim, W. and Ji, W. 2015a. River Hydraulics. Chungmoongak Press: 605 and 627. (in Korean)
- Woo, H., Kang, J.K., Cho, H.J., Choi, Y. S. and Park, M. H. 2015b. A preliminary verification of the influences of hydrologic regime change and nutrients influx on vegetation recruitment on riparian bars. Ecology and Resilient Infrastructure 2(4): 284-290. (in Korean)
- Woo, H. and Park, M.H. 2016. Cause-based categorization of the riparian vegetative recruitment and corresponding research direction. Ecology and Resilient Infrastructure 3(3): 207-211. (in Korean)