

수생태계 종적 연결성 평가를 위한 국내외 연구 현황 및 어류기반 종적 연속성 평가모델 적용성 분석

김지윤, 김재구¹, 배대열², 김혜진, 김정은, 이호성, 임준영, 안광국*

충남대학교 생명시스템과학대학 생명과학과, ¹(주) 엔솔파트너스, ²청록환경생태연구소

International and domestic research trends in longitudinal connectivity evaluations of aquatic ecosystems, and the applicability analysis of fish-based models

Ji Yoon Kim, Jai-Gu Kim¹, Dae-Yeul Bae², Hye-Jin Kim, Jeong-Eun Kim, Ho-Seong Lee, Jun-Young Lim and Kwang-Guk An*

Department of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

¹Environment Solution Partners, Gwangmyeong 14348, Republic of Korea

²Chungrok Environmental Ecosystem Research Institute, Anyang 14059, Republic of Korea

*Corresponding author

Kwang-Guk An

Tel. 042-821-6408

E-mail. kgan@cnu.ac.kr

Received: 2 November 2020

First Revised: 30 November 2020

Second Revised: 8 December 2020

Revision accepted: 10 December 2020

Abstract: Recently, stream longitudinal connectivity has been a topic of investigation due to the frequent disconnections and the impact of aquatic ecosystems caused by the construction of small and medium-sized weirs and various artificial structures (fishways) directly influencing the stream ecosystem health. In this study, the international and domestic research trends of the longitudinal connectivity in aquatic ecosystems were evaluated and the applicability of fish-based longitudinal connectivity models used in developed countries was analyzed. For these purposes, we analyzed the current status of research on longitudinal connectivity and structural problems, fish monitoring methodology, monitoring approaches, longitudinal disconnectivity of fish movement, and biodiversity. In addition, we analyzed the current status and some technical limitations of physical habitat suitability evaluation, ecology-based water flow, eco-hydrological modeling for fish habitat connectivity, and the s/w program development for agent-based model. Numerous references, data, and various reports were examined to identify worldwide longitudinal stream connectivity evaluation models in European and non-European countries. The international approaches to longitudinal connectivity evaluations were categorized into five phases including 1) an approach integrating fish community and artificial structure surveys (two types input variables), 2) field monitoring approaches, 3) a stream geomorphological approach, 4) an artificial structure-based DB analytical approach, and 5) other approaches. The overall evaluation of survey methodologies and applicability for longitudinal stream connectivity suggested that the ICE model (Information sur la Continuite Ecologique) and the ICF model (Index de Connectivitat Fluvial), widely used in European countries, were appropriate for the application of longitudinal connectivity evaluations in Korean streams.

Keywords: longitudinal stream connectivity, fish passability, ICE model, ICF model, aquatic ecosystem health

서 론

우리나라 수생태계는 기존에 존재하던 농업용 중소형 보 및 4대강 건설에 의한 16개의 보의 건설로 상류에서 하류까지의 수생태계에 급격한 단절을 가져왔다(ME 2011). 농업용 중소형 보의 건설에 의한 수생태 연속성 훼손 및 단절에 대한 연구는 수리수문학적 측면에서 단절(Cho *et al.* 1999), 구조물의 기능성 소멸(Lee *et al.* 2017), 퇴적물 축적 문제(Hong *et al.* 1997; Shin and Cho 2000; Jeong *et al.* 2011; Shin and Yoon 2011; Lee *et al.* 2013a; Kim *et al.* 2013), 유속 감소에 의한 수질 악화(Yoon *et al.* 1999; Boyd 2001; Boyer *et al.* 2002) 및 조류(녹조) 대발생(Petts 1979; Karr *et al.* 1986; Everitt 1993; Topping *et al.* 2000; Gleick 2001; ME 2011), 어류 등의 이동성 장벽 문제(Harris 1984; Jacobs 1990; Mallen-Cooper *et al.* 1995; Park *et al.* 1999; Choi and An 2008), 보의 존치 혹은 철거에 대한 경제적 비용에 대한 논의(Koo *et al.* 2014; Lee *et al.* 2015; Lim and Yoo 2015) 등에 대한 다양한 문제를 야기시켜 왔다. 2010년에는 우리나라 하천의 종적 연결성에 가장 큰 영향을 준 4대강 사업에 의해 낙동강에 8개, 한강과 금강에 각각 3개, 영산강에 2개 등, 전체 16개의 대형 인공보를 설치하며 대규모 강의 상·하류 간의 종적 연결성(longitudinal connectivity) 단절을 가져왔다. 이렇게 인위적으로 건설된 대형댐과 인공보 등이 수생태계의 생물, 특히 어류에 미치는 영향은 아직까지 이론적으로만 알려져 있을 뿐, 이에 대한 표준화된 평가 기법이 없고, 정량적/정성적인 조사기법이 다양하여 지역특성에 적합한 종적 연결성에 대한 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다(MacLennan and Simmonds 1992; Abad *et al.* 1998; Lee *et al.* 2013b; ME 2017a, 2017b, 2017c).

최근 우리나라에서는 기후변화로 인하여 갈수기에 심한 가뭄 현상이 빈번히 발생되고(ME 2014a), 어떤 해의 하절기에 강우 강도가 급격히 약화되며 하천 유량 감소에 큰 영향을 끼치고 있다(Korea Water Resources Corporation 2002; Hyun *et al.* 2017). 이런 급격한 유량변동은 하천의 수위 감소, 유량 감소 등의 현상으로 수생태계의 연속성 측면에서 심각한 단절을 가져올 뿐만 아니라(Hirsch *et al.* 1991; Morris and Fan 1998), 경제적 측면에서도 수자원을 안정적으로 관리하기 어렵게 만들어 국가 경제발전과 삶의 질을

저하시키는 무엇보다도 큰 장애요인으로 인식되어지기 시작하였다(Yang *et al.* 2001). 이와 같이 불안정한 수자원을 안정적으로 확보하고, 이수와 치수의 효율성을 극대화하기 위하여 다양한 형태와 규모의 대형 중소규모의 농업용 보 및 대형 4대강 인공보 등이 건설되었고, 현재도 건설 중에 있다(Jeong 2005; Han 2006). 특히, 우리나라에서는 농업용 보가 4대강 수계의 강과 하천 생태계에 약 33,000여 개 이상 이미 건설되어 농업용수를 공급하고 있으나(Park 2010), 이들 중 상당 부분은 그 기능을 잃거나 불필요한 구조물로 분류되며 상·하류 간의 물리적 서식지 종적 단절을 가져오고 있어 이에 대한 대책이 절실히 요구된다(Hirsch *et al.* 1991; Kinsolving and Bain 1993; Morris and Fan 1998; Park and An 2014).

수생태계의 연속적 단절/훼손된 수생태계를 관리하기 위해 정부에서는 「물환경보전법」에 의거한 법적 관리를 시작하였다. 수생태계 연속성 확보를 위한 법적 근거를 마련하기 위해 환경부는 2017년 1월 17일 「물환경보전법」을 공포함으로써 관련 핵심 조항인 제22조의 2항의 주요 3가지 내용을 다음과 같이 제시하고 있다. 첫째, 수생태계의 단절·훼손 여부 등을 파악하기 위한 수생태계 연속성 조사 실시, 둘째, 환경부 장관의 권한과 의무강화: 중앙행정기관장 또는 관련 시설(구조물) 관리자들과 수생태계 연속성 확보를 위한 필요 조치 등의 협조 요청, 셋째, 수생태계 연속성 확보를 위한 조사방법·절차, 단절·훼손 기준 및 우선 순위 결정 절차 등은 환경부령으로 정하는 것으로 고시되어 있다. 개정된 「물환경보전법」에도 불구하고 이제까지 수생태계 연속성 단절 및 훼손에 대해 제시된 사례가 없어 하위법령에 명시할 기준이 모호하고, 이를 조사하는 방법 및 절차 역시 부재한 상태이다. 더욱이 하천의 수생태 연속성 평가를 위해서는 이미 외국의 연구들에서 제시한 바와 같이 보 상하류의 다양한 수리수문학적 변수들의 평가(Ko *et al.* 2008), 보 구조물 재원 변수 평가(Lee *et al.* 2015), 어도의 유무에 따른 지표 평가(Hwang *et al.* 2012), 수생물 특히 어류의 이동성(Kim *et al.* 2011; Kang *et al.* 2012) 및 어류 서식지 특성 등의 복합적인 특성(Hur *et al.* 2009a)이 고려되어야 하기 때문에 단기간의 연구 결과로 국내 적합한 평가방안을 제시하기는 극히 어렵게 현재 상황이다. 따라서 수생태 연속성 조사 및 절차 등에 대한 환경 선진국 해외사례

를 조사하고, 이를 기반으로 어류 이동성을 기반으로 한 수생태계 종적 연결성 평가기술개발에 관한 연구가 필요하다. 특히, 하천의 생물학적, 수문학적 그리고 물리적인 프로세스에 대한 종적(longitudinal), 횡적(lateral), 그리고 수직적(vertical)인 파라미터의 평가 및 현장조사는 수생태계 연속성의 주요한 구성 요소이며(Annear *et al.* 2004), 이런 수생태 연속성 조사 및 평가, 절차 및 방법론을 구축하는 것은 통합적 종적 수생태 건강성 진단 및 보존을 위한 핵심요소라 할 수 있다.

지난 2000년 이래 국토부에서는 이수·치수 등 개발위주의 공원형 하천이나 자연형 정비하천 사업을 수행하였고(Song 2010), 이에 대해 환경부에서는 훼손된 하천을 원래의 건강한 하천과 유사하게 되돌리는 수생태계 원형 복원, 유사 복원, 대체 복원개념의 수생태 복원사업을 추진해 왔다(ME 2014b). 환경부에서는 4대강 대권역 2단계 기본계획을 수립하면서 수생태 건강성 복원 기본 방향으로서 발원지로부터 지류, 본류, 하구 연안 생태계에 이르기까지 생태계의 종적 연결성(Longitudinal connectivity) 확보를 위한 노력을 지속적으로 하고 있다.

1. 우리나라에서 하천의 종적 연결성 현황 및 구조적 문제점

1) 국내하천에 설치된 횡구조물 및 하천 연계율의 극한 감소의 문제점

우리나라에서 하천 건강 악화에 대한 핵심 3가지 문제점은 첫째, 이화학적 수질 문제, 둘째, 생물 다양성 교란, 셋째, 생물 서식지로서 하상교란 및 하천 내 인위적 구조물의 설치에 의한 종적 단절성으로 요약된다. 수질악화 문제점으로는 거의 대부분 도심하천 및 농업지역 부근의 하천에서는 하수종말 처리장 및 농업지역의 비점오염원에 의한 부영양화(N, P)가 가장 큰 문제점으로 알려져 있으며, 이런 수질 악화는 수생태계 변화에 직접적으로 영향을 주어 생물다양성 감소에 촉매제 역할을 하고 있다. 생물변화 지표는 우리나라에서 1차 생산자로서 돌말 부착조류, 1차 소비자로서 저서무척추동물 및 최종 고차 소비자로서 어류를 이용하여 수생태 건강성 등급을 도출하여 하천 건강성 악화를 평가하고 있으며, 이런 문제는 2008년 이후 전국생물 측정망 확립, 조사법 구축 및 현장조사를 기반으로 아주 잘 평가되어 오고 있다. 또한, 하천의 하상 유량 등의 물리적 서식지 평가 또한 비교적 연구가 잘 되어 있으나, 하천의

물리적 구조물 설치에 의한 종적 연결성에 의한 건강성 문제는 2018년 법으로 고시된 후 전국의 하천을 대상으로 연구된 바는 아직 미진하여 향후 수생태 건강성 증진을 위한 종적 연결성 확보는 아주 중요한 연구 이슈 중의 하나로서 향후 집중적인 현장조사법, 진단법 등의 개발에 의한 국가 측정망 측면의 수생태 건강성 증진에 대한 연구 및 법적/제도적 장치마련이 아직 미흡한 수준이다.

2) 국내 종적 연결성을 위한 어도(Fishway) 설치 현황 및 시설 문제점

어도는 일반적으로 하천에서 보 혹은 댐의 구조물에 대해 어류의 이동성 측면의 종적 연결성을 증가시키기 위해 설치된 구조물이다. 그러나 최근 이런 어도 구조물은 갈수기에 무용지물이 되거나(Park 1996; Lee 2011; Ahn *et al.* 2012), 일부 구조적인 결함이 있거나(Lee *et al.* 2013; Seong *et al.* 2013), 물 흐름에 대한 수리수문학적 문제점들(Cloern 1987; Yeo and Yoon 2005)이 빈번히 보고되고 있다. 2018년 국가어도정보시스템 어도실태현황을 보면 전국의 보에 설치된 어도는 총 5,239개로서 약 15.5% 설치율이며, 이 가운데 어도의 기능이 미흡하거나 불량한 것이 약 3,776개(약 72%)에 이르는 것으로 조사되어 하천 연속성을 위협하는 요인으로 작용하고 있다. 이에 따라 경제성 어종·회유성 어종·법정 보호종과 같은 주요 어종의 경우 연속성이 확보되어야 하지만 하천 중간에 설치된 횡단구조물로 인해 서식지가 단절되어 이동성에 제약을 받고 있어 영양물질이 동(N, P 등; Cho *et al.* 2007), 부유사 퇴적(Suspended solids; Jeong *et al.* 2006), 유기물 축적(Cho and Cho 2017)뿐만 아니라 먹이망(Son 2008)에 영향을 주어 궁극적으로는 생태계 건강성을 훼손하는 것으로 보고되고 있다.

하천에 설치된 어도는 2009년 하천설계기준에 따라 표준형식의 계단식, 아이스하버식, 버티칼슬롯식, 도벽식의 4가지 어도 유형을 제시한 이후 대부분 표준형식에 따라 어도설계가 이루어지고 있으나, 아직 지자체에서는 비표준형식의 어도(42%)들도 상당히 많은 것으로 파악되고 있다. 이러한 어도의 설계가 국내 어종과 하천환경을 고려한 설계가 아니고 일률적으로 이루어지고 있어 지속적으로 논란이 되고 있는 실정이다. 또한, 어도 설치 이후 관리의 부재로 인해 어도의 파손에 따른 기능 상실, 잘못된 구조 설계로 어도의 상·하류 간 낙차가 크게 발생하고 있으며, 설계 당시 물 흐름에 대한 고려가 미흡하여 어도로 물이 흐르지 않거나 어도 외부로 월류되어 어류가 이용하기에 부적

합한 경우가 있어 종적 연결성에 문제가 있는 것으로 분석되어 향후 이런 문제점을 개선하기 위한 기술개발이 시급한 실정이다.

2. 종적 연결성 평가를 어류 모니터링 기법 및 현황

1) 종적 연결성을 평가를 위한 어도에서의 어류 모니터링 위한 기법 및 현황

최근에는 2010년 4대강을 중심으로 건설된 인공보에서는 단절된 수생태계를 연결해 주기 위하여 생태연결로인 어도(인공어도, 자연형 어도)를 설치하였으나, 어도는 어류의 생태적인 특성을 고려하지 않은 채 건설되어 어도의 기능을 하지 못하는 일반적인 구조물로 등한시되어 왔다. 또한, 정부에서 재자연화를 위한 첫 단계로서 물의 펄스방류, 상시방류 및 완전 개방 등으로 수위가 낮아지며 세종보와 같은 어도는 물이 전혀 유입되지 않는 상태로 보고되고 있다. 또한, 어도의 건설 시 토목학적인 측면의 고려가 주류를 이루어 어류의 본질적인 이동에는 제약을 가한 것이 사실이다. 현재의 수많은 어도 연구에도 불구하고, 어도의 기능에 대한 이해와 어도를 이용하는 어종들에 대한 연구가 부족하다. 즉 어도의 이용률 및 어도 효율성을 평가하기 위해 표식·비표식 기법적용(Parker *et al.* 1990; Nielson 1992; Lucas and Baras 2001), 장거리 이동 전파발신 장비 Radiotag(Matthew 1992; Cote *et al.* 2002; Jadot *et al.* 2006) 및 수동형 전자발신장치 PIT tag (Passive Intergrated Transponder)(Castro-santos *et al.* 1996; Morhardt *et al.* 2000; Roussel *et al.* 2000; Zydlewski *et al.* 2001) 등의 기법을 이용하여 어종별 이동효율을 평가하고 있으나 여전히 하천의 전체 상하류의 전체 시스템을 보지 않고 특정 어도 설치 구간들에 제한되어 있어 종적 연결성 평가에 여전히 걸림돌로 작용하고 있다. 또한, 현장조사 및 분석도 지속적인 생태모니터링이 이루어지지 않고 있어서 실효성을 거두지 못하고 있는 실정이며, 어류 이동에 있어 제한요소가 되는 댐 및 갑문의 건설은 비단 소하성, 강하성 어류만의 문제가 아니라 거의 모든 어종에 영향을 미치는 바 하천의 종적 연결성을 체계적으로 평가하기 위해서는 중장기적인 모니터링 및 체계적인 평가기술 모델 개발이 필요하다.

2) 상류-하류 사이의 종적측면의 어류 이동단절 및 종다양성 감소

기존의 국내·외의 다양한 인공댐 및 보 건설에 대한 하

천 생태계 연구들에 따르면, 수체내의 인공 구조물은 일반적으로 생태계의 구조적 측면(Gray 1992; Flecker 1993; Allan and Thomas 1996; Hong and Kim 2007) 및 생태계 기능적 측면의 물질순환(Kang *et al.* 1997), 먹이연쇄(Kim 1997) 및 에너지 흐름(Jang *et al.* 2008)에 악영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다(Cloern 1987; Hanson and Butler 1994; Mantel *et al.* 2010; Mueller *et al.* 2011). 즉, 인공보는 하천의 흐름을 막아 물리적 수환경의 변화를 초래하고, 달라진 수환경으로 인하여 어류의 종조성을 변화시킨다. 또한, 해수와 담수를 오가며 생활하는 회유성 어류의 이동과 일반 어류의 상·하류 간 이동을 단절시켜 어류의 생존을 저해시키는 주요 요인으로 작용하게 된다. 특히, 어류는 끊임 없이 이동을 하고 움직이는 생물이며 서식처에 대한 특이성으로 인해 지역적 특이성을 지니는 생물이다. 따라서 하천의 흐름을 막는 보나 댐은 어류서식의 지역적 범위를 제한할 수 있다.

특히, 우리나라에서 뱀장어, 연어, 황어, 은어와 같은 경제적 가치가 높은 장거리 회유성 어류의 경우 지리적 격리가 일어날 수 있으며, 이로 인해 내수면 어족자원 감소로 이어질 수 있다. 또한, 우리나라에서는 연어, 송어, 황어 등의 소하성 어류, 뱀장어, 무태장어 등의 강하성 어류들은 물론이고, 일반적으로 1차 담수어인 누치, 치리, 참물개 등의 어종들도 계절적으로 상·하류를 이동하는 특성을 지니고 있어 하천의 종적 단절성은 하천의 상류로부터 하류까지의 구간에서 생태학적 구조 및 기능에 악영향을 주는 것으로 알려져 왔다. 1차 담수어인 경우 특히 4~6월의 주요 산란기에 수심이 깊은 수체에서 수심이 얇은 인근 상류 지류로 이동을 하게 되는데(Kim and Park 2002) 이때 소규모 농업용 보 구조물 및 천내의 인공 구조물은 산란율을 감소시켜(Ko *et al.* 2007), 중장기적으로 이런 구조물이 존재할 때 종적 연결성을 크게 단절 혹은 훼손시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Choi *et al.* 1989; Yang *et al.* 2001; Choi and An 2008; Yang 2011). 또한 4대강의 하구에 건설된 대규모 인공 하구언들(Lee and Um 2007; Lee *et al.* 2014)은 바다에서 직접 강으로 유입되는 뱀장어 생산량에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다(Hwang *et al.* 2009). 따라서 하천의 연속성을 확보하는 것은 하천 상·하류 간의 생물다양성 확보 및 생태계 보존에 아주 중요한 역할을 하는 것으로 보고되었다.

3. 종적 연결성 확보를 위한 물리적 서식지 적합도 및 환경생태 유지유량

1) 서식지 적합도 지수 개발 및 환경생태유량 산정

하천의 종적 연결성을 위해 기본적으로 하천을 흐르는 유량이 최소한 존재해야 한다. 하천에서 최소유량 확보를 위해 유량산정 및 분석이 실시되고, 이들 유량에 따른 어종별 서식지 적합도(Fish Habitat Suitability; FHS)를 분석하는 것이 중요하다. 미국의 경우, 지속적인 모형 개발 및 현장 모니터링을 통해 150여 종에 대한 서식지적합도 지수를 산정하였으며, 어류 종별, 성장단계별 서식처 및 서식처 조건별 수리량을 환산하여 하천의 유지유량을 결정하는 연구가 진행되어 왔다(Stalnaker *et al.* 1995).

우리나라 하천에서는 봄철에 강우량이 적고, 이로 인한 하천 유량이 극히 감소하여 건천화 현상을 많은 하천에서 보이고 있고, 이에 따른 이화학적 수질악화, 녹조 문제, 수생생물 서식처 감소 등 수생태계 건강성 훼손에 문제를 발생하고 있다. 우리나라 환경부에서는 수생태계 건강성 유지에 필요한 하천 유량을 확보하기 위해 환경생태유량 제도를 물환경정보전법에 도입하여 2018년 1월 18일부터 시행하고 있다. 하천 유지유량 중 환경생태유량은 수생태계의 건강성을 유지할 수 있는 최소한의 유량을 의미하며, 이를 결정하기 위해서는 서식지 적합도 지수 개발이 필수적이다. 현재 국내 서식지 적합도 지수 산정에 대한 기준은 미비한 상태로, 미국에서 제시한 방법에 근거하여 적합도 지수를 산정하고 있는 것으로 조사되었다. 다만, 법에서는 국토부와 환경부가 환경생태유량을 산정하도록 하고 있으며, 실무적으로는 PHABSIM (physical habitat simulation system) 모형을 사용할 것으로 전망하였다(ME 2017a). 따라서, 하천 수생태계에 보다 적합한 환경생태유량을 산정하기 위해서는 1) 생태계(어류) 대상으로 성장단계에 따른 최적 환경생태유량의 산정이 필요하고, 2) 소수의 대표어종이 아닌 다양한 어종(보호 대상종, 지표 어종, 지역특성 어종 등)에 대한 서식처 모의가 종합적으로 수행될 필요성이 있으며, 3) 조절 하천과 비조절 하천을 대상으로 국내 하천에 적합한 환경생태유량을 확보할 수 있는 방안이 제시되고, 4) 또한 제시된 개별방안에 따른 어류 서식처 개선효과 분석이 과학적이고 체계적인 방법을 통해 제시되어야 한다(Korea Water Resources Corporation 2018).

미국 환경부(US EPA)에서는 종적 연결성을 위한 어류

유량 확보 방안으로서 지난 1970년부터 현재까지 지속적인 수리수문 모형개발 및 현장 모니터링을 통해 약 150여 종에 대한 서식지 적합도 지수(Habitat Suitability Index; HSI)를 산정하였으며, 어류 종별, 성장단계별 서식처 및 서식처 조건별 수리량을 환산하여 하천의 생태유량을 결정하는 연구가 진행되고 있고(Stalnaker *et al.* 1995), 하천유지유량 중 환경생태유량은 수생태계의 건강성을 유지할 수 있는 최소한의 유량을 의미하며, 이를 결정하기 위해서는 각 어종별 HSI 구축이 필수적이다. 우리나라에서 어류의 서식지 적합성 관련 연구는 대부분 하천생태유량과 관련하여 PHABSIM 모델 적용을 위해 활용되고 있다. 금강에 어류 서식지를 고려한 유량 산정(Woo *et al.* 1998), 괴산 달천에 유량 및 수질을 고려한 유량 연구(Kim 1999)가 처음 시작되었고, 2000년대 이후부터 낙동강 유역 어류 서식환경을 고려한 유량 연구(Sung *et al.* 2005), 한강 지류에 어류 서식 조건을 고려한 유량 연구(Oh *et al.* 2008), 최적 생태유량 산정(Hur and Kim 2009; Hur *et al.* 2013; Lee *et al.* 2013) 및 어류 서식지 평가 및 유량 산정에 대한 연구(Hur *et al.* 2009b; KEI 2010; Hur and Kim 2011a, 2011b, 2011c; Hur and Seo 2011; Hur *et al.* 2011) 등이 본격적으로 수행되어 왔으나, 생태계에 필요한 환경생태유량 산정 및 평가방법, 정량화 및 기초 데이터베이스(DB) 등의 객관적 자료는 극히 부족한 실정이다.

최근, 환경선진국들의 경우 어류 기반 서식지 적합도를 평가하기 위해 다양한 서식지 평가모델을 개발하고 있으며, 특히 최근에는 “HABITAT 모델”을 개발되어 활용하고 있다. 기존의 PHABSIM 모델은 서식지 적합성 평가를 통해 하천 유지유량을 결정하는 데 주로 사용되고 있으므로 서식지 분석을 통한 종밀도, 위험도 평가 등은 고려할 수 없는 단점을 가지고 있으며, 또한 한국환경정책평가연구원(KEI)의 연구보고서(2017)에 따르면 모델의 한계점 및 제약으로 인해 국내 환경에서 일괄적으로 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 평가되고 있다.

2) 물리적 어류 서식처 모의를 위한 생태-수리모델링 개발 및 연계 필요성

어류 기반의 물리적 서식처 모의를 위해서는 유속, 수심, 수온 및 하상지수(substrate)의 자료가 기본적으로 요구되며, 최종적으로 각 목표어종(Target species) 또는 대상어종에 대한 생애 단계에 따른 가중가용면적-유량 관계 곡선을

산정하여 물리서식처의 적합성을 평가하게 된다. 따라서, 효율적인 물리서식처 해석을 위해서는 1차적으로 1차원 수리모델이 아닌 최소 2차원 이상의 다차원 생태수리 모델이 필요할 것으로 사료되고, 2차적으로는 이러한 모델을 통해 대상어종의 생애 단계를 고려한 지점별 및 시계열 분석이 요구된다. 서식처의 시계열 변화 분석을 통해 서식처 지속 곡선을 도출하거나, 사전에 기준에 적합하지 못한 서식처를 명확히 선별할 수 있으며, 서식처의 정량적 평가를 통해 특정 연구결과가 서식처의 이익 및 악화 영향에 대한 보다 객관적인 분석결과를 이해 당사자에게 제공할 수 있다(KEI 2010). 참고로, 국내에는 수질 및 수생태에 관한 법률이 최근 개정(2107년 1월 공포)되어 환경생태유량 산정에 대한 법적 근거를 마련하였으나, 산정 기준 및 예측 방안이 부재하여 이에 대한 개발 및 연구추진이 필요한 것으로 고찰되었다(ME 2017a).

4. 종적 연결성 평가를 위한 기존 기술의 한계성 및 프로그램 개발의 시급성

1) 어류 유영력 기반 이동성 분석에 대한 현재 기술의 한계성

종적 연결성 평가를 위해 하천 혹은 강에서 어류의 점핑 능력(jumping capacity), 혹은 물을 거슬러 올라가는 유영력 평가는 너무 중요한 연구대상 주요 핵심 인자 중의 하나이다. 어류의 유영능력은 어류의 서식처 간 이동 능력을 말하며, 시공간적인 분포를 결정하는 요인이 된다(Drucker and Jensen 1996). 또한, 피-포식행위, 생식활동, 서식처 선택 등 어류의 생존과 직접적인 연관성을 가진다(Taylor and McPhail 1986). 이에 따라 어류의 유영능력 및 소상능력은 하천의 종적 연결성을 평가하는 중요한 요인이 될 수 있다. Park (2001a, 2001b, 2001c)은 회유성 어종의 생태환경 분석 및 어종별 소상능력을 비교하여 계단식 어도의 활용성 증대를 위한 낙차를 결정하였으며, Park *et al.* (2008)은 피라미에 대한 유영특성을 분석하고 어도의 합리적인 설계기준을 제시하였고, Bae *et al.* (2011)은 PIV (Particle Imaging Velocimetry)를 이용하여 은어의 유영능력을 측정하여 어도 설계를 위한 기초자료로 활용하였다. 따라서 어류의 유영능력에 따른 서식처 적합도 지수 등은 어류의 생태 유량을 산정하는 기초자료이며 어류 행동 기반에 따른 하천의 종적 연결성을 평가하기 위한 중요지표가 된다. 그러나 현재 우리나라 연구에서는 이런 분석법에 대한 개발은 거의

전무한 실정이며, 현재 존재하는 이동성 분석 기술도 특정 어종 이외에는 없는 것이 가장 큰 문제여서 이런 기술 개발이 이루어질 때 종적 연결성 평가는 좀 더 향상될 것으로 사료된다.

2) 행위자 기반(ABM) 어류행동예측 프로그램 개발의 시급성

행위자 기반 모형 (Agent based model; ABM)은 생물체의 행동을 기반으로 행동 혹은 이동에 대한 예측을 하는 모델로서, 하천 혹은 강과 같은 유수 생태계에서 어류 기반의 ABM 모델은 종적 연결성 평가에서 어류 행동특성 파악에 중요한 역할을 한다. 현재, 어류 기반 ABM 모델은 여러 요소들의 복잡한 상호작용 및 확산현상을 기존의 수학적 모델 또는 통계 모델을 통해 응용하기 어려운 현상에 적용하는 시뮬레이션 기법으로서, 생태계 다양한 현상을 연구하기에 가장 타당한 모형임에도 불구하고 현재까지 국내는 전혀 없으며, 외국 연구사례에서도 종종 나타나나 특정 종에 한정되어 일부 연구들이 보고되고 있다.

행위자 기반의 모델을 하천 수체에서 어류 행동과 같은 복잡한 행동패턴 추적에 활용할 수 있을 것으로 예상되며, 특히 첨단 센서를 활용한 모니터링 및 실시간 DB를 확보할 경우 실증데이터 기반의 국내 어류 행동 예측 시스템 개발 및 구축이 가능할 것으로 기대된다. 어류 행동 예측 프로그램의 개발은 난이도가 높아 쉽지 않으며, 시공간적 변이가 커서 전체의 큰 시스템에 적용하는 데는 한계가 있으나, 어류 기반 ABM 모델이 성공적으로 개발될 경우, 1) 이동하는 대상 어종을 정확하게 판별할 수 있는 장점, 2) 전국의 보 및 어도 모니터링에 확대하여 이동성 평가에 따른 시간과 비용절감 가능, 3) 국내 하천의 종적 연결성 정성/정량 평가지표 및 서식처 적합도 지수를 보완하거나, 4) 물리서식처 모의에 적합한 대상 어종을 선별하는 데에도 유용하게 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 환경 선진국에서의 종적 연결성 평가 관리 체계 및 평가모델

국외에서는 다양한 연구모델(ICE 모델, ICF 모델 등)을 개발하여 하천의 수생태 연속성을 평가하고 있으며, 하천 건강성 복원을 위해 하천 구조물의 수생태 연속성 복원을 의무화하고 있다. 이는 기존의 인간 중심의 하천관리라는 개념이 아닌 하천에 서식하는 수생물을 우선의 패러다임,

즉, 하천생물 기반의 하천 연속성 평가가 핵심 화두로 떠오르고 있다. 특히 하천 상류와 하류 사이의 수생태 연속성 확보를 위해서 수생태 연속성에 관련된 업무와 권한이 연방 정부 산하 하나의 조직으로 통합되었다는 점에 주목할 필요가 있으며, 이는 수생태계 연속성 관련 자료, 조사 및 영향평가 정보, 종합적인 대책 마련 그리고 기술적 노하우 등을 효율적으로 하나의 조직에서 관리할 수 있는 장점이 있다. 특히, 독일과 프랑스는 수생태 연속성 관련법들을 책임지고 주도하는 전담기관을 설립하여 수생태 연속성 측면에서 이루어지는 모든 상황에 대해 효율적이고 즉각적으로 연속성 복원 프로젝트를 실행하고 있다. 프랑스의 경우 수생태 연속성 복원 및 추진에 있어 하천 환경관리 전담 기관인 ONEMA를 설립하고 이 기관이 수생태 연속성 사업에 있어 주도적으로 관리하고 있으며, 구조물 소유주와의 밀접한 협업체를 구성하는 것은 수생태 연속성 복원 사업에 있어서 가장 우선적으로 실행되어야 할 요소로 제시한다. 공동 또는 참여로 관련 정보들을 공유하고 협의를 통해 하천 구조물에 대한 가장 최적의 방안을 제시하는 선진 기술로 판단된다.

전 세계의 하천종적 연결성 평가모델 및 기법(프로토콜)에 대해 문헌, 자료 및 다양한 모델을 종합적으로 검토한 결과에 따르면 Table 1에서 보여주는 바와 같다. 즉, 첫 번째 기법은 구조물과 어류 유영 속도 점프능력 등의 지표 기반 기법이다. 이것은 환경 선진국에서 최신 통합적 종적 연결성 평가를 위한 기법으로서 공통적인 사항은 어류 군집(특정 어류종을 대상으로 하는 것이 아닌 평가, 즉 개체군 평가가 아닌 군집유형 평가 방식)을 대상으로 하고 있고, 여기에 직접적으로 구조물의 높이 유속, 유량 특성을 고려하여 어류가 구조물을 통과할 수 있는지 여부에 대한 하천 연속성 평가 기법이다. 두 번째 기법은 직접적인 어류조사 및 모니터링에 의한 기법으로서 우리나라에서 많이 시도된 기법이다. 세 번째는 하천 지형 평가 기반의 기법이고, 네 번째는 하천 연계성 지수 평가법 그리고 그 외의 기타 우리나라에서 사용되는 기법들로 대별된다.

1) 구조물과 어류 유영 속도 점프력 등의 지표 기반 모델링 및 기법

ICE (Information sur la Continuite Ecologique) 기법은 하천 구조물에 대한 정량 평가법으로서 어류의 유영속도, 이동가능 최소수심, 점프능력, 유속 등에 대한 상관관계 분

석을 통한 평가를 실시한다. ICF (Index de Connectivitat Fluvial) 기법은 보외 암거, 경사진 구조물, 어도 등에 대한 다양한 평가를 실시하며, 전문가의 경험 및 판단에 의해 분석 평가하는 기법이다. FMBAP (Fish Migration Barrier Assessment Protocol) 기법은 암거와 보에 대한 연속성 평가로서, 레벨 A의 현장조사 기반 평가와 레벨 B의 모델링 기반 평가로 구성되어있다. WDFW (Washington Department of Fish and Wildlife) 기법은 우리나라에서도 빈번히 이용되는 기법으로서 하천에서 암거 구조물에 대해서만 적용가능하며, FMBAP과 거의 유사한 특성을 가지고 있다. FishXing 모델 기법은 어도 등의 구조물에 대한 평가가 가능하고, 수리분석 및 s/w 프로그램을 이용하여 분석하는 기법이다.

2) 직접적인 현장조사 및 모니터링 기법

본 현장조사 기법은 우리나라에서 빈번하게 4대강 보 구조물 및 어도 이동성 평가에서 이용된 기법으로서 수중카메라 설치에 의한 어류 이동평가를 실시하고, 트랩설치기법(Trap)은 어도 혹은 보 구간에 트랩을 설치하여 어류이동을 평가하며, 초음파 에코사운더 기법은 어류의 수층내의 밀도를 측정하여 평가를 실시하는 기법이고, 첨단센서 기반의 텔레미터리 기법(Radio 텔레미터리, 트랜스미터 이용법) 등을 들 수 있다.

3) 하천지형학적 접근방식 기법 및 구조물 기반 DB 구축 기법

하천 지형학적 접근방식 기법은 DCI 기법(Dendritic Connectivity Index)으로서 총 3단계로 구분한다. 1단계에서는 하천망 범위 설정 및 각 하천망에 위치한 하천 연장에 대해 조사, 2단계에서는 하천 구조물의 개수 및 위치 파악, 3단계에서는 어류가 구조물을 통과할 수 있는 여부의 확률 설정 및 최종 점수 평가로 대별되어 있으며, Table 1에서와 같이 구조물 기반 DB 구축 기법으로서 WebDB 모델, ROE 모델, OFPDS 모델 및 RDB-DRN 연계모델이 이용되고 있다.

$$DCI_p = \sum_{i=1}^n \frac{l^i}{L^2} \times 100$$

$$DCI_D = \frac{l_i}{L} \times 100$$

Table 1. Various international/domestic approaches, connectivity models, and the countries applying longitudinal connectivity evaluation in streams and rivers

Longitudinal connectivity evaluations approaches	Longitudinal connectivity evaluation models	Conturies applied
Integrated methodology, based on fish community-artificial structure (Two types input variables)	ICE model	France
	ICF model	Spain
	FMBAP model	USA
	FishXing model	Canada
Direct field monitoring approaches	Underwater camera monitoring	USA, Canada, Korea
	Trap monitoring	USA, Canada, Korea
	Ecosounder monitoring	USA, Canada, Korea
Stream geomorphological approaches	DCI model	Canada
	RCI model	
Artificial structure-based DB data analytical approaches	Web DB model	Belgium
	ROE model	France
	RDB + DRN model	United Kingdom
	OPFDS model	USA
Other approaches	Fish passing efficiency	Korea (KEI)
	Stream connectivity index	Korea (KRCC)

*ICE Model: Informations sur la continuité écologique, ICF Model: Index de Connectivitat Fluvial, FMBAP Model: Fish Migration Barrier Asesment Protoco, DCI Model: Dendritic Connectivity Index, RCI Model: River Connectivity Index, Web DB Model: Web based Databas, ROE Model: Referentiel national des Obstacles a l'Ecoulemen, RDB+DRN Model: River Barrier Dataset+Detailed River Network, OPFDS Model: Oregon Fish Passage Barrier Data Standard

(L: 전체 하천의 길이, l_i : 구조물로 인해 단절된 인접한 두 하천 구간의 길이)

또한, 하천 연계율을 산정하는 하천 연계성 지수 평가 기법 [하천 연계율(%) = 하천 종점에서 어류 소상이 가능한 거리/하천 총 연장 × 100] 외에도 우리나라에서 이용되는 기법들이 다양하게 있다(Table 1).

4) 전 세계 하천 종적 연속성 평가의 조사방법론에 대한 유럽권과 비유럽권 비교

현재, 전 세계에서 널리 이용되는 종적 연결성 평가모델의 조사방법론 및 적용성 비교 평가는 유럽에서 제시된 보고서인 REFORM (Rinaldi *et al.* 2013)을 참고하여 유럽권과 비유럽권으로 비교하였다(Tables 2, 3). 이런 이유는 현재 종적 연결성 평가는 유럽권 주도 방식으로 이루어져 있고, 미국에서도 유럽의 방식을 이용하고 있기 때문이다. Table 2와 Table 3은 조사방법별로 유럽권과 비유럽권으로 구분하여 조사·평가 항목에 대한 특징요소에 대해 정리한 결과 총 22개의 조사방법이 이용되었으며, 이는 크게 아래와 같이 6개 항목으로 대별하여 구분하였다. ① 항목은 자료수집의 범위, ② 항목은 공간적인 스케일 정도, ③ 항목은 서

식처 평가 유·무, ④ 항목은 연속성 평가항목 종류, ⑤ 항목은 이동성 평가를 위한 기준 인자들, ⑥ 항목은 타깃 어종의 적용 범위로 대별된다. ① 항목의 자료수집의 범위: 지도, 원격 탐사, 현장조사, 데이터베이스 사용, 모델링으로 구분하였고, ② 항목의 공간 스케일은 하천망, 하천, 단일 구조물, ③ 항목의 서식처 평가는 서식처 구간 설정, 서식처 망 조성, ④ 항목의 평가항목 구분은 구조물 이동성 평가, 구조물 특성 및 모델링, 데이터베이스 기록·맵핑, 정량적 최종 지수, 서식처 손실 평가, 어류 원격 측정, ⑤ 항목의 이동성 평가를 위한 기준은 어류 특성, 화학적 속성, 환경적 변화, 수문학적 인자, 구조물의 물리적 특성, 어도 설치 유·무, 하천 위치, ⑥항목의 어종의 적용은 생활사, 관심 타깃 어종으로 구분하였다. 본 조사방법론 비교에 따르면, 유럽권에서는 ICE 모델과 ICF 모델이 어류의 군집수준 특성, 현장조사, 구조물 특성 반영, 어류의 구조물 통과성 평가, 수리수문특성 현장 평가, 상·하류 간의 공간평가 및 구조물 특성 평가 측면에서 아주 좋은 모델로 평가되어 이 모델을 검토하고 모델을 수정 보완할 경우 우리나라에서 종적 연결성 통합평가에 효율적일 것으로 사료되었다. 한편, 비유럽권 조사방법론에서는 DCI 모델 및 FiXing 소프트웨어 프

Table 2. Longitudinal stream connectivity evaluation models (LSCE model) in European countries and their applicability based on database, spatial distribution range, physical habitat, input variables, fish passing indicator, and target fish habitats (○: high certainty, △: ambiguous)

Applicability of the LSCE model and evaluations (the models developed by European countries)																
	OSS model	R-T model	Web-DB model	NFPI-PM model	RBD+DRN model	ROE model	ICE model	BA & QuIS model	IPs & IPT model	EAPW model	MPD model	ICF model	IF model	IC model	ICL model	IPA model
DB allocation	Map/remote sensing	○	△	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	△	△	△
	Field survey	○	○				○		○	○	○	○	○		△	
	Rapid fish evaluations															
	Current database	○	△	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	△	△	△
Longitudinal spatial range	Hydrological modeling									△						
	Stream network	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	△	△	△
	Stream applied	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Physical habitat	Single artificial structure	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Designation of habitat range							○	△	○	○	○	○	○	○	○
Input variables	Habitat web			△				△								
	Passability evaluation of artificial structure	△	○	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Characters of artificial structure/modelling	○	○			△	○	○	△				△			
	Recording and mapping of DB	△		○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△
	Final connectivity impact index						○		○			○	○	○	○	○
	Habitat impact index							○		△						△
	Real-time fish monitoring		○													
	Fish indicator character	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Chemical indicator	○	○				○	○		△						
	Fish passing indicator and criteria						△	△	○	○	△	△	△	△		○
						○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	
						○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

Table 2. Continued

Applicability of the LSCCE model and evaluations (the models developed by European countries)

	QSS model	R-T model	Web-DB model	NFPI-PM model	RBD+DRN model	ROE model	ICE model	BA & QuIS model	IPs & IPT model	EAPW model	MPD model	ICF model	IF model	IC model	ICL model	IPA model
Structure-base impact variable	△			△		△		△	○	△						
Fishway indicator (presence/absence)	○					○		○				○	○			
Stream reaches applied (up vs. downstream)	△							○		○		○	○			
Life cycle/habitat				○	○	○	○		○		○	○	○	○	○	○
Target species	○								○	△						

*QSS Model: Qualitative Scoring System model, R-T Model: Radio-Telemetry model, Web-DB Model: Web-based Database model, NFPI-PM Model: National Fish Passage Improvement Prioritisation Methodology model, RBD + DRN Model: River Barrier dataset + Detailed River Network model, ROE Model: Référentiel national des Obstacles à l'Écoulement model, ICE Model: Informations sur la continuité écologique, BA & QuIS Model: Barrier assessment standard methodology & Querbauwerke - Information System model, IPs & IPT Model: Indici di Priorità d'intervento (Priority Indices) model, EAPW Model: Empirical assessment of passability of weirs model, MPD Model: Morphology Pressure Database model, ICF Model: Indice de Conectividad Fluvia model, IF Model: Indice de Prioridad de actuación model, ICL Model: Índice de continuidad longitudinal model, IPA Model: Índice de prioridat de actuación model

로그래밍 이용 모델이 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 사료되었다.

6. 국내 기존 기술의 한계성 및 향후 연구되어야 할 핵심 내용

국내에서 어류의 종적 연결성 모델개발 및 평가 연구에 관련된 유관한 연구들은 상기에서 제시한 바와 같이 아직 극히 미흡한 상태에 있다. 즉, 주로 우리나라에서는 어류 군집 기반의 서식지 평가가 아닌 특정 개체군 지표종(e.g., 피라미) 기반의 어종별 서식지 적합도(HSI) 평가모델 연구가 주류를 이루고 있고, 또한 이런 모델도 Phabsim 모형의 단편적 지표 기반 모형(유량, 유속, 하상기질)에 의존하고 있는 것이 한계점으로 나타나고 있고, 이에 대한 개선 노력이 집중적으로 일어나고 있다. 또한, 어류 종적 연결성 구조물(어도) 유형분석 및 실규모 어류생태 수리실험 역시 특정 구조물 혹은 특정 어종에 대한 실험적 자료이기 때문에 현장 적용성에 여러 제약점을 가지고 있다. 또한, 종적 연결성 평가에서 어류의 이동성 평가 또한 핵심 사항이고, 특히 회유성 장거리 이동성 어류들의 연구를 위해 첨단 센서(e.g., PIT tag, radio tag, transmitter) 기반 어류 이동성 연구 및 종적 연결성 평가가 적용되고 있으나 고가장비의 문제점, 그리고 일회성이면서 소모성인 트랜스미터 등의 고가라는 제약성 때문에 종적연결성의 한계성이 있다. 특히, 상기에서 제시한 바와 같이 GIS-기반 하천 종적 연결성 수리수문 연계 모델 및 알고리즘 평가 연구 및 어류 행위자 기반 모형(ABM) 모델 개발 연구는 거의 전무한 것으로 검토되었다.

따라서, 우리나라에서 종적 연결성 평가를 위해서는 기본적으로 어류의 종적 연결성 모델 개발을 해야 하며, 이를 위해서는 첫째, 우리나라 어종별 서식지 적합도(HSI) 평가 모델 연구, 둘째, 군집 기반의 보/어도에 대한 어류 이동성 평가모델 구축, 셋째, 하천 종적 연결성 수리수문 연계 모델 및 알고리즘 연구 넷째, 어류 종적 연결성 구조물인 어도의 유형분석 및 현장에서의 실제 이동성 평가, 다섯째, 어종별 구조물 및 수리수문특성별(유량, 유속) 어류생태 수리 실험, 여섯째, 종적 연결성 평가를 위한 GIS-기반 국가/지자체 평가 및 현장조사/테스트, 여섯째, 첨단 센서 기반 어류 이동성 연구 및 종적 연결성 평가가 필요하고, 일곱째, 상기 제시한 바와 같이 어류 행위자 기반 ABM 모델 연구 및 여덟째, 어류 유영력 수리수문 테스트 및 평가에 대한 집중연구가 요구된다. 이런 상기 다양한 연구 내용 및 요소기술을

Table 3. Longitudinal stream connectivity evaluation models (LSCE model) in non-European countries and their applicability based on data-base, spatial distribution range, physical habitat, input variables, fish passing indicator, and target fish habitats (○: high certainty, △: ambiguous)

Applicability of the LSCE model and evaluations (the models developed by non-European countries)		DCI model	FiXing model	FMBAP model	OFPDS model	PAD model	FFHA model
DB application	Map/remote sensing						○
	Field survey		○	○	△	△	○
	Rapid fish evaluations		△	△			
	Current database		○		○	○	○
	Hydrological modeling	○	○	○		○	
Longitudinal spatial range	Stream network	○	△	○	△	△	○
	Stream applied	○	△	○	△	△	○
	Single artificial structure		○	○	○	○	○
Physical habitat	Designation of habitat range						○
	Habitat web			○			○
Input variables	Passability evaluation of artificial structure	○	○	○	△	○	
	Characters of artificial structure/modelling		○		○	○	△
	Recording and mapping of DB			○	○	○	○
	Final connectivity impact index						
	Habitat impact index			○			△
Fish passing indicator and criteria	Real-time fish monitoring						
	Fish indicator character	○	○	○	△	○	○
	Chemical indicator	○					
	Time-serial analysis (year, season)		△			○	
	Hydrological indicator analysis	○	○	○		○	○
	Characters of artificial structure indicator	○	○	○			○
	Structure-base impact variable	○					
Fishway indicator (presence/absence)					○		
Target fish habitat	Stream reaches applied (up vs. downstream)	○			△	○	△
	Life cycle/habitat	○					○
	Target species		○	○		○	○

*DCI Model: Dendritic Connectivity Index, FMBAP Model: Fish Migration Barrier Assessment Protocol, OFPDS Model: The Oregon Fish Passage Data Standard model, PAD Model: Passage Assessment Database project model, FFHAModel: Fish and Fish Habitat Assessment model

서로 접목, 융합시켜 GIS-기반의 하천 종적 연결성 확보 통합 알고리즘 및 이를 기반으로 한 수체의 상-하류 간 연결, 훼손 혹은 단절성 평가를 위한 국가 통합 플랫폼 구축은 종적 연결성 연구에서 현재의 우리나라 기술의 한계성을 극복하는 데 핵심연구로 사료된다.

적 요

최근, 우리나라에서는 하천에 중소형 보(Weir) 및 각종

구조물(어도) 건설이 건설되면서 수생태계의 단절 및 훼손이 보고되고 있고, 이들은 수생태계 건강도에 직접적으로 영향을 주면서 수생태계의 종적 연결성 평가가 중요한 이슈가 되었다. 본 연구에서는 수생태 건강성 확보를 위한 일환으로 수생태계 종적 연결성 평가를 위한 국내외 연구 현황, 선진국의 어류 기반 종적 연속성 평가모델 개발 및 현장 적용성에 대한 분석을 실시하였다. 이를 위해, 우리나라에서 하천의 종적 연결성 현황 및 구조적 문제점, 어류 모니터링 기법 및 현황, 종적 측면의 어류 이동성 단절 및 종 다양성 영향에 대한 현황분석을 하였다. 또한, 물리적 서식

지 적합도 평가, 환경생태유량 평가 및 어류 서식처 모의를 위한 생태-수리모델링의 기술적 한계 등에 대한 연구 현황을 분석하였다. 또한, 어류 유영력 기반 이동성 분석 및 행위자 기반(ABM) 어류행동에측 프로그램개발에 대한 현재 기술의 한계성도 제시하였다. 전 세계에서 적용된 하천 종적 연결성 평가모델 및 기법(프로토콜)에 대해 문헌, 자료 및 다양한 모델을 종합적으로 검토한 결과에 따르면, 첫째, 하천 구조물과 어류 유영속도, 점프력 등의 지표 기반 평가 기법, 둘째, 직접 현장 어류조사 및 모니터링 기법, 셋째, 하천지형학적 접근방식 평가 기법 및 구조물 기반 DB 구축 기법 및 넷째, 하천 연계성 지수 평가법 등으로 분석되었다. 종적 연결성 평가모델의 조사방법론 및 적용성 평가 결과에 따르면, 유럽권의 ICE 모델(Information sur la Continuite Ecologique)과 ICF 모델(Index de Connectivitat Fluvial)을 우리나라에 수정보완하여 적용할 경우 적절할 것으로 평가되었다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호: 2020003050004).

REFERENCES

- Ahn HK, SN Kim and HS Woo. 2012. Stream corridor ecological restoration by small dam removal. *J. Environ. Impact Assess.* 21:171-184.
- Allan JD and AS Flecker. 1993. Biodiversity conservation in running waters. *Bioscience* 43:32-43.
- Annear T, I Chisholm, H Beecher, A Locke, P Aarrestad, N Burkardt, C Coomer, C Estes, J Hunt, R Jacobson, G Jobsis, J Kauffman, J Marshall, K Mayes, C Stalnaker and R Wentworth. 2004. *Instream Flows for Riverine Resource Stewardship*, Revised Edition. Instream Flow Council. Cheyenne, WY. p. 268.
- Bae JH, KH Lee, JK Shin, YS Yang and JH Lee. 2011. Measurement of swimming ability of silver fish (*Plecoglossus altivelis*) using a particle imaging velocimetry. *J. Korean Soc. Fish. Technol.* 47:411-418.
- Boyd SR. 2001. Nitrogen in future biosphere studies. *Chem. Geol.* 176:1-30.
- Boyer EW, CL Goodale, NA Jaworski and RN Howart. 2002. Anthropogenic nitrogen sources and relationships to riverine nitrogen export in the northeastern USA. *Biogeochemistry* 57/58:137-169.
- Castro-Santos T, A Haro and S Walk. 1996. A passive integrated transponder (PIT) tag system for monitoring fishways. *Fish. Res.* 28:253-261.
- Cho HC and YG Cho. 2017. Long-term variation and flux of organic carbon in the human-disturbed Yeongsan River, Korea. *The Sea* 22:187-198.
- Cho KA, PK Ahn, SG Hong and DO Chung. 1999. A study on characteristics of water quality and degradation rates of organic phosphates in Young-San river. *J. Environ. Sci. Int.* 8:691-697.
- Cho YC, HK Ahn, HS Woo and JM Oh. 2007. Effects of weir on the change of water quality. pp. 1033-1037. In: *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*. Korea Water Resource Association.
- Choi JW and KG An. 2008. Characteristics of fish compositions and longitudinal distribution in Yeongsan River watershed. *Korean J. Limnol.* 41:301-310.
- Choi KC, SR Jeon, IS Kim and YM Son. 1989. *Distribution of Freshwater Fish in Korea*. Korea Institute of Freshwater Biology.
- Cloern JE. 1987. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Cont. Shelf Res.* 7:1367-1381.
- Cote O, LMN Ollerhead, RS Gregory, DA Scruton and RS Mckinley. 2002. Activity patterns of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Buckley Cove, Newfoundland. *Hydrobiologia* 483:121-127.
- Drucker EG and JS Jensen. 1996. Pectoral fish locomotion in the striped surfperch: kinematic effects of swimming speed and body size. *J. Exp. Biol.* 199:2235-2242.
- Everitt B. 1993. Channel responses to declining flow on the Rio Grande between Ft. Quitman and Presidio, Texas. *Geomorphology* 6:225-242.
- Gleick PH. 2001. Making every drop count. *Sci. Am.* 284:40-46.
- Gray A. 1992. *The ecological impact of estuarine barrages*. British Ecological Society/Field Studies Council. Shrewsbury, UK.
- Han BD. 2006. Survey of public awareness on dam construction. pp. 9-20. In: *Parliamentary Inspection of the Administration Policy Materials*.
- Hanson M and MGA Butler. 1994. Responses of plankton, turbidity, and macrophytes to biomanipulation in a shallow prairie lake. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51:1180-1188.
- Harris JH. 1984. Impoundment of coastal drainages of southeastern Australia, and a review of its relevance to fish migrations. *Aust. J. Zool.* 21:35-250.
- Hirsch RM, RB Alexander and RA Smith. 1991. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water

- quality. *Water Resour. Res.* 27:803–813.
- Hong JS, RH Jung, IS Seo, KT Yoon, BM Choi and JW Yoo. 1997. How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa Dike in the west coast of Korea? *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 30:882–895.
- Hong SK and JE Kim. 2007. Circulation and network of forest-stream-coastal ecosystems. *J. Island Culture* 30:267–286.
- Hur JW, DS In, MH Jang, HS Kang and KH Kang. 2011. Assessment of inhabitation and species diversity of fish to substrate size in the Geum River Basin. *Environ. Impact Assess.* 20:845–856.
- Hur JW and JK Kim. 2009. Assessment of riverine health condition and estimation of optimal ecological flowrate considering fish habitat in downstream of Yongdam Dam. *Korea J. Korea Water Resour. Assoc.* 42:481–491.
- Hur JW, SY Park, SU Kang and JK Kim. 2009a. Physical habitat assessment of pale chub (*Zacco platypus*) to stream orders in the Geum River Basin. *Korean J. Environ. Biol.* 27:397–405.
- Hur JW and JK Kim. 2011a. Fish monitoring guidelines for calculating ecological flow rate and application examples: 1. Preliminary survey. *Water for Future* 44:41–55.
- Hur JW and JK Kim. 2011b. Fish monitoring guidelines for calculating ecological flow rate and application examples: 2. Field survey. *Water for Future* 44:43–56.
- Hur JW and JK Kim. 2011c. Fish monitoring guidelines for calculating ecological flow rate and application examples: 3. Arrangement and assessment of survey results. *Water for Future* 44:25–42.
- Hur JW and JW Seo. 2011. Investigation on physical habitat condition of Korean chub (*Zacco koreanus*) in typical streams of the Han River. *Environ. Impact Assess.* 20:206–214.
- Hur JW, HS Kang, MH Jang and JY Lee. 2013. Fish community and estimation of optimal ecological flowrate in up and downstream of Hoengseong Dam. *J. Environ. Sci. Int.* 22:925–935.
- Hur JW, JW Park, SU Kang and JK Kim. 2009b. Estimation of fish fauna and habitat suitability index in the Geum River Basin. *Korean J. Environ. Ecol.* 23:516–527.
- Hwang GS, JS Hwang and DS Kim. 2012. Fish migration characteristics with fish type. *Water for Future* 45:20–28.
- Hwang SD, TW Lee, HB Hwang, IS Choi and SH Hwang. 2009. Upstream behavior of glass eels (*Anguilla japonica*) in an experimental eel-ladder. *Korean J. Ichthyol.* 21:262–272.
- Hyun YJ, HS Kang, JM Lee and HT Hwang. 2017. Evaluation of Environmental Ecological Drought Considering Stream Base-flow. Korea Environment Institute. Sejong, Korea. pp. 1–109.
- Jacobs TA. 1990. Regulation and management of the River Murray. pp. 38–58. In: *The Murray* (D Eastburn, ed.). Murray-Darling Basin Commission. Canberra.
- Jadot C, A Donnay, ML Acolas, Y Comet and ML Begout Anras. 2006. Activity patterns, home-range size, and habitat utilization of *Sarpa salpa* (Teleostei: Sparidae) in the Mediterranean Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 63:128–139.
- Jang SH, CI Zhang, JH Na and JH Lee. 2008. Analysis of trophic structures and energy flows in aquatic ecosystem of the lower reaches of the Nakdong River. *Korean J. Environ. Biol.* 26:292–302.
- Jeong BK, YS Sin, SY Yang and C Park. 2011. Monthly variation of phytoplankton community in Asan Bay, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.* 16:238–245.
- Jeong SY. 2005. Alternative eco-friendly dam construction. *National Assembly Review* 478:72–75.
- Kang EJ, H Yang, HH Lee, KS Kim and CH Kim. 2012. Characteristics of fish fauna collected from near estuaries bank and fish-way on the bank of Naktong River. *Korean J. Ichthyol.* 24:201–219.
- Kang KM, JS Kim and NG Jang. 1997. The energy flow and mineral cycles in *Zoysia japonica* and a *Miscanthus sinensis* ecosystem on Mt. Kwanak. 7. The cycles of Mn and Zn. *Weed Turf. Sci.* 11:1–7.
- Karr JR, KD Fausch, PL Angermeier, PR Yant and IJ Schlosser. 1986. Assessing biological integrity of running waters: A method and its rationale. Illinois Natural History Survey. Urbana, IL.
- Kim HG, MH Lee, YJ Kim, DH Won, SJ Hwang, SO Hwang and BH Kim. 2013. Water quality and epilithic diatom community in the lower stream near the south harbor system of Korean Peninsula. *Ecol. Environ.* 46:551–560.
- Kim IS. 1997. Korean Animal and Plant Diagrams. Vol. 37 Animal Places (Freshwater Fish). Ministry of Education. Sejong, Korea.
- Kim IS and JY Park. 2002. Korean Freshwater Fish. Kyohaksa. Seoul.
- Kim JO, HS Shin, JH Yoo, SH Lee, KS Jang and BC Kim. 2011. Distribution of fish in paddy fields and the effectiveness of fishways as an ecological corridor between paddy fields and streams. *Korean J. Ecol. Environ.* 44:203–213.
- Kim KH. 1999. Evaluation of fish-formed environment in rivers and estimation of optimum flow rate. Ph.D. Thesis. Yonsei University, Seoul.
- Kinsolving AD and MB Bain. 1993. Fish assemblage recovery along a riverine disturbance gradient. *Ecol. Appl.* 3:531–544.
- Ko IH, SY Park and JG Kim. 2008. Eco-hydrological evaluation of Geum River based on flow regime change analysis - Case study on the Geum River Basin. pp. 1715–1718. In: *Proceed-*

- ings of Civil Expo 2008. Korean Society of Civil Engineers. Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea.
- Ko MH, IS Kim, JY Park and YJ Lee. 2007. Growth of a land-locked ayu, *Plecoglossus altivelis* (Pisces: Osmeridae) and weir obstruction in Lake Okjeong, Korea. Korean J. Ichthyol. 19:142–153.
- Koo YM, HS Kang and MS Lee. 2014. An economic value for construction of ecological stream in Horg Cheon area, Korea. Korean J. Environ. Ecol. 28:71–79.
- Korea Environment Institute. 2010. Development of Physical Fish Habitat Suitability Index. Korea Environment Institute. Sejong, Korea.
- Korea Environment Institute. 2017. Evaluation of Environmental Ecological Drought Considering Stream Baseflow. Korea Environment Institute. Sejong, Korea.
- Korea Water Resources Corporation. 2002. A Study on the Establishment of Comprehensive Measures for Drought Management. K-Water. Daejeon, Korea. p. 554.
- Korea Water Resources Corporation. 2018. A Research on Estimation and Securing of Environmental Flow. K-Water. Daejeon, Korea.
- Lee GY, MG Kim, SH Han and GO Baek. 2017. A Basic Study on Constructing Fishways for Paldang Dam. Gyeonggi Reserach Institute. Suwon, Korea. pp. 1–119.
- Lee HH and UJ Sup. 2007. Water depth change caused by artificial structures in Geum River estuary: Spatio-temporal evaluation based on GIS. Korean J. Geogr. Soc. 42:121–132.
- Lee JH, GK An, JH Han, BJ Lim, JH Park and JK Shin. 2013a. Comparative analysis of fish fauna and community structures before and after the artificial weir construction in the mainstreams and tributaries of Yeongsan River Watershed. Korean J. Ecol. Environ. 46:103–115.
- Lee MJ, JE Lee, EW Seo and JJ Yu. 2014. Community fluctuation of the benthic macroinvertebrates before and after the construction of Nakdan Weir. Korean J. Ecol. Environ. 47:328–336.
- Lee S, JC Kim and JW Hur. 2013. Assessment of ecological flow-rate by flow duration and environmental management class in the Geum River, Korea. Environ. Earth Sci. 68:1107–1118.
- Lee SH. 2013. Impacts of weirs on fish community in the Jojong Stream. MS Thesis. Seoul National University. Seoul.
- Lee Y, H Chang, TY Yoon and HY Park. 2015. Ex-ante and ex-post economic value analysis on ecological river restoration project. J. KRSA 31:39–54.
- Lee YJ. 2011. Proposal of new domestic fishway type. J. Korean Soc. Civil Eng. 59:101–112.
- Lee YJ, HG Jang and JS Lee. 2013b. Proposal of proper Korean fishway types in domestic river. pp. 193–196. In: Proceedings of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection Conference. Busan, Korea.
- Lim SY and SH Yoo. 2015. The feasibility analysis of restoring the ecological integrity of the Namyang and Yugu streams. J. KRSA 31:25–45.
- Lucas MC and E Baras. 2001. Migration of Freshwater Fishes. Blackwell Science. Oxford, UK.
- MacLennan DN and EJ Simmonds. 1992. Fisheries Acoustics. Chapman & Hall. London, UK. p. 325.
- Mallen-Cooper M, IG Stuart, F Hides Pearson and JH Harris. 1995. Fish migration in the Murray River and assessment of the Torrumbarry fishway. Final Report, NRMS Project N002.
- Mantel SK, NWJ Muller and DA Hughes. 2010. Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 2: Biotic response-abundance and composition of macroinvertebrate communities. S. Afr. J. Radiol. 36:361–370.
- Matthews KR. 1992. A telemetric study of the home ranges and homing routes of lingcod *Ophiodon elongatus* on shallow rocky reefs off Vancouver Island, British Columbia. Fish. Bull. 90:784–790.
- Ministry of Environment. 2011. Passage route survey of migratory fishes before and after the construction of weirs and the fishway's effects. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea. pp. 116, 175.
- Ministry of Environment. 2013. Research on the improvement of survey of lake environment and ecology. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2014a. Preemptive response to water quality changes in Paldang Lake. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2014b. Technical guidelines for ecological river restoration project. Aquatic Ecology Restoration Project Team. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2017a. Research of environmental ecological flow pilot project and system operation plan. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2017b. Green algae management and aquatic ecosystem health security technology development project planning research. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2017c. Research on aquatic continuity survey and security system establishment. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Ministry of Environment. 2019. A study on the establishment of a healthy integrated water management system from ditch to estuary. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- Morhardt JE, D Bisher, CI Handlin and SD Mulder. 2000. A portable system for reading large PIT tags from wild trout. North Am. J. Fish. Manage. 20:276–283.
- Morris GL and J Fan. 1998. Reservoir Sedimentation Handbook:

- Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watershed for Sustainable Use. McGraw-Hill. New York.
- Mueller M, J Pander and J Geist. 2011. The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *J. Appl. Ecol.*, 48:1450–1461.
- Nelson LA. 1992. *Methods of Marking Fish and Shellfish*. American Fisheries Society Special Publication 23. Bethesda, MD.
- Oh KR, JH Lee, GW Choi, DH Kim and SM Jeong. 2008. Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model - focused on *Zacco platypus*. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* 8:117–124.
- Park CS and KG An. 2014. Fish passage assessments in the fishway of Juksan Weir constructed in the downstream area of Youngsan-River Watershed. *J. Environ. Sci. Int.* 23:1513–1522.
- Park SB, JY Lee, MH Jang, HW Kim, JM Jeong, JW Kim and GJ Joo. 1999. Water quality and phytoplankton community dynamics in a weir reach of the Yangsan Stream (1993–1996). *Korean J. Limnol.* 32:331–340.
- Park SD. 1996. Function analysis of fishways by hydraulic experiment. pp. 51–54. In: *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference*. Seoul.
- Park SD. 2001a. Sweet fish passage. pp. 49–61. In: *Han River Symposium with Sweet fish Return*. Seoul.
- Park SD. 2001b. Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (I) Baffled fishway. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 34:365–379.
- Park SD. 2001c. Assessment of ascending capacity of migratory fish in fishways by eco-hydraulic experiments (II) Terraced fish. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 34:381–390.
- Park ST. 2010. The 4-river restoration project from the viewpoint of 21st century river management. *J. Environ. Health Sci.* 36:72–75.
- Park SY, SJ Kim, SH Lee and BM Yoon. 2008. An experimental study on the swimming performance of pale chub (*Zacco platypus*). *J. Korea Water Resour. Assoc.* 41:423–432.
- Parker NC, AE Giorgi, RC Heidinger, DB Jester, ED Prince and GA Wimans. 1990. *Fish-Marking Techniques*. American Fisheries Society. Bethesda, MD.
- Petts GE. 1979. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Prog. Phys. Geogr.* 3:329–362.
- Rinaldi M, B Belletti, WV de Bund, W Bertoldi, A Gurnell, T Buijse and E Mosselman. 2013. Review on Eco-hydrumorphological methods. *Restoring rivers for effective catchment management*. European Commission: Belgium, 202.
- Roussel JM, A Haro and RA Cunjak. 2000. Field-test of a new method for tracking small fishes in shallow rivers using passive integrated transponder (PIT) technology. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 57:1326–1329.
- Seong JU, JC Park, JH Park and JO Kim. 2013. Classification and assessment of fishway in the tributary of Nakdong River. *Ecol. Environ.* 46:185–191.
- Shin JK and KJ Cho. 2000. Seasonal dynamics and pollution status of the water quality in the Kum River Reservoir. *Korean J. Limnol.* 33:251–259.
- Shin YS and BB Yoon. 2011. Change in taxonomic composition of phytoplankton and environmental factors after construction of dike in Yeongsan River estuary. *Korean J. Environ. Biol.* 29:212–224.
- Son SH. 2008. Effect of river artificial structures on ecosystem: Focusing on benthic large invertebrates, fish, and river vegetation. *MSThesis*. Soonchunhyang University, Asan, Korea.
- Song MY. 2010. Survey and evaluation of stream restoration projects in Gyeonggi province. *Gyeonggi Research Institute*. Suwon, Korea. pp. 1–193.
- Stalnaker C, BL Lamb, J Henriksen, K Bovee and J Bartholow. 1995. *The instream flow incremental methodology. A primer for IFIM*. Biological Report 29. U.S. Department of the Interior, National Biological Service. Fort Collins, CO.
- Sung YD, BJ Park, JG Jae and JK Sue. 2005. The estimation of ecological flow recommendations for fish habitat. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 38:545–554.
- Taylor EB and JD McPhail. 1986. Prolonged and burst swimming in anadromous and freshwater three spine stickleback, *Gasterosteus aculeatus*. *Can. J. Zool.* 64:416–420.
- Thomas DHL. 1996. Dam construction and ecological change in the riparian forest of the Hadejia-Jama' are floodplain, Nigeria. *Land Degrad. Dev.* 7:279–295.
- Topping DJ, DM Rubin and LE Vierra. 2000. Colorado river sediment transport: 1. Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam. *Water Resour. Res.* 36:515–542.
- Woo HS, JW Lee and KH Kim. 1998. Development of a method for determination of instream flow needs required for fish habitat conservation application to the Keum River. *J. Korean Soc. Civil Eng.* 18:339–350.
- Yang HJ, KH Kim and JD Kum. 2001. The fish fauna and migration of the fishes in the fish way of the Nakdong River Mouth Dam. *Korean J. Limnol.* 34:251–258.
- Yang WI. 2011. Research on the development of Four Major River restoration project. *MS Thesis*. Kwangwoon University, Seoul, Korea.
- Yeo KD and KS Yoon. 2005. Study on problems with fishway and suggestion for improvement in Korea. pp. 2588–2591. In: *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers Conference*. JeJu, Korea.

Yoon YY, DH Kim and SM Lee. 1999. Accumulation of pollutants in the lower course of the Namdae stream and effect of the water discharged from Kangnung hydroelectric power station. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 21:2221-2230.

Zytlewski GB, A Harom, KG Whalen and SD McCormick. 2001. Performance of stationary and portable passive transponder detection systems for monitoring fish movements. *J. Fish Biol.* 58:1471-1475.