

Review

## 하천 연속성의 개념과 평가: 국외 사례 비교를 통한 국내 적용성 고찰

최예림 · 이대희 · 유경아<sup>1</sup> · 장광현\* · 김정희<sup>2,\*</sup>

경희대학교 환경학및환경공학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 물환경연구부, <sup>2</sup>주식회사 에코리서치

**The Concept and Assessment of River Continuity: Review of Global Trends for Domestic Application.** Yerim Choi (0000-0002-8600-1391), Dae-Hee Lee (0000-0002-4701-9409), Kyung-A You<sup>1</sup> (0000-0002-2733-6829), Kwang-Hyeon Chang\* (0000-0002-7952-4047) and Jeong-Hui Kim<sup>2,\*</sup> (0000-0003-2331-4232) (Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Republic of Korea; <sup>1</sup>Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea; <sup>2</sup>EcoResearch Incorporated, Gongju 32588, Republic of Korea)

**Abstract** Recently, Korean government has incorporated the assessment and restoration of river continuity as a key component of its integrated water management policy. While, methodologies for evaluating discontinuities and degradation, as well as the procedures for assessment and restoration, have been developed and proposed, there is a need for further improvement. Therefore, further research is required to establish a conceptual framework for continuity specific to domestic river ecosystems and to formulate appropriate assessment methods and restoration strategies. In this study we conduct a comparative analysis of the concepts, restoration approaches, and comprehensive evaluation methods for river continuity as proposed by Japan, the United States, and the European Union (EU), all of which have long-standing frameworks for river continuity assessment and restoration projects. Each country demonstrates distinct objectives and guidelines: Japan emphasizes habitat continuity within the context of river and watershed continuity, the United States integrates continuity as a tool for watershed management, and the EU prioritizes biodiversity conservation by advocating for the removal of artificial barriers and promoting the restoration of free-flowing rivers (FFR). By investigating these international examples, this study provides insights that can guide the development of long-term strategies and evaluation criteria for securing aquatic ecosystem continuity in Korea.

**Key words:** river continuity, river restoration, longitudinal continuity, lateral continuity

### 하천 연속성의 개념

생태계에서 연속성의 개념은 자연 시스템에서 물질과 유

기체가 공간적으로 정의된 단위 사이를 이동할 수 있는 정도로 정의된다(Wohl, 2017). 하천 연속성의 개념은 하천 생태학자 James Ward가 하천을 포함하는 유역 생태계의 연속적 특성을 개념화한 이후로 지형학자들로부터 물과 퇴적물의 흐름을 설명하는 데에 적용되기 시작하였으며, 이후 생물 다양성 보존과 연계되어 생물의 이동 측면에서 유역 간의 연속성이 더욱 중요한 요소로 인식되었다(Ward, 1989). 하천 생태학 분야에서 널리 알려진 하천연속성 개념(RCC, River

Manuscript received 19 September 2024, revised 25 September 2024, revision accepted 25 September 2024

\* Corresponding author: Tel: +82-31-201-2977

E-mail: chang38@khu.ac.kr

Tel: +82-41-853-3018

E-mail: ragman-k@hanmail.net

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

Continuum Concept; Vannote *et al.*, 1980)이 하천의 연속적인 변화로 인한 유기물 공급원의 변화와 이를 이용하는 소비자 군집의 기능군 특성 변화를 강조하여 생물군집 중심의 생태계 물질순환에 초점을 맞춘 반면, Ward의 연속성 개념(SDC, Serial Discontinuity Concept; Ward and Stanford, 1983)은 댐, 저수지와 같은 인공 구조물로 인한 물리·화학·생물학적 특성의 시공간적 변화의 불연속성을 고려하고 있어 인공 구조물의 영향을 평가하고, 하천 생태계의 복원 및 관리 전략을 수립하는 데 중요한 이론적 배경으로 사용되어 왔다. 최근 하천의 연속성을 평가하고 단절된 연속성의 복원이 하천 관리의 핵심으로 인식됨에 따라 하천 연속성에 대한 평가 방법과 복원에 대한 연구가 활발히 이루어졌고 국가적 하천 관리를 위한 표준화된 지침 개발과 공유가 이루어지고 있다(Thieme *et al.*, 2023). 하천 연속성의 단절은 주로 댐, 보와 같은 하천 내 인공구조물로 인해 발생되며 이로 인한 하천 본래의 온전한 연속성의 영향 평가는 일반적으로, 1) 유황개념(flow regime), 2) 수계 내 영양염류와 유기물의 이동, 3) 서식 생물군집의 이동성 및 4) 생태계 먹이망과 생산성의 주요 요소로 구분되어 이루어진다(Pettit *et al.*, 2017) (Fig. 1).

하천의 연속성은 종적(하구 및 해양 시스템을 포함하여 하천의 상류 및 하류) 연속성, 횡적(본류, 범람원 등) 연속성, 수직적(지하수, 하천 및 대기) 연속성, 시간적(자연 흐름) 연속성의 네 가지 차원으로 확장될 수 있다(Thieme *et al.*, 2023).

종적 연속성은 수체의 발원지에서 하구까지의 물 흐름에 단절이 없는 것으로, 일반적으로 상류-중류-하류의 물의 흐름에 대한 연속성을 의미한다. 하천에 보·댐과 같은 인공구조물의 건설은 수체의 흐름에 단차를 형성시켜 종적 연속성

을 훼손시키며, 이러한 구조물에 의해 물이 가두어져 그 흐름이 정체되는 경우에 물의 흐름 측면에서 종적 연속성이 방해받게 되고, 동시에 회유성 어류를 포함한 다양한 서식 어류의 종적 이동이 제한되게 된다(Large and Petts, 1996; Kim *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Thieme *et al.*, 2023). 횡적 연속성은 수면, 둔치, 홍수터, 수변구역 등 수생태계와 육상생태계가 구조적(지형적), 기능적(생물이 서로 왕래하고 물질이 서로 이동)으로 연결되어 변화되는 성질을 의미한다. 홍수 시에는 물이 하천 수로를 넘어 주변의 습지와 연결되며, 이때 생물이나 물질들이 이동하게 된다. 반대로 저수기에는 서로 분리되어 연속성이 단절되어, 유량과 수위에 의해 주기적으로 변화한다(Ward, 1989). 종적 연속성과 횡적 연속성은 범람과 큰 관련이 있으며, 이를 통해 물, 퇴적물, 영양분, 유기물들의 종적, 횡적 이동 및 교환이 이루어진다. 국지적으로 내리는 호우는 소규모 하천에서 건설된 구조물의 단차를 극복함에 따라 일시적으로 종적 연결성이 확보되는 경우가 발생한다. 반면 큰 강에서의 범람은 횡적 연결성을 증가시킨다. 범람으로 인해 육상에 퇴적된 영양분과 유기물이 하천 생태계로 유입되며, 수위 증가로 인한 미소서식처의 형성과, 수로의 연결은 생물의 이동 통로와 산란처를 제공하게 된다. 횡적 연결로 인한 영양분의 공급은 유입된 영양분이 서식 생물 군집에 긍정적 영향을 미치는 미국의 우각호나 호주의 간헐천 등에서 중요하게 적용되는 개념으로, 국내 하천의 경우 많은 횡적 구조물이 설치되어 있고 부영양화로 인해 영양 염류의 농도가 높아 수질에 부정적인 요소로 작용하는 경우가 많아 적용에 있어 차별화가 필요한 개념이라 할 수 있다.

하천의 수직적 연속성은 하천과 인접한 지하수 사이 연속성, 대기와 하천 사이 연속성을 포함한다. 대수층 내의 탄소

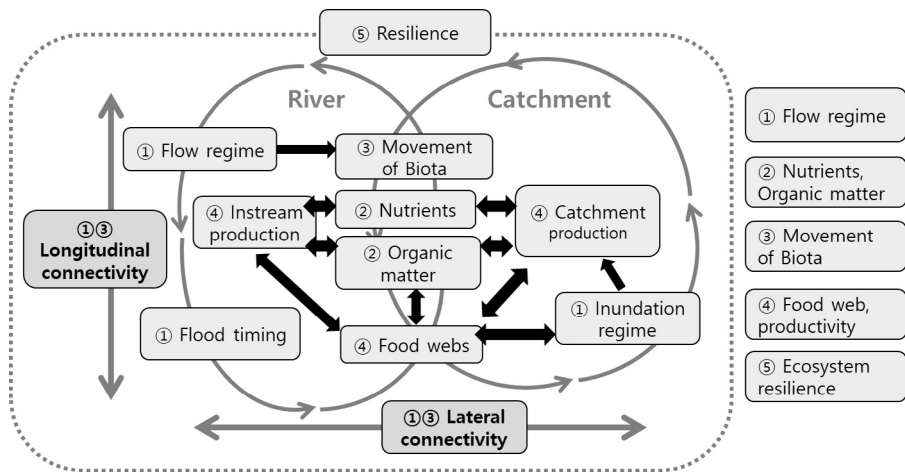


Fig. 1. Longitudinal and lateral continuity of rivers, biological movement, food web, nutrient interactions, and the stability of river ecosystems (interpreted and applied to Korean river environments based on the concepts of Pettit *et al.*, 2017).

및 영양소 역학, 미생물 활동, 생물근집의 이동 등은 대수층의 배출을 통해 하천 생산성에 중요한 역할(특히 비생산적인 하천 생태계)을 하기 때문에 특정 하천 생태계에서의 수직적 연속성은 중요 요소로써 고려될 수 있다(Ward, 1989; Jain and Tandon, 2010; Thieme *et al.*, 2023). 또한 시간적 개념은 일반적으로 계절적 변화 및 장기적 변화를 포함하며 때로는 서식 생물의 반응과 변화와 관련된 시간 개념 및 교란 후 생태계 변화와 관련한 시간 등 연구 대상과 목적에 따라 다양하게 적용될 수 있다(Ward, 1989).

### 국내 하천 연속성 단절 상황과 연속성 확보 정책

국내에는 농업용수의 공급을 위해서 하천 내 다수의 보가 건설되어 있다. 국내 5대강 권역에 위치한 국가 및 지방 하천 3,837개를 대상으로 실시된 전수조사에서 확인된 보는 34,012개로 km당 약 1.2개의 보가 하천에 설치되어 있는 것으로 파악되었다(Cha *et al.*, 2015). 환경부는 이와 같은 하천 수생태계 연속성 단절에 대한 심각성을 인지하고 2017년 물환경보전법에 수생태계 연속성 조사(물환경보전법 제22조의2)의 법적 근거를 마련하였다. 해당 법률에 근거하여 환경부에서는 2018년 국내 실정에 적합한 수생태계 연속성 조

사 지침(안) 개발을 시작하였으며, 2023년 “수생태계 연속성 조사 및 평가 방법 등에 관한 지침”이 국립환경과학원 예규로 등록되어 현재 해당 지침을 근거로 연속성 조사 및 평가가 이루어지고 있다. 해당 지침은 하천 연속성을 종적·횡적 연속성으로 나누어 평가 방법을 제시하고 있으며, 종적 연속성의 경우에는 인공 구조물의 물리·수리 현황(경사, 유속, 수심, 낙차)과 인공구조물 하류에 서식하는 어류를 채집하여 어류 이동성을 간접적으로 계산하는 방법으로 평가 지침을 제시하고 있다. 횡적 연속성은 하천 제내·외지의 연속성, 제방 연속성을 중심으로 평가 지침을 제시하고 있으며, 횡단면 구조 및 제방 경사, 식생 피복 비율 및 습지 면적비를 이용하여 횡적 연속성의 단절 정도를 계산하는 방법을 제시하고 있다(Table 1).

국내에서 시행 중인 하천 연속성 복원사업의 경우, 어류의 자유로운 이동을 위한 어도의 설치 및 개보수 사업을 통해 이루어지고 있으며 환경부, 해양수산부, 농림축산식품부 등에서 각각 목표는 상이하나 방식은 유사한 어도 개선 사업을 수행 중이다. 환경부는 지침을 통해 하천 내 횡단 구조물의 종적·횡적 연속성을 평가한 후 연속성 단절이 심각한 구조물을 대상으로 2021년부터 하천 연속성 확보를 위한 횡단구조물의 철거 및 어도 설치 등의 복원사업을 진행 중이다. 해양수산부의 경우, 어류의 이동이 많은 하천을 중심으로 수산자원 증강 및 내수면 어업 활성화를 유도하기 위해 2014년부터

**Table 1.** Guidelines on Investigation and Evaluation Methods for Aquatic Ecosystem Continuity and River Continuity Restoration Projects in Korea.

Related topics	Details
Legal basis	- 2017 Water Environment Conservation Act: Implementation of “Guidelines on the Investigation and Evaluation Methods for Aquatic Ecosystem Continuity”
Evaluate for longitudinal continuity	- Artificial structures such as weirs, drop structures, reservoirs, and dams installed in rivers - Reservoirs and dams without fishways are excluded from the investigation - Fish inhabiting the 100-meter section downstream of artificial structures
Evaluate for lateral continuity	- To evaluate the aquatic ecosystem continuity between public waters and riparian areas, floodplains, levees, and adjacent areas of rivers, including river channels, riverbanks, and floodplains, are included in the investigation - Investigation points and sections are selected based on the scale of the river, targeting the entire flow path of the investigated river - Lateral continuity is evaluated by investigating floodplain continuity, levee continuity, and the continuity of adjacent areas in the selected investigation sections
Challenges of restoration projects	- Ministry of Environment: (2021~) River continuity restoration project through the removal of transverse structures and installation of fishways - Ministry of Oceans and Fisheries: (2014~2022) Fishway renovation project aimed at increasing fishery resources and promoting inland fisheries - Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs: (1968~2030) Fishway installation project tailored to the characteristics of different fish species to facilitate free fish movement

2022년까지 “어도 개보수사업”을 진행하였다. 농림축산식품부는 친환경적 농업 수리시설물의 정비를 목적으로 1968년부터 2030년까지 어류의 자유로운 이동을 돕기 위해 어종별 특성에 맞는 어도를 설치하는 사업을 진행 중이다(Table 1).

국내의 경우, 앞선 국가기관 주도의 하천 연속성 확보 사업 이외에도 특정 지점 및 구간에서 보 및 댐 건설로 인한 어류, 저서생물 군집 및 식생의 시공간 분포 변화 평가를 중심으로 하천 연속성 복원과 평가에 관련한 연구가 수행되어 왔다 (Won *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2010, 2018; Kim *et al.*, 2015). 최근에는 횡단 구조물의 유량 특성 모의에 기반한 어류의 이동 특성을 이용한 횡단구조물의 종적 연결성 평가 방안에 대한 연구 결과가 보고되었고, 특히 Kim *et al.* (2020)은 국내외의 어류 기반 종적 연속성 평가모델 개발 및 현장 적용성을 종합적으로 분석하여 국내의 적용 방안을 제시하였다. 이들 연구는 어류 이동 측면에서의 평가 관점과 방법에 대해 유용한 연구 결과와 적용 방법을 제시하고 있다.

현재 국내 수생태계 연속성 확보를 위한 하천 연속성 평가는 개별 구조물을 대상으로 하류에 서식하는 어류의 이동능력에 초점을 맞춘 간접적 평가가 진행되고 있으며, 하천 연속성 복원사업의 경우에는 여러 유관 부처에서 일원화되지 않은 방식으로 어도의 설치 및 개보수 사업이 진행되고 있어, 물질 순환 및 생물이동을 목표로 하는 수역 개념의 하천 전

체 연속성의 평가 및 복원에 한계가 존재한다. 따라서 국내 수생태계 특성에 맞는 하천 연속성의 확보를 위해서는 전략적 목표설정과 더불어 하천 전체의 연속성을 확보할 수 있는 추가적인 평가 및 복원 방안의 연구가 필요한 실정이다. 이러한 국내 하천 연속성 확보 정책 현황에 비해 국외의 경우 일찍이 하천 연속성의 개념을 확립하고 이에 대한 평가를 수행, 다양한 하천 복원사업을 진행해왔으며, 복원과 평가에 대한 지침 또한 세부적으로 제시되어 있다. 따라서 본 논문에서는 하천 연속성 개념을 적용하여 하천 복원사업을 선도적으로 수행하고 있는 일본, 미국 및 유럽연합(EU)을 대상으로 해당 국가들에서 제시하고 있는 하천 연속성의 개념과 복원의 방향성, 연속성을 평가할 수 있는 종합적인 평가 방법을 비교 분석하였다. 이를 통해 향후 국내의 장기적인 수생태계 연속성 확보를 위한 방향 설정과 평가에 대한 기준 마련에 도움이 되고자 하였다.

## 일본의 하천 연속성 개념과 관리

### 1. 일본의 하천 연속성 개념과 관리 정책 방향

일본의 하천 연속성 관리는 1997년 개정된 하천법에 의해 “하천환경의 정비와 보전”이 하천 관리의 주요 목표로 설정

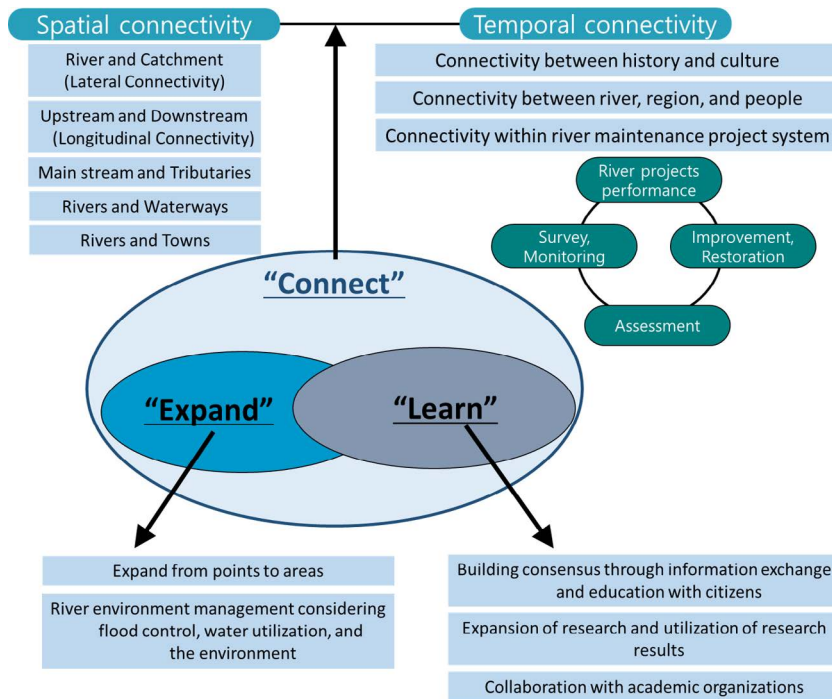


Fig. 2. The key concepts of Japan’s river continuity restoration project (River environment initiatives in specific watersheds and river sections focusing on “connecting”, “expanding”, and “learning”, Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2017).

**Table 2.** Concepts, Implementation, Evaluation, and Future Tasks Extraction Process of River Improvement in Japan Regarding Continuity (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan, 2017).

Related topics	Details
Legal basis	- 1997 River Act Amendment: Main goal set as “Improvement and Conservation of River Environment”
Policy Direction	- Within the basic framework for the improvement and conservation of the river environment, the policy direction for the river environment is established - Policy 1: Conservation and improvement of habitats for the reproduction, growth, and breeding of wildlife - Specific Policy: Multi-natural river creation (Ecological networks), Create rivers that facilitate fish migration
Concept of continuity	- Longitudinal Continuity: Continuity between upstream and downstream (mainstream-tributary, within the mainstream) - Lateral Continuity: Continuity between river and floodplain
Evaluation Perspective	- Conservation and restoration of the river's inherent dynamism - Conservation and improvement of habitats for the reproduction, growth, and breeding of native river species - Ensuring continuity between the river and its watershed - Monitoring and scientific evaluation - Setting clear goals and collaborating with local residents and relevant agencies
Strategy for Ensuring Continuity	- Formulated guidelines for multi-natural river creation and creating fish-friendly rivers (2005) - Actively improve and construct fishways, and ensure the flow in fishways by upgrading structures and surroundings of river-crossing structures such as weirs and dams that obstruct fish movement within rivers. - Reconstruction of river-crossing facilities - Reconstruction or construction of fishways - Improvement of flow conditions within the river, such as flow variations - Securing riparian vegetation and forming biotopes to enhance habitat environments
Challenges of Restoration Projects	- Review from the perspective of conserving habitat and breeding environments, including water quantity and quality, and continuity with surrounding water bodies of the river - Need to respond based on expert opinions from each site - Responsibility to explain the purpose and intent of the project, and, if necessary, fully obtain the understanding and cooperation of residents around the river with maintenance plans - Fishways that require functional and structural improvements

된 후 수행되기 시작하였으며, 해당 목표를 4가지 영역 - [생물서식환경의 보전과 정비], [수변공간의 보전과 정비], [유량, 수질 개선], [지역, 시민과의 연계, 협력] - 으로 세분화하여 정책을 시행하고 있다. 그중에서도 하천 연속성의 확보 및 평가 방안은 첫 번째 주요 정책 목표인 “생물의 서식, 번식환경의 보전과 정비” 내 개별 시책을 통해 제시되고 있으며, 하천 연속성 확보에 관하여 대하천 복원 지침인 “다자연하천 조성” 지침과 어류의 하천 내 자유로운 이동을 복원의 목표로 하는 “어류가 이동하기 쉬운 하천 조성” 지침을 제시하고 있다(Table 2).

일본의 하천 연속성은 생물의 서식처 개념에서 하천과 유역의 연속성 확보를 평가 및 복원의 목표로 삼고 있으며 여기에서 종적, 횡적 연속성을 동시에 고려하고 있다(Ikeuchi and Kanao, 2003). 하천의 종적 및 횡적 연속성은 공간적인 연결성 개념으로 하천과 주변의 육지의 연결, 상류와 하류의

연결, 본류와 지류의 연결, 하천과 수로의 연결 등을 포함하고 있다. 이와 같은 연결을 통해 관심 대상을 하천의 지점 개념에서 유역을 포괄하는 “면” 개념으로 확장하여 향후 하천 환경관리의 주요 개념으로 제시하고 있다. 일본 하천 정비와 관리에서의 향후 방향성은 훼손된 하천의 “연결”로 제시되고 있으며 이는 구조물로 인한 물리적인 훼손과 영향 외에 사회, 문화적인 연결, 학술, 행정, 시민의 연결 등 포괄적인 연결을 목표로 하고 있다. 또한 “교육”에 대한 중요성을 강조하고 있으며 여기에는 국내에서 수행되고 있는 수생태계 건강성 모니터링 평가 사업에 해당하는 일본의 “하천, 댐 국제조사(일본 국토교통성 실시)”의 확장과 결과의 공유, 관련 연구의 활성화와 조사 및 연구 결과를 시민과 공유하고, 이와 같은 연결을 하천 정비 정책의 추진 동력으로 활용하고 있다(Fig. 2).

2. 일본의 하천 연속성 확보를 위한 평가 및 복원 지침

1) 다자연하천조성 지침

“다자연하천조성” 지침은 중대형 하천의 연속성 평가와 복원의 방향성을 제시하기 위해 “생태계 네트워크” 개념을 도입하고 있다. 생태계 네트워크(Ecological Networks)는 생태계 먹이망 구조를 중간 상호작용의 연결을 중심으로 시각화하여 해석하고, 생태계 복잡성과 안정성의 관계에 대한 해석과 기작을 밝히기 위해 사용되어온 개념이다(Montoya *et al.*, 2006). 일본의 경우 하천 관리의 공간 범위를 중간 상호작용과 그에 필요한 서식처를 포괄하는 개념으로 사용하고 있다(Hara *et al.*, 2014). 생물 다양성 보존을 위해 가치 있는 자연 환경이나 우수한 자연 조건을 가진 지역을 핵심으로 선정하고, 관련된 지역들을 유기적으로 연결하여 관리하는 개념으로, 지리적으로 연속된 경우뿐만 아니라, 철새 도래지와 같이 지리적으로 연속되지 않은 경우도 포함될 수 있다(Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2017). 또한, 복원의 목표를 선정된 지표종의 서식 환경 조성에 두고, 보다 넓은 하천 구간을 대상으로 하여 중, 황적 연속성을 종합적으로 확보하는 경우가 많으며, 대상 범위에 따라 조류와 같은 광역 지표종을 선정하거나 지역 하천 복원과 관리의 경우 어류와 저서성 대형무척추동물과 같이 상대적으로 이동 범위가 좁은 종을 선정하기도 한다. 대상 종의 이동과 생활사를 고려하여 하천의 종적 연속성 및 하천과 유역

내의 서식 환경과 관련한 황적 연속성이 이 네트워크 속에 포함되게 된다.

생태계 네트워크 복원의 평가는 조사 결과에 기반한 평가로서 복원 전·후의 물리적 환경과 생물의 종수, 현존량의 변화를 측정, 조사하여 증감 경향을 평가하는 동시에, 복원된 여울, 하천 내의 미소 서식처의 수, 면적 및 어도 개축에 의한 어류 이동 범위의 연장 등의 전통적 평가 지표를 사용하여 평가하도록 하고 있다. 또한 서식지로서의 적절성(서식 포텐셜)을 추정하는 간접적인 평가 방법도 적용하도록 하고 있다. 광역 조사에서 표준화된 방법을 통해 수집된 데이터의 환경 요인 지표를 이용하여 서식지로서의 적절성을 평가하는 방법으로 유역 규모의 생태계 네트워크 형성에 있어 보전, 대책 지점의 선정 등을 사전에 검토하는 계획 단계에서 넓은 범위를 통일적으로 평가할 수 있는 방법이라 할 수 있으며 다음과 같은 두 가지 적용 방법을 제시하고 있다.

- 모델형(통계적 모델을 사용하는 방법): 서식 적합도 모델 등의 통계적 분석을 통해 생물의 서식 포텐셜을 평가하는 방법
  - 비모델형: 기존의 정보에서 대상 생물과 관계 있는 환경 요인을 선정하고, 일정한 규칙에 따라 점수화함으로써 서식 포텐셜을 평가하는 방법
- 특히 따오기, 황새와 같은 상징적인 의미를 지니는 광역 지

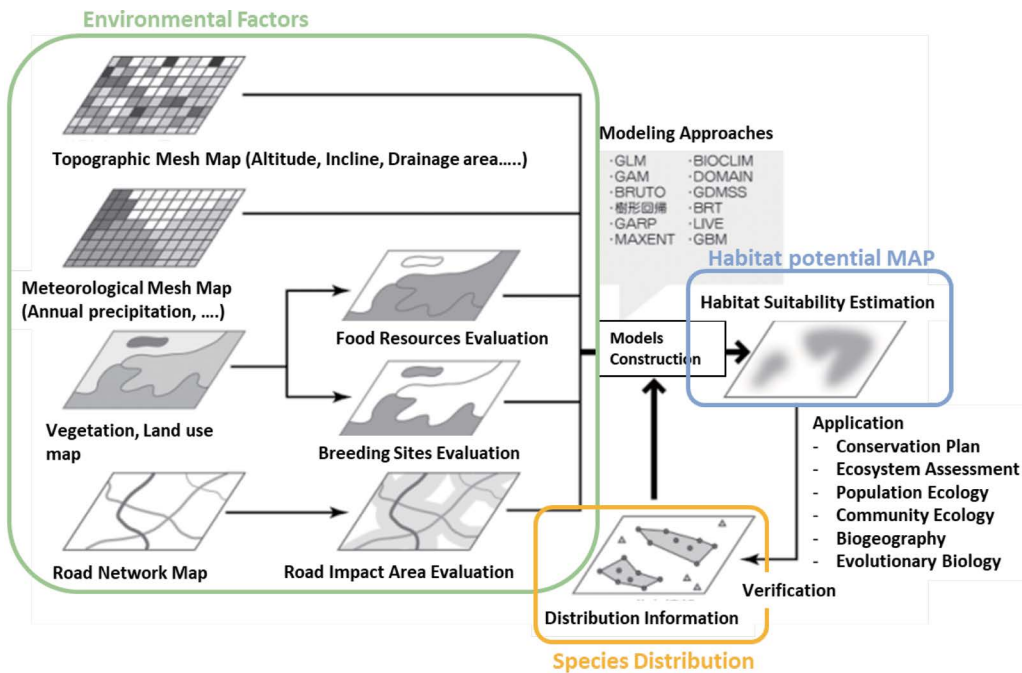


Fig. 3. Concept of creating maps using habitat suitability models (Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2021).

표종의 경우 현재 서식이 확인되지 않은 지역에서도 지표종으로 설정하여 복원의 상징으로 활용할 수 있으며, 이러한 경우에는 과거의 서식 상황을 조사하거나, 서식 적합성 모델을 사용한 평가 등을 통해 현재 해당 지역의 적정성(서식 잠재력)을 평가할 수 있다. 이와 같이 서식지로서의 적절성을 평가하여 평가 결과를 서식 포텐셜 맵 형태로 시각화함으로써 관계자와의 정보 공유, 목표의 공유 목적의 유용한 도구로 활용할 수 있다(Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2021) (Fig. 3).

2) 어류가 이동하기 쉬운 하천 만들기 지침

연속성 확보를 통한 하천 정비 지침인 “어류가 이동하기 쉬운 하천 만들기” 지침은 회유성 어류를 포함, 서식 어류가 해당 하천에서 자신들의 생활사를 완성할 수 있는 하천환경을 조성하는 것을 목표로 하여 대상 하천에서 어류의 상·하류 이동 범위가 넓어질 수 있도록 횡단구조물에 대해 어도의 설치, 구조물의 부분 철거(절개를 통한 이동 통로 확보 및 수위 조절 등)를 중심으로 한 복원 방법을 제시하고 있다. 해당 지침은 개별 하천이 가진 특성과 서식 어종의 조성을 고려한 하천 특이적 목표 설정과 연속성 복원을 위한 보 설치 및 개보수 방법을 시범 사업의 다양한 사례와 결과를 중심으로 제시하고 있다. 따라서 하천 연속성 확보를 위한 표준화된 방법을 제시하기보다 앞서 이루어진 시범 사업의 사례를 분석, 정리하여 대상 하천의 복원사업에 참고할 수 있도록 하고 있다.

실제 하천에서 사업을 진행할 시에는 이 목적을 구체화한

목표를 설정하며, 어류의 회귀-분포 범위 및 어류가 생활사를 완성하기 위해 필요한 장소(산란처, 성장장소)의 분포 현황과 변천을 밝히고 연속성을 확보해야 할 범위를 설정하고 어류가 생활사를 완성하기 위해 서식환경(지형, 유량, 하상 구조 등)의 개선이 필요한 범위를 설정하여 타 하천의 사례를 참고하되, 대상 하천의 특성을 고려한 독자적인 연속성 확보의 노력을 강조하고 있다. 특히 사전에 대상 하천에서 서식하는 어류 군집의 이동 특성을 시공간적으로 정리하여, 횡단구조물과 어종에 따른 이동 범위, 산란처 등 어류의 생활사를 완성할 수 있는 연속성 범위, 과거의 이동 범위 파악을 통해 연속성 확보를 통한 회유 범위, 이동의 시간적 범위를 추정하고 이에 근거하여 연속성 확보를 위한 복원의 세부 목표 설정과 계획을 수립하고 단계적인 복원의 효과를 예측하도록 하고 있다. 복원으로 인한 회유 가능거리를 수치로 표시, 효과를 직접적으로 표현하여 복원 홍보에 효과적으로 활용하도록 하며 분포 범위와 산란 장소 등의 현황을 도식화하여 복원 후 예상되는 분포 범위를 중첩시켜 어류의 생활사 완성을 확인할 수 있도록 하고 있다(Fig. 4).

연속성의 복원 효과는 어류 군집의 상, 하류 비교를 통해 어종의 이동 여부를 해석하여 평가하도록 하고 있다.

- 소형종, 저서성 어종의 유무: 하류에 소형 또는 저서성 어종이 있음에도 불구하고 상류에는 대형종 또는 유영종만 존재하는지에 대한 분석
- 상류와 하류의 어류 최소 체장 비교를 통해 유영 능력과

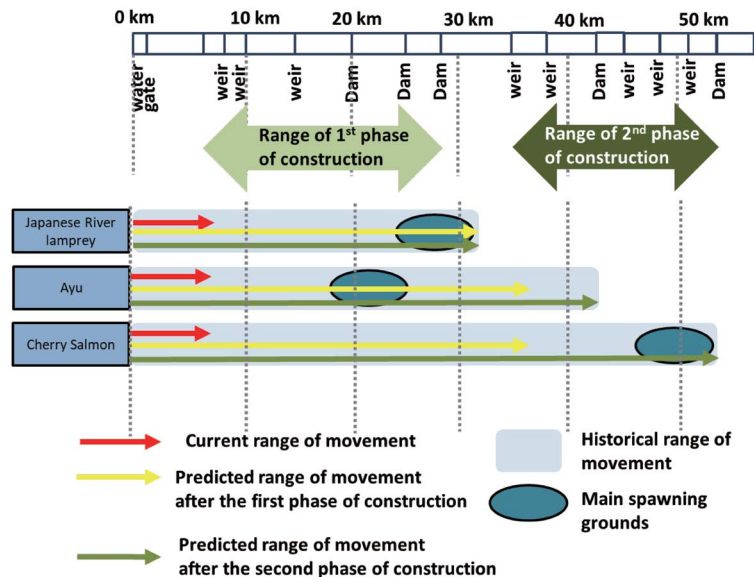


Fig. 4. Examples of restoration project plans and predicted effects after restoration (Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2005).

### 상류로의 이동 관계 해석

- 하류의 어류 군집 특성: 이동하지 못한 어류의 정체 현상 확인

평가에는 개별 횡단 구조물의 개선뿐 아니라 유역 전체를 대상으로 한 평가를 중시하며 하천 전체의 어류 분포와 상류로의 이동 범위 확대에 대한 평가와 해당 하천에서 어류의 생활사 완성 여부에 대해 평가하여 연속성의 확보로 어류 군집이 지속될 수 있는 환경에 대한 평가가 가능하도록 하고 있다. 이와 같은 하천 전체의 평가에는 군집분석(클러스터 분석)을 활용하여, 어류 조성에 기반하여 하천을 다수의 클러스터로 구분(해수-기수-담수-산지 클러스터 등), 복원을 통해 클러스터의 확대 정도를 검토하여 평가하는 방법을 제시하고 있다. 이와 같은 클러스터 구분에서 복원에 의해 어류의 종적 이동이 확보될 경우 중, 하류 클러스터의 범위가 상·하류로 확대되는 경향을 나타내게 된다.

## 미국 EPA의 하천 연속성 개념과 관리

### 1. 미국 하천의 연속성 개념과 관리 정책 방향

1972년에 개정된 미국의 청정수법(Clean Water Act, CWA)은 미국 수역의 물리적·화학적·생물학적 온전성(integrity)을 유지 및 회복하는 것을 목표로 유역 통합적인 측면에서 수자원을 관리 및 보호하도록 명시하고 있다. 이에 따라 미국에서는 연속성의 개념 또한 수역 간의 연결에 기반을 두고 있으며 수역 간 연속성의 개념 및 평가 근거 마련을 위해 연방 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 수역 간 연결의 기초 원리를 정립하고 기존 연구를 바탕으로 발전을 도모할 수 있는 하천(stream)/습지(wetlands)-하류(downstream) 연속성 연구보고서 및 기초 조사 사례집들을 발간하고 있다.

미국에서 하천의 연속성은 다양한 전달 체계를 통해 하천 시스템 구성요소 간에 연결 및 상호작용하는 정도로 정의되며(U.S. EPA, 2015), 하천 상·하류의 종적 연속성, 범람원 습지와 하천 간의 횡적 연속성을 포함하고 있다. 하천의 수로화, 습지 매립 및 준설, 횡단구조물 등에 의한 종적, 횡적 연속성의 단절에 대해서는 하천의 수리학적 특성 및 생물 서식지의 영향에 대한 평가에 따라 단계적인 복원 방향을 제시하고 있다. 종적 연속성 복원 시 하천의 생물학적 기능 회복을 목적으로 하며, 횡적 연속성의 경우에는 생물학적 기능에 더해 수리학적 기능 측면에서의 범람원 연속성 회복 또한 목적으로 하고 있다. 이에 따라 미국에서는 복원의 목표에 적합

한 평가 방법과 평가 결과에 따라 실제 하천 복원이 수행된 사례를 중심으로 대상 하천에 적합한 방법을 적용할 수 있는 가이드라인을 제시하고 있다.

하천 연속성은 유역 건강성 평가, 하천 평가 및 하천 복원 평가 지표의 일부로써 물리적·화학적·생물학적 기능을 중심으로 평가에 활용되며, 하천 연속성의 평가와 복원을 위해 세 가지 지침을 제시하고 있다. 하천의 기능을 계층적인 프레임워크로 제시하여 단계적인 복원 평가 방법을 제시하는 “A function-based framework”, 하천 내 물리적인 구조로 인해 훼손된 연속성의 복원 방법을 제시하며 연속성 훼손의 원인과 해결 방안을 제시하는 “Stream habitat restoration guidelines” 지침, 하천과 범람원 간의 연속성 확보와 관련하여 범람원의 기능에 대해 계층적인 구조로서 평가 방법을 제시하는 “Reconnecting rivers to floodplains” 지침이 있다(Table 3).

### 2. 미국 하천의 연속성 확보를 위한 평가 및 복원 지침

#### 1) A function-based framework 지침

“A function-based framework” 지침은 하천 기능에 대한 이해와 기능 간의 상호작용 원리에 대한 이해를 바탕으로 하천을 복원할 수 있도록 하천의 기능을 계층적으로 구분하여 제시하고 있어, 대상 하천을 기능 중심으로 평가할 수 있다. 가장 상위 수준의 생물학적 기능에 해당하는 경관 연속성이 종적, 횡적 연속성을 모두 포함하며, 그중 횡적 연속성은 하위 2단계의 수리학적 기능 중 범람원과의 연결을 통해서도 고려되고 있다(Fig. 5).

해당 지침에서는 하천의 종적 연속성을 수리·수문학적 연속성에 해당하는 하천의 구조적 연속성과 생물 이동 측면의 연속성에 해당하는 기능적 연속성으로 나누어 평가하고 있다. 구조적 연속성의 경우, 서식지 패치 간의 물리적인 관계 및 거리에 초점을 맞춰 평가하며, 유힬의 시공간적 변동성을 추적할 수 있는 GIS와 같은 공간 분석 기술을 사용하여 하천 수역의 선형 특성을 측정할 수 있는 정량적인 평가 방법을 제시하고 있다.

하천의 기능적 연속성의 경우, 생물의 이동에 영향을 미치는 요소에 초점을 맞춰 평가하기 위해 어류 종의 이동 행동을 추적하여 하천의 연결성을 측정한다. 어류 종의 이동 행동 추적에는 종의 이동 범위, 분산 범위, 이동 중 사망률을 고려하며 서식지 모델을 적용하도록 하고 있다. 이 접근 방법은 전기회로 이론의 원리를 생태학에 적용하여 이동 경로를 분석하는 생태적 회로 이론(Ecological Circuit Theory)을 기반으로 한(McRae and Beier, 2007), 서식지 간의 연결성 및 생물 종의 이동 경로 분석이 가능한 Circuitscape 모델, 서식지



**Table 3.** Concepts, Implementation, Evaluation, and Future strategy Extraction Process of River Improvement in USA Regarding Continuity (Harman *et al.*, 2012; U.S. EPA, 2015).

Related topics	Details
Legal basis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1972 Clean Water Act (CWA) amendment: Main goal set as “restore and maintain the chemical, physical, and biological integrity of the nation’s waters”</li> </ul>
Development of continuity concepts based on research	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>River Continuum Concept</b> (Vannote <i>et al.</i>, 1980): Predicts the ecological structure and function patterns along the entire length of a river, from headwaters to mouth, considering it as a hydrological gradient</li> <li>- <b>Serial Discontinuity Concept</b> (Ward and Stanford, 1983): Expands on the River Continuum Concept by examining the impact of lateral structures on the longitudinal patterns of physical, chemical, and biological continuity</li> <li>- <b>Spiraling Concept</b> (Webster and Patten, 1979; Newbold <i>et al.</i>, 1981; Elwood <i>et al.</i>, 1983): Focuses on understanding the mechanisms of transport and recycling of materials within the river network</li> <li>- <b>Flood Pulse Concept</b> (Junk <i>et al.</i>, 1989): Describes the lateral continuity between rivers and their floodplains, emphasizing seasonal expansion and contraction of wetlands and open water areas</li> <li>- <b>Ward’s Summary</b> (1989): Presents a four-dimensional concept of continuity: longitudinal, lateral, vertical, and temporal</li> <li>- <b>Natural Flow Variability</b> (Bunn and Arthington, 2002): Explains the influence of flow variability on longitudinal and lateral continuity, highlighting its effects on biodiversity</li> <li>- <b>Network Dynamic Hypothesis</b> (Benda <i>et al.</i>, 2004): Describes how biological “hotspots” are formed at tributary confluences, explaining patterns of habitat heterogeneity in river systems</li> </ul>
Concept of continuity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Longitudinal Continuity: Continuity between upstream and downstream (mainstream-tributary, within the mainstream)</li> <li>- Lateral Continuity: Continuity between river and floodplain</li> </ul>
Evaluation Perspective	<p>A hierarchical assessment approach based on river functions</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hydrology function: Transport of water from the watershed to the channel</li> <li>2. Hydraulic function: Transport of water in the channel, on the floodplain, and through sediment</li> <li>3. Geomorphology function: Transport of wood and sediment to create diverse bed forms and dynamic equilibrium</li> <li>4. Physicochemical function: Temperature and oxygen regulation; processing of organic matter and nutrients</li> </ol> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Biology function: Biodiversity and the life histories of aquatic and riparian life</li> </ul>
Strategy for Ensuring Continuity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A function-Based Framework (2012), Stream Habitat Restoration Guidelines (2012), Reconnecting Rivers to Floodplain (2016)</li> <li>- The removal of river-crossing structures, the creation of riparian wetlands, and the securing of adequate water flow to improve habitats degraded by anthropogenic impacts                         <ul style="list-style-type: none"> <li>- Removal of river-crossing facilities</li> <li>- Creation off wetlands for the improvement of habitat environment</li> <li>- Expansion of channel width through bed elevation adjustment</li> <li>- Eco-friendly enhancement of waterways</li> </ul> </li> </ul>
Challenges of Restoration Projects	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Design should consider potential long-term uncertainties based on climate change scenarios</li> <li>- Need preliminary assessment to prevent damage to local cultural heritage and resources</li> <li>- Responsibility to explain the purpose and intent of the project, and, if necessary, the river improvement plan’s location should be communicated clearly to ensure understanding and cooperation from nearby residents</li> <li>- Prevention of invasive vegetation species</li> </ul>

패치 간의 연결성 분석 및 생물종의 이동 가능성 평가가 가능한 Conefor Sensinode 모델, 생물의 이동 경로 및 경관의

기능적 연결성 분석이 가능한 Funconn 모델 등의 서식지 모델을 활용하여 기능적 연속성을 평가한다.

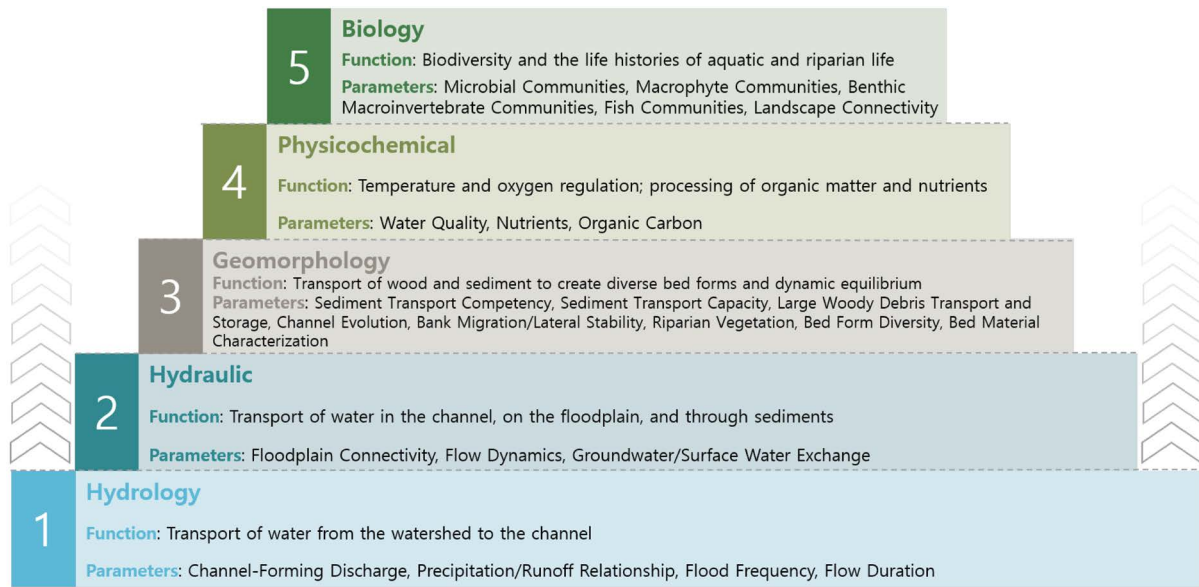


Fig. 5. The hierarchical framework of river functions for river restoration evaluation (U.S. EPA, 2015).

Table 4. Measurement methods for evaluating floodplain continuity considering the hydrological characteristics of the floodplain and river (U.S. EPA, 2015).

Measurement method	Formula	Variable	Detail	Note
Bank Height Ratio (BHR)	$BHR = D_{top} / D_{bf}$	$D_{top}$	Depth from the top of the lowest bank to the thalweg	- BHR close to 1 indicates easy spread to floodplain
		$D_{bf}$	Depth from the bankfull elevation to the thalweg	- BHR close to 2 indicates need for higher discharge to spread
Entrenchment Ratio (ER)	$ER = FW / BW$	FW	Floodprone width, measured at a stage of 2 times the bankfull max depth	- Lower ER indicates a narrow flood-prone area and significant river erosion
		BW	Bankfull riffle width	

횡적 연속성의 평가는 범람원의 물리적인 특성을 중심으로 수행하며, 수리학적 기능에 해당하는 유역 연결성에 대해 정량적 평가를 진행할 수 있는 두 가지 항목과 단계별 유량 분석 기법을 제시하고 있다. 정량 항목으로는 Bank Height Ratio (하천이 만수위를 넘어서는 유량을 나타낼 때 하천의 침식 정도를 고려하여 하천에서 범람원으로 물이 얼마나 쉽게 확산될 수 있는지를 정량적으로 평가할 수 있는 지표)와 Entrenchment ratio (일반적인 하천의 침식 정도로부터 일정 높이가 이상 - 침식 정도의 2배 - 에서 홍수 시 범람 가능 구간 너비를 고려하여 하천-범람원의 연속성을 평가)가 있다. 단계별 유량분석(Stage versus discharge)은 홍수 재발 간격(Flood return interval)에 따른 수위와 유량의 관계를 예측하여 하천의 침식 정도 및 범람원과의 연속성을 평가할 수

있는 지표로 HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center, River Analysis System) 모델(US Army Corps of Engineers, 2016)을 사용하여 평가할 수 있다(Table 4).

**2) Stream habitat restoration guidelines & Reconnecting rivers to floodplains 지침**

Stream habitat restoration guidelines 지침은 하천 복원과 유역 복원 간의 통합과 유역 전체의 물리적, 생태적 평가 결과를 기반으로 하여 인위적인 개입을 최소화한 복원을 강조하고 있으며, 지점에서부터 유역 규모에 이르는 하천의 생물 서식처 연속성 복원 측면에서 물리적인 구조물에 의한 연속성 훼손 원인을 제시하고 각 원인의 해결 방안 및 복원 기술을 제시하고 있다(Table 5).

**Table 5.** Cause of continuity degradation by physical structures, scale of impact, continuity dimension, solutions, and restoration technique (USACE, 2016).

Impact/Cause	Scale of impact	Continuity dimension	Solution	Restoration technique
Diversions or other weirs	Site	Long.	- Removal or reconfiguration of structure	- Instream structures - Channel modification - Fish passage
Culverts	Site	Long.	- Removal or reconfiguration of structure	- Instream structures - Channel modification - Channel profile - Fish passage
Dams	Site, Reach	Long.	- Removal or reconfiguration of structure - Install fish ladder	- Instream structures - Channel modification - Fish passage
Tide gates	Site	Long., Lat.	- Removal or reconfiguration of structure	- Fish passage
Levees	Reach	Long., Lat.	- Levee removal - Breach levees	- Floodplain and Channel Migration zone Restoration - Floodplain fencing - Riparian restoration
Floodplain fill	Reach	Long., Lat.	- Remove fill - Riparian revegetation	- Channel modification - Side channels - Riparian restoration
Channelization	Reach	Long., Lat.	- Reconfigure the channel - Raise channel bed	- Channel modification - Instream structures - Channel profile
Channel incision	Reach	Long., Lat.	- Reconfigure the channel - Raise channel bed	- Channel modification - Instream structures - Channel profile
Bank stabilization	Reach	Long., Lat.	- Remove stabilization features - Reconfigure channel and banks, riparian revegetation	- Channel modification - Riparian restoration
Hydrologic or Sediment Regime	Watershed	Long., Lat.	- Restore regime - Reconfigure channel - Stabilize channel	- Channel modification - Instream structures - Channel profile

Long. means longitudinal and Lat. means lateral

Reconnecting rivers to floodplains 지침은 횡적 연속성의 확보를 통한 생물 서식 환경 개선을 목표로 하여 단계적인 복원 방법을 제시하고 있으며, 연속성 회복 정도에 따른 범람원의 기능적 특성 및 생태적 이점을 서술하고 있다. 해당 지

침은 범람원의 속성에 대해 하천-범람원 연속성, 유황 가변성, 범람원의 충분한 공간 확보, 다양한 서식 환경 및 종 다양성 등의 계층적인 구조를 제시하고 있으며 이에 대해 하천 특이적 목표 설정과 공법 선정을 강조하고 하천-범람원 간의

**Table 6.** Attribute of floodplain and details for ensuring lateral continuity (Jonathon and Eileen, 2016).

Attribute	Action to ensure the attribute	Detail
Floodplain-river Continuity	Setback levees	- Relocate levees further from the river
	Remove levees	- Breach or open up holes in existing levee structures to allow floodwaters to reach the flood plain - Remove levees entirely
	Flood bypass	- Install flood bypasses that allow controlled flooding - Install weirs or floodgates on existing levees
	Address causes of flow alteration	- Work with upstream flow managers to negotiate controlled water releases that mimic natural flood pulses
Variable Flow	Return floodplain activating flows	- Engage with upstream flow regulators to negotiate controlled water releases that meet floodplain activating flow criteria - Management of flow reflecting seasonal changes in river discharge
	Address water withdrawals	- Explore avenues for working with upstream users to secure greater water flow levels
Spatial Scale	Conservation easement	- Work with local land owners and land management agencies to put lands into conservation easement - The conservation stewardship program, land and water conservation fund, and the flood mitigation assistance program
	Land acquisition	- Acquisition through the buyout of repetitive loss properties jurisdiction of the state or local governments that can manage them for restoration
	Federal land transfer	- When working on federal flood control infrastructure, those lands may be turned over to local control following setback or removal
Habitat and Structure Diversity	Allow passive restoration	- Work with local land managers to ensure restored floodplain areas are managed to support natural ecosystem functions.
	Secure sediment supply	- Flush of sediment behind dams
	Enhance woody debris recruitment	- Install log jams - Beaver reintroduction
	Riparian planting	- Replant native riparian plants
	Manage non-native and invasive species	- Remove non-native and invasive plant species

수리·수문학적 연속성 평가 방법을 제시하고 있다(Table 6).

## 유럽연합의 하천 연속성 개념과 관리

### 1. 유럽연합 연속성 개념과 관리 정책

EU는 하천 및 범람원 복원의 중요성을 인지하고 1998년 “European centre for river restoration (ECRR)”을 설립,

하천 복원과 관리에 참여하는 개인 및 조직을 연결하여 하천 복원에 대한 정보를 교환하고, 하천 복원 및 관리의 모범 사례를 개발할 수 있도록 지원하여 유럽 전역의 생태적 하천 복원을 장려해왔다. 2000년에는 수자원의 관리와 보호를 목표로 물 정책 수립의 기본 원칙이 되는 지침인 Water Framework Directive (WFD)를 채택하였고, 해당 지침에 따라 수생태계 지속 가능성을 보장하고 유럽 수역의 “양호한

**Table 7.** Continuity-related items in the Process of Concept, Implementation, Evaluation, and Future Task Derivation of EU River Restoration (EURÓPAI and TANÁCSA, 2000; Kristensen *et al.*, 2018).

Related topics	Details
Legal basis and Policy Direction	<ul style="list-style-type: none"> <li>- WFD (Water Framework Directive, revised in 2000)</li> <li>“Restoration and Maintenance of Good Ecological Status of European Waters”</li> </ul>
Concept of continuity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- River continuity is not hindered by artificial activities, and the movement of aquatic organisms and sediments is unimpeded.</li> <li>- Longitudinal direction: between upstream and downstream</li> <li>- Lateral direction: between the river and the floodplain</li> <li>- Vertical direction: continuity with groundwater and the atmosphere</li> <li>- Temporal concept: seasonal variation of water flow.</li> </ul>
Evaluation Perspective	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification of Single Characteristic Segments and Securing Free-Flowing Rivers through the Evaluation of Continuity within and beyond Segments</li> <li>- Identification of single characteristic segments within potential free-flowing river sections</li> <li>- Evaluation of longitudinal, lateral, and vertical continuity of single characteristic segments</li> <li>- Comprehensive assessment of upstream and downstream pressures on potential free-flowing river sections</li> <li>- Calculation of the minimum length of potential free-flowing river sections</li> </ul>
Strategy for Ensuring Continuity	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Guidelines for the Removal of Artificial Structures for River Restoration (2021), Guidelines for the Creation of Free-Flowing Rivers (2024)</li> <li>- Measures to Ensure Continuity Vary by Country but Generally Include:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Setting Priorities for Restoration Target Water Bodies</li> <li>- Setting Priorities for Restoration Target Artificial Structures</li> <li>- Removal of Artificial Structures and Modification/Installation of Structures to Improve Fish Migration</li> </ul> </li> </ul>

생태적 상태”를 만드는 것을 목표로 설정하였다. 2018년 개최된 EU Water Conference 이후 하천 복원에 있어 연속성의 중요성이 대두되었으며, ECRF에서 제시하는 하천 연속성의 개념은 물, 퇴적물, 수생생물이 하천을 따라 상류와 하류 방향으로 자유롭게 흐를 수 있는 가능성인 종적 연속성, 하천과 범람원 간 이동이 자유로울 수 있는 횡적 연속성과 하천 저층과 지하수 간에 자유로운 흐름을 의미하는 수직적 연속성을 모두 포함하고 있다.

연속성 복원의 중요성이 강조됨에 따라 하천의 인공구조물을 제거하고 자유 흐름 하천을 확보하는 방안에 관한 연구가 지속적으로 진행되어왔으며, 유럽 위원회에서 2030년까지 생물다양성을 회복시키기 위해 세운 전략인 “Biodiversity Strategy 2030”에서는 생물다양성 보전에 있어 하천 연속성 복원의 중요성을 강조하고 있다. 유럽연합은 “2025년까지 인공구조물의 제거와 홍수 범람원 및 습지의 복원을 통해 최소 25,000 km의 하천을 자유 흐름 하천으로 복원한다.”라는 목표를 설정하고 있으며, 이를 달성하기 위해 2021년 인공구조물의 제거를 위한 지침인 “Barrier Removal for River Restoration”을 발간하고, 2024년에는 하천의 연속성을 평

가할 수 있는 지침인 “Criteria for identifying free-flowing river stretches for the EU”을 발간하였다(Table 7).

## 2. 유럽연합의 하천 연속성 확보 지침; Criteria for identifying free-flowing river stretches for the EU

자유 흐름 하천(Free-Flowing Rivers, FFR)은 인간의 활동에 의해 물리적 흐름이 방해받지 않는 하천으로 정의되며, 특히 댐, 제방, 수로 등 인공 구조물의 간섭 없이 자연 상태의 흐름을 유지하는 하천을 말한다. 이 개념은 하천 내의 물질과 생물의 자유로운 이동을 종적, 횡적, 수직적 및 시간적 연결성을 통해 설명하고 있어, 유럽의 하천 관리와 복원에 있어 정량적 평가의 기준으로 사용되고 있으며, 특히 전체 하천 구간에서 이 자유 흐름 하천 구간이 차지하는 비율은 연속성 평가에서 중요한 척도로 활용된다(Van de Bund *et al.*, 2024). 하천 연속성 평가 지침인 “Criteria for identifying free-flowing river stretches for the EU”의 목적은 특정 하천 구간의 현재 상태나 복원 이후 하천의 연속성을 평가하는 절차를 제공하는 것으로 넓은 범위에서 적용 시 유역 또는 국가 수준에서 하천 연속성의 현 상태를 평가할 수 있다. 해당

평가 지침은 하천 연속성의 네 가지 차원(종적, 횡적, 수직적, 시간적) 중 물리적 장애물에 가장 직접적으로 영향을 받는 종적, 횡적, 수직적 연속성에 중점을 두고 있으며, 시간적 연속성의 경우 생태학적 흐름을 통해 부분적으로 고려된다.

하천 연속성 평가 지침은 아래 네 가지 단계를 따라 적용되며 각각의 단계는 논리적으로 연결되어 있으나, 반드시 순차적으로 수행할 필요는 없다. 예를 들어, 조사 중인 하천 구간 외부에 하천의 연속성을 제한할 특성이 존재할 경우, 2단계 전에 3단계를 진행하는 것이 더욱 유용할 수 있다.

- 1단계: 잠재적 자유 흐름 하천 구간 내에서 단일특성구간 판별
- 2단계: 단일 특성 구간의 종적, 횡적, 수직적 연속성 평가
  - 단일 특성 구간 내에서 하천의 연속성을 저해하는 구조물에 대해 평가하기 때문에 인공구조물에 대한 국가적 데이터베이스가 필요함
- 3단계: 잠재적 자유 흐름 하천 구간에 가해지는 상류 및 하류 압력에 대한 대규모 평가
  - 자유 흐름 하천 구간 외부에서 연속성을 제한할 수 있는 상류 및 하류의 제한 사항을 평가
- 4단계: 잠재적 자유 흐름 하천 구간의 최소 길이 계산

- 잠재적 자유 흐름 하천 구간이 생태적 및 수문지형학적 과정이 수행되기에 충분한 길이를 가지는지 평가

1) 단일 특성 구간의 설정

하천 연속성 평가 절차의 첫 단계는 평가 대상 하천 구간 내 단일 특성 구간(Homogeneous reaches, HR)을 설정하는 것이다. 단일 특성 구간은 하천의 연속적인 구간 중에서 지형적 구조가 균일하게 나타나는 구간으로(Levianier *et al.*, 2012), 연속성 평가 방법을 일관성 있게 적용하여 인공구조물 및 인위적 하천 형태의 변형에 의한 하천 연속성의 저해 정도를 파악하기 위해 설정하는 것으로 구간의 길이는 다양할 수 있으며, 보통은 하천 구간의 평균 만수위 폭의 10배에서 100배에 해당한다. WFD에서 제시한 단일 특성 구간의 수문지형학적 평가 방법은 댐/저류보 구간의 끝 부분, 경사 혹은 유량의 큰 변화가 발생하여 변경된 하천 형태로 세분화하여 분류하고, 분류 시 하나의 하천 유형만 적용하여야 하며, 구간 내에 하천 변의 자연 제방 혹은 절벽 등에 의해 흐름이 제한된 상태의 변형 혹은 자연적 방해물(예: 호수, 폭포 등)이 없어야 한다. 또한, 평균 만수위 폭, 구간 내 서식 어류 군집에 큰 변화가 없어야 하고, 구간 내 하천의 합류 지점이 반드시 없어야 하는 것은 아니나, 합류점의 크기 및 유량이

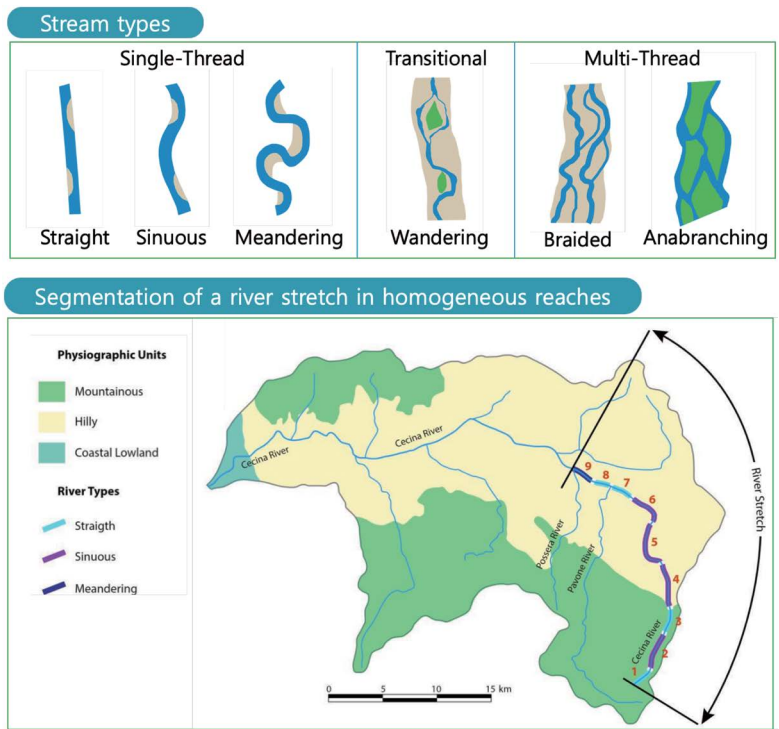


Fig. 6. Six main morphological types of stream and river (Rinaldi *et al.*, 2016) and identification of Homogenous reaches (Van de Bund *et al.*, 2024).

하류 구간의 크기에 영향을 미칠 경우에는 두 개의 다른 구간으로 분할하도록 하고 있다. 구간 내 종적 연속성을 방해하는 구조물이 있는 경우에는 해당 구간을 세분화하여 평가하도록 하고 있다(Fig. 6).

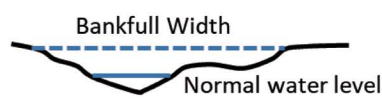
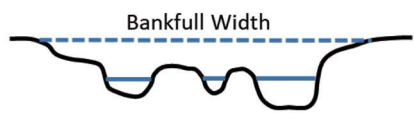
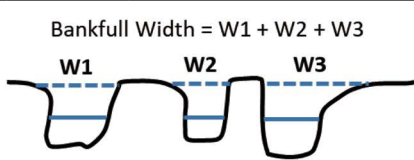




2) 단일 특성 구간의 연속성 평가

종적 연속성의 평가는 어류의 이동 측면에서의 평가, 퇴적물 이동 측면에서의 평가, 생태 유량 및 수문학적 변형에 대한 평가 세 가지로 나뉜다. 어류의 이동 측면에서 평가의 경우, 해당 단일 특성 구간의 연속성이 충분히 확보되었을 경우를 고려하여 구간 내 고유종인 어류 군집의 서식에 대한 평가로 이전의 계획, 연구, 보고서 등을 통해 확보된 데이터를 이용할 수 있으며, 이러한 데이터가 없을 시 참조 하천 혹은 유사한 하천 구간에 서식하는 어류 군집 구조에 기반하여 어류 이동 측면의 하천 종적 연속성을 추정 및 평가할 수 있다. 단, 가파른 산악 계곡 지역 혹은 일시적으로 생성된 하천과 같이 어류 군집이 존재하지 않는 구간은 해당 평가 대상에서 제외된다. 퇴적물 이동 측면에서의 평가는 단일 특

성 구간 내에 퇴적물의 이동을 방해하는 인공구조물이 있는지 확인해야 하고, 이때, 하천의 형태학적 변화와 관련한 Morphological Quality Index (MQI) 등의 평가 방법을 사용할 수 있다(Rinaldi *et al.*, 2016). 생태 유량 및 수문학적 변형 평가는 전체 구간에 걸쳐 연중 생태 유량이 확보되는지, 구간 내에서 어류 혹은 퇴적물 이동에 영향을 미칠 수 있는 비자연적인 물리적 단절과 같은 수문학적 변형이 존재하는지를 평가한다.

횡적 연속성은 최소 범람 구역(Fluvial corridor)을 설정하고 그에 따라 최소 범람 구역 내 횡적 연속성 저해 구조물의 총 길이를 계산하는 방식으로 평가한다. 최소 범람 구역 설정 시 단일 특성 구간의 횡적 연속성을 평가하기 위해서는 하천에 인접한 영역 중 하천이 자유롭게 침식하고 범람할 수 있는 최소한의 토지 부분을 정의하는 최소 범람 구역을 설정하는 것이 필요하다. 일반적인 하천 범람원의 너비는 하천 지형, 지질 특성, 하천의 길이와 경사 등 여러 요인에 의해 결정되는데, 자유 흐름 하천의 횡적 연속성 평가에 있어 일반적인 하천 수변, 범람원을 사용하는 것은 도시화 및 기존 기반 시

**Table 8.** Measurement of bankfull width (W; C = pW) and application of type coefficients by river type for calculating fluvial corridor width (Van de Bund *et al.*, 2024).

Parameter	Stream type	Value
W (Mean bankfull width)	Single-thread	
	Multi-thread braided	
	Multi-thread anabranching	$Bankfull\ Width = W1 + W2 + W3$ 
p (Stream (river) type coefficient)	Single-thread rivers	p = 2 
	Transition rives	p = 1 
	Anabranching rivers	p = 0.5 
	Braided rivers	p = 0.2 

설의 존재 등으로 인해 실현 가능성이 낮으므로 평가에 적절한 최소 범람 구역을 설정하는 것이 필요하다. 최소 범람 구역(C)은 아래 식을 이용하여 계산한다. 단, 계산에 따른 최소 범람 구역의 너비가 범람원의 너비를 초과하는 경우에 최소 범람 구역은 범람원과 일치한다(Table 8).

$$C = pW$$

C: 최소 범람 구역의 너비(하천의 제방에서부터 측정)

W: 평균 만수위 하천 폭

p: 하천 유형 계수

최소 범람 구역 내 횡적 연속성 저해 구조물의 총 길이 ( $L_{tot}$ )를 계산할 때는 최소 범람 구역의 설정 후 해당 구역 내 횡적 연속성 저해 구조물을 확인하고 도식화해야 한다. 횡적 연속성 저해 구조물은 범람을 방지하는 제방, 둑과 같은 구조물, 침식 및 횡적 이동성을 방지하기 위한 사석공, 돌망태공 등을 모두 포함하며, 하천의 범람 구역 내에 위치한다. 이러한 모든 구조물을 고려하여 총 길이 ( $L_{tot}$ )를 계산해야 하며, 구조물이 겹칠 때 길이는 한 번만 고려된다. 또한, 하천 제방과 직접적으로 연결된 저해 구조물은 하천의 흐름과 직접 접촉하여 횡적 연속성에 대한 영향이 더 크기 때문에 총 길이 ( $L_{att}$ )는 별도로 평가한다. 최소 범람 구역 내 횡적 연속성 확보 하천의 기준은 Table 9와 같다(Fig. 7).

수직적 연속성 평가는 인공적으로 형성된 불투수성 하천 바닥 구간이 단일 특성 구간 길이( $L_c$ )의 5% 미만일 때 연속성이 유지된 상태라고 평가할 수 있다. 이는 불투수성 바닥 구간이 하천의 수직적 연속성과 하상 구조에 미치는 영향을 최소화하는 범위로 판단되기 때문이다. 해당 평가는 원격 이미지 또는 국가에서 제공하고 있는 구조물 정보를 파악하여

진행할 수 있으며, 정보가 없는 작은 하천의 경우에는 별도의 조사를 실시하도록 하고 있다.

3) 자유 흐름 하천의 상류 및 하류 압력에 대한 대규모 평가

하천 내 단일 특성 구간의 연속성을 평가하기 위해서는 종적, 횡적, 수직적 연속성의 평가뿐만 아니라 하천의 주요 형태학적 및 생태적 기능이 상류 또는 하류의 압력에 의해 저해되지 않는지 평가할 필요가 있다. 즉, 하천에 영향을 미치는 요인을 압력(Pressure)으로 정의하고, 이에 대한 영향을 평가하도록 하고 있다(Pressures and impacts analysis). 하천에 가해지는 압력은 연속성(Continuity), 수리·수문학적 변형, 형태 변형, 수질, 항해(Navigation) 및 레크레이션, 외래종으로 인한 생물학적 압력 등의 기타 압력으로 총 5가지로 평가될 수 있다(Parasiewicz *et al.*, 2023). 이와 같은 압력의 평가는 대규모로 이루어지며, 상류로부터의 퇴적물 이동과 어

Table 9. Criteria for rivers with lateral continuity within the fluvial corridor width (Van de Bund *et al.*, 2024).

Classification	Criteria
All river types except meandering rivers	$L_{tot} < 0.4L_c$ $L_{att} < 0.2L_c$
Meandering rivers	$L_{tot} < 0.2L_c$ $L_{att} < 0.1L_c$

$L_{tot}$ : Total length, meaning the sum of the lengths of all lateral barriers (attached and non-attached to the riverbanks) located in the corridor  
 $L_{att}$ : Sum of the lengths of attached lateral barriers located in the corridor  
 $L_c$ : Length of the homogeneous reach assessed

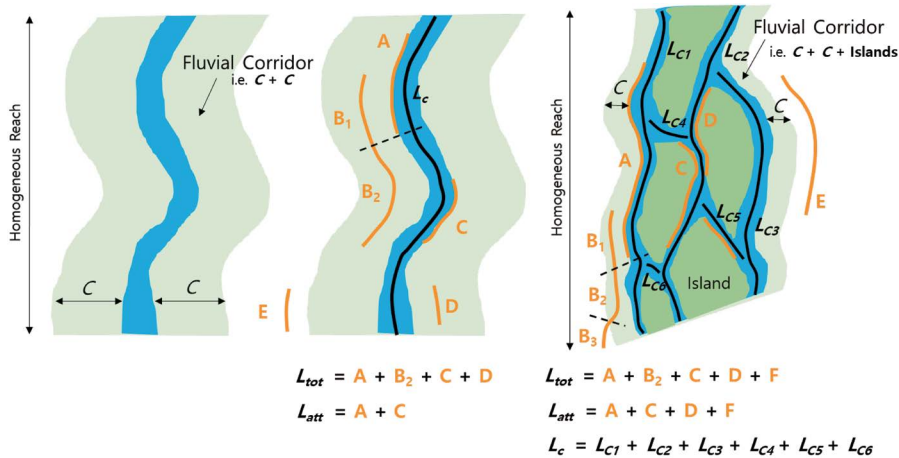


Fig. 7. Identification of the fluvial corridor and deriving the length of the homogeneous reach (L), of the total length of the lateral barriers ( $L_{tot}$ ), and of the total length of the attached lateral barriers ( $L_{att}$ ) for different river types (Van de Bund *et al.*, 2024).



류 이동성이라는 두 가지 주요 변화를 중점적으로 다룬다. 예를 들어, 상류 구조물로 인한 퇴적물의 감소로 해당 하천 구간의 생태적 기능이 손상될 수 있으며, 하류 구조물은 하천 구간을 고립시켜 어류의 구간 간 이동을 방해할 수 있다.

상류 압력 평가(퇴적물의 이동)는 평가 대상 하천 구간의 상류에 퇴적물 및 하류 연속성을 감소시킬 수 있는 구조물이 존재하는지 확인하며, 구조물이 존재하지 않거나 퇴적물에 큰 영향을 미치지 않는 구조물만이 존재하는 경우, 구조물의 존재가 단일 특성 구간의 형태학적 구성을 변경시키지 않는 경우에 상류의 연속성이 충족된 것으로 간주한다. 평가 대상 하천 구간에 대해 평가에 적절한 정보가 존재하지 않는 경우 구조물에 의해 차단된 퇴적물의 비율에 대한 신뢰할 수 있는 추정치를 사용하여 상류 압력을 평가할 수 있으며, 퇴적물의 비율이 30% 미만인 경우 상류 연속성 조건이 충분히 충족된 것으로 간주할 수 있다.

하류 압력 평가(어류의 이동)는 서식 어류의 군집 특성과 구조물의 존재 여부를 이용하여 평가한다. 평가 대상 하천 구간의 생태계를 대표하는 어류 군집의 이동 유형(바다-하천, 하천 내 이동)과 이동 거리(단거리, 중거리, 장거리)를 고려하여, 구조물로 인한 하류로의 이동 저해 여부를 평가하도록 하고 있다. 하천 구간 내 이동성이 높은 어류가 서식하는 경우, 자유 흐름 하천으로 평가되기 위해서는 하류에 존재하는 모든 구조물이 어류가 이동할 수 있는 통로 시설로 완화되어야 한다.

**4) 자유 흐름 하천의 최소 길이 평가**

하천 내 모든 단일 특성 구간에 대해 위의 평가 절차를 수행했을 때, 해당 구간의 연속성이 충족되는지 확인 후, 해당 구간의 길이가 하천의 형태학적 패턴 형성을 지원하고, 고유 어종이 지속 가능한 개체군을 유지할 수 있을 만큼 충분한지 추가로 검토해야 한다. 평가된 단일 특성 구간에 참조 조건의 어류가 서식하는 경우, 형태학적 패턴의 유지와 어류 개체군집의 유지 두 가지를 모두 충족할 수 있는 최소 길이로 평가해야 하며, 어류가 서식하지 않는 경우에는 형태학적 패턴의 유지만을 고려한 최소 길이만 적용된다. 형태학적 패턴 유지를 위한 자유 흐름 하천의 최소 길이를 측정할 때, 형태학적 측면에서 자유 흐름 하천으로 평가되기 위해서는 일반적인 하천의 형태학적 패턴(예: 곡류, 자갈톱 등)이 형성될 수 있도록 충분한 길이의 연속성이 보장되어야 한다. 자유 흐름 하천의 최소 길이는 하천 유형과 평균 만수 폭에 따라 설정되어야 하며, 일반적으로 예상되는 형태학적 패턴의 변화가 충분히 수용될 수 있는 정도여야 한다. 자유 흐름 하천의 최소 길이는 평균 하천 폭의 20배보다 작지 않아야 하나, 주변

지역이 복잡하게 형성된 경우에는 더 짧은 구간으로 설정하는 것도 가능하다. 일반적으로 연속성 복원을 대상으로 하는 자유 흐름 하천의 최소 길이는 1,000 m로 간주되며, 곡류 하천과 다중 하천의 최대값은 각각 20,000 m, 5,000 m로 간주된다. 다만, 하천 폭이 넓은 경우, 생물 서식지가 하천의 종적 방향뿐만 아니라 횡적으로도 분포하기 때문에, 서식지의 이질성 파악을 위해 제시된 기준에 비해 짧은 최소 길이를 설정하는 것도 가능하다. 이처럼 과도한 최소 길이의 설정은 오히려 현실성이 떨어져 자유 흐름 하천 개념의 목적을 달성하지 못할 수 있기 때문에 하천의 현황에 적절한 최소 길이의 설정이 요구된다.

어류의 지속가능한 개체군을 지원하기 위한 자유 흐름 하천의 최소 길이를 설정할 때는 어류 군집의 최소 메타 개체군 크기를 충분히 수용할 수 있는 길이로 설정해야 한다. 이를 위해 어류의 생애주기 및 성장단계별로 요구되는 서식지의 범위와 공간적 위치 및 연속성을 고려해야 한다. 다양한 사례 연구 및 과학적 결과를 바탕으로 작은 하천(폭 < 10 m), 중간 크기의 하천(폭 10~50 m), 그리고 큰 하천(폭 > 50 m)에 대해 각각 최소 5 km, 10 km, 15 km의 최소 길이가 제안된다.

**결론 및 제언**

우리나라의 경우 제5차 국가환경 종합계획(2020~2040)에서 통합 물관리 주요 정책의 하나로 하천 수생태계 연속성 확보를 위한 평가와 복원을 명시하고 있다. 관련 법률에 따라 환경부에서는 2018년 하천 연속성 조사 지침 마련 연구를 통해서 국내 실정에 적합한 지침(안) 개발을 시작하였으며, “수생태계 연속성 조사 및 평가 방법 등에 관한 지침”이 국립환경과학원 예규로 등록되어 해당 지침을 근거로 연속성 조사 및 평가가 이루어지고 있다. 그러나, 해당 지침은 단일 인공 구조물 대상으로 어류 중심의 간접적 생물 이동 평가 방법 및 하천 수리적 구조만을 평가 지표로 사용하고 있기 때문에 물질 순환의 연속성 평가, 포괄적인 생물 서식처 평가, 하천을 포함한 유역 전체의 생태적 구조 및 기능 증진 평가 등 하천 생태계 전체의 연속성을 평가할 수 있는 방안이 필요한 것으로 판단된다. 국내 실정에 맞는 표준화된 방법 확립을 위해서는 평가 방법에 대한 지속적인 보완, 고도화 방안 마련 등을 통해 국내 수생태계 연속성 확보가 잘 이루어질 수 있게 할 필요성이 있으며, 평가를 통해 복원으로 이어질 경우 하천 연속성에 대한 근본적인 개념이 정의되고 복원의 방향성이 명확히 제시되어야 한다.

본 연구에서는 국외의 하천 연속성 관리 동향을 분석하기 위하여 일본, 미국, EU를 대상으로 각 국가별 정부 가이드라인에 따른 하천 복원 및 연속성 평가 지침과 기존의 하천 복원 및 연속성 평가에 적용된 방법들의 사례를 조사하였다. 각 국가별 하천 연속성 확보 지침의 근거, 하천 연속성의 정의 및 평가 관점을 조사하였으며, 종적 연속성, 횡적 연속성, 수직적 연속성, 시간적 연속성 등의 평가 방법에 대해 상세히 기술하였다. 일본의 경우에는 생물 서식처 개념에서 하천과 유역의 연속성 확보를 위한 정책을 제시하고 있으며 명확한 연속성 확보 지침의 제시보다, 하천 연속성 복원사업의 사례를 분석 및 정리하여 대상 하천에 따라 선택적으로 참고할 수 있도록 하고 있다. 미국의 경우에는 유역 통합적 수자원 관리를 위한 평가 방안으로써 연속성 개념을 활용하고 있으며, 수역 간 연속성을 확보할 수 있도록 하천을 구조적, 기능적 연속성으로 접근하여 하천 연속성 훼손 원인 및 연속성 확보 방안에 대해 제시하고 있다. EU는 생물다양성 확보를 목적으로 하천의 연속성의 중요성을 강조, 하천의 인공구조물을 제거하고 자유 흐름 하천(Free-flowing rivers, FFR)을 형성할 수 있도록 상세한 복원 및 평가 지침을 제시하고 있다. 각 국가들은 자국의 환경정책에 기반한 서로 다른 하천 연속성 복원 목표를 설정하고 있으며, 이에 따라 제시된 구체적 접근방법과 지침들로 각 국가별 특성을 반영한 연속성 확보 전략을 수행하고 있다.

## 적 요

최근 하천 생태계 관리에서 물, 퇴적물, 영양염류와 같은 물질의 연속적 흐름뿐만 아니라 서식 생물의 자유로운 이동을 통해 생물 서식처를 보존할 수 있도록 하천의 연속성을 평가하고 단절된 연속성을 복원하는 것이 핵심으로 인식되고 있다. 하천 연속성의 단절은 주로 댐, 보와 같은 하천 내 인공구조물로 인해 발생되며 국내 4대강 권역에 위치한 보는 34,012개로 최근 환경부에서는 이와 같은 하천 수생태계 연속성 단절에 대한 심각성을 인지하고 하천 수생태계 연속성 확보를 위한 평가와 복원을 통합 물관리의 주요 정책 중 하나로 채택하고 관리 방안의 마련을 위해 지속적으로 노력하고 있다. 본 연구에서는 향후 국내 실정에 맞는 장기적인 수생태계 연속성 확보를 위한 방향 설정과 표준화된 평가 방법 확립에 도움이 되고자 일찍이 하천 연속성에 대한 평가 및 복원 지침을 제시한 일본, 미국, 유럽연합(EU)을 대상으로 해당 국가들에서 제시하고 있는 하천 연속성의 개념과 복원의 방향성, 연속성을 평가할 수 있는 종합적인 평가 방법을 비교, 분석하였다. 각 국가별로 서로 다른 하천 연속성 확

보의 목표와 평가 지침을 가지고 있는 것으로 분석되었는데, 일본의 경우에는 생물 서식처 개념에서 하천과 유역의 연속성 확보에 초점을 맞추고 있으며, 미국의 경우에는 유역 전체에서 하천 생태계의 구조와 기능에 초점을 맞춘 연속성 평가 및 복원 방안을 제시하고 있다. EU는 생물다양성 확보를 위하여 서식처 개념에서의 하천의 연속성의 중요성을 강조, 자유 흐름 하천을 확보할 수 있는 방안에 대해 제시하고 있다. 본 논문은 하천 연속성 확보에 대한 개념적 접근과 실무적 적용 방안을 동시에 파악할 수 있도록 하여 국내 환경에 적합한 거시적이고 전략적인 목표의 설정과 종합적인 평가 방법의 개발에 도움이 될 것으로 기대된다.

**저자 정보** 최예림(경희대학교 박사과정), 이대희(경희대학교 석사과정), 장광현(경희대학교 교수), 유경아(국립환경과학원 연구관), 김정희(주식회사 에코리서치 대표이사)

**저자 기여도** 개념설정: Y. Choi & K.H. Chang, 자료수집: Y. Choi, D.H. Lee & K.H. Chang, 원고 초안작성: Y. Choi, 원고 교정: D.H. Lee & K.H. Chang, 원고 편집: Y. Choi, J.H. Kim & K.H. Chang, 과제관리: J.H. Kim & K.A. You, 연구비 수주: J.H. Kim

**이해관계** 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 국립환경과학원 연구사업의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2023-01-02-061).

## REFERENCES

- Benda, L., N.L. Poff, D. Miller, T. Dunne, G. Reeves, G. Pess and M. Pollock. 2004. The network dynamics hypothesis: How channel networks structure riverine habitats. *BioScience* **54**: 413-427.
- Bunn, S.E. and A.H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* **30**: 492-507.
- Cha, S.B., J.U. Seong, J.O. Kim and J.C. Park. 2015. Evaluation of fish migration ratio at the fishway constructed in weir. *Journal of Environmental Science International* **24**(2): 229-236.
- Duarte, G., P. Segurado, G. Haidvogel, D. Pont, M.T. Ferreira and P. Branco. 2021. Damn those damn dams: fluvial longitudinal connectivity impairment for European diadromous fish throughout the 20th century. *Science of The Total Environment* **761**: 143293.
- Elwood, J.W., J.D. Newbold, R.V. O'Neill and W. Van Winkle. 1983. Resource spiralling: An operational paradigm for analyzing lotic ecosystems. Ann Arbor Science Publishers. pp. 3-23.

- EURÓPAI, A. and U. TANÁCSA. 2000. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the council.
- Hara, Y., F. Hooimeijer, S. Nijhuis, M. Ryu and A. van Timmeren. 2014. The impact of historical geography and agricultural land development processes on wetland restoration methods used to create ecological networks: a comparison of Japan and the Netherlands. *Journal of Environmental Design and Planning* **10**(1): 10.
- Harman, W., R. Starr, M. Carter, K. Tweedy, M. Clemmons, K. Suggs and C. Miller. 2012. A function-based framework for stream assessment and restoration projects. US Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, Washington, DC.
- Ikeuchi, K. and K. Kanao. 2003. The approach and the issue to conservation and restoration for river environment in Japan. *Ecology and Civil Engineering* **5**(2): 205-216.
- Jain, V. and S.K. Tandon. 2010. Conceptual assessment of (dis) continuity and its application to the Ganga River dispersal system. *Geomorphology* **118**: 349-358.
- Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 2005. Guidelines for creating fish-friendly rivers.
- Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 2017. Strategy for river environment maintenance and conservation: verification of measures after the revision of the River Act and future directions. Policy Review Outcome Report.
- Japan Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 2021. Evaluation guidelines for ecosystem conservation in river projects (draft for practitioners): Formation of ecosystem networks. Water Management and National Land Conservation Bureau, River Environment Division.
- Jonathon, L. and S. Eileen. 2012. Reconnecting rivers to floodplain. *American Rivers*.
- Junk, W.J., P.B. Bayley and R.E. Sparks. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* **106**: 110-127.
- Kim, J.H., J.D. Yoon, S.H. Park, S.H. Baek, H.J. Lee, K.J. Kim and M.H. Jang. 2020. The impact of weirs on fish assemblage according to stream order in wadeable stream. *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**(2): 148-155.
- Kim, S.H., H.T. Cheon and K.H. Cho. 2015. Fish community structure of the former channel isolated by channelization in the Mangyeong River, Korea; implications for connectivity restoration. *Ecology and Resilient Infrastructure* **2**(1): 22-32.
- Kristensen, P., C. Whalley, F.N.N. Zal and T. Christiansen. 2018. European waters assessment of status and pressures 2018.
- Large, A.R. and G.E. Petts. 1996. Historical channel-floodplain dynamics along the River Trent: implications for river rehabilitation. *Applied Geography* **16**(3): 191-209.
- Lee, K.Y., H. Jang and J. Choi. 2010. River continuum Pattern of Palmi Stream by fish community. *Journal of the Environment* **7**(1): 67-74.
- Lee, K.Y., H.K. Lee, Y.K. Oh, J.C. Kim and J.S. Choi. 2018. Distribution of fish community and discontinuity of inspection of river continuity in Yangyangnamdae stream, Korea. *Journal of the Environment* **13**(1): 17-30.
- Leviandier, T., A. Alber, F. Le Ber and H. Piegay. 2012. Comparison of statistical algorithms for detecting homogeneous river reaches along a longitudinal continuum. *Geomorphology* **138**: 130-144.
- McRae, B.H. and P. Beier. 2007. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **104**(50): 19885-19890.
- Montoya, J.M., S.L. Pimm and R.V. Sole. 2006. Ecological networks and their fragility. *Nature* **442**: 259-264.
- Newbold, J.D., J.W. Elwood, R.V. Oneill and W. Van winkle. 1981. Measuring nutrient spiralling in streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **38**: 860-863.
- Parasiewicz, P., K. Belka, M. Lapinska, K. Lawniczak, P. Prus, M. Adamczyk, P. Buras, J. Szlakowski, Z. Kaczkowski, K. Krauze, J. O'Keeffe, K. Suska, J. Ligieza, A. Melcher, J. O'Hanley, K. Birnie-Gauvin, K. Aarestrup, P.E. Jones, J. Jones, C.G. de Leaniz, J.S. Tummers, S. Consuegra, P. Kemp, H. Schwedhelm, Z. Popek, G. Segura, S. Vallesi, M. Zalewski and W. Wisniewolski. 2023. Over 200,000 kilometers of free-flowing river habitat in Europe is altered due to impoundments. *Nature Communications* **14**: 6289.
- Pettit, N.E., R.J. Naiman, D.M. Warfe, T.D. Jardine, M.M. Douglas, S.E. Bunn and P.M. Davies. 2017. Productivity and connectivity in tropical riverscapes of northern Australia: ecological insights for management. *Ecosystems* **20**: 492-514.
- Rinaldi, M., M. Bussetini, N. Surian, F. Comiti and A.M. Gurnell. 2016. Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI).
- Thieme, M., K. Birnie-Gauvin, J.J. Opperman, P.A. Franklin, H. Richter, L. Baumgartner and S.J. Cooke. 2023. Measures to safeguard and restore river connectivity. *Environmental Reviews* **32**(3): 366-386.
- US Army Corps of Engineers (USACE). 2016. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual version 5.0.
- U.S. EPA. 2015. Connectivity of Streams and Wetlands To Downstream Waters: A Review and Synthesis of the Scientific Evidence (Final Report). US Environmental Protection Agency, Office of Wetlands, Oceans, and Watersheds, Washington, DC.
- Van de Bund, W., T. Bartkova, K. Belka, M. Bussetini, B. Calleja, T. Christiansen, ... and V. Bastino. 2024. Criteria for identifying free-flowing river stretches for the EU Biodiversity Strategy for 2030.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.

- dian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**(1): 130-137.
- Ward, J.V. 1989. The four-dimensional nature of lotic ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society* **8**: 2-8.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1983. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems. Ann Arbor Science, pp. 29-42.
- Webster, J.R. and B.C. Patten. 1979. Effects of watershed perturbation on stream potassium and calcium dynamics. *Ecological Monographs* **49**: 51-72.
- Wohl, E. 2017. Connectivity in rivers. *Progress in Physical Geography* **41**(3): 345-362.
- Won, D.H., D.H. Hoang, Y.H. Jin, J.M. Hwang and Y.J. Bae. 2003. Community composition and functional feeding groups of aquatic insects according to stream order from the Gapyeong Creek in Gyeonggi-do, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **36**(1): 21-28.