

Original article

수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과를 활용한 수생태계 훼손원인 진단체계 구축

이종원 · 이상우 · 황순진¹ · 장민호² · 원두희³ · 안경진 · 박혜진⁴ · 이정아*

건국대학교 산림조경학과, ¹건국대학교 환경보건학과, ²공주대학교 생물교육과,
³(주)생태조사단 부설 두희생태연구소, ⁴환경부 수자원정책국 수자원정책과

Establishing Diagnosis Systems for Impaired Stream Ecosystem using Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment. Jong-Won Lee (0000-0002-7984-7233), Sang-Woo Lee (0000-0002-3275-7564), Soon-Jin Hwang¹ (0000-0001-7083-5036), Min-Ho Jang² (0000-0003-2331-4232), Doo-Hee Won³ (0000-0002-1435-7743), Kyung-Jin An (0000-0002-1155-3554), Hye-Jin Park⁴ (0000-0002-7817-3193) and Junga Lee* (0000-0002-3582-9359) (Department of Forestry and Landscape Architecture, Konkuk University; ¹Department of Environmental Health Science, Konkuk University; ²Department of Biology Education, Kongju National University; ³Doohee Institute of Ecological Research, Korea Ecosystem Service Inc.; ⁴Ministry of Environment, Water Resource Policy Department, Water Resource Policy Division)

Abstract The Stream/River Ecosystem Survey and Health Assessment has been carried out regarding the ecological health of the streams by the Ministry of Environment (MOE), South Korea. However, the sources of impairment of the stream ecosystem and the interactions between the sources, stressors, and the responses of impaired streams have not been taken into consideration. The purpose of this study is to propose the establishment of diagnosis systems for the impaired stream ecosystem because of the need to incorporate the same in the making of the policy to enable the recovery and improvement of the health of the impaired streams or river ecosystem. First, we define the concept of a diagnosis of the impaired stream or river ecosystem through a literature review. Second, through case studies [e.g., US CADDIS (Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System), AUS. Eco Evidence, EU WFD (Water Framework Directive)], we try to develop the diagnosis system for the making of policy. In this study, the diagnosis system that is proposed consists of eight steps including the basic data collection, detecting or suspecting impairment, defining the impaired stream reach, identifying the biological impaired cases and listing the candidate causes, illustrating the interactive conceptual diagrams between stressors and responses, investigating the stressors-responses in the field, verifying causes and identifying the probable causes of the impaired cases, and summarizing and proposing the restoration of the streams. The results of this study will support and enable efficient decision-making for sustainable stream restoration and management based on the diagnosis of the probable causes for the impaired complex and the diverse stream ecosystem.

Key words: stream ecosystem, stream health, water management, stream diagnosis system

Manuscript received 12 March 2020, revised 19 March 2020,
revision accepted 19 March 2020

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3684, Fax: +82-2-3437-0202
E-mail: archjung@konkuk.ac.kr

© 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.

서 론

과거 우리나라에서 시행되어온 하천 복원사업은 하천의 기능적 측면에 중점을 두고 하도의 직선화, 인공 제방의 축조 등을 통해 하천의 재해 경감을 우선시하는 방식으로 이루어져왔다(Kim, 2007). 또한 하천 환경에 대한 평가 및 관리는 대부분 이화학적 중심의 평가 및 관리로 이루어져왔다. 이는 수생태계의 생물 다양성 및 건강성에 대한 생태학적 영향을 고려하지 못하고, 생태학적 총체성의 유지 및 확보의 측면에서 구체적인 방안을 제시하지 못하는 한계를 가지고 있다(KEI, 2006).

이에 환경부에서는 물관리 목표를 물리적, 화학적 그리고 생물학적 총체성을 포함하는 생태학적으로 온전한 상태로 복원 및 관리하는 것으로 세우고, 2006년 ‘물환경기본계획’을 수립하고, ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’ 개정을 통해 수생태계 건강성 복원 및 유지를 위한 방향으로 ‘수질환경보전법’을 재정비하였다. 이에 따라 2007년부터 ‘수생태계 현황 조사 및 건강성 평가’ 사업을 통해 우리나라 4대강 대권역에 걸쳐 2016년 기준 3,039개의 구간을 ‘물환경측정망’으로 고시하고, 조사 구간을 설정하여 부착돌말 분야, 저서성 대형무척추동물 분야, 어류 분야, 수질 및 수리환경 분야, 서식 및 수변 환경 분야 그리고 수변 식생 분야에 대한 조사 및 평가가 수행되고 있다. 현재, 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과는 우리나라 수생태계의 건강성 현황 및 변화 추이를 파악하는 데에 활용하고 있으며, 이를 바탕으로 참조하천 및 생태복원 대상하천을 선정하여 하천 복원 및 관리에 대한 계획을 추진하고 있다(MOE, 2017).

그러나 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과는 조사 시점에서 하천의 생태적 건강성 상태를 파악할 수 있으나 훼손된 하천의 경우 그에 대한 근본적인 원인을 제시하지 못하는 한계가 있다. 또한 기존의 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가는 다양한 하천 공간의 특성과 기능에 대한 고려를 중심으로 수행되지 않아(Jeon, 2016) 여러가지 환경 변수에 의한 하천 훼손의 근본적인 원인을 정확하게 파악할 수 없어 이를 활용한 하천 복원과 관리를 위한 방향 및 목표의 설정은 불명확할 수밖에 없다(Kim, 2007; Kim *et al.*, 2010). 이에, 실제 하천 복원 사업 및 유역 관리의 전 과정에서 수생태계 건강성 평가결과뿐만 아니라, 훼손 하천의 원인 그리고 훼손의 전이 과정을 규명할 수 있는 과학적이고 논리적인 하천 진단체계의 구축은 지속가능한 하천 생태계를 유지시키기 위해 중요한 과제이다. 따라서, 본 연구에서는 훼손된 수생태계의 건강성을 증진시키기 위하여 훼손 진단체계의 정책적 도입의 필요성을 제

기하고 수생태계 훼손원인 진단체계를 구축하고자 한다. 구체적으로 수생태계 훼손원인 진단체계에 관한 선행연구를 통해 훼손 진단의 개념을 이해하고 훼손원인 진단체계를 도입하기 위한 방안을 구체화하고자 한다.

연구 방법

수생태계 훼손원인 진단의 개념을 이해하고 진단체계를 구축하기 위해서 인터넷 및 문헌을 통해 자료를 조사하였다. 먼저 학술 검색엔진 학술 검색엔진(www.scholar.google.co.kr)을 사용하여 ‘하천 진단’, ‘stream diagnosis system’ 등을 중심 키워드로 설정하여 발표 및 게재된 학술지를 중심으로 수집하였고, 진단의 과정, 절차, 그리고 활용에 관한 주요 자료는 외국에서 구축한 진단 관련 사이트에서 수집하였다(미국: <https://www.epa.gov/caddis/>; 호주: <https://ewater.org.au/>; 유럽: <https://ec.europa.eu/environment/>).

하천 진단의 문헌 분석을 통해 하천 훼손 진단의 개념에 대한 이해를 바탕으로 진단체계를 제시하였고 이 과정에서 진단체계의 정책적으로 도입하기 위한 방안을 고찰하였다.

수생태계 훼손원인 진단

1. 수생태계 훼손원인 진단의 개념

수생태계 훼손이란 자연적·인위적 교란으로 인해 수생태계의 생물학적 총체성, 건강성이 저하되는 것을 의미한다(EPA, 2017). 이를 기초로 진단의 개념은 상태에 대한 평가와 의미부여뿐만 아니라, 상태의 원인과 전이 과정을 규명하는 전 과정을 의미한다(An *et al.*, 2018). 따라서, 수생태계 훼손원인 진단은 수생태계의 생물학적 총체성 및 건강성을 훼손하는 원인에 대한 여러 가지 유기적 단서들을 체계적이고 통합적으로 식별하는 전 과정이라고 할 수 있다.

수생태계 훼손원인을 진단하기 위해서는 체계적이고 논리적이면서 현실적인 방법으로 훼손원인을 파악하기 위한 인과 관계 분석이 이루어져야 하며, 선행연구 및 전문가의 경험 등을 활용하여 훼손의 전이 과정을 규명할 수 있어야 한다(EPA, 2017). 이때, 하천의 전반적인 현황, 물리적·화학적·생물학적 특성, 시간적·공간적 특성, 유역 내 사회적·경제적 활동 등 다각적 방면에서 수생태계에 부정적 영향을 미칠 수 있는 훼손원인을 탐색할 수 있어야 한다.

또한, 진단의 과정에서 수생태계 훼손과 훼손원인 간의 전이 과정을 파악하여, 하천의 수생태계 건강성 회복 및 하천 복원과 관리 목표를 설정하기 위한 근거를 마련할 수 있어야 한다. 즉, 수생태계 훼손 진단의 과정은 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과를 활용하여 훼손 하천을 파악하고, 훼손원인, 훼손원인과의 인과관계, 그리고 그 전이 과정을 규명하여 지속가능한 하천의 수생태계 건강성을 향상 혹은 유지시키기 위한 방안을 제안하는 과정으로 이루어질 수 있다. 이와 같은 과정은 정책적으로 시행될 때, 실질적인 하천 복원 및 관리 계획을 제안할 수 있는 근거를 마련할 수 있다

2. 수생태계 훼손원인 진단체계 사례연구

수생태계 훼손원인 진단체계 구축을 위하여, 미국의 CADDIS (Causal Analysis/diagnosis Decision Information System), 호주의 Eco Evidence, 그리고 유럽의 WFD (Water Framework Directive)의 해외 사례를 분석 및 비교하였다.

1) CADDIS

CADDIS는 U.S. EPA에서 Stressor Identification을 기반으로 하천 생태계에서의 생물학적 훼손원인을 파악하여 하천관리 및 복원에 필요한 정보를 제공하기 위해 개발된 온라인 응용 프로그램이다(EPA, 2017). CADDIS는 스트레스 요인 식별(Stressor Identification: SI), 소스, 스트레스 인자 및 반응(Sources, Stressors and Responses), 예제 및 응용(Examples and Applications), 데이터 분석(Data Analysis), 그리고 인과 데이터베이스(Causal Databases)로 구성되어 있으며, 서로 연관된 정보가 유기적으로 연결되는 통합적 시스템으로 이루어져 있다(Fig. 1).

스트레스 요인 식별에서는 다양한 훼손 유형의 원인과 일반적인 평가에 대한 자료를 제공하며, 하천의 부정적인 변화 및 생물학적 조건의 발생 원인을 제시한다. 이를 토대로 소스, 스트레스 인자 및 반응에서는 인과관계를 평가하기 위해 개념적 모델을 활용하여 훼손 근원, 훼손원인과 훼손의 전체적인 경로를 제시한다. 예제 및 응용에서 일반적인 훼손원인과 생물학적 반응 간에 관계를 보여주는 예제들을 제공하며, 데이터 분석을 통해 다양한 훼손 유형의 근거를 해석하고 인과관계 결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있도록 통계 기법을 제공한다. 인과 데이터베이스는 인과관계 평가에서의 선행연구를 기반으로 근거를 얻거나 활용할 수 있도록 도구들을 제시하며, 선행연구 데이터베이스를 제공하여, 훼손원인 간의 인과관계 식별에 지원한다.

특히, 스트레스 요인 식별 단계는 수생태계 훼손원인이

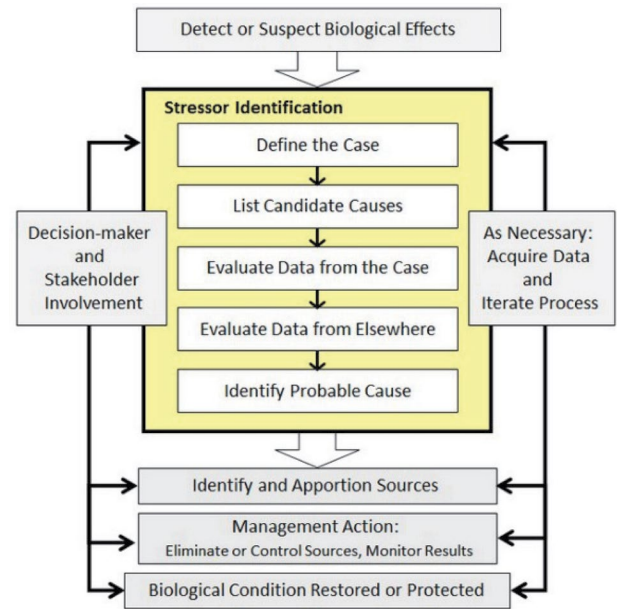


Fig. 1. Define the Case fits into the Stressor Identification process (EPA, 2017).

화학적, 물리적, 생물학적으로 인한 것인지를 식별하는 단계로 이 단계의 결과를 토대로 하천 관리의 기준을 선정할 수 있어 진단에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있다. 예를 들어, 미국 주/지방 유역 관리, 비점오염원 제어, 국가 오염물질 배출 제거(NPDES), 하천 복원 등 여러 방면에서 스트레스 요인 식별 단계를 통해 수질, 생물학적 훼손원인 등의 하천의 전반적인 상태를 평가하고, 계획 및 사업에서 우선순위 선정 및 오염물질 배출이 생물학적 훼손원인과 관련이 있는지 판단하는 기준을 마련한다. 이에 많은 주에서 CADDIS를 활용하고 있으며, 미국 물관리 기본법에도 명시되어 있어 정책적으로도 그 활용도가 높은 편이다.

2) Eco Evidence

Eco Evidence는 광범위한 과학 연구 논문 DB를 제공하여 훼손원인과 결과에 대한 인과관계 분석 및 평가를 용이하게 하여 환경을 관리할 때 최적의 의사결정을 지원하기 위해 개발되었다(Nichols *et al.*, 2011).

Eco Evidence의 운영 프레임워크는 8단계로 구성되어 진행된다(Fig. 2). 하천의 훼손원인에 대해 자연적, 물리적 상황들에 대한 가설 설정을 하고 훼손원인의 전체적인 경로를 예측한다. 그리고 조사결과를 토대로 훼손원인과 결과를 연결할 수 있는 가설을 세우고 이를 기초로 기존 연구, 진단 사례, 참고문헌을 통해 개념적 모델을 만든다. 이때 가설 검토 및 수정이 이루어지며 분석 결과에 점수를

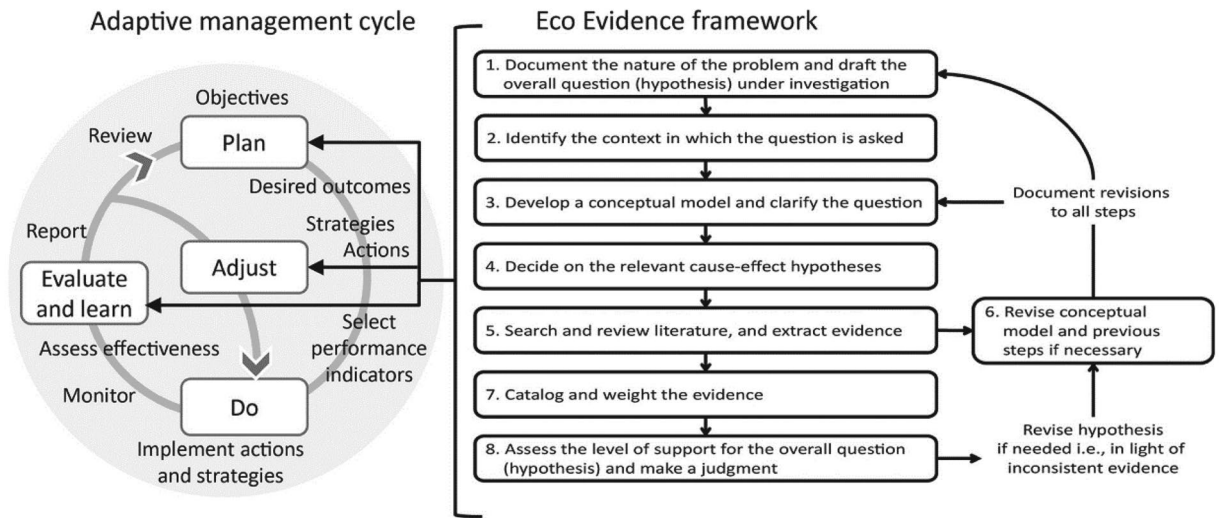


Fig. 2. Eco Evidence framework stage (right) and how managers and stakeholders use Eco Evidence (left) (Nichols, Susan and Webb, 2017).

매겨 최종 훼손원인을 판단한다.

Eco Evidence는 기존 진단 사례 및 문헌을 기반으로 훼손원인과 훼손 현상 간의 인과관계를 판단하는 시스템으로 이루어져 실제 자료를 조사하지 않고 연구 설계에 따라 훼손원인에 대한 증거를 수집하고 가중치를 부여하여 훼손의 인과관계를 진단한다. 다만, 실제 훼손 자료를 이용한 분석이 아니기 때문에 신뢰성에 대한 문제가 생길 수 있으나, 관련 정보들이 DB화되어 새로운 진단에 활용되고 있어 진단의 정확성을 높일 수 있다.

한편, Eco Evidence는 CADDIS와 다르게 주요 스트레스 요인 자체를 식별하기보다 특정 가설을 테스트하며, 문헌 검토를 통해 원인 마다 하나씩 일련의 가설에 적용하여, 훼손원인에 가장 가능성이 높은 항목을 식별한다(Horne *et al.*, 2017).

Eco Evidence는 수자원 정책에 대해 과학적 정보를 제공하고 평가 단계에서 의사결정에 추가 정보를 제공해 줄 수 있으나 실제 정책적으로 활용도는 높지 않다. 다만, 정책 및 관리 결정에 있어서 논리적이고 과학적인 증거를 체계적으로 제시할 수 있어 의사결정 시 불확실성을 낮추고 신뢰성을 높이기 위한 방안으로 Eco Evidence의 활용이 권장되고 있다(Webb *et al.*, 2015).

3) WFD

유럽에서는 지속가능한 수질 관리를 하기 위해 WFD를 도입하였다. WFD의 목적은 EU 전역의 수생태계 건강성의 향상으로, 물관리를 제도적으로 통합하여 생물학적, 수문학적, 물리적·화학적 요소에 대한 생태학적 건강성을 달

성하는 것이다(Voulvoulis, Arpon and Giakoumis, 2017). WFD는 건강한 생태학적 상태를 파악하기 위해 유역 단위의 물관리 프레임워크를 채택하였다(Impress, 2003, Fig. 3). 그리고 유럽에서는 River Basin management Plans (RBMP)의 일환으로 모니터링 데이터를 이용하여 훼손원인 및 영향 분석에 기초한 지역 수질을 관리하며, 하천 조사와 유형화 및 분석을 통한 물관리 시스템이 구축되어 있다.

WFD에서 가장 중요한 단계로 현재의 생태학적 상태를 파악하기 위해 하천에 직접적인 영향을 주는 훼손원인을 선정하고, 선정된 훼손원인 중 가장 유력한 훼손원인을 대상으로 하는 모니터링을 수행한다. 모니터링은 수질 및 수량에 영향을 미치는 관련 훼손원인을 식별하고 영향을 평가하는 데에 필요하며, 이를 기초로 사회적·경제적 활동으로 인해 나타나는 수환경과 다양한 인위적 활동 간의 인과관계를 분석한다(Voulvoulis, Arpon and Giakoumis, 2017). 이러한 모니터링 자료를 토대로 정확한 훼손 평가를 하기 위해 훼손 영향에 대한 개념적 모델을 설정한다. 개념적 모델은 증점적으로 지하수와 지표수의 상호작용의 특성을 고려하여 작성되며, 여러 유역의 모니터링 자료를 통해 모델을 지속적으로 수정 및 보완한다. 훼손 평가에서는 각각의 훼손원인에 대한 조사 및 분석을 통해 훼손원인의 영향을 정도를 나타내는 지도를 작성한다.

유럽에서는 각 나라별로 생물군을 이용하여 생태학적 상태에 대한 평가를 진행하고 있으며, 훼손원인과 그 영향을 결정하기 위한 분석 프레임워크인 DPSIR (Driver, Pressure, State, Impact, Response), 인위적 훼손원인을 관

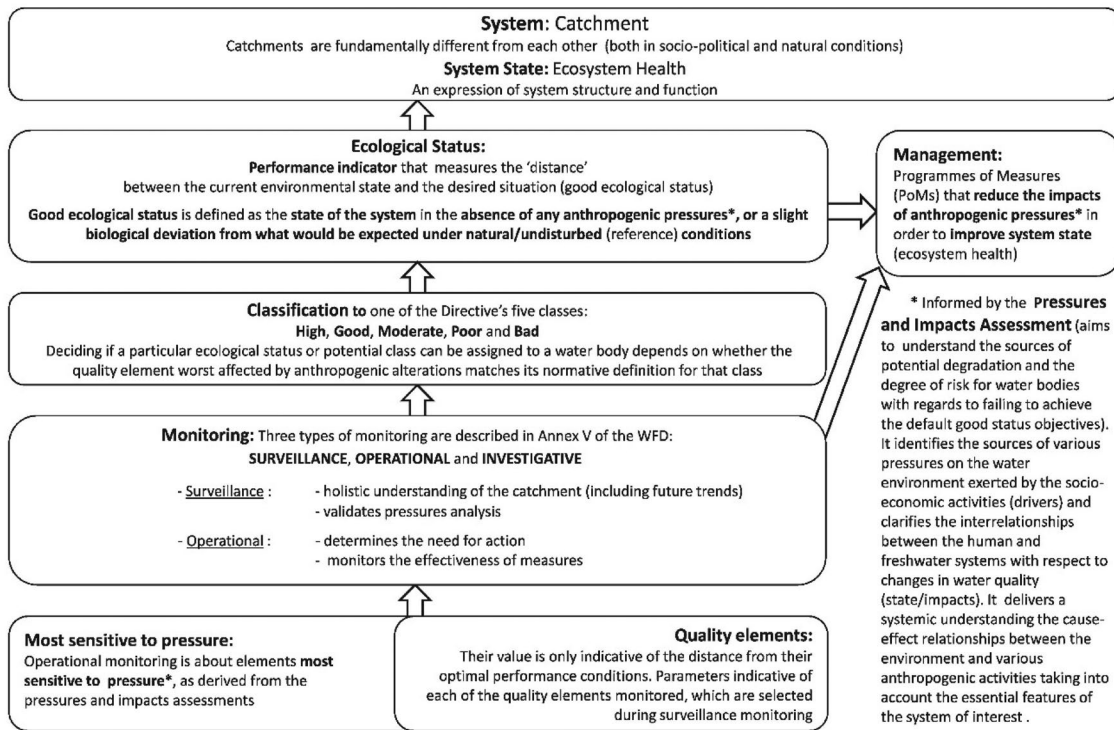


Fig. 3. WFD framework (Voulvoulis *et al.*, 2017).

리하기 위한 프로그램인 PoMs (Programme of Measures) 등을 활용하여 WFD의 목표를 지원한다 (Borja *et al.*, 2006; Voulvoulis, Arpon and Giakoumis, 2017). 그러나 CADDIS나 Eco Evidence와 같이 체계적인 진단체계가 구축되어 있지 않아 분석이 복잡하고 어려운 단점이 있으며, 각 나라마다 WFD에서 제시하는 정책에 대한 이해도가 달라 유럽의 수자원을 보호하기 위한 하천 물관리 정책을 통합하는 것에 초점을 두고 있다.

4) 진단 사례 비교 분석

CADDIS는 진단체계의 모범적인 사례로서 온라인 상에서 진단 절차와 진단에 필요한 각종 자료 및 사례 등에 대한 내용을 구체적으로 제공한다. SI를 토대로 이를 지원하는 정보와의 연결성이 매우 높아 진단을 매우 효율적으로 수행할 수 있다. 그러나 진단체계 전체에 대한 별도의 소프트웨어 없이 개념적 모델 작성과 관련된 소프트웨어만 제공하는 단점이 있다.

Eco Evidence는 진단 절차에 맞춰 분석 및 작성할 수 있도록 진단을 위한 별도의 무료 소프트웨어를 제공한다. 이는 제공되는 소프트웨어 상에서 작성이 가능하며, 과학 문헌 DB를 저장, 구축 및 재사용이 가능하다. Eco Evidence는 기존의 과학 문헌 DB를 이용한 인과관계 분석을 하기

때문에 현장에서의 연구 결과보다 일반적인 적용 가능성을 기반으로 수행하기 때문에 신뢰성에 문제가 생길 수 있으며, 새로운 원인을 발견하는 데 어려움이 있다.

WFD는 모니터링 자료, 수질과 관련된 통계 자료, 수생태계 관련 정보에 대해서 온라인 상에서 대쉬보드, 데이터 세트, 지도 등의 자료를 제공하며, 관련 연구기관 및 대학교의 링크들을 제공하여, 외부 기관이나 관련 시스템과의 연결성이 매우 좋아 빠른 상황 판단을 할 수 있다. 그리고 DPSIR, PoMs 등의 프레임워크, 프로그램을 통해 과학적이고 체계적인 인과관계 분석이 이루어지고 있다. 이와 같이 관련된 자료의 양이 많으며 지속적이고 빠른 업데이트가 이루어지고 있으나, CADDIS나 Eco Evidence처럼 별도의 진단체계가 구축되어 있지 않아 진단을 이해하고 수행하는데 한계가 있다 (Table 1).

수생태계 훼손원인 진단체계 제안

1. 수생태계 훼손원인 진단체계

본 장에서는 사례 조사 결과 바탕으로 국내에 맞는 수생태계 훼손원인 진단체계를 구축하여 제안하였다. 먼저, CADDIS는 SI 단계를 토대로 예제, 통계 기법, 문헌 DB,

Table 1. Difference between Diagnosis Systems Cases.

System	CADDIS	Eco Evidence	WFD
Accessibility	• On-line application	• On-line application and software	• On-line application
Write	• Write separately	• Written in software	• Write separately
Data set	• Conceptual model program	• Write step-by-step results on software	• None
Information scope	• Describe in detail such as basic research data, related literature, analysis method • Present diagnosis case	• Download available online • Manual provided	• Download available online • Analysis framework and manual provided • Present diagnosis case
External Information	• Vulnerable due to limited internal information	• External data can be attached	• Link to research Institutes and University sites
Notes	• All information is provided in document form • Utilized in EPA and many states	• Not based on field surveys • Not actively used by the government	• A lot of data in the relevant data • No systematic diagnosis system • Focus on Water Management Policy Integration

개념적 훼손 모델과 같은 다른 단계에서 이를 지원하는 형태로 되어 있어 훼손된 하천에 대한 훼손원인을 식별하고 이를 해결하는 방안으로서 진단의 개념이 잘 적용되어 있다. 또한 많은 주에서 정책적으로 활용되어 진단의 실효성이 보장된다. 따라서 본 진단체계의 전체적인 프레임워크는 CADDIS를 기반으로 구성하였다. 그리고 진단에서 훼손원인을 식별하기 위해 가장 핵심이 되는 인과관계 분석은 CADDIS와 Eco Evidence를 참고하였다. 특히 Eco Evidence의 특징은 과학 문헌 DB를 활용하여 인과관계 분석에 초점을 맞춘다. 훼손원인을 진단하는 데에 필요한 자료들을 DB화하여 과학적이고 체계적인 근거를 마련하여 훼손에 대한 원인을 찾는다. 본 진단체계에서 이와 같은 진단 결과 및 과학 문헌의 DB화를 고려하였다. 훼손 파악 및 진단 결과에 대한 사후 관리 측면에서 본 진단체계에서는 WFD에서 활용하고 있는 모니터링을 고려하였다. 이미 국내에서 이루어지고 있지만, WFD의 모니터링은 훼손원인을 파악하고 이를 저감하기 위한 일련의 목적을 가지고 이루어진다. 또한 다른 진단체계보다 인간의 사회적·경제적 활동에 초점을 두어 수환경과 인간의 인위적인 활동에 대한 인과관계에 중점을 두고 있다. 이에 본 진단체계에서는 진단 결과에 따른 사후 모니터링 시스템과 훼손 하천 분석에 있어서 인문적·사회적 요소를 고려하였다.

훼손된 하천의 훼손원인과 그 전이 과정 그리고 복원 및 관리 방안을 체계적으로 수립하기 위해 본 진단체계는 총 8단계로 구성하였다(Table 2).

1) 기초자료 조사

진단 대상 하천의 정확한 진단을 위해 하천의 전반적인 특성에 대한 기초자료를 수집한다. 물리적·화학적·생물학

Table 2. Proposed Diagnosis system.

Stage 1	Basic data collection
Stage 2	Detecting or suspecting impairment
Stage 3	Defining the impaired stream reach
Stage 4	Identifying biological (e.g., fishes, epilithic diatoms, benthic macroinvertebrates) impaired cases Listing candidate causes (e.g., sources, stressors and responses)
Stage 5	Illustrating the interactive conceptual diagrams between stressors and responses
Stage 6	Investigate stressors-responses in the field
Stage 7	Verifying causes (sources, stressors and response) Identifying the probable causes of the impaired cases
Stage 8	Summarizing Proposing the restoration of the streams

적 항목, 수생태계 건강성 항목, 수리·수문, 인문사회, 기상, 기후 등 대상 하천과 관련된 생물, 비생물적 요소를 포함한 인간에 의한 교란 요소를 모두 포함하여 시·공간적으로 폭넓은 조사를 하여 자료를 수집한다. 기초자료를 바탕으로 하천의 전반적인 특성 및 (훼손원인을 추정)을 정리하고, 복원 방향을 참고하기 위한 동일 수계, 동일 규모의 참조하천을 선정한다. 참조하천은 국가 참조하천 목록을 참고하며, 대상 하천과 동일하게 기초자료 수집 및 특성 분석을 하여 진단 대상 하천의 교란 및 훼손 정도를 파악할 수 있는 기준으로 삼는다.

2) 하천 수생태계 훼손 판단

훼손 판단은 수생태계 건강성 평가 항목 중 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류 생물군의 건강성 평가결과를

바탕으로 설정된다. 건강성 평가는 다섯 개의 평가 등급으로(A등급: 매우 좋음, B등급: 좋음, C등급: 보통, D등급: 나쁨, E등급: 매우 나쁨), 나쁨 혹은 매우 나쁨인 경우에 훼손으로 판단한다. 세 종류의 생물군 중 한 생물군이라도 훼손이면 훼손으로 판단하며, 조사지점에 따라 조사 주기(3년, 1년, 신규)에 따라 다르게 설정되며, 조사 주기에 따른 기준으로 훼손 여부를 판단한다.

3) 훼손 구간 설정

훼손 판단을 토대로 훼손 구간을 설정한다. 하천의 구간은 하나의 조사지점을 기준으로 하천의 상류 방향으로 다음 조사지점까지 동일한 특성을 갖는다고 가정한다(대부분의 조사지점은 하천구간파일(KRF: Korea Reach Files)을 참고하여 선정되어 있음). 훼손 구간은 훼손의 명확한 공간적 범위를 설정하여 진단의 효율성을 높이기 위해 훼손 구간이 선정된다. 하천의 길이는 5 km를 기준으로 미만이면 한 조사지점이라도 훼손이면 하천 전체가 훼손으로 판단한다. 그리고 하천 길이가 5 km 이상이면 조사지점의 연속, 불연속인지에 따라 훼손 구간이 설정된다. 훼손 구간의 범위는 훼손 구간의 수변 및 유역을 포함한 하천 훼손의 영향권으로 설정한다.

4) 훼손 유형화 및 잠재적 훼손원인 도출

훼손 유형에 따른 훼손을 야기하는 것으로 판단되는 것들을 생물 메커니즘, 환경의 물리, 화학적 작용, 오염원 등과 관련 연구를 참고하여 잠재적 훼손원인을 도출한다. 잠재적 훼손원인은 훼손원인, 훼손 근원 그리고 훼손원인과 훼손 근원 사이의 과정에서 작용하는 중간변수로 구분할 수 있다. 진단은 훼손의 근원부터 중간변수, 훼손원인의 관계를 통한 생물군의 훼손에 초점을 맞추고 있기 때문에 모든 가능성을 열어두고 잠재적 훼손원인을 도출해야 한다. 훼손 유형 및 훼손 판단 기준은 수생태계 건강성 평가결과를 바탕으로 설정되었으며, U.S. EPA, 기존 선행연구, 전문가 경험 등을 근거로 설정되었으며, 향후 여러 진단 사례와 연구 결과에 따라 훼손 유형이 추가되고 보완될 수 있다. 동일한 훼손원인에 대해 각 생물군은 다양한 훼손 형태를 나타내며, 하천의 시간적, 공간적 상황, 하천 특성에 따른 생물군의 반응은 복잡하고 다양하게 변화한다. 따라서 가능한 모든 잠재적 훼손원인을 파악해야 훼손 유형에 맞는 훼손원인을 정확하게 식별할 수 있다. 잠재적 훼손원인은 훼손원인의 근원, 훼손원인, 이 둘 사이의 복잡하고 다양한 경로를 거쳐 발생하는 중간변수로 나눌 수 있다. 훼손원인의 근원은 훼손원인을 일으키는 근본적인 문제를 말한다. 훼손원인의 근원으로부터 다양하고 복잡한 중간변

수를 거쳐 하천 환경 특성에 변화를 주게 된다. 이러한 중간변수는 훼손원인을 일으켜 최종적으로 하천을 훼손시키게 된다. 하천 훼손의 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 훼손원인과 중간변수 간의 다양한 경로를 파악하고 훼손원인의 근원을 파악하여 저감 및 제거하는 일이 필요하다.

5) 개념적 훼손 모델 설정

도출한 잠재적 훼손원인을 개념적 훼손 모델로 시각화하는 단계이다. 개념적 훼손 모델은 단순히 훼손원인의 근원, 중간변수, 훼손원인을 도식화하는 것이 아니라 훼손원인의 근원에서 훼손이 발생하는 모든 경로에 대한 인과관계를 표현하여 훼손원인 간의 상호작용을 파악하는 도구이다. 훼손에 영향을 미치는 모든 요인들의 전이 과정을 한눈에 파악할 수 있으며, 조사 및 검증해야 할 잠재적 훼손원인의 우선순위를 파악하고, 이해 관계자들과 연구자들 간의 의사소통의 도구로 활용할 수 있다.

6) 본 조사

본 조사는 개념적 훼손 모델을 토대로 잠재 훼손원인에 대한 현장 조사를 실시하여 주 훼손원인을 파악하기 위한 자료 구축 단계이다. 기초자료 수집과는 다르게 대상 하천의 훼손원인에 대한 구체적인 조사이다. 따라서 모든 하천 환경인자, 수생태계 건강성, 유역, 인문사회 요인을 고려하여 조사한다. 기존의 기초자료와 개념적 훼손 모델에서 파악된 항목 그리고 추가로 참고해야 할 항목들을 조사하여 자료를 구축한다.

7) 주 훼손원인 진단 및 최적 훼손 모델 도출

본 조사 결과를 토대로 잠재적 훼손원인 중에 실제로 훼손에 영향을 미치는 주 훼손원인을 도출한다. 훼손원인 간의 인과관계를 신뢰할 수 있도록 명확한 검증을 위하여 공간 동시성 분석 방법(상·하류 지점에서 훼손원인과 관련된 항목의 결과 값의 차이를 비교하는 방법)이나 대상 하천 및 참조하천의 비교(‘수생태계 건강성 평가결과’의 전국 자료 조사 값의 백분위수(25 백분위수, 75 백분위수) 기준을 설정하여 본 조사를 토대로 대상 하천과 참조하천의 잠재적 훼손원인 결과 값을 비교)를 통한 분석 방법 등의 심화 분석을 수행한다. 그 밖에도 여러 가지 심화 분석 방법을 이용할 수 있으며, 훼손 유형과 특성에 따라 알맞은 분석 방법을 택해서 분석하면 된다. 특히 여러 분석 방법을 이용해서 분석한 결과들이 동일한 결과를 도출한다면, 인과관계의 신뢰성이 높아질 수 있다. 이러한 과정을 통해 주 훼손원인을 진단하고 최적의 훼손 모델을 도출한다(Fig. 4).

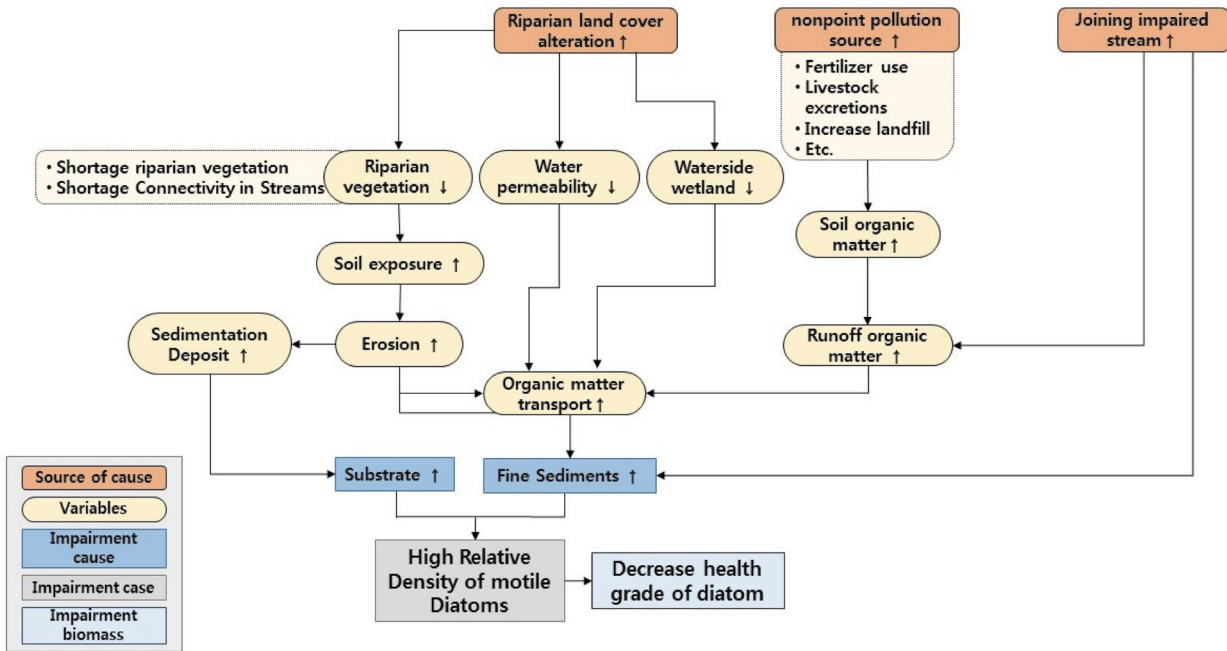


Fig. 4. Final Impaired case example: ‘High Relative Density of motile Diatoms.’

8) 종합분석 및 복원 방안 제시

지금까지의 조사 및 분석을 통해 도출된 최적 훼손 모델을 바탕으로 정리하고 이를 토대로 대상 하천의 복원 및 관리 방안을 제시하는 것이다. 복원 및 관리 방안은 훼손 원인, 중간변수, 훼손 근원 모두를 방안으로 제시할 수 있어, 추후 실제 사업이 시행될 때 추가 조사 및 분석 없이 참고하여 사용할 수 있어 진단과 사업과 연결이 가능하다.

수생태계 훼손원인 진단의 정책적 활용방안

수생태계 훼손원인 진단은 하천 수생태계의 건강성이 훼손된 원인과 그 전이 과정을 규명하는 것으로, 하천관리 계획 수립 시 하천 수생태계 건강성의 훼손원인과 분석 그리고 결과에 따른 효율적인 의사결정에 기준이 될 수 있으므로 진단체계를 정책적으로 연계해 볼 수 있다.

훼손 진단은 수생태계 건강성 평가 사업과 하천 복원 및 관리 사업을 연결하는 중간자역할을 한다. 그 역할은 수생태계 건강성 평가결과에 따라 하천 훼손의 근원, 원인을 식별하고, 진단 결과를 종합적으로 분석함으로써 하천의 복원 및 관리에 대한 목표를 제시하는 것이다. 이는 정책결정자가 하천관리계획에서 최적의 대안을 선정할 수 있도록 지원한다. 이미 미국에서는 물관리 기본법에서 진단의 활용을 명시하고 있으며, 여러 주에서 사용되고 있어

진단에 관한 그 실효성은 입증되었다. 그러나 현재 제안한 훼손 진단체계는 시작 단계로서 다른 사업이나 정책과 연계가 되어 있지 않다. 따라서 진단체계가 정책적으로 활용되려면, 하천관리계획에서 하천 진단의 평가 방향과 과정들이 정책 목적에 맞게 구체적으로 형성되어야 한다.

그러기 위해서는 수생태계 건강성 평가결과, 하천 복원 및 관리 사업, 사후 모니터링을 아우르는 진단체계의 전 과정을 하나로 하는 통합 시스템이 구축되어야 한다. 하천 훼손은 잠재적 훼손원인과 그 전이 과정에 대한 불확실성을 늘 갖고 있기 때문에 각 하천별 훼손과 관련된 자료들의 지속적인 수집이 필요하다. 이에 훼손 진단에서는 이미 하천의 전반적인 현황 파악을 위해 하천 기본도, 하천 환경, 인문·사회 분야 그리고 하천과 유역 환경을 제어하는 관련법과 규정 그리고 하천의 훼손 판단을 위해 수생태계 건강성 평가결과를 활용하도록 제안한다.

지속적인 수집이 이루어지기 위해서 호주와 미국의 사례를 참고하면 도움이 된다. 호주의 Eco Evidence의 경우에는 지속적으로 과학 문헌 자료를 DB화하고 있으며, 미국의 CADDIS 또한 인과 데이터베이스(Interactive Conceptual diagrams, Literature database)를 구축하여 관련 문헌들을 제공하고 있다. 또한 수집된 자료를 활용할 수 있도록 온라인 사이트를 구축하였으며, 전문가 및 비전문가 모두에게 활용 가능한 진단 및 프로그램 사용 매뉴얼과 하천 훼손 진단 전체를 아우르는 프레임워크를 제공

하고 있다. 따라서 본 훼손 진단이 체계적이고 지속적으로 이루어지기 위해서는 온라인 사이트를 개설하여 수집된 자료들을 활용할 수 있는 틀을 제공해야 하며 더 나아가서는 진단 분석 프레임워크를 토대로 한 진단 소프트웨어를 구축해야 한다.

이상과 같이 온라인 사이트와 DB 구축을 통해 진단 결과에 대한 신뢰성과 정확성을 확보할 수 있는 동시에 효율적인 진단 과정과 하천 복원 및 관리 방안을 제시할 수 있으며, 진단의 전 과정을 통합하는 시스템을 구축함으로써 정책적 의사결정에 좀 더 효율적으로 지원이 가능해지고, 하천 건강성에 대한 생태학적 목표를 달성할 수 있을 것이다.

결 론

본 논문은 미국, 호주, 유럽의 진단 사례를 분석하고 고찰하여 국내에 맞는 수생태계 훼손원인 진단체계를 제안하였고, 정책적으로 활용할 수 있는 방안을 도출하였다. 국내에서는 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과를 통해 전국 하천의 생물학적 훼손 현황 파악이 되었지만, 하천 복원 및 관리 측면에서 훼손원인, 훼손원인의 근원과 많은 환경변수들을 고려하지 못한 실정이었다. 따라서 하천이 훼손된 원인과 그 전이 과정을 분석하고 결과를 도출할 수 있는 진단체계를 제안하고 정책적 활용성을 고찰해 본 것이 본 연구가 가지는 의의라 할 수 있다.

수생태계 훼손원인 진단체계는 이제 시작 단계이며, 하천 수생태계의 복잡한 특성으로 인해 장기적인 관점에서 진단체계 구축을 진행해야하는 어려움이 있다. 하천 수생태계에 대한 연구가 많이 이루어지고 있기는 하지만, 하천 수생태계 연구에 필요한 다 학제 간의 연구가 부족하여 아직까지는 그 신뢰성이나 정확성에 있어서 한계를 가진다. 따라서 하천 훼손의 원인, 근원과 그 전이 과정을 통한 합리적인 의사결정을 위해서는 지속적인 하천 진단이 수행되고 그 과정 및 결과가 축적되어 DB화되어야 한다. 향후 본 연구에서 제안한 바와 같이 하천 진단의 정보들이 DB화되고 지속적으로 진단 사례가 축적되어 새로운 진단 시행에 있어서 신뢰성과 정확성이 향상된다면 수계 별 하천 관리계획에 대한 의사결정에 있어서 효율적인 하천 복원 및 관리를 할 수 있는 토대를 만들 수 있을 것이다.

적 요

본 연구는 훼손된 하천 수생태계의 훼손원인을 식별하고 그 전이 과정을 규명하기 위해 수생태계 훼손원인 진단체계

를 구축하고 정책적 활용 가능성을 보고자 하였다. 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가결과는 하천의 훼손에 대한 전반적인 상황을 알 수 있어 하천 복원 및 관리의 판단 근거로 사용된다. 그러나 하천이 훼손된 원인이나 훼손이 발생하게 된 전이 과정을 고려하지 못한다는 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 과학적이고 체계적인 진단체계를 제안하여 훼손원인과 그 전이 과정을 규명하였다. 미국, 호주, 유럽의 사례를 분석하여 우리나라에 맞는 진단체계를 제안하였다. 총 8단계로 구성되며, 기초자료 조사, 하천 수생태계 훼손 판단, 훼손 구간 설정, 훼손 유형화 및 잠재적 훼손원인 도출, 본 조사, 주 훼손원인 진단 및 최적 훼손 모델 도출, 종합분석 및 하천 복원방안으로 이루어져 있다. 이러한 진단체계는 하천 생태계의 복잡하고 다양한 특성을 고려하여 훼손원인을 파악할 수 있으며 하천 복원 및 관리 방안을 제시하여 효율적인 의사결정을 지원할 수 있다.

저자정보 이종원(건국대학교 산림조경학과 박사과정), 이상우(건국대학교 산림조경학과 교수), 황순진(건국대학교 환경보전과학과 교수), 장민호(공주대학교 생물교육과 교수), 원두희((주)생태조사단 부설 두희생태연구소 대표이사), 안경진(건국대학교 산림조경학과 교수), 박혜진(환경부 수자원정책국 수자원정책과 환경사무관), 이정아(건국대학교 산림조경학과 조교수)

저자기여도 개념 설정: J.W. Lee, J.A. Lee, S.W. Lee, 자료 수집 및 분석: J.W. Lee, S.J. Hwang, M.H. Jang, D.H. Won, K.J. An, H.J. Park, 원고 초안작성: J.W. Lee, 원고 교정: J.W. Lee, J.A. Lee, 최종 원고 검토: S.W. Lee, J.A. Lee. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 본 연구에 참여한 모든 저자들은 학술출판에 있어 어떠한 이해충돌의 여지가 없습니다.

연구비 이 논문은 환경부에서 시행한 수생태계 훼손 원인 분석 및 진단체계 구축연구(II)사업의 지원을 받았습니다.

사사 이 논문은 건국대학교 KU연구전임 프로그램에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, K.J., S.Y. Kim and S.W. Lee. 2018. Analysis of Relative Importance of Socio/Economic Factors in Establishing Diagnosis Systems for Impaired Stream Ecosystem. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration*

- Technology* **21**: 13-26 (Korean).
- Borja, A., I. Galparsoro, O. Solaun, I. Muxika, E.M. Tello, A. Uriarte and V. Valencia. 2006. The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **66**: 84-96.
- Horne, A., A. Webb, M. Stewardson, B. Richter and M. Acreman. (Eds.). 2017. *Water for the environment: From policy and science to implementation and management*. Academic Press.
- IMPRESS, W. 2003. Guidance for the analysis of pressures and impacts in accordance with the Water Framework Directive. In Guidance Document prepared by WG IMPRESS. Available online at <http://forum.europa.eu.int/Public/irc/env/wfd/library>, accessed at (Vol. 7).
- Jeon, S.H. 2016. Some Problems and Improvement of Domestic System for River Environment Assessment. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* **16**: 305-317 (Korean).
- Kim, H.J., S.J. Lee and K.G. An. 2010. Comparative Analysis of Ecological Health Conditions Before and After Ecological Restoration in Changwon Stream and Nam Stream. *Korean Journal of Ecology and Environment* **43**: 307-318 (Korean).
- Kim, M.J. 2007. Suggestions for Ecological Stream Restoration. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* **16**: 59-68 (Korean).
- Kim, Y.J., H.N. Kim and O.M. Lee. 2012. The biological assessment of water quality using DAIPo and TDI of Paju Ecological wetland. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* **21**: 229-238 (Korean).
- Lee, Y.K. and S.W. Lee. 2012. Stream Classification Based on the Ecological Characteristics for Effective Stream Management - In the Case Nakdong River -. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* **15**: 103-114 (Korean).
- Ministry of Environment. 2017. A study on Aquatic ecosystem reference stream (II) (Korean).
- Nichols, S., A. Webb, R. Norris and M. Stewardson. 2011. *Eco Evidence analysis methods manual: a systematic approach to evaluate causality in environmental science*. eWater Cooperative Research Centre. Also available online at <http://tinyurl.com/Eco-Evidencemanual>.
- Nichols, S.J., M. Peat and J.A. Webb. 2017. Challenges for evidence-based environmental management: what is acceptable and sufficient evidence of causation?. *Freshwater Science* **36**: 240-249.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency). 2017. *Causal Analysis/Diagnosis Decision Information System (CADDIS)*, <https://www.epa.gov/caddis>, Office of Research and Development, Washington, DC.
- Voulvoulis, N., K.D. Arpon and T. Giakoumis. 2017. The EU Water Framework Directive: From great expectations to problems with implementation. *Science of the Total Environment* **575**: 358-366.
- Webb, J.A., K.A. Miller, M.J. Stewardson, S.C. de Little, S.J. Nichols and S.R. Wealands. 2015. An online database and desktop assessment software to simplify systematic reviews in environmental science. *Environmental Modelling and Software* **64**: 72-79.