



## Ecohydraulics - the significance and research trends

Woo, Hyoseop<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Professor, School of Earth Science and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea

Paper number: 20-077

Received: 15 August 2020; Revised: 9 September 2020; Accepted: 9 September 2020

### Abstract

Ecohydraulics is a newly born discipline in the early 1990s by the interdisciplinary approach combined with aquatic ecology in one discipline and geomorphology, hydrology, and fluid hydrodynamics in another. Major areas of ecohydraulics can be delineated as habitat hydraulics (including environmental flow), vegetation hydraulics, eco-corridor hydraulics, eutrophication hydraulics, and ecological restoration hydraulics. Reviews of relevant international journals and literature reveal that ecohydraulics has remained in the limited areas of fish response, hydraulic modeling, and physical habitat response. It has not reached a truly interdisciplinary stage. Literature reviews in Korea reveal that only 3% of the total number of the papers listed in the Journal of KWRA during the last 24 years is related to ecohydraulics. It is about 20% of the total listed in the Journal of Ecology and Resilient Infrastructure. Most of those related to ecohydraulics in Korea concern vegetation hydraulics, habitat hydraulics, and ecological restoration hydraulics. In contrast, dynamic flow modeling areas, including turbulence, fauna motion simulation, and eutrophication hydraulics, are not found. Areas of further research in ecohydraulics in Korea may be specified as follows: 1) environmental flows adapted to the traits of the rivers in Korea, 2) development of the dynamic floodplain vegetation models (DFVM) to assess the changes from the white river to green river, 3) development of the eutrophication hydraulic model to predict the freshwater algal blooms, and 4) development of the models to evaluate the physical, chemical, and biological impacts of the stream restoration, decommissioning and removal of old weirs or small dams.

**Keywords:** Ecohydraulics, Interdisciplines, Habitat, Environmental flow, Dynamic floodplain vegetation model (DFVM), Eutrophication, Stream restoration

## 생태수리학의 의의와 전망

우효섭<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>광주과학기술원 지구환경공학부 산학교수

### 요 지

생태수리학은 수생생태학을 한 축으로, 지형학, 수문학, 유체동력학 등을 또 다른 한 축으로 1990년대 초 탄생한 다학제간 연구분야이다. 생태수리학을 흐름, 유사이송, 지형, 동식물, 수리구조물 등 5가지 주요인자 간 상호 관계나 작용을 기준으로 구분하면 서식처수리(환경유량 포함), 식생수리, 생태통로수리, 부영양화수리, 생태복원수리의 5개로 나눌 수 있다. 지난 20여 년간 관련 국제논문집에 게재된 생태수리학 관련연구는 물고기반응, 수리모델링, 물리서식처반응 분야에 치우쳤으며, 이는 아직 진정한 학제 간 상호반응적 연구단계로 진입하지 못했음을 의미한다. 한편 1997년 이후 한국수자원학회 논문집에 게재된 생태수리학 관련논문 수는 전체의 3% 수준에 불과하며, 생태수리학과 더 밀접한 응용생태공학회 논문집에 게재된 논문 수도 20% 수준에 머물렀다. 이 두 논문집에 게재된 논문들은 주로 서식처수리, 식생수리, 생태복원수리 분야이었으며, 난류모의를 포함한 동적 흐름모의, 동물유영모의, 부영양화수리 분야는 사실상 없는 것으로 나타났다. 국내의 하천특성 및 생태수리학의 사회적 수요를 고려하여 앞으로 연구개발이 시급한 분야는 1) 국내하천 여건에 맞는 환경유량의 평가기법, 2) 하이드로리버의 그린리버 변화현상을 평가할 수 있는 동적 홍수터식생모형(DFVM)의 개발, 3) 정수역 및 유수역에서 수리조건 중심으로 조류생성을 평가할 수 있는 모형개발, 4) 하천지형복원이나 소형 보/댐의 가동정지(decommissioning) 및 철거에 따른 물리/화학/생물적 영향을 평가할 수 있는 모형개발 등이다.

**핵심용어:** 생태수리학, 학제간, 서식처, 환경유량, 동적 홍수터식생모형(DFVM), 부영양화, 하천복원

\*Corresponding Author. Tel: +82-62-715-2443  
E-mail: hsw00603@gmail.com (H. Woo)

## 1. 서론

생태수리학(ecohydraulics)은 생태학(ecology)과 수리학(hydraulics)의 합성어이다. 전자는 19세기에 Ernst Haeckel이 처음 주창한 학문분야로서, 생물과 생물, 생물과 무생물 간의 관계를 연구하는 과학이다. 반면에 후자는 그보다 역사가 훨씬 오래된 분야로서, 물의 흐름, 특히 지구상 물의 흐름을 물리적으로 해석하는 기술이다. 따라서 생태수리학은 지구상 물의 흐름, 구체적으로 하천, 호소, 지하수, 해안에서 물흐름의 물리적 특성과 생물적 특성 간의 관계를 조사, 분석, 모의하는 응용수리학의 한 분야라 할 수 있다. 생태수리학은 생태학 관점에서 수생생물학(또는 수생생태학)과 수리학 관점에서 지형학, 수문학, 유체동역학 등과의 융복합적 연구분야이다(Journal of Ecohydraulics, 2020).

조금 더 구체적으로 생태수리학의 학문적 특성을 제시하면, Maddock *et al.* (2013)은 생태학과 수리학의 다학제적(multi-disciplinary) 연구로 시작하여, 점차적으로 상호작용적인 학제간(interdisciplinary) 연구로 발전하고 있으며, 나아가 여러 학제를 아우르는 범학제적(transdisciplinary) 연구로 향하고 있다고 표현하고 있다. 여기서 ‘transdisciplinary’는 ‘실 사용자들과 함께하는’ 의미이다.

인간사회의 새로운 수요를 만족하기 위해 다양한 학제간 융합 및 복합 연구가 진행되었으며, 생태수리학도 그 중 하나로써 1990년대부터 대두된 비교적 새로운 연구분야이다. 생태수리학의 시작은 유지유량증분법(Instream Flow Incremental Methodology, IFIM)이라 불리는 환경유량평가법에 초점을 둔 연구개발(Bovee, 1975; 1982)로 특정된 수생서식처 평가 기법의 개발부터이다(Petts, 2009).

수리기술자들이 생태적 과정, 특히 수생생태 과정을 이해하고 전통수리학과 연관지려는 노력이 처음 보인 것은 1989년 캐나다 오타와에서 열린 국제수환경공학회(IAHR) 대회이다. 그 후 IAHR 내에 이를 위한 T/F 팀이 만들어져 1991년에 ‘수리학과 환경’이라는 이름의 워크숍이 네덜란드에서 열렸으며(Van Boetzel *et al.*, 1991), 이어 1992년에 캐나다에서 ‘수리학과 환경영향평가를 위한 생태학’이라는 이름의 워크숍이 개최되었다. 그러나 본격적으로 생태수리학이라는 용어가 쓰이기 시작한 것은 IAHR과 국제수생모델링그룹(IAMG)이 공동으로 1994년에 노르웨이 트론히임에서 개최한 제1회 국제생태수리학 심포지엄(International Symposium on Ecohydraulics, ISE)이었다. 이어서 1996년에 캐나다 퀘벡에서 IAHR 주관으로 ‘댐과 저수지가 하천에 미치는 영향을 저감하는 기술과 측정’ 심포지엄이 열렸다(Woo, 2006). 그 후 거의 매2년마다 세계 각 대륙을 돌아가면서 국제생태수리학

심포지엄(ISE)이 개최되었으며, 우리나라에서도 2010년에 한국수자원학회 주관으로 서울에서 제8회 대회가 개최되었다. 마지막으로, 제13회 국제대회가 2020년 6월 프랑스 리옹에서 개최될 예정이었으나, 코비드-19 문제로 학술대회는 열리지 못했고, 논문특집 발간 등으로 변경, 축소되었다.

위와 같은 활동에 힘입어 IAHR은 생태수리학이라는 다학제연구분야 성과를 정리하고 전파할 플랫폼으로서 2016년에 ‘생태수리학 논문집(J. of Ecohydraulics, JoE)’을 출범시켰다(Kemp and Katopodis, 2016). 국내에서도 대학의 수공학 전공에서 생태수리학의 필요성을 공감하고 그에 맞는 교과내용도 제시되었다(Yoon, 2000).

본 연구는 21세기 들어 수리학분야의 하나로 새로이 확립된 생태수리학의 의의와 연구동향을 관련문헌을 검토하여 제시한다. 구체적으로, 1990년대 초 물분야 국제학계에 생태수리학 분야가 처음 대두된 이후 약 30년 가까이 지난 현재 이 분야 관련 총설논문(state-of-the-art review paper)을 중심으로 검토한다. 또한, 이 분야 국내 연구동향을 관련문헌을 가급적 모두 검토하여 분석한다. 마지막으로, 생태수리학 분야에서 앞으로 더 연구되어야 할 분야를 제시한다.

## 2. 생태수리학의 의의와 주요대상

물문제는 이제 어느 한 지역이나 나라에 국한된 것이 아니라 범지구적인 문제이다. 또한 생태계를 보전하는 것은 이제 지구상 인간을 포함한 모든 생명체의 생존에 직접적으로 관련된 사안이다. 이러한 범지구적 물과 생태계 문제를 UN 차원에서 공식적으로 처음 보여준 것은 1992년 리우환경회의에서 채택된 의제18(Agenda 18)이다. 일종의 UN 실천강령인 의제18에서 제15장이 종다양성의 보전, 즉 생태계의 보전이었고, 17장이 해양보호, 그리고 18장이 수자원이었다. 조금 더 근래 들어 2015년 9월 유엔정기총회에서 결의된 이른바 지속가능한 개발목표(SDGs) (UN, 2015)의 목표6이 ‘모두를 위한 물과 위생의 가용성과 지속가능한 관리의 보장’이라는 것이고, 목표14가 ‘해양생태계의 보전과 지속가능한 이용’, 목표15가 ‘육상생태계의 복원과 지속가능한 이용의 증진’이다.

여기서 목표6의 세부목표(targets)를 보면 6.5가 통합수자원관리이고, 6.6이 민물관련 생태계의 보호와 복원이다. 통합수자원관리는 중국적으로 물관리에 있어 물, 토지, 생태계를 통합적으로 접근하자는 것이며, 민물관련 생태계 관리(보호 및 복원)는 하천, 호소 등의 물관리에서 생태적 서식처를 보호, 복원하자는 것이다. 따라서 전자는 주로 생태수문학적 접근을 요구하는 것이며, 후자는 생태수리학적 접근을 요구

하는 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 생태수리학의 연구동향을 구체적으로 살펴보기에 앞서서 유사학술용어인 생태수문학과 유사성과 차별성을 논한다. 또한 생태수리학의 정의와 의미, 나아가 연구 범위 등을 검토하기 위해 생태수리학의 상위개념인 환경수리학과의 상호위계를 논한다. 일반적으로 어느 개념과 개념 간 유사성과 차별성 및 전체 및 부분(subset) 등 위계성을 논하는 것은 각각의 개념을 이해하는 방법론 중 하나이다.

생태계(ecosystem)는 하나의 시스템으로 작동하는, 주변 무생물환경 요소와 연관된 생물집단을 지칭한다. 이는 사실 자연환경 자체이다. 따라서 생태수리학은 크게 환경수리학의 범주에 포함될 수 있다. 환경수리학(environmental hydraulics)은 1970대부터 시작한 비교적 역사가 오래된 분야로서, 당초에는 하폐수와 냉각수의 해양, 하천 등 공공수역으로 조절방류에 따른 혼합현상에 초점이 맞추어졌다. 1990년대 중반에 미토목학회는 위와 같은 전통적인 환경수리학 분야에 수생서식처의 물리적 기반의 보전과 복원을 위한 생태수리학 분야를 추가하였다(ASCE, 1996; Neary *et al.*, 2000; 2001). 따라서 이와 같이 분류하면 생태수리학은 환경수리학의 일부로 볼 수 있으며, 실제 관련 학술대회에서는 주제 및 세부주제를 구분할 때 생태수리학은 환경수리학의 하위분야로 간주하곤 한다.

그러나 환경수리학은 당초 출범할 때부터 수체 내 혼합현상에 초점이 맞추어졌으며, 생태수리학은 시작부터 유사이송을 포함한 물흐름의 물리적 특성과 생태계 간의 관계에 초점이 맞추어졌으므로 엄밀하게 말하면 연구대상이 서로 다른 분야이다. 다만 환경이라는 용어가 넓은 의미에서 생태를 포함하므로 생태수리학은 편의상 환경수리학의 한 분야로 구분할 수 있을 것이다(Woo, 1999).

다음은 생태수리학과 생태수문학(ecohydrology)의 차이이다. 생태수문학은 문자 그대로 생태학과 수문학이 접목한 분야이다(Dunbar and Acreman, 2001). 여기서 접목이라는 것은 두 분야의 접촉면에서 인과과정이나 상호작용을 의미하며, 결국 생태수문학은 이러한 두 분야의 인과과정이나 상호작용을 조사, 이해, 모의하는 분야이다. 구체적으로, 생태수문학은 1990년대 초 물과 식물 간의 관계를 연구하는 식생생리학에서 출발하여 물과 지구화학 간의 관계로 확대되었다(Kim and Woo, 2004). 생태수문학의 주요 분야는 증산과 식물의 물이용, 생물의 수환경 적응, 그리고 생태과정과 수문순환 간 되먹임 등이다. 따라서 앞서 간단히 언급한 지속가능한 개발목표(SDG's)의 세부목표 6.5에서 제시된 통합수자원관리의 실천을 위해서는 주로 생태수문학적 지식과 자료가 요구된다.

수문학은 지구상의 물순환을 다루는 학문으로서, 일반적으로 그 대상이 되는 공간이나 시간 영역이 제한된 지리공간

에서 물흐름을 다루는 수리학보다 크다. 이에 따라 생태수리학은 생태수문학의 한 분야로 인식되기도 한다(Wood *et al.*, 2007). 여기서 수문학은 물의 질량보존(또는 물은 비압축성 유체이므로 단순히 부피보존) 법칙에 충실하여 물순환 현상을 조사, 모형화 하는 분야라 할 수 있다. 반면에, 수리학은 물의 질량보존법칙은 물론 운동량보존법칙까지 고려하여 물흐름 현상을 조사, 모형화 하는 분야라고 본다면, 생태수문학과 생태수리학 간 관계를 단순히 공간적 범위에서 두 분야를 비교평가하는 것은 피상적일 것이다. 실제 Gosselin *et al.* (2019)은 생태수리학과 생태수문학은 서로 중복되는 분야라기보다는 상호보완적인 학제간 연구임을 강조하였다.

다음은 생태수리학의 주요 연구대상이다. 생태수리학 분야의 유일한 전문논문집인 J. of Ecohydraulics (JoE)의 공동편집자인 Katopodis는 생태수리학의 주요분야로서 다음 세 가지를 꼽았다(Ecohydraulics, 2020).

- 수생생물의 운동, 능력 및 통로: 민물, 기수 및 염수에서 이동행동 및 생애단계별 필요사항, 상류 및 하류 이동시스템, 생물역학(거동, 유영능력, 생물에너지학, 모형화)
- 환경유량: 수생동식물 관련 수리 및 서식처 계량화와 모형화, 열 및 수질 관점에서 생태수문학, 개체군 역학 및 생태 모형화
- 수생 서식처 및 생태계의 복원: 형태동역학/유사이송/얼음동역학, 수변식생 동역학 및 모형화, 서식처 및 생태계 복원 및 댐 철거

Woo *et al.* (2015)은 생물과 무생물 간의 관계를 흐름, 유사, 지형, 수리구조물, 생물(식물/동물) 등 모두 5개의 인자들 간의 상호관계로 표시하였다. 본 연구에서는 이러한 다섯 인자들의 상호관계에서 Fig. 1과 같이 도출된 4개의 생태수리학 주요분야를 제시한다.

이 그림에서 먼저 흐름/유사이송/기층 및 소/여울/하도/홍수터 등 수생서식처의 물리조건과 수생동물 간 관계를 대표하는 서식처수리, 또는 용어를 일반화해서 서식처물리를 들 수 있다. 여기에는 수생동물 서식처 적합도와 흐름 간의 관계를 정량화 한 환경유량(e-flow)도 포함된다. 이는 Fig. 1에서 flow → geomorphology → fauna로 연결, 표시되었다. 이 그림에서 '유사이송'은 모든 과정에 직간접적으로 연결되어 있기 때문에 화살표가 해당 박스를 지나가도록 표기하였다.

반면에, 수생 및 수변 식물(식생)과 흐름 간의 관계는 식생에 의한 흐름저항으로 대표될 수 있다. 이는 Fig. 1에서 flora → flow로 표시되었다. 여기서 식생에 의한 흐름저항은 식생 종류 및 성장단계 별로 물리적 특성(줄기의 휨강도, 투영면적 등)에

따라 달라지기 때문에 생태수리학의 한 분야로 간주하였다.

흐름과 유사이송에 의한 식생과 지형 간 관계를 조사, 분석, 모의하는 생물지형학(bio-geomorphology)은 지형학의 한 분야이다. 여기에 하천 홍수터나 사주에서 흐름 및 유사이송과 식생생장과의 상호작용은 식생역의 확장 및 소멸에 직접적인 영향을 주는 과정이다. 이러한 과정 중 흐름(난류)과 유사이송 등을 미시적으로 계측, 분석, 모의하는 것이 난류식생수리이다(Yang *et al.*, 2011). 한편, 흐름 및 유사이송과 식생생장 및 소멸과의 상호과정을 거시적으로 모의, 예측하는 것을 동적식생모의라 한다. 여기에는 하천식생이 하도의 평면변화와 유사이송 및 분급에 미치는 영향등도 포함된다(Jang, 2013; 2016). 동적식생모의 중 특히 홍수터식생에 초점을 맞춘 것이 이른바 동적 홍수터식생모의(dynamic floodplain vegetation model, DFVM) (Benjankar *et al.*, 2011)라 한다. 난류식생수리와 동적식생모의는 Fig. 1에서 flow ↔ flora로 같이 표시되었다. 이러한 식생과정은 결과적으로 흐름저항에 되먹임으로 돌아간다. 따라서 식생 흐름저항과 난류식생수리 및 동적식생모의를 모두 묶어 Fig. 1에서 식생수리로 표기하였다.

수리구조물로 인한 인위적 동물이동통로를 다루는 생태통로수리는 Fig. 1에서 flow→hydraulic structure→fauna로 표기되었다. 여기에는 수생동물의 유영모의도 포함한다.

수질, 특히 부영양화와 흐름/유사이송/지형 조건을 다루는 동수역학 수질모형화는 Fig. 1에서 flow→pollutants→flora로 표시되었으며, 부영양화수리로 표시되었다. 그 이유는 생태수리학 관점에서 수질모형화의 주요대상은 일반 유·무기질 오염물질보다는 조류생장 및 사멸 등 생물관련이기 때문이다.

마지막으로, 생태복원수리 분야는 어느 한 요소와 동식물 간 관계에 국한된 것이 아니라, Fig. 1에 제시된 모든 요소들이

복합적으로 관련된 생물서식처복원 관련 수리학을 의미한다. 여기에는 생태관리 관련분야도 포함될 수 있을 것이다. 생태복원수리는 위 4가지 생태수리학 분야와 별개로 취급되어야 할 것이다.

지금까지 제시한 생태수리학의 주요분야중에서 서식처수리와 환경유량 두 분야 간 관계를 조금 더 설명하면 다음과 같다. 서식처수리는 환경유량의 산정에 관계없이 수생생태계 구성생물을 대상으로 개별 생물이나 생물군의 서식조건 적합도를 정량화 하면서 외부조건 변화에 따른 내부서식처의 적합도를 통합적으로 분석, 모의하는 것이다. 하천의 예를 들면 외부조건은 유량, 난류, 수온, 영양염류 농도 등이 될 수 있다. 따라서 이 중 유량조건 변화에 따른 특정생물이나 생물군의 서식처 조건을 계량화 하는 환경유량은 서식처수리학의 한 분야라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 환경유량은 서식처수리 분야에서 사회수요가 가장 크고, 분명한 분야이기 때문에 여기서는 이 둘을 묶어 서식처수리(환경유량)로 표시한다.

위와 같은 생태수리학의 5개 분야를 Katopodis의 3가지 분야와 서로 비교하면 환경유량(서식처수리)은 서로 같으며, 식생수리는 Katopodis의 세 번째 분야의 일부로 들어가 있으나, 이는 기본적으로 생태복원과 차원이 다른 독립적인 분야이다. 다음 생태통로수리는 Katopodis의 첫 번째 분야에 포함된다. 그러나 부영양화수리는 Katopodis의 분류에 나타나지 않은 분야이며, 생태복원수리는 Katopodis의 세 번째 분야에 해당된다.

지금부터 이 논문에서 생태수리학의 연구동향은 서식처수리(환경유량), 식생수리(흐름저항+식생모의), 생태통로수리, 부영양화수리, 생태복원수리 등으로 구분하여 검토한다.

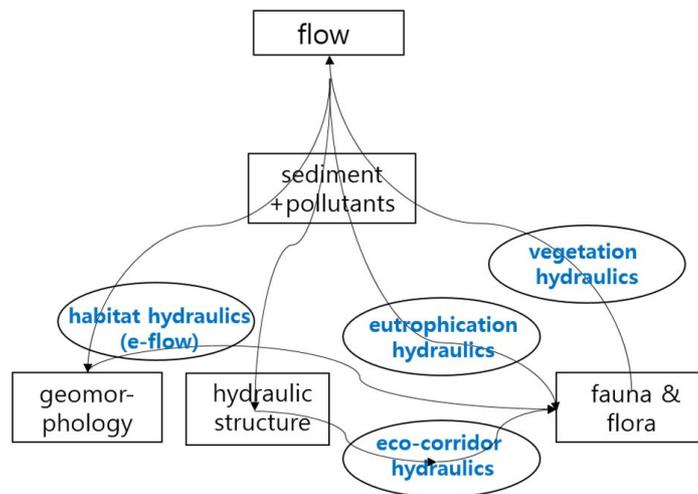


Fig. 1. A diagram showing five major factors (squares) related to ecohydraulics and its major areas (elliptic)

### 3. 연구동향

#### 3.1 기존 총설논문의 분석

생태수리학의 연구동향을 최초로 분석한 논문(Rice *et al.*, 2010)에 의하면, 1997년부터 2009년까지 약 12년 동안 ecohydraulics라는 이름이 논문 제목이나 초록, 핵심용어 등에 등장한 논문 수는 61편으로서, 비슷한 성격의 용어인 ecohydrology 관련 논문 수에 비해 상당히 적게 나타났다. 이 중 29개 논문이 수자원 및 기술 관련 논문집에, 19개 논문이 지구과학 관련 논문집에, 그리고 13개 논문이 생물/생태 관련 논문집에 수록된 것으로 나타났다. 이 같은 논문을 작성한 저자들의 전공을 소속 학과나 연구실 이름에서 유추하면 대부분이 지구과학이나 환경과학 분야이며, 다음으로 공학분야이고, 생물/생태 분야 저자들의 수는 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 생태수리학이 아직 주로 물리적으로 접근되는 분야임을 보여준다. Rice 등은 생태수리학이라는 이름이 지형학자나 수리기술자들이 생각하는 것만큼 생물/생태 학자들의 관심을 끌지 못하는 점을 지적하였다. 그럼에도 불구하고 수리기술자들에게 기대하는 것은 생태적, 동수역학적, 생물기계적 과정을 통합적으로 보여주는 이론적인 플랫폼의 구축이라고 하였다.

위 같은 문헌분석은 2016년에 'ISI web of knowledge database'를 통해 다시 시행되어 모두 165개 논문이 확인되었다(Casas-Mulet *et al.*, 2016). 이 중 반 이상이 여전히 수자원이나 기술 분야 논문집에 수록되었으며, 그 다음 지형학 분야이며, 생물/생태 분야는 가장 적어서 생태수리학 분야는 여전히 물리과학자들 중심이며, 생물학자나 생태학자들에게는 상대적으로 관심을 덜 받고 있음을 확인할 수 있다.

나아가 Casas-Mulet 등은 자연어생성(Natural Language Processing, NLP) 기법을 이용하여 생태수리학이 그동안 어떻게 발전했는지를 분석하였다. 구체적으로, 그들은 1994년부터 2016년까지 거의 2년마다 열린 총 11회의 국제 생태수리학 심포지엄(ISE)의 프로시딩에 실린 총 2,265개의 논문을 대상으로 앞서 설명한 다학제적, 학제간, 범학제적 특징의 정도를 분석하였다.

Casas-Mulet 등의 분석결과 중 몇 개를 소개하면 먼저, 연간 발표된 논문의 수를 보면 Fig. 2와 같이 논문 수는 매년 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다.

논문발표자들의 대륙별 분포를 보면 전체 논문의 31%가 북유럽에서 나왔으며, 그 다음 아시아가 20%, 북아메리카가 18%를 차지하여, 이 세 지역이 모두 약 70%를 차지하였다. 그 밖에 아프리카, 중남미, 중동 지역 등이다. 생태수리학이 당초 노르웨이 등 북유럽에서 새로이 시작한 분야임을 감안하면 위

대륙별 비율은 자연스러운 결과로 보인다. 아시아 지역이 비교적 높게 나타난 이유는 특히 2010년 서울대회에서 발표논문 수 전체의 68%가 한국을 포함한 아시아 지역이었기 때문이다.

다음 생태수리학의 주제별 분류로 수문학, 수리모델링, 흐름반응, 물리서식처 반응, 수질, 식생반응, 무척추동물 반응, 물고기반응, 하구반응, 사회반응 등 10개로 구분하였다. 이 기준으로 위 분석결과 물고기반응, 수리모델링, 물리서식처 반응 등 세 분야가 두드러지게 자주 나타났다. 이처럼 점차 넓어지는 연구분야와 지역 등을 감안하면 생태수리학은 다학제적 연구성격이 강한 특징을 보여준다.

그러나 20년이 지난 다음에도 주요 연구분야가 위 세 분야에 치우치는 현상은 생태수리학이 진정한 학제간 상호반응적 연구특징이 아직 충분하지 않음을 방증하는 것이다. 즉 생태수리학은 아직 물리적 접근 중심이지 생물, 생태적 접근이 그만큼 따라오지 못함을 보여준다고 할 수 있다. 이는 수리학과 생태학은 1) 공간적 시간적 규모 면에서 차이가 있고, 2) 모형화 접근방식이나 기법이 기본적으로 다르며, 3) 수학적 표현, 개념 가정 등에서 서로 다른 조합을 이용하며, 4) 서로 다른 형상의 복잡성과 불확실성이 있는 문제를 제기하고 있다는 점에서 기본적으로 서로 다른 분야이기 때문일 것이다(Nestler *et al.*, 2016).

한편, 위 10개 분야의 각 세부분야 중 서식처 물리구조, 1차원 수리모형, 어도 분야 등은 생태수리학 태동기에 비해 점차 줄어드는 것으로 나타났는데, 위 세 분야는 상대적으로 이미 어느 정도 완성되었음을 암시하는 것이다(Maddock *et al.*, 2013). 반면에, 상대적으로 연구빈도가 증가한 분야로는 유수(流水)의 질, 오염물질, 얼음동역학 및 환경정책 등이었다. 비슷한 다른 예는 대형무척추동물 관련 연구로서, 이는 학제간 연구가 점차 증가하는 것을 암시한다.

세 번째, Casas-Mulet *et al.* (2016)의 연구에서 이른바 범학

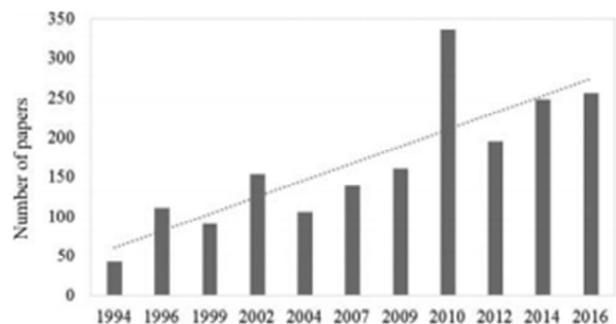


Fig. 2. Yearly changes in number of the papers presented in each ISE (excerpted from Fig. 2 in Casas-Mulet *et al.*, 2016) (The 8<sup>th</sup> ISE was held in Seoul, Korea, 2010)

제적 특징은 전술한 바와 같이 생태수리학 태동기부터 어느 정도 나타났지만 20년이 지난 후에 그 정도가 크게 증가하지 않은 것으로 나타났다. 이는 연구자들이 그 동안 실무이용자와 소통하면서 현장에 적용하려는 노력을 크게 하지 않았다는 방증으로 볼 수 있다.

1990년대 이후 길지 않은 생태수리학의 발전사에서 중요한 비중을 차지하는 것은 2013년에 발간된 ‘생태수리학-통합적 접근’이라는 책(Maddock *et al.*, 2013)과 2016년 창간된 생태수리학 논문집(Kemp and Katopodis, 2016)이다. 다만 후자는 생태통로수리 분야와 환경유량에 치우쳐있으며, 그밖에 식생수리, 부영양화수리, 생태복원수리 분야는 사실상 관련 논문이 빈약하다.

### 3.2 생태수리학 책 분석

‘Ecohydraulics - An Integrated Approach’ 책은 생태수리학이라는 신생 대학제적 연구분야가 유럽에서 시작하여 북미, 남아프리카, 아시아태평양 등으로 어느 정도 확대된 2013년에 발간된 책(Maddock *et al.*, 2013)으로서, 그 당시 생태수리학의 기술동향 성격이었다. 편집자들은 주로 영국과 노르웨이 전문가들이다. 이 책에는 서론성격의 논문부터 시작하여 방법론과 접근법 분야에서 7편, 종-서식처 상호작용 분야에서 7편, 관리적용 사례 분야에서 9편, 그리고 결론 성격의 논문 1편 등 모두 25편의 논문으로 구성되었다.

위 논문들 중 서론과 결론 성격의 논문 각 1편을 제외한 23편의 논문을 앞서 구분한 생태수리학의 5개 분야로 나누어 분석

하면 다음 Table 1과 같다. 여기서 첫 번째 서식처수리 분야의 동적 흐름모의는 난류모의를 포함한 미시적 1, 2, 3 차원 서식처수리특성을 모의하는 것을 의미한다. 두 번째 식생수리 분야의 난류 및 동적 식생모의는 난류식생수리와 동적식생모의를 구분 없이 표시한 것이다.

위 결과에서 알 수 있는 것은 그 당시 생태수리학의 중심적 과제는 서식처에서 생물과 주변 비생물환경의 물리조건(수리조건이 지배적이지만) 간 상호작용에 대한 이해와 모형화, 나아가 실무적용을 위한 환경유량 결정 등이었다. 다음 식생의 동적 식생모의와 생태복원수리 관련 이슈가 그 뒤를 따랐다.

### 3.3 생태수리학 논문집(JoE) 분석

한편 2016년에 출범한 JoE의 논문을 검토하면 2016년부터 2020년 상반기까지 총 58개의 논문 중 총설 성격이나 생태수리학과는 직접 관련이 없는 논문들을 제외하고 46개의 논문들에 대해 위와 같은 분류를 기준으로 분석하면 다음 Table 2와 같다.

위 결과에서 바로 알 수 있는 것은 생태수리학 논문집에 실린 논문들은 대부분 어도, 환경유량, 서식처수리, 동물유영 등에 관련된 것들로서, 특히 어도 관련 논문이 거의 반 가까이 차지하고 있다. 반면에 동적 흐름모의나 동적식생모의, 부영양화, 생태복원 관련분야는 사실상 없는 것으로 나타났다. 동시에 이 결과는 JoE 논문집이 어류서식처 조건, 환경유량, 어도, 물고기 유영 등 특히 어류관련 생태수리학 전문가들 중심으로 운영되고 있음을 암시하는 것이다.

Table 1. Number of papers in each area of ecohydraulics in the book of Ecohydraulics - An integrated approach

area	number of papers (%)	sub-areas (number of papers)	note
habitat hydraulics	14 (61%)	general (8), dynamic flow modeling (including turbulence) (2), environmental flow (4)	
vegetation hydraulics	4 (17%)	turbulence and dynamic vegetation modeling (4), flow resistance (0)	
eco-corridor hydraulics	2 (9%)	fish ladder (2), fauna-motion simulation (0)	
eutrophication hydraulics	0 (0%)	-	
ecological restoration hydraulics	3 (13%)	-	

Table 2. Number of papers in each area of ecohydraulics in J. of Ecohydraulics

area	number of papers (%)	sub-areas (number of papers)	note
habitat hydraulics	14 (30%)	general (6), dynamic flow modeling (including turbulence) (1), environmental flow (7)	
vegetation hydraulics	6 (13%)	turbulence and dynamic vegetation modeling (1), flow resistance (5)	
eco-corridor hydraulics	26 (57%)	fish ladder (21), fauna-motion simulation (5)	
eutrophication hydraulics	0 (0%)	-	
ecological restoration hydraulics	0 (0%)	-	

### 3.4 국내연구동향

생태수리학 관련 국내연구동향을 분석하기 위해 한국수자원학회 논문집(JoKWRA)과 응용생태공학학회 논문집(Ecology and Resilient Infrastructure, E&RI)을 중심으로 조사하였다. 조사분석 시작연도는 생태수리학이 국제적으로 1990년대 초에 태동하였고, 이 분야가 국내에 소개, 도입된 것이 환경유량 관련연구가 처음 시작된 1990년대 중반(Woo *et al.*, 1998)인 점을 감안하였다. 여기에 JoKWRA가 1997년부터 D/B화가 되어 있는 점을 감안하여, 조사분석 대상기간은 1997년 이후로 하였다. 그 결과는 다음 Table 3과 같다.

1997년 이후 2020년 5월호까지 JoKWRA에 게재된 총 약 2,200개의 논문 중에서 위에서 분류된 생태수리학 관련 논문 수는 총 64개로서, 전체의 약 3% 수준에 불과하다. 이는 국내에서 생태수리학 관련 연구는 아직 본격적인 궤도에 오르지 못했다는 반증이다. 더욱이 2010년대 하반기 들어 생태수리학 관련 논문 출현빈도는 대폭 줄어드는 것으로 나타났다.

분야별로는 식생수리 분야, 특히 흐름저항이나 식생호안 침식 등 실무적으로 중요한 분야가 가장 많이 나타났으며, 다음 서식처수리 분야와 환경유량 분야가 그 뒤를 따랐다. 그 다음은 생태복원 관련 분야가 비교적 많이 나타났으나, 이 분야는 자연도평가 등 생태수리학의 어느 한 고유분야라기보다는 종합분야 성격이 강하다. 그 다음 실무적으로 중요한 어도분야로 나타났다.

우리나라에서 생태학과 토목공학의 융복합 성격으로 유일한 논문집인 E&RI는 2014년에 창간되어 2020년 상반기까지

총 208편의 논문이 수록되었다. 이중 아래 생태수리학 범주에 포함되는 논문 수는 총 42편으로서 전체의 20%를 차지한다. 이를 분야별로 나누면 다음 Table 4와 같다.

위 통계를 보면 서식처수리 분야와 식생수리 분야가 가장 많이 나타났으며, 특히 식생과 흐름의 상호작용에 관련된 동적 식생모의 분야가 상당한 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 관련 전문가들이 그 동안 다른 논문집보다는 위 논문집에 집중적으로 투고한 결과로 보인다. 반면에 전통적으로 수리학의 범주에서 다루었던 흐름과 식생 간 관계인 마찰저항이나 침식저항 관련 논문은 상대적으로 적게 나타나 이는 전통수리학 논문집인 JoKWRA에 투고한 결과로 보인다. 이 같은 경향은 어도, 즉 생태통로수리 분야의 투고 수에서도 같은 양상을 보인다. 그러나 전통수리학 논문집이든 생태수리학 관련 논문집이든 동적흐름모형의 개발, 동물유영의 모의, 부영양화수리 분야는 국내에서 사실상 연구활동이 거의 없는 것으로 보인다. 이는 하천이나 호소의 부영양화 현상이 우리나라에서 특히 2010년대 초부터 사회적 이슈로 등장했음에도 불구하고 생태수리학 측면에서 부영양화수리 관련 연구가 진행되지 못했음을 보여준다.

### 3.5 대표적 국내연구사례

위에서 제시한 한국수자원학회 논문집에 실린 생태수리학 관련논문 60여 편과 응용생태공학학회 논문집에 실린 관련논문 40여 편, 계 100여 편 논문 중 위의 표에 제시된 5개 분야별로 대표적인 논문 1~2 편씩 간략히 소개한다. 다만 부영양화수

Table 3. Number of papers in each area of ecohydraulics in J. of Korea Water Resources Association

area	number of papers (%)	sub-areas (number of papers)	note
habitat hydraulics	18 (28%)	general (10), dynamic flow modeling (including turbulence) (1), environmental flow (7)	
vegetation hydraulics	21 (33%)	turbulence and dynamic vegetation modeling (8), flow resistance (13)	
eco-corridor hydraulics	7 (11%)	fish ladder (5), fauna-motion simulation (2)	
eutrophication hydraulics	4 (6%)	-	
ecological restoration hydraulics	14 (22%)	-	

Table 4. Number of papers in each area of ecohydraulics in J. of Ecology and Resilient Infrastructure

area	number of papers (%)	sub-areas (number of papers)	note
habitat hydraulics	16 (38%)	general (15), dynamic flow modeling (including turbulence) (0), environmental flow (1)	
vegetation hydraulics	15 (36%)	turbulence and dynamic vegetation modeling (12), flow resistance (3)	
eco-corridor hydraulics	0 (0%)	fish ladder (0), fauna-motion simulation (0)	
eutrophication hydraulics	2 (5%)	-	
ecological restoration hydraulics	9 (21%)	-	

리 분야는 해당논문을 찾을 수 없어 생략한다. 이렇게 직접 소개하는 이유는 본 논문은 총설논문이기 때문에 가능한 많은 독자들이 관심을 가지고 읽을 수 있도록 하고, 특히 젊은 독자들이 생태수리학이라는 신생 학술분야와 직접적으로 교감하면서 흥미를 가지도록 유도하기 위함이다. 다만 각 분야별 논문 선정은 저자의 주관적인 판단이므로 대표성이 없음을 밝힌다.

### 3.5.1 서식처수리 분야: 환경유량

이 분야의 논문 중에서 여기에 소개하는 것은 2009년에 한국수자원학회 논문집에 실린 ‘용담댐 하류의 하천건강성 평가 및 어류 서식처를 고려한 최적 생태유량 산정’(Heo and Kim, 2009) 논문이다. 제1저자는 어류학자이며, 제2저자는 하천수리/수질 전문가로서 학제간 공동연구의 전형을 보여준다. 저자들은 금강의 용담댐 하류에서 환경유량을 산정하기 위해 먼저 어류모니터링을 하여 종별 서식환경특성조사를 하였다. 이를 토대로 어류상, 상대풍부도 및 생물다양도 분석 등 하천의 건강성 평가를 하였다. 이 중 수리, 피라미 및 감돌고기 등에 대하여 서식처적합도 지수(HSI)를 개발하였으며, 물리적 서식처 모의시스템(PHABSIM)을 이용하여 적합한 환경유량을  $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 추정하였다. 이 연구의 장점은 해당 하천구간에서 직접 어류조사를 하여 그 결과를 토대로 주요 종별 서식처적합도 지수를 개발하였다는 점이다. 이 연구는 새로운 기법을 개발한 것은 아니지만 국내자료가 흔하지 않은 서식처적합도지수를 직접 도출하였다는 점에서 의의가 있다. 다만 이 논문에서 환경유량(environmental flow)이라는 국제용어가 있음에도 불구하고 ‘생태유량’이라는 다소 모호한 용어를 사용하였다는 점이 거슬려 보인다.

### 3.5.2 식생수리 분야: 난류식생수리

이 분야의 논문은 주로 실험실 수로에서 모의식생을 가지고 난류를 실측하거나, 이론적으로 난류모형을 개발하거나, 난류를 계산하는 연구이다. 여기서 소개하는 것은 실험논문으로서, 2011년에 한국수자원학회 논문집에 실린 ‘침수식생 개수로에서 난류 및 부유사이송 특성’(Yang *et al.*, 2011) 논문이다. 이 논문의 제3저자는 국내에서 난류식생수리 분야 연구를 주도해온 연구자이다. 이 논문은 흐름에 완전히 잠긴 식생수로에서 난류와 유사이송 특성에 관한 실험연구이다. 이 연구에서 모의식생이 있는 개수로의 유사이송 흐름에서 레이저도플러 유속계로 난류를 측정하였고, 튜브를 이용하여 사이편 방식으로 부유사 농도를 측정하였다. 그 결과 평균유속은 상부영역에서 식생이 없는 수로와 같이 대수함수분포를 보이나, 식생영역에서는 식생항력으로 인하여 유속이 감소하였

다. 레이놀즈응력은 상부영역에서 선형함수로, 식생영역에서 지수함수 형태로 근사하였다. 마지막으로, 부유사 농도분포는 Rouse 수가 커짐에 따라 상부영역의 농도가 매우 균일하게 되는 것으로 나타났다. 이는 전단층에 의해 상부영역에서 난류가 강화되었기 때문이다. 이러한 실험자료는 난류식생모형의 검증에 유효하게 사용될 수 있을 것이다.

### 3.5.3 식생수리 분야: 동적식생모의

이 분야의 논문은 앞서 설명한 것과 같이 홍수터식생의 생장에 초점을 맞춘 경우와 하도변화에 초점을 맞춘 경우로 나눌 수 있다. 전자는 국내에서 2010년대 초부터 본격적으로 시작된 연구분야이며(Woo *et al.*, 2019), 후자 역시 2010년대부터 한 연구팀에 의해 지속적으로 연구된 분야이다(Jang, 2013). 전자의 경우 해당논문 자체가 그 분야의 총설성격의 논문이므로 그 논문을 직접 확인하는 것이 바람직하고, 여기서는 후자에 대해 간단히 소개한다. Jang (2013)은 실험실에서 식생변화에 따른 하도의 수리적 특성, 저수로변화, 사주거동, 하안안정성 등을 정량적으로 파악하였다. 이 실험은 인공식생이 아닌 실제식생인 알팔파를 수로에 키워서 수행하였다. 그 결과 홍수터식생에 의하여 저수위가 고착되어 하도안정성이 커지고, 하도내 사주이동속도는 감소하고, 하상이 불규칙하게 변하면서 사주 수는 증가하였다. 또한 식생밀도가 증감함에 따라 하안안정성은 커지고, 유사유출량 자체와 변동성이 줄어들었다. 이러한 연구는 혼합사 흐름에서 하도변화 및 분급 실험까지 확대되었다(Jang, 2016). 이러한 연구의 의의는 실험실 수로에 실제 식물을 심어 흐름과 유사이송 양상을 재현했다는 점이다.

### 3.5.4 생태통로수리: 어도

이 분야의 국내논문은 대부분 어도실험에 초점을 맞추고 있다. 대상 물고기는 실물을 이용하여 실험하는 것이 추세이다. 여기서 소개하는 것은 2001년에 한국수자원학회 논문집에 나누어 실린 ‘어도 생태수리실험에 의한 회유성 어류의 소상능력 평가(I) - 사다리식 어도’(Park, 2001a) 논문과 같은 제목의 ‘계단식 어도’(Park, 2001b)이다. 전자는 각 단계별로 흐름에너지 감쇄벽(baffles)을 설치한 어도이며, 후자는 그야말로 계단 위에서 물이 쏟아지는 형태의 어도이다. 먼저, 사다리식 어도 실험연구에서는 회유성 어종인 은어와 송어를 대상으로 소상능력에 영향을 미치는 주요인자로 어도유량, 어도경사, 어도입구부의 어도와 하상 간 낙차 등을 도출하였다. 이 연구에서 동해안지역에 설치된 사다리식 어도경사는 너무 커서 물고기 소상이 제한적임을 확인하였다. 계단식 어도 연구

에서도 같은 어종을 대상으로 실험하였다. 계단식 어도에서 낙차가 16.0 cm 미만으로 작을 때는 은어가 송어보다 소상능력이 크고, 20.0 cm 이상으로 낙차가 클 때는 송어가 큰 것으로 확인되었다. 이 연구에서는 계단식 어도의 설치시 어도내 상류와 하류 용덩이 간 낙차는 20 cm 미만이 바람직하다는 결론을 내렸다.

### 3.5.5 생태복원수리

이 분야는 복합연구성격이 강한 분야이다. 따라서 여기서는 생태복원수리 분야의 어느 특정한 연구보다는 이 분야 전반에 관련된 연구사례를 소개한다. Woo (2017)는 ‘하천생태계 기능, 서비스, 가치 관점에서 본 하천복원 정의 및 모형의 고찰’이라는 연구에서 하천복원에 대해 하천기술자와 생태학자 간 이해와 사고의 간격을 좁히기 위해 먼저 하천생태계의 기능, 재화와 용역에 대해 de Groot *et al.* (2002)의 논문을 기준으로 분석적으로 제시하였다. 이를 토대로 지금까지 알려진 하천복원을 포함한 유사활동의 정의와 복원전략을 재고찰하였다. 이를 토대로 하천복원의 목표에 따라 생태서식처 복원을 목표로 하는 생태복원모형(ERM), 하천이 주는 친수효과를 강조하는 어메너티복원모형(ARM), 그리고 제한된 여건에서 생태서식처 복원을 목표로 하는 준생태복원모형(semi-ERM) 등을 구분하여 제시하였다.

## 4. 향후과제

Maddock *et al.* (2013)은 ‘생태수리학 연구의 필요성, 도전 및 미래’라는 글에서 인공적인 유향변화에 따른 환경유량의 평가, 하천복원, 수생태통로라는 세 가지 사회적 수요에서 생태수리학의 도전 및 미래 연구방향을 제시하였다. 이들은 여전히 생태수리학 관련 다른 사회적 수요는 강조하지 않았다.

그들은 다만 수문학과 수리학의 연결고리인 강우-유출모형의 완성, 미소서식처 수리현상을 모의·평가할 3차원 동수역학모형 개발 및 실용화 측면에서 연구가 필요함을 강조하였다. 나아가 연구대상 공간을 지금과 같이 하천흐름뿐만 아니라 저수지나 호수 같은 정수상태의 수체, 하구 및 해안역으로 확대할 것을 강조하였다.

구체적으로, 이들이 강조한 미래(2013년 기준)의 생태수리학 연구방향은 다음과 같다.

- 흐름의 난류성분이 개별 생물 및 생태군집에 미치는 영향을 이해하는 것

- 학제간 및 범학제적 연구성과의 이용자들을 위해 수리적으로 타당한 정보와 생태자료를 통합할 수 있는 능력
- 생태수리학의 시공간적 자료, 변수 및 결과의 이전성을 높이는 것(생물/생태 학자들이 쓸 수 있게 제공하는 것)
- 과학적 연구개발 성과와 환경유량/하천복원 같은 실무적 적용 및 관리 방법 간 틈을 메꾸는 것

위와 같이 Maddock *et al.* (2013)이 제시한 연구방향은 첫 번째 항의 난류와 서식처 등과 같이 구체적인 분야도 있지만, 대부분 생물/생태학자 등 타분야 전문가들과 연구성과의 직접이용자들에게 제공되는 연구성과의 활용방안들이다.

여기서 우리나라의 일반적 하천여건을 제시하면, 1) 많은 하천들이 크고 작은 댐(다목적, 수력발전, 농업용)으로 막혀있어 직하류는 영속적이거나 상당기간 건천화 되어 있고, 2) 외국과 달리 환경유량 설정을 위한 적절한 수생동물이 별로 없으며, 3) 복구, 일본, 북미 등에 비해 회유성어류(바다에서 강으로)가 제한적이어서(동해안 연어 등 일부에 국한) 인위적 생태통로 필요성을 절감하지 못하고 있으며, 4) 거의 전국에 걸쳐 모래/자갈 사주하천이 풀과 관목류로 가득 찬 식생하천으로 변모하는 이른바 화이트리버의 그린리버화 현상(Woo, *et al.*, 2019)이 가속되고 있고, 5) 하천이나 호소에서 부영양화 현상이 사회적 이슈가 되었음에도 불구하고 수리적 측면에서 부영양화 현상을 모의할 수 있는 연구가 부재하며, 6) 하천지형의 복원, 보/댐의 가동중지 및 철거 등에 따른 하천의 물리/화학/생물적 영향의 평가기법이 부재하다는 점이다. 여기서 맨 마지막 항, 6)은 하천복원이나 기능과 용도가 없는 댐/보/철거사업 등에 대한 환경영향평가라 할 수 있다.

이렇게 국내에서 당면한 문제점들과 생태수리학 관련 우리나라 현재 기술수준을 고려하여 앞으로 연구개발이 시급한 분야를 제시하면 다음과 같다.

- 서식처수리(물리): 인위적 하천변경(유향 및 지형)에 따른 우리나라 하천여건에 맞는 환경유량의 평가 기법(대표 생물종의 선정 포함)
- 식생수리: 화이트리버의 그린리버 변화현상을 모의, 평가할 수 있는 동적 홍수터식생모형(DFVM)의 개발
- 부영양화수리: 정수역 및 유수역에서 수리조건 중심으로 조류생성을 평가할 수 있는 모형의 개발
- 생태복원수리: 하천지형복원이나 보 및 소형 댐 가동중지(decommissioning) 및 철거에 따른 물리/화학/생물적 영향을 모의, 평가할 수 있는 모형의 개발

## 5. 요약 및 결론

생태수리학은 생태학과 수리학의 합성어이다. 이는 생태학 관점에서 수생생물학(또는 수생생태학)과 수리학 관점에서 지형학, 수문학, 유체동역학 등과의 다학제적, 학제간적, 범학제적 연구분야이다.

생태수리학의 주요 구성인자인 흐름, 유사이송, 지형, 동식물, 수리구조물 등 5가지 인자 간 상호 관계나 작용을 기준으로 그 분야를 구분하면, 서식처수리(환경유량 포함), 식생수리, 생태통로수리, 부영양화수리, 생태복원수리 등 5개 분야로 나눌 수 있다.

생태수리학 분야의 출범 이후 관련 연구논문은 주로 수자원 관련 논문집이나 지구과학 관련 논문집에 수록되었으며, 상대적으로 적은 수의 논문이 생물/생태 관련 논문집에 수록된 것으로 나타났다. 생태수리학은 아직 환경과학이나 하천공학 분야로 간주되며, 생물/생태 분야라는 인식은 매우 제한적인 것으로 나타났다. 생태수리학은 하천지형학자나 하천수리기술자들이 생각하는 것만큼 생물/생태 학자들의 관심을 끌지 못하고 있다.

생태수리학을 수문학, 수리모델링, 흐름반응, 물리서식처 반응, 수질, 식생반응, 무척추동물 반응, 물고기반응, 하구반응, 사회반응 등 10개의 주제로 구분하면, 물고기반응, 수리모델링, 물리서식처 반응 분야가 가장 자주 등장하였다. 생태수리학이 탄생한 지 20년이 지난 후에도 주요 연구분야가 위 세 분야에 치우치는 현상은 생태수리학이 진정한 학제간 상호반응적 연구특징이 아직 충분하지 않음을 암시하는 것이다. 즉 생태수리학은 아직 물리적 접근 중심이지 생물, 생태적 접근이 그 만큼 따라오지 못함을 보여준다고 할 수 있다.

한편 JoKWRA와 E&RI를 기준으로 생태수리학의 국내 연구동향을 보면 서식처수리 분야와 식생수리 분야가 가장 많이 나타났다. 반면에, 난류를 고려한 동적흐름모의, 동물유영의 모의, 부영양화수리 분야는 국내에서 사실상 연구활동이 없는 것으로 보인다.

결론적으로, 생태수리학 관련 국내 하천특성, 관리실태, 기술수준 등을 고려하여 앞으로 연구개발이 시급한 분야를 제시하면 다음과 같다.

- 서식처수리: 인위적 하천변경(유황 및 지형)에 따른 우리나라 하천여건에 맞는 환경유량의 평가기법(대표생물종의 선정 포함)
- 식생수리: 화이트리버의 그린리버 변화현상을 모의, 평가할 수 있는 동적 홍수터식생모형(DFVM)의 개발

- 부영양화수리: 정수역 및 유수역에서 수리조건 중심으로 조류생성을 모의, 평가할 수 있는 모형의 개발
- 생태복원수리: 하천지형복원이나 보 및 소형 댐 가동중지(decommissioning) 및 철거에 따른 물리/화학/생물적 영향을 모의, 평가할 수 있는 모형의 개발

마지막으로, 본 연구는 제한된 시간과 노력으로 생태수리학 분야의 연구동향을 도출하였기 때문에, 필자가 충분히 이해하지 못했거나 일부 오해한 부분도 있을 수 있음을 밝힌다.

## 감사의 글

본 연구는 제1저자가 연구책임자로 있는 ‘친환경 신소재를 이용한 고강도 제방 기술개발 연구사업 (2016. 6~2021. 5)’ (#17AWMP-B114119-02) 연구사업에서 식생 제방 및 호안을 식생수리 측면에서 검토한 것에 기초하였으며, 이 연구사업을 지원한 국토교통과학기술진흥원에 깊은 감사를 표한다.

## References

- ASCE Task Committee on Hydraulic Engineering Research Advocacy (1996). "Environmental hydraulics: New research directions for the 21st century." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122, No. 4, pp. 180-183.
- 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*, Vol. 92, No. 12, pp. 3058-3070.
- Bovee, K.D. (1975). *The determination, assessment, and design of in-stream value studies for the northern Great Plains region*. Master thesis, University of Missouri, C.U., U.S. p. 129.
- Bovee, K.D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using instream flow incremental methodology*. FWS/OBS-82/26, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C., U.S., p. 248.
- Casas-Mulet, R., King, K., Hoogeveen, D., Duong, L., Lakhanpal, G., Baldwin, T., Stewardson, M.J., and Webb, J.A. (2016). "Two decades of ecohydraulics: Trends of an emerging interdisciplinary." *Journal of Ecohydraulics*, pp. 1-15.
- De Groot, R.S., Wilson, M.A., and Boumans, R. (2002). "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods, and services." *Ecological Economics*, Vol. 41, pp. 393-408.
- Dunbar, M.J., and Acreman, M.C. (2001). "Applied hydro-ecological science for the twenty-first century." *Hydro-Ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology*, Edited by Acreman, M.C.,

- International Association of Hydrological Science, pp. 1-18.
- Ecohydraulics (2020). accessed 15 July, 2020, <<https://ecohydraulics.org/about/what-is-it/>>.
- Gosselin, M.-P., Ouellet, V., Harby, A., and Nestler, J. (2019). "Advancing ecohydraulics and ecohydrology by clarifying the role of their components interdisciplines." *Journal of Ecohydraulics*, Vol. 4, No. 2, pp. 172-187.
- Heo, J.U., and Kim, J.K. (2009). "Assessment of riverine health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of Yongdam dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 6, pp. 481-491.
- Jang, C.-R. (2013). "Experimental analysis of the morphological changes of the vegetated channels." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 909-919.
- Jang, C.-R. (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*, Vol. 49, No. 1, pp. 73-81.
- Journal of Ecohydraulics (2020). accessed 9 July, 2020, <<https://think.taylorandfrancis.com/ecohydraulics/>>.
- Kemp, P.S., and Katopodis, C. (2016). "Introducing the Journal of Ecohydraulics: Fundamental and applied research on the road to transdisciplinarity." *Journal of Ecohydraulics*, Vol. 1, pp. 1-4.
- Kim, Y.S., and Woo, H. (2004). "Introduction of ecohydrology." *Magazine of KWRA*, Vol. 37, p. 5.
- Maddock, I., Harby, A., Kemp, P., and Wood, P. (2013). "Ecohydraulics: An introduction." *Ecohydraulics: An Integrated Approach*, Wiley-Blackwell, Chichester, U.K., pp. 1-6.
- Neary, V., Diplas, P., and Lynn, D. (2000). "The environmental hydraulics technical committee within EWRI." Forum paper, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 5, p. 320.
- Neary, V., Diplas, P., and Lynn, D. (2001). "New directions in the environmental hydraulics technical committee." *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, EWRI-ASCE, May 20-24, Orlando, F.L., U.S.
- Nestler, J.M., Stewardson, M.J., Gilvear, D.J., Webb, J.A., and Smith, D.L. (2016). "Ecohydraulics exemplifies the emerging paradigm of the interdisciplines." *Journal of Ecohydraulics*, Vol. 1, No. 1-2, pp. 5-15.
- Park, S.D. (2001a). "Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (I) - baffled fishways." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 365-379.
- Park, S.D. (2001b) "Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (II) - pool and weir type fishway." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 381-390.
- Petts, G.E. (2009). "Instream flow science for sustainable river management." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 45, pp. 1071-1086.
- Rice, S.P., Little, S., Wood, P.J., Moir, H.J., and Vericat, D. (2010). "The relative contributions of ecology and hydraulics to ecohydraulics." *River Research and Applications*, Vol. 26, No. 44, pp. 363-366.
- United Nations (UN) (2015). accessed 6 August, 2020, <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communicationsmaterial/>>.
- Van Boetelaer, M.E. van Geldermalsen, L.A., Vrijling, J.K., and Prins, J.E. (1991). "Hydraulics and the environment, partnership in sustainable development." *Extra issue of Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 29.
- Woo, H. (1999). "Turn eyes on environmental hydraulics." *Magazine of KWRA*, Vol. 32, No. 5.
- Woo, H. (2006). "Ecohydraulics: another mission of hydroscintists and engineers." *Water and Future*, KWRA, Vol. 9, No. 4, pp. 12-20.
- Woo, H. (2017). "Assessment of definitions and models of river restoration based on the functions, services, and values of river ecosystem." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 4, No. 3, pp. 123-129.
- Woo, H. Cho, K.H., Jang, C.R., and Lee, C.J. (2019). "Fluvial processes and vegetation-research trends and implications." *Journal of Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 6, No. 2, pp. 89-100.
- Woo, H., Kim, W., and Ji, W. (2015). *River Hydraulics*, Chungmoongak Press, p. 605, 627.
- Woo, H., Lee, J.W., and Kim, K.K. (1998). "Development of a method for determination of instream flow needs required for fish habitat conservation - application to the Keum River", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 2-4, pp. 339-350.
- Wood, P.J., Hannah, D.M., and Sadler, J.P. (2007). "Hydrology and ecohydrology: An introduction." *Hydrology and Ecohydrology: Past, Present, and Future*, John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, U.K., pp. 1-6.
- Yang, W., Jang, J., and Choi, S.-U. (2011). "Characteristics of turbulent flows and suspended sediment transport in open-channel with submerged vegetation." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 417-427.
- Yoon, T.H. (2000). "Necessity of ecohydraulics and college curriculum." *Magazine of KWRA*, KWRA, Vol. 33, No. 1, pp. 44-50.