

하천식생 이입 현상에 대한 수문현상 변화와 영양염류 영향의 예비 검증

A Preliminary Verification of the Influences of Hydrologic Regime Change and Nutrients Influx on Vegetation Recruitment on Riparian Bars

우효섭^{1*} · 강준구² · 조형진³ · 최이송⁴ · 박문형⁵

¹광주과학기술원 환경공학부, ²한국건설기술연구원 수자원하천연구소 하천실험센터, ³수생태공간 정보연구소, ⁴경희대학교 환경학과, ⁵한국건설기술연구원 수자원하천연구소

Hyoseop Woo^{1*}, Joon-goo Kang², Hyung-Jin Cho³, Yi-song Choi⁴ and Moon-hyeong Park⁵

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

²River Experimentation Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Andong 36754, Korea

³ECONGEO, 62, Seokjeong-ro, Incheon 22170, Korea

⁴Department of Environmental Science, Kyunghee University, Suwon 17104, Korea

⁵Department of Water Resources and River Engineering Research, KICT, Goyang 10223, Korea

Received 30 November 2015, revised 14 December 2015, accepted 20 December 2015, published online 31 December 2015

ABSTRACT: In this study, two hypotheses were examined to preliminarily verify for the vegetation recruitment and establishment on riparian bars in unregulated rivers; hydrologic regime change and nutrients influx into streams. In order to preliminarily verify the first hypothesis, precipitation patterns were analyzed during a period from March through to May when reeds, the most common riparian vegetation in Korea, germinate and start to grow in riparian areas. The results show that during the last 35 years, the total precipitation during the three-month period decreased by about 15 %, while the total annual one increased by about 15% in Korea. In order to verify the second hypothesis, a preliminary experiment was conducted with a set of two-vegetative flumes for one year. In this experiment, a stream flow with reeds on the riparian sand bars was simulated with a flume with reeds planted on the sand bed and water with a concentration of 3.5 mg of N flowing in the flume for four hours. For comparison, clean water was circulated in the same way in another flume for simulating a stream flow without N. The experimental results show that the growth rate of reeds in N-mixed flow exceeds that in clean water flow by about 30%. The above two results could explain the phenomenon of change in unregulated rivers from white river to green river in Korea, although they were obtained through limited extents of analysis and experiment.

KEYWORDS: Green river, Hydrologic regime, Nitrogen, Nonpoint source pollutant, Riparian vegetation, White river

요 약: 본 연구는 비 조절하천에서 식생 이입 및 활착 현상에 대해 봄철 강수특성 변화에 따른 식생영향 가설과 질소화합물의 하천유입에 따른 식생영향 가설을 일차적으로 검증하는 것이다. 첫 번째 가설을 검증하기 위해 국내하천에 대해 갈대와 달뿌리풀의 발아기, 유식물기인 3-5월의 강수특성 변화를 분석하였다. 그 결과 최근 35년 동안 연 총 강수량은 약 15% 늘어난 반면에 3-5월의 강수량은 오히려 약 15% 이상 감소한 것으로 나타나서 이러한 가설을 부분적으로 뒷받침하였다. 두 번째 가설을 검증하기 위해 한 쌍의 실험수로에 갈대를 식재 하고 여름 기간 동안 갈대성장을 관찰한 결과 질소화합물이 3.5 mg/L 정도 함유된 오염수를 주기적으로 흘린 수로의 경우 그렇지 않은 경우보다 약 30% 이상 갈대성장이 높은 것을 확인하였다. 비록 강수량 분석 결과와 식생수로 실험결과는 제한된 범위 내에서 수행된 것이지만 국내 비 조절 중소하천의 초본류 번무현상을 일부 설명할 수 있을 것이다.

핵심어: 그린리버, 수문 현상, 질소, 비점오염물질, 하천식생, 화이트리버

*Corresponding author: hswoo@gist.ac.kr

© 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

형태적인 측면에서 자연하천의 주요 구성요소는 수로와 홍수터이다. 여기서 수로의 횡방향 범위는 하천유황에 따라 변하며, 일반적으로 횡방향 지점 별 침수기간이나 빈도는 하안으로부터 멀어질수록 줄어든다. 하천 증수시 침수되는 구역은 물에 잠기는 것 뿐만 아니라 흐름에 의해 유사이송과 하상교란이 생긴다. 그에 따라 이러한 구역에서는 식생이 활착하지 못하고 통상 모래나 자갈이 노출된 사주 (bars)가 된다. 이와 같이 사주는 수로의 일부일 수도 있고 홍수터의 일부일 수도 있다. 따라서 축적홍수터가 있는 자연하천에서 사주의 존재여부는 그 하천의 유황에 의존한다. 자연하천의 유황은 그 유역의 강수와 용설 등 수문학적 변화에 따르며, 같은 토양, 지형 조건에서 수문특성은 일반적으로 기후특성에 따라 다르게 되므로 결국 사주특성은 기후특성에 따라 다르게 된다.

몬순기후의 영향을 받는 한반도는 여름에 비가 많이 오고 그 밖의 계절에는 상대적으로 적게 와서 하천의 유량변화가 다른 지역의 하천에 비해 매우 크다. 하천유량의 최대치와 최소치의 비인 이른바 유황계수 (또는 하상계수)는 대륙의 하천이 수십 정도라면 한반도의 경우 수백 정도이다 (Lee and Woo 1993). 이에 따라 한반도 하천에서는 평상시 물에 잠기지 않지만 홍수시 강한 유사이송과 하상교란이 발생하여 식생 이입과 활착이 불가능한 사주의 범위가 상대적으로 넓게 나타난다. 이른바 ‘화이트리버’이다 (Woo 2008). 반면에 서안해양성 기후의 영향을 받는 유럽의 하천은 유황계수가 작고, 그에 따라 사주발달이 적어서 하안에서부터 바로 식생이 활착하는 ‘그린리버’가 된다. 화이트리버에서는 갈대, 달뿌리풀, 갯버들, 왕버들, 버드나무 등 한반도 하천에 보편적으로 나타나는 식생의 씨앗이 3-6월에 바람에 날려 사주에 떨어져 발아하여 유식물로 자라다가 5-6월 작은 홍수에 쉽게 쓸려 내려가거나 사주에 파묻혀 고사하게 된다. 일부 살아남은 식생은 7-8월 본격적인 홍수로 살아남지 못하게 된다.

댐개발, 하천정비, 골채채취 등 자연하천의 인위적 변경은 흐름-유사이송-하천지형-식생 등으로 이어지는 하천 제 인자 간 상호작용에 직간접적으로 영향을 준다 (Woo 2015). 이러한 추가적, 인위적인 요

인은 대부분 하천 식생 이입, 활착 현상을 가속화 한다. 위와 같은 하천 내 식생의 활착현상은 공학적으로 하천지형의 변화와 그에 따른 하천관리 문제와 하천 내 식생, 특히 목본류 존재 자체가 주는 흐름저항 증가로 인한 홍수위험 증가문제를 만든다. 전지는 하천에 식생이 활착하면 부유사 퇴적으로 사주는 육역화 되고 그 사이로 단일 수로가 좁게 형성되어 하상은 지속적으로 파이게 된다 (Williams and Wolman 1984). 사주의 육역화 문제는 바로 통수능 감소로 이어져서 홍수위험 증가문제로 귀결된다. 하천 내 과도한 목본류 활착은 마찰계수 증가를 넘어 물리적으로 통수능 자체를 감소시킨다.

하천 내 식생활착 현상은 생태적으로 서식처의 다양성을 증가시켜 일부 종다양성에 기여할 수 있으나, 사주하천에 서식하는 특정 동식물은 감소하거나 사라지게 된다. 이에 대한 구체적인 연구는 국내에서 아직 확인되지 않고 있다. 경관적으로도 물과 모래와 갈대가 어우러진 우리나라 전통하천의 모습인 ‘화이트리버’가 식생으로 가득 찬 ‘그린리버’로 바뀌게 된다.

실제 국내하천의 사주에 식생의 이입과 활착 상황에 대한 조사 결과를 보면 조절하천이든 비조절하천이든 대부분의 크고 작은 하천이 그린리버로 바뀌고 있다 (Park et al. 2008). 최근 한 예로 2012년 기준 62개 하천 2,997 km에 대해 조사한 결과 평수위 기준으로 수역은 45%인 반면에 식생역은 34%이고 기타 구역은 21%로 나타났다 (Woo et al. 2015). 여기서 기타 구역은 통상 도시 근처 고수부지나 일부 경작지 (4대강사업으로 사실상 모두 제거되었음)을 제외하면 모두 자갈, 모래 등 사주이다. 과거 1980년대 이전 국내 항공사진에서 나타나는 하천은 수역과 사주역만이 있었음을 감안하고 수역 규모의 상대적 변화 자체는 크지 않다고 가정하면, 식생이입이 가능한 사주역의 60% 이상이 식생역이 되었다고 개략적으로 추정할 수 있다. 우리나라 하천의 60% 이상이 그린리버로 변했다는 것이다.

본 연구는 이렇게 화이트리버와 그린리버로 바뀌는 현상에 대해 하천사주 식생이입 현상을 요인 별로 분석, 평가하고 그 중 비조절하천에서 나타나는 ‘그린리버’ 현상의 요인으로서 식생 발아 및 유식물 기인 3-5월의 하천유황변화 가설과 특히 중소하천의 영양염류 과다유입으로 인한 식생번무 가설을 일차적

으로 검증하는 것이다. 조절하천의 경우 국내외에서 상대적으로 많은 연구가 이미 수행되었다.

2. 하천식생 이입, 활착 현상의 문헌 고찰

하천홍수터 (사주 포함) 상 식생의 이입, 활착 현상에 대한 국내의 문헌분석은 Woo (2009)에 의해 비교적 자세히 이루어졌으며, 이를 토대로 제한된 현장조사를 통해 하천식생 이입현상의 원인 별 유형이 제시되었다 (Woo et al. 2010). 이 분류에 따르면 첫 번째 유형 1은 인위적인 하천의 유황과 유사이송의 변화이다. 특히 댐개발과 같은 대규모 유황변화는 하류하천의 소류력 감소와 홍수터 침수기간의 감소를 가져와 홍수터나 사주 상 식생활착에 서로 다른 영향을 주게 된다. 사주상 소류력 감소는 식생 이입과 활착 기회를 높이는 반면에, 사주나 홍수터의 침수기간 감소는 지하수 함양과 토양습윤에 부정적 영향을 주며 특히 ‘신선한’ 미립토사의 공급을 감소시켜 식생의 발아 기회를 줄이게 된다. 여름 철 댐에 의한 홍수저감으로 하상소류력이 감소함에 따른 식생활착 효과에 대해서는 Williams and Wolman (1884) 이후 외국에서 많은 사례가 발표되었으며, 국내에서 Choi et al. (2005)에 의해 최초로 황강댐 하류구간에 대해 조사 연구되었으며, Egger et al. (2012), Woo et al. (2014) 에 의해 낙동강 상류 안동댐/임하댐 하류하천에 대해 조사연구 되었다. 반면에 봄 철 댐에 의한 홍수저감으로 지하수 함양 및 토사공급이 감소함에 따른 기존 식생고사 및 식생이입 감소효과에 대해서는 미국 중서부 준 건조지역의 댐에 의한 조절하천 사례에서 볼 수 있다 (Rood and Mahoney 1990, Benjankar 2011).

두 번째 유형 2는 하천의 인위적 교란으로 인한 것이다. 여기에는 골채채취, 하도정비, 보 축조 등을 들 수 있다.

세 번째 유형 3은 아직 가설 수준이나, 하천에 N이나 P같은 영양물질의 유입에 따른 것이다. 이 중 질소화합물은 특히 도시와 농촌의 중소하천에 나타나는 초본류 식생의 번무현상에 직접적인 영향을 주는 것으로 추정된다. 현재 국내하천에 비점오염물질 유입은 여전히, 특히 농촌하천에서 비료나 축산 폐수가 비점오염물질로 유입하는 경우 바로 하천식생의 ‘비료’가 될 수 있다. 최근 일본에서 조사된 결과에 의하면 하천 내 초본류 식생 활착은 특히 하천수의 질소농도와 상관성이 높은 것으로 나타났다 (Asaeda et al. 2013). 본 연구의 목표 중 하나는 바로 이러한 현상을 실험을 통해 검증하는 것이다.

위와 같은 기존의 원인 별 유형분류에 추가할 수 있는 것은 댐 개발과 같은 인위적 영향이 없는 비조절하천의 경우에도 특정시기에 유황의 변화는 하천식생이입을 촉진할 수 있다는 가설이다. 그 예로 하천 초본류와 목본류의 발아기 (3-5월)에 ‘작은’ 홍수가 발생하면 사주의 물리적 안정성에 영향을 주어 유식물이 씻어 내려가거나 토사로 묻힐 수 있다. 그러나 다른 기후적 요인으로 봄 철 작은 홍수가 줄어들거나 없어지면 사주에 식생이 발아하여 성장할 가능성이 높아질 것이다. 본 연구에서는 이러한 영향 가설을 수문자료 분석을 통해 예비 검증하는 것이다.

3. 강수 특성 변화에 따른 식생이입 영향 가설의 검증

Table 1은 국내에서 대표적인 하천사주에 서식하는 식물인 초본성 갈대류 (갈대, 달뿌리풀)과 교관목성 버드나무류 (선버들, 왕버들 등) 발아 및 유식물 시기를 표시한 것이다. 이 표에서 갈대류는 3초월부터 5월초까지 발아하여 유식물 기를 거치며, 갯버들류는 4월에서 6월 중순까지 발아하여 유식물 기를 거친다. Fig. 1은 식생이 이입 되지 않은 ‘땀’ 사주와

Table 1. Periods of germination and seedlings of reeds and willows (from an unpublished report of the 3rd author).

Species and environmental condition	Month				
	March	April	May	June	July
Reeds		Germination		Seedlings	
Willows		Germination		Seedlings	
Condition for germination and growth	Soil moisture (in most cases, riparian floodplains, bars in this study, are satisfied)				
Limiting condition	Instability of riparian bars due to scours and burying				

갓 발아 되어 자라고 있는 갈대류를 보여준다. 이때부터 약 두 달간은 토양습윤(‘물가’라는 사주 특성상 통상 보장됨)은 물론 발아 및 성장 기반인 사주의 물리적 안정이 갈대류 생존에 필수적이다. 이 기간에 무차원 하상소류력 0.06 이상의 하천흐름이 발생하여 하상이 움직이기 시작하면 생존할 수 없게 된다(Okabe et al. 2001). 여기서 무차원 하상소류력 0.06은 통상 쉘즈 곡선에서 사립자가 움직이기 시작하는 한계치이다.

Fig. 2는 한반도 연 강수량과 하천사주의 대표적 식생인 갈대류의 발아기/유식물기인 3-5월간 강수량 합의 경년변화를 각각 보여준다. 이 그림에서 1973년 이후 2010년까지 연 총강수량은 15% 이상 늘었으나, 3월부터 5월 간 강수량 합은 오히려 약 15% 정도 줄은 것을 알 수 있다. 이 결과는 근래 들어 우

리나라 봄철 강수량이 과거에 비해 상당히 줄어들었으며, 그 결과 봄철 홍수 규모가 줄어들고 그에 따라 사주에 미치는 하상소류력도 같이 줄었음을 간접적으로 보여준다. 이는 Table 1에서와 같이 사주상 식생 생존에 유리한 조건을 마련해준다. 즉 봄철에 과거보다 일정규모 이상(통상 무차원 하상소류력 0.06 이상)의 하천흐름 발생 횟수와 강도가 줄어들어 그에 따라 우리나라 전국에 걸쳐 하천에 식생이입이 증가했다고 추정할 수 있을 것이다. 다만 이를 과학적으로 확인하기 위해서는 몇 개의 시험하천구간을 정해 강수량 같은 수문량보다는 유속과 소류력 같은 수리량을 비교, 분석하여야 할 것이다.

4. 비점오염물질 형태의 질소화합물의 하천유입영향 가설의 검증

이 가설은 특히 도시와 농촌의 비 조절 중소하천에서 근래 들어 초본류 식생이 번무 하는 현상에 대한 설명이다. Asaeda et al. (2013) 도 일본의 하천에서 질소성분 농도가 높은 하천수에 의해 홍수시 범람된 인근 사주와 홍수터 토양에 영양분이 공급되어 식생 성장에 기여하는 점을 강조했다.

본 연구에서는 이러한 가설을 실험적으로 입증하기 위해 예비실험 성격으로 2015년에 1년 동안 안동 하천실험센터에서 식생수로 실험을 하였다. 이 실험에서는 2015년 7월에 Fig. 3과 같이 길이 20 m, 폭 1.0 m, 높이 1.5 m의 수로 2개를 병렬로 설치하고 바닥에 두께 50 cm의 모래를 깔고 각각의 수로에 갈대를 40주씩 이식하였다. 이식 당시 갈대는 높이 20



Fig. 1. Photograph showing the area of sand bar and seedlings of reeds (upper right) at an upstream reach of Nakdong-gang River.

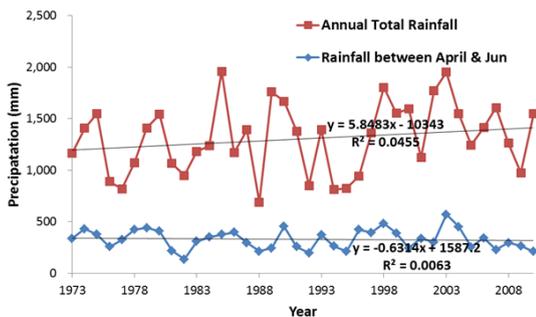


Fig. 2. Annual variations of yearly total rainfall and the rainfall during the period of riparian vegetation's germination and seedling growth from March to May in Korea (Woo et al. 2015).

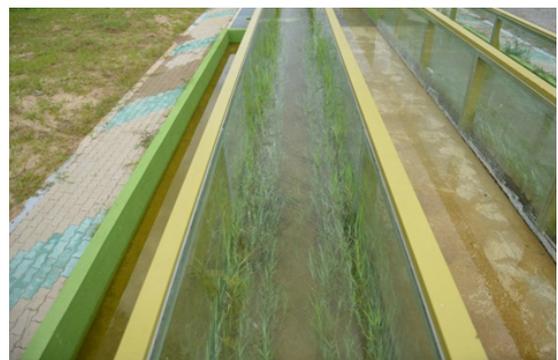


Fig. 3. Vegetative experimental flumes (an N-polluted water flume in center and a non-polluted water flume at right).

cm 정도로서 유식물기를 지난 성장 단계이었다.

비조절 된 농촌 중소하천 하천수와 인접 사주의 지하수에서 나타나는 총질소 및 총인 농도를 추정하기 위해 안동실험센터 근처 풍산천, 내성천, 내성천 지류 등에서 물 시료를 채취하여 실험실에서 분석하였다. 그 결과 총질소는 1.4-4.0 mg/L, 총인은 0.04-0.55 mg/L 정도로 나타났다. 이 결과를 고려하여 본 실험에서는 총질소는 3.5 mg/L, 총인은 0.05 mg/L를 실험수 영양영류 농도로 정하였다. 이를 맞추기 위해 34,500 L의 원수에 KNO₃ 와 KH₂PO₄ 를 각각 적정량 투입하였다. 8월 20일과 8월 25일에 각각 1회 유량 공급을 하여 모의를 하였으며, 3차 실험은 기간을 두고 10월 19일에 하였다. 각 실험에서 하천흐름 모의를 위한 유량공급은 수위 0.3 m, 유속 0.2 m/s, 공급시간 4시간으로 하였다. 4시간 후에는 자연 배수되도록 하였다. Fig. 3에서 중앙수로에는 질소, 인 농도가 있는 오염수를, 우측 수로에는 인근에서 채취한 원수를 흘렸다. 원수에는 약간의 질소, 인 성분이 검출되었으나 이는 두 수로 비교농도 차를 줄이게 되므로 특별히 고려하지 않았다. 수로를 통과한 물은 하류 수조를 통해 강제순환 하도록 하였다.

Fig. 4에서 질소화합물이 혼합된 오염수를 실험수조 내에서 순환시키면 그 농도는 시간이 감에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 오염된 물이 순환하면서 지하로 서서히 침투하여 질소화합물은 토양과 식생 뿌리, 줄기 등에서 흡수되기 때문으로 사료된다. 지하수 질소농도는 오히려 일부 증가하는 것은 지표수에 함유된 질소화합물이 지하수와 서서히 혼합되기 때문으로 보인다.

총인 농도 변화는 초기농도가 매우 작고 (0.05 mg/L), 원수 농도와 큰 차이가 없기 때문에 큰 유의성을 확인하기 어려웠다. 인 성분은 식물의 열매성장에 기여하기 때문에 본 실험 목적인 식생의 성장과

직접 관련이 없어 본 연구에서 더 이상 검토하지 않았다.

이러한 실험에서는 사주의 침수 빈도와 기간을 추정하여 수로실험에 고려하는 것이 바람직하나, 중소하천 수위자료의 정확도에 한계가 있어 실제 모의하지 못하고, 각 사상 별 4시간 정도 침수하는 것으로 임의 가정하였다. 추후 실험에서는 침수 빈도 및 기간의 모의를 고려하는 것이 필요할 것이다.

Table 2는 2015년 7월 27일에 처음 이식한 후 9월 24일, 10월 26일, 그리고 11월 19일에 갈대성장 상태를 각각 측정한 결과이다. 이 표에서 갈대의 성장률은 비오염수 (원수) 수로에서 평균 80% 수준이나, 질소성분이 들어간 오염수 수로에서는 110%로 나타나 30% 이상 성장률이 높게 나타났다. 반면에 앞 수에서는 두 경우 큰 차이를 보이지 않았다. 실험 시작시와 종료시 줄기생체량 비교 결과 오염수의 경우 11% 이상 크게 나타났다. 특히 Fig. 4에서 보는 바와 같이

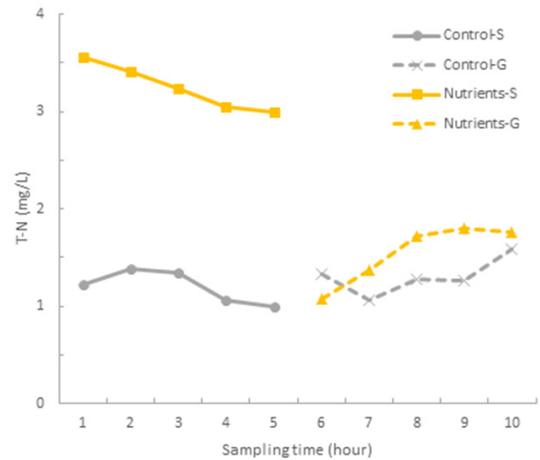


Fig. 4 Variations in T-N concentration in the first experiment on August 29 (brown colors are for N-polluted water and grey colors are for non-polluted water, S for surface water and G for groundwater).

Table 2. Comparisons of growth rates of reeds in N-mixed water and clean water.

Measurement	Water type	Days after reeds were planted in the flumes				Growth rate (%)
		0 (Jul 27)	60 (Sep 24)	92 (Oct 26)	116 (Nov 19)	
Stem length (cm)	Clean	23.4	39.0	41.9	42.1	80
	Mixed	22.3	45.4	46.3	46.8	110
Number of leaves	Clean	6.2	11.0	11.5	11.3	82
	Mixed	6.1	11.5	11.3	11.1	82

*The first experiment with N-mixed water was on August 20.

당초 실험수의 질소성분 농도는 주입 시 3.5 mg/L에서 시간이 감에 따라 감소하고 지하수 (수로바닥 모래 층 사이 간극수)의 질소성분 농도는 서서히 증가하므로 식생은 초기농도보다 낮은 농도 상태에서 성장했을 것이다. 이러한 결과는 식물생리학 관점에서 더 검토가 필요할 것으로 사료되나, 이 실험결과를 도시와 농촌 비점오염물질의 주요성분인 질소화합물이 하천으로 유입하여 식생성장을 촉진한다는 점을 간접적으로 입증한 것이다. 질소 성분이 작물용 비료의 3대 요소 중 하나라는 점을 고려하면 당연한 결과로 보이나, 질소화합물을 직접 식물에 시비한 것이 아니라 하천에서 나타나는 흐름으로 재현하였다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있을 것이다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 이른바 화이트리버가 그린리버로 바뀌는 현상을 과학적으로 설명하기 위한 연구의 일환이다. 하천 내 식생 이입, 활착 현상에 대해 조절하천과 비 조절하천을 망라하여 국내외 문헌분석을 통해 요인 별 유형분류를 한 결과 유황 및 유사이송의 변화 (유형 1), 하도 및 홍수터의 인위적 변경 (유형 2), 그리고 영양염류의 하천유입영향 가설 (유형 3) 등으로 구분되었다. 추가로, 유형 1에 비조절하천에서 봄 철 홍수저감으로 인한 식생이입 영향 가설을 고려 할 수 있다.

위 두 가설을 일차적으로 검증하기 위해 제한된 범위에서 각각 자료 분석과 수로실험을 하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 국내 강우특성변화 분석결과 최근 35년 동안 연 강수량은 15% 이상 증가하였으나, 갈대와 달뿌리풀의 발아기 및 유식물기인 3-5월에는 오히려 약 15% 이상 감소한 것으로 나타났다. 강우량과 강우강도가 작아지면 하천유량이 감소하고 그에 따라 하상소류력이 감소하여 갈대나 달뿌리풀 같은 국내하천의 대표적인 초본류의 유식물이 쓸려 내려가거나 토사에 묻히지 않고 생존할 가능성이 높아진다.
- 2) 식생수로실험 결과 하천수의 질소화합물 농도가 높아지면 그렇지 않은 경우에 비해 식생이 더 번

무하는 것을 확인하였다. 구체적으로 제한된 실험 결과 하천수에 질소화합물이 3.5 mg/L정도 함유된 경우 그렇지 않은 경우보다 약 30% 이상 식생 성장이 촉진된다.

감사의 글

본 연구 중 '3. 강수 특성 변화에 따른 식생이입 영향 가설의 검증'은 2015년 IAHR 대회에서 발표된 제1저자와 제5저자의 논문 (Woo et al. 2015)에 기초한 것이며, '4. 비점오염물질 형태의 질소화합물의 하천유입영향 가설의 검증'은 한국건설기술 연구원 안동하천실험센터에서 2015년 수행한 실험성과에 기초한 것으로서 연구원에 감사를 드린다.

References

- Asaeda, T. et al. 2013. The most effective factors responsible for increase in the vegetation coverage of river channel. Proceedings of the 35th IAHR Biennial Congress, Chengdu, China.
- 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., 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* 21: 315-325.
- Egger, G., Politti, E., Woo, H., 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.
- Lee, J. and Woo, H. 1993. Analysis of the Effect of Damming on Flow Duration Characteristics of Five Major Rivers in Korea. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 13(3): 79-91. (in Korean).
- Okabe, T., Anase, Y. and Kamada, M. 2001. Relationship between willow community establishment and hydrogeomorphic process in a reach of alternate bars. Proceedings of IAHR, Beijing, China. pp. 340-345.

- 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)
- Rood, S.B. and Mahoney, J.M. 1990. Collapse of riparian poplar forests downstream from dams in western prairies: probable causes and prospects for mitigation. *Environmental Management* 14: 451-464.
- Williams, G.P. and Wolman, M.G. 1984. Downstream Effects of Dams on Alluvial Channels. USGS Professional Paper 1286, Department of the Interior, Washington, USA.
- Woo, H. 2008. White river, green river? *Magazine of Korea's Water Resources Association* 41(12): 38-47.
- Woo, H. 2009. Literature study of vegetation recruitment on riverine bars (1, 2): investigation on the process of white river to green river. *Magazine of Korea Water Resources Association* 42(8): 37-53. (in Korean)
- Woo, H., Park, M.H., Jeong, S.J. and Kim, H.T. 2010. White river? green river? - sand/gravel bar succession to riparian vegetation in the rivers, Korea. *Proceedings of the 17th IAHR-APD, Auckland, New Zealand*.
- 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: 577-591.
- Woo, H., Park, M.H. and Kim, W. 2015. From white rivers to green rivers - why and they are changed? *Proceedings of the 36th IAHR Biennial Congress, Hague, the Netherlands*.