

저서성 대형무척추동물을 이용한 수생태계 평가 방법의 소개



최준길 ▶▶▶

상지대학교 생명과학과 교수
jkilchoi@sangji.ac.kr



이항구 ▶▶▶

상지대학교 생명과학과 겸임교수
morningdew@sangji.ac.kr

1. 서론

저서성 대형무척추동물은 1) 분별적인 민감성, 2) 채집의 용이성과 다양성, 3) 낮은 이동성, 4) 긴 생활사 그리고 5) 다양한 기능성 등의 여러 가지 측면에서 변화되는 환경교란에 대한 분석에 그 유용성이 매우 높게 평가되고 있어 생물 모니터링이나 보존 및 복원을 위한 평가시 보편적으로 사용되고 있다. 최근 지표 생물과 생물 지수화 등의 연구가 본격화되면서 유역 관리방안으로 도입되고 있을 뿐만 아니라 하천 생물군집 변화 예측프로그램 개발 등 환경요인과 생물군집 사이의 상관관계 해석을 통한 생태적 모델링 연구가 국내·외에서 다양하게 연구되고 있다. 또한 활용범위와 응용 분야가 다양해진 지리정보시스템(geographic information system, GIS)과 원격탐사(remote sensing, RS)기법의 도입으로 하천을

더욱 효과적으로 관리할 수 있게 되면서, 환경변화에 따른 하천생태계의 구조와 기능에 대한 변화 양상을 합리적으로 평가 및 관리하기 위한 생물군집 분포도 작성 및 예측 모델링 기법 개발이 새로운 연구 주제로 부각되고 있는 실정이다(박영준, 2011). 그러나 현재까지 수질평가를 위해 적용되어온 이화학적 방법은 측정 당시의 수질상태를 제한된 항목으로 나타내므로 수시로 변화하는 수질을 종합적으로 대변하기에는 한계가 있다. 이에 반해 지표생물(indicator organisms)을 이용한 생물학적 방법은 연간의 평균적인 수질을 대변하고 과거 오염물질의 임의적 유출에 대한 추정을 가능하게 해줌과 동시에 오염물질의 복합효과 등에 따른 종합적인 영향을 반영해 주고 있다(공동수, 2002). 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물지수는 19세기부터 담수생태계의 수질에 따라 생물종이 다르게 서식하는 것을 발견하면서 생물학적 평가에 대한 연구가 시작되었다. 또한 생물학적 물환경 평가에 오래전부터 가장 많이 이용되어 오고 있는 생물군이며, 최근에도 저서성 대형무척추동물의 지표성을 이용한 생물학적 물환경 평가뿐만 아니라 수생태 건강성 평가에도 국외의 선진국을 비롯한 많은 국가에서 수행되고 있다(표 1, 2)(원 등, 2006). 따라서 본 원고에서는 저서성 대형무척추동물과 수생태계에 관하여 개략적으로 논하고, 저서성 대형무척추동물을 이용한 국내·외의 수질 평가 지수 및 현재 국내에서 적합하게 사용되고 있는 수생태계 평가 지수를 소개하고자 한다.

표 1. 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 수질 평가 지수

Type	Index	Nation
Saprobic indices	Biologically Effective Organic Loading (BEOL)	Germany
	Saprobic index	Germany
	Saprobic valency	Germany
	Coupling analysis	Germany
	Saprobic valency	Japan
	DIN system	Germany
	Saprobic index	Korea
	Integrated saprobic system	Austria
Simplified indices	Family biotic index	USA
	Group pollution index	Korea
	Higher taxa biotic index	Korea
Biotic indices (formula based)	Biotic index	USA
	Biotic index	Japan
	Biotic index	South Africa
	Biotic index	USA
	Quality index	Netherlands
	Improved biotic index	USA
	RIVAUD	Switzerland
	Improved RIVAUD	Switzerland
Biotic indices (based on standard tables)	Trent Biotic Index (TBI)	UK
	Extended Trent Biotic Index (EBI)	UK
Biotic scores	Biotic score	UK
	Biological Monitoring Working Party Score (BMWP)	UK
	BMWP/Average Score Per Taxon (ASPT)	UK
	Total biotic score	Korea
	Macroinvertebrates Community Index (MCI)	New Zealand
Empirical model	River InVertebrate Prediction And Classification Scheme (RIVPACS)	UK
	AUStralian River Assessment System (AUSRIVAS)	Australia
	Benthic evaluation of ORegon rIverS (BORIS)	USA

출처: 원두희, 전영철, 권순직, 황순진, 안광국, 이재관(2006). 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용, 한국수질학회지, 제 22권 5호, pp. 768-783.

표 2. 저서성 대형무척추동물을 이용한 생태학적 건강성 평가 지수

Type	Index	Nation
Integrated assessment system	The Development and Testing of an Integrated Assessment System for the Ecological Quality of Streams and Rivers throughout Europe using Benthic Macroinvertebrates (AQEM)	EU
	Multiple metric index	Rapid Bioassessment Protocols (RBPs)
	Invertebrate Community Index (ICI)	USA

출처: 원두희, 전영철, 권순직, 황순진, 안광국, 이재관(2006). 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용, 한국수질학회지, 제 22권 5호, pp. 768-783.

2. 수생태계(Aquatic Ecosystem)

수생태계는 수체에 존재하는 생태계로 주변 환경에 의존하는 생물체의 집단이 살아 가고 있다. 수생태계는 크게 해양생태계와 담수생태계로 구분이 되며, 본 연구에서 다루고자 하는 담수생태계는 다음과 같은 3가지 형태를 가지고 있다.

- 정수(Lentic): 느리게 움직이거나 흐름이 없는 수체(연못, 저수지, 호수 등)
- 유수(Lotic): 빠르게 움직이는 수체(하천, 강 등)
- 습지(Wetlands): 토양이 포화되거나 일시적으로 범람이 일어나는 지역

담수생태계 중 호소생태계는 개방수역(pelagic zone), 심저대(profoundal zone), 연안대(littoral zone), 호수와 육지가 만나는 수변부(riparian zone) 등으로 구분된다. 또한 호소생태계는 호소에 서식하는 모든 수생생물에게 기본적인 영양을 제공하는 독립 영양조류에 의존하게 되며, 동물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 어류 등 다양한 생물이 존재하게 된다.

하천생태계의 구역은 하상의 경사나 유속에 의해

결정된다. 따라서 유속이 빠른 급류대(riffle)는 일반적으로 용존산소 농도가 높아서 물의 흐름이 느린 정수역보다 다양한 생물다양성을 유지하고 있다. 하천 생태계에 영향을 미치는 주요한 환경요인은 고도, 유속, 수심, 하상재료, 온도, pH, BOD, DO 등의 물리·화학적 요소로 구분할 수 있으며, 생물구성원은 수변 및 수중식물 등의 생산자와 저서성 대형무척추동물 및 어류와 같은 소비자 그리고 박테리아와 곰팡이 같은 미생물로 구성된 분해자로 구별된다(Allan, 1995). 또한 하천생태계는 고도 구배에 따라 발원지에서 하구까지 단기간에 변하지 않고 일정하게 흐르기 때문에 환경요인과 그에 따른 생물군집이 연속적으로 변화한다는 하천연속성 개념(river continuum concept, RCC)은 하천생태계를 이해하는데 중요한 역할을 한다(Vannote *et al.*, 1980).

습지는 관속식물(vascular plants)이 우점하고 있으며, 물과 토양이 근접해 있어 자연생태계에서 생산력이 가장 높다고 할 수 있다. 따라서 제방과 배수시설이 있는 토지로 전환되어 농업목적으로 이용되기도 하며, 호수와 강 부근은 인간주거 목적으로 개발되기도 한다.

수생태계의 건강성은 생태학적으로 온전한 자연상태 혹은 교란되지 않은 상태를 나타내며, 생태계가 감당하기 힘든 수준을 넘어서면 손상되게 된다. 미국의 청정수법에서는 생태학적 총체성을 화학적, 물리적 및 생물학적 총체성이라는 세 가지 요인들의 조합으로 규정하고 있다. 이 중에서 하나 또 그 이상이 교란이나 파괴되었을 때에는 수생태계의 건강성에 영향을 받으며, 대부분의 경우에 있어 서식하는 수생생물이 그 영향을 반영한다. 따라서 생물학적 상태는 수생태계의 건강성을 가장 종합적으로 표현하는 지표라고 할 수 있다. 이미 미국이나 유럽에서는 수질정책의 기본적인 개념으로 수생태계의 건강성을 제시하고 있으며(Davis and Simon, 1995), 이는 수질기준이라는 정책적 목표 내에 생물학적 요인들과 그에 관련된 기준과 평가의 중요성을 포함하고 있다. 이는 수질의 목표를 물환경에 의존하기 보다는 수생태계의 건강성을

통해 달성하려는 의지를 보여주는 것이다. 수생태계의 건강성은 물리·화학적으로 대표되기 보다는 궁극적으로 그 안에 서식하는 수생생물을 유지하는 것과 더욱 연관성이 높다고 할 수 있다(이와 노, 2006).

수생태계의 건강성을 위한 평가는 하천의 복원시에 절대적으로 필요하다. 이는 하천 복원은 자연적 상태가 지속적으로 유지되어야 하며, 물리·화학적 서식환경과 생물군별 모니터링을 통하여 환경적 진단이 필요하기 때문이다. 현재 사용되고 있는 물리·화학·생물학적 생태조사방법과 평가기준은 매우 다양하나 하천별 또는 수계별 상태 비교에는 어려움이 따르며, 특히 복원된 하천생태계에 대한 평가기준은 불명확한 상태이다. 또한 선진 외국에서 개발된 다양한 평가기준을 국내 하천에 적용할 경우 우리나라의 하천생태계의 특성과 생물군의 상이성으로 인하여 어려움이 따르게 된다. 따라서 국내·외의 연구현황의 비교·분석을 통하여 우리나라 실정에 적합한 수생태계의 평가방법이 필요하다(한국건설기술연구원, 2011). 최근 수생생물을 이용한 수생태계 건강성을 평가하려는 노력과 방법은 나날이 발전하였으며, 그 중 본 고에서는 저서성 대형무척추동물을 이용한 수생태계 평가방법에 관해 소개하고자 한다.

3. 저서성 대형무척추동물

저서성 대형무척추동물은 다양한 오염에 대한 물환경의 변화 분석에 있어 여러 가지 측면에서 유용성이 매우 높다(Metcalf-Smith, 1996). 따라서 저서성 대형무척추동물은 하천의 주요 에너지원으로 대부분의 생활사를 하천에 의존하여 서식하며, 이동성이 적고, 개체수가 풍부하여 하천생태계의 먹이사슬에 중요한 역할을 하고 있을 뿐만 아니라 오염물질과 서식환경에 민감하게 반응하는 분류군으로 수환경을 평가하는 생물학적 지표생물 및 환경변화를 평가하는 생태학적 모니터링에 유용하게 이용되고 있다. 특히 저서성 대형무척추동물 중 곤충강에 속하는 수서

곤충류는 생활사의 전부 또는 일부를 수중에서 생활하는 곤충류를 총칭하는 것으로 바다에서 발견되는 몇몇 종을 제외하고는 모두 하천이나 호소 등의 담수 생태계에 서식한다. 수서곤충은 종류가 많고, 개체수가 풍부하므로 담수생태계의 영양단계에서도 중요한 위치에 있는 생물군이다. 하루살이류나 날도래류 대부분의 종처럼 주로 조류(Algae), 식물조각, 부식질 등을 섭식하는 담수생태계의 1차 소비자인 경우와 잠자리류, 노린재류, 딱정벌레류, 강도래류 일부 종처럼 포식성으로 담수생태계의 2차 소비자인 경우가 있다. 그러나 수서곤충은 잡식성도 많으며, 종류에 따라서 먹이습성 및 서식양식이 다양하다. 또한 수서곤충은 어류와 같은 대형육식동물의 먹이가 되기 때문에 담수생태계의 먹이사슬에 있어 매우 중요한 위치에 자리잡고 있다. 수서곤충은 다양한 담수생태계의 환경에 오랜 기간 적응하여 왔으므로 수질에 대한 종 특유의 내성의 범위를 가진다. 따라서 수서곤충은 이러한 특성 때문에 담수생태계의 수질환경을 평가하는 지표생물로 많이 연구되어 왔으며, 우리나라에서도 하천의 수질평가에 있어 수서곤충을 포함한 저서성 대형무척추동물이 널리 이용되고 있는 실정이다(박영준, 2011).

4. 저서성 대형무척추동물과 수생태계 평가

4.1 저서성 대형무척추동물에 따른 수질 판정

저서성 대형무척추동물은 종류도 매우 다양하고 환경에 대한 적응 방법이 다양하여 수질에 따라 출현하는 종류가 서로 다르며, 이들 중에 수질을 가장 잘 대변할 수 있는 종류를 지표생물이라 한다. 이러한 지표생물의 조사를 통해 그 지역의 수질을 알아볼 수 있으나 이는 몇몇 종과 분류군에 한정되어 있어 정확한 수질을 평가하기에는 다소 어려움이 따르는 것으로 판단된다(표 3, 그림 1). 수질 급수별 물의 특징은 아래와 같다.

- 1급수 마실 수 있는 물: 간단한 정수과정을 거쳐



그림 1. 물속 생물 조사표

표 3. 수질등급별 지표생물군

수질 등급	화학적검사 (BOD:mg/L)	수질 지표생물군
1등급	1.0이하	플라나리아류, 가재류, 옆새우류, 툇툇하리류, 하루살이류, 강도래류, 물날도래류, 광택날도래류, 멧모기류, 개울등애류
2등급	3.0이하	선충류, 강하루살이류, 동양하루살이류, 납작하루살이류, 고려촉범잠자리, 쇠촉범잠자리, 뱀잠자리류, 날도래류, 여울벌레류, 물삿갓벌레류, 각다귀류, 등애류, 먹파리류, 깔다구류(흰색)
3등급	6.0이하	거머리류, 복족류, 부족류, 등각류, 새뱅이류, 꼬마하루살이류, 연못하루살이류, 등딱지하루살이류, 잠자리류(기타), 딱정벌레류(기타)
4등급	8.0이하	실지렁이류, 깔다구류(붉은색), 나방파리류, 꽃등애류
5등급	10.0이하	어떤수서곤충(물벌레)도 살수없다.

수돗물로 곧바로 사용가능하며, 가장 깨끗한 물로 맑으며 냄새가 없다

- 2급수 비교적 맑은 물: 수돗물로 만드는데 지장이 없으며 수영을 할 수 있는 물로 냄새가 나지 않고 바닥에 깔린 모래나 자갈이 보인다.
- 3급수 썩은 물이고 죽은 물이라고도 할 수 있으며, 고약한 냄새가 난다. 수돗물로는 적합하지 않으며, 공업용수로 쓰인다. 물고기는 살 수 없고 실지렁이나 모기의 애벌레(장구벌레)가 살며, 더욱 오염되면 어떤 생물도 살 수 없다.

4.2 저서성 대형무척추동물을 활용한 수생태계 평가

저서성 대형무척추동물을 이용한 초기의 하천생태계의 평가는 생물을 이용한 수질평가가 주를 이루었으며, 이러한 생물학적 수질평가는 지표성이 높은 개체군(population)을 이용한 방법과 군집(community)을 분석하는 방법으로 구분되나 다양한 조건에서 출현하는 수중생물의 지표성을 구분하기 위해서는 군집단위에서의 분석이 일반적이라 할 수 있다. 수환경의 평가를 위한 군집분석에는 주로

군집 다양성을 기초로 하는 오수 생물계열 방법 등의 수리군집지수(mathematical community index, MCI)를 이용한 방법과 지표종에 따른 내성치를 부여하여 지표성이 높은 개체군을 이용한 지표군집지수(indicate community index, ICI)인 Biotic score, Trent biotic index, Monitoring working party score 등의 다양한 방법이 개발되었다. 수리군집지수는 오염에 따른 종의 선별과 자원에 대한 종간경쟁의 변화에 따라 나타나는 종수와 개체수 혹은 생물량 변화의 규칙성에 근거를 둔 것으로 객관적인 반면 수질평가지수라기 보다는 군집의 안정도 혹은 엔트로피를 대변하는 지수에 가깝다. 이에 반해 지표군집지수는 지역적이고 특수한 상황을 잘 반영하는 평가지수이나 지표종의 선정과 내성치의 적용이 주관적이라는 점이 단점을 가지고 있다(공동수, 2002). 또한 대부분 적용 범위가 좁고 한정적이며, 오락계급치 역시 국외의 것을 그대로 도입하는 등 국내 현실에 직접적으로 이용하는 데에 한계가 있는 것으로 보인다. 따라서 이러한 단점을 개선하기 위해 국내에서 간이수질평가지수(Group Pollution Index, GPI)와 한국생물지수(Korean Biotic Index, KBI) 등이 제안되어 사용되고 있지만, 각 종의 오락계급치와 지표가중치의 결정에 대한 기준으로 단지 다양도 지수만을 고려한 한계점을 지니고 있다. 최근에는 환경부 전국자연환경조사지침서에 저서성 대형무척추동물을 이용한 ESB(Ecological score of benthic macroinvertebrate community) 지수는 중수준에서 환경질 점수를 부여하고 출현종의 환경질 점수를 합산하여 수질을 평가하는 방법으로 하천, 습지, 호수 등의 모든 담수생태계에서 사용되어 왔다. 또한 현재 국내 현실에 적합한 한국형 오수생물지수(Korean saprobic index, KSI)를 이용하여 주요 하천 및 강에서 수생태계 건강성 평가를 실시하고 있는 실정이다(국립환경과학원, 2007, 2008). 그러나 한국오수생물지수(KSI)는 계류형 정량채집망(surber net; 30×30 cm, 1.0 mm net mesh)을 사용하여 조사지점별 규모에 따라 여울

(riffle)에서 2~4회씩 정량적으로 채집하는 것을 원칙으로 하고 있어 습지나 호수 및 정수생태계에 적용하는 데에는 한계가 있는 것으로 판단되며, 지표생물군이 100개로 한정되어 있어 저서성 대형무척추동물의 지역적 특이성을 대변하기에는 어려움이 있는 것으로 사료된다.

또한 국내에서 개발된 생물지수는 하천의 건강도를 평가하기에는 적합하나 산출과정이 복잡하고 전문적인 분류학적 지식을 필요로 하는 중 수준의 동정(identification)은 평가 결과의 오류를 일으킬 수 있다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 가장 최근에는 하천생태계의 건강도 및 복원 회복도를 평가하기 위해 하천생물지수(Stream biotic index, SBI)가 제시되었다. 이는 각 조사지점에서 출현한 저서성 대형무척추동물 중 하천에서 가장 높은 다양도와 풍부도를 보이는 하루살이목과 날도래목은 속 수준에서, 그 외 분류군은 과 수준에서 분류하여 분류군의 다양도지수 범위 내에 속하고 지표생물군 점수에 해당하는 하천생물지수를 산출한 후 1~9까지의 환경상태를 나타내는 지수로 분류군의 다양도지수 범위내에서 각 지표생물군 점수에 따

라 우리나라 하천생태계의 건강도 평가에 적합하도록 개발되었다. 본 지수는 환경부에서 대표적으로 사용되고 있는 생물지수인 저서성 대형무척추동물 생태점수(ESB)와 한국오수생물지수(KSI)의 평균값을 이용하여 제시되었기 때문에 앞으로의 활용도에 있어 기대가 되는 지표라 할 수 있다(한국건설기술연구원, 2011).

저서성 대형무척추동물을 이용한 수질 및 수생태계를 평가하는 지수는 이외에도 여러 가지가 있으나 국내 하천을 고려한 현실성에 있어서는 부족한 실정이다. 따라서 하천별 하상재료와 서식처 유형의 다양성을 인지하여 하천유형별 평가지수의 개발이 필요할 것으로 생각되며, 부착조류 및 어류를 대상으로 한 지수와와의 상관성을 고려하여 지수의 개발이 이루어져야 할 것이다. 또한 이화학적인 수질 평가 방법과 수생생물을 대상으로 한 수생태계 평가 방법은 수질등급을 평가하는데 있어 많은 차이가 있으며, 이와 같은 차이를 최소화할 수 있는 지수의 개발과 사용자의 편의성과 활용성을 고려한 지수가 지속적으로 개발되어야 할 것으로 사료된다. 🌊

참고문헌

1. 공동수(2002), 생물학적 수질기준 설정 필요성 및 접근방안, 한국환경생물학회지, 제 20권, pp. 38-49.
2. 국립환경과학원(2007). 수생태계 건강성 조사 및 평가체계 구축을 위한 조사구간 선정 등 현장 정밀조사-금강수계 수생태계 건강성 조사 및 평가- 국립환경과학원, 196pp.
3. 국립환경과학원(2008). 수생태계 건강성 조사 및 평가 -금강 대권역- 국립환경과학원, 415pp.
4. 박영준(2011), 금강 수계 저서성 대형무척추동물군집의 분포 및 예측에 관한 연구, 대전대학교 박사학위 논문, 153pp.
5. 원두희, 전영철, 권순직, 황순진, 안광국, 이재관(2006). 저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용, 한국수질학회지, 제 22권 5호, pp. 768-783.

6. 이병국, 노태호(2006), 수생태 복원을 위한 제도정비 방안과 추진전략, 한국환경정책평가연구원 연구보고서, 제12권, pp. 1-134.
7. 한국건설기술연구원(2011). 하천복원 통합매뉴얼. ECORIVER21.
8. Allan, J. D. (1995). *Stream Ecology, Structure and Function of Running Waters*, Chapman & Hall, London, 388pp.
9. Davis, W. S. (1995). Biological Assessment and Criteria: Building on the Past, In: W. Ss for water resource planning and decision making, pp. 81-96. Lewi. Davis and T. P. Simon (Eds.) *Biological Assessment and Criteria: Tools*, Boca Raton
10. Metcalf-Smith, J. L. (1996). Biological Water Quality Assessment of Rivers: Use of Macroinvertebrate Communities, pp. 17-43 in Petts, G., and Calow, P. (eds.), *River Restoration*, Blackwell Science, p. 231.
11. Vannote, R. L., G. W. Minshall, K. W. Cummins, J. R. Sedell, and C. E. Cushing. (1980). The river continuum concept, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37:130-137.