

총설

우리나라 생물학적 물환경평가의 현황과 미래

황순진<sup>†</sup> · 김난영 · 원두희<sup>\*</sup> · 안광국<sup>\*\*</sup> · 이재관<sup>\*\*\*</sup> · 김창수<sup>\*\*\*\*</sup> · 신재기<sup>\*\*\*\*</sup>

건국대학교 환경과학과

<sup>\*</sup>(주)생태조사단 부설 두희자연환경연구소

<sup>\*\*</sup>충남대학교 생명과학부

<sup>\*\*\*</sup>국립환경과학원 환경진단연구부

<sup>\*\*\*\*</sup>한국수자원공사 수자원연구원

Current Status and Perspective of Biological Assessments of Water Environment in Korea

Soon-Jin Hwang<sup>†</sup> · Nan-Young Kim · Doo Hee Won<sup>\*</sup> · Kwang Kuk An<sup>\*\*</sup> ·

Jae Kwan Lee<sup>\*\*\*</sup> · Chang Soo Kim<sup>\*\*\*</sup> · Jae-Ki Shin<sup>\*\*\*\*</sup>

Department of Environmental Science, Konkuk University

<sup>\*</sup>Doohee Institute of Ecological Research (DIER), Korea Ecosystem Service (KES), Inc.

<sup>\*\*</sup>School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University

<sup>\*\*\*</sup>National Institute of Environmental Research (NIER)

<sup>\*\*\*\*</sup>Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (KOWACO)

(Received 26 June 2006, Accepted 16 August 2006)

Abstract

Biological assessments are the primary tool for evaluating the biological condition of a water body and makes it possible to understand accumulative and long-term effect of stressors. They also provide reliable biological information for which disturbed systems are to be restored. Sustainable water environment is not enough with attaining only the clean water, but it should sustain healthy and diverse aquatic life. Aquatic organisms are affected by various factors, including not only water quality but also habitat condition and stressors, and thus good condition of both physical and chemical water quality is prerequisite for sustaining healthy organisms. Therefore, biological assessment, along with other physical and chemical assessments, are crucial for evaluating the health of a water body. Overall, sustainability of water environment demands the attainment and maintenance of ecological integrity, which is resulted from the combination of physical, chemical and biological integrity. The biological criteria will play very important role in the water resource management and policy issues, and thus bioassessment program should be fully implemented and supported eventually by the law. To keep ecosystem health of water environment safely from the toxic pollutants and other stressors, the following suggestions need to be considered in environmental quality standards in Korea. For the first step, the biological indicators need to be introduced in evaluating river quality condition; they provide a qualitative description of biological condition of water body. Secondly, the biological water quality standards using biotic indices should be developed and implemented under the consideration of characteristics of Korean river systems. Lastly, the ecological status classification regime (ESCR) should be developed and introduced; it could be used in quality assessment of the water environment in general. In developing ESCR, integration of physico-chemical, biological, and habitat parameters should be taken into account.

**keywords** : Aquatic organisms, Biological assessments, Ecological integrity, Ecological status classification regime, Ecosystem health, Water body

1. 서론

물<sup>1)</sup>은 지구상의 생명유지를 위한 필수적인 매질이며 깨끗한 물의 공급과 생태계의 보전은 21세기의 인류의 생존

을 위한 지구적 문제로 그 중요성이 점점 더 크게 인식되고 있다. 국제적인 물문제 전문가들은 21세기에 인류의 생존을 위협하는 가장 큰 스트레스 요인으로 물의 중요성을 강조하고 있다(Postel, 1992; Wetzel, 2001). 또한 UN의 21세기를 위한 MA(Millennium Assessment)나 GIWA(Global International Water Assessment)에서도 물을 인류의 번영과 지속가능한 발전을 위해 가장 기본적으로 확보해야할 요소

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

sjhwang@konkuk.ac.kr

1) 여기서의 물은 담수(freshwater)를 의미한다.

로 강조하고 있다. 이처럼 지속가능한 인류의 번영은 지속가능한 물의 확보와 직결되는 문제이며 물환경의 지속가능성은 물이라는 매체가 보유하는 다양한 요소와 성질을 개선하고 보전함으로써 달성될 수 있다.

물환경의 개선과 보전을 위해서는 현재의 상태를 객관적이고 과학적으로 평가할 수 있어야 하며 평가의 방법은 해당 물환경의 이수 혹은 정책목표를 달성하기 위해 다양하게 접근할 수 있다. 예를 들면, 우리나라의 경우 지금까지의 물환경 정책은 먹는 물 위주의 정책으로 깨끗한 물의 확보에 최상의 목표를 두었기 때문에 이를 위해 필요한 평가와 해결수단을 강구해 왔다. 즉, 하천의 수질을 유기물(BOD)에 의존하여 평가하였고 BOD의 개선을 수질관리의 가장 큰 목표로 지향해 온 것이다(환경부, 2005). 그 과정에서 BOD를 포함하는 다양한 수질 요인들 간의 연계성이나 물환경의 종합적 특성을 간과하였고, 그 결과 BOD가 개선되어도 실제로 다른 요인으로부터 발생하는 문제점들을 개선하지 못하였다. 부영양화, 녹조현상, 서식지의 파괴, 생태계의 질적 악화 등은 바로 그러한 부작용으로 나타나게 되었다. 결론적으로, 지금까지의 우리나라 물환경 정책은 물환경의 종합적인 의미를 파악하지 못하였음을 인정하지 않을 수 없다.

물환경의 종합적인 특성 속에서 수질은 일부분이며 물환경의 지속가능성을 위해서는 화학적 수질과 똑같이 물리적 교란이나 생물학적 피해에 대해서도 고려하여야 한다(US EPA, 2002). 해당 물환경이 가지는 지형학적(유역적)·형태적 특성과 이수의 목적에 따라 필요한 요소들에 대한 개선과 관리의 차별성은 당연히 필요하지만 지속가능한 물환경을 위한 최종적인 목표는 그러한 요소들이 종합적으로 표현되는 생태학적 온전성<sup>2)</sup>(ecological integrity)의 확보에 두어야 한다. 다시 말해서, 물환경의 지속가능성은 수문, 물리, 화학 및 생물학적 온전성을 종합한 생태학적 건강성을 의미하는 것이다(US EPA, 2002).

물환경의 평가는 그 환경이 가지는 모든 요소들을 이용하여 수행할 수 있지만(UNESCO, 1996) 궁극적인 물환경의 지속가능성을 확보를 위해서는 생물학적 평가를 포함하지 않으면 안된다. 단순히 깨끗하기만 한 물로서는 충분하지 않으며(Karr, 1995) 다양하고 건강한 생물들이 부양될 수 있는 환경이 되어야 한다. 물속의 생물은 수질 뿐만 아니라 서식지나 위해성과 같은 다양한 요소들의 영향을 종합적으로 받기 때문에 물리·화학적으로 양호한 수질은 건강한 생물의 유지를 위해 선결조건이 된다.

1980년대 이후로 미국, 유럽, 일본 등 선진국에서는 물환경의 지속가능성을 상기한 맥락에서 이해하기 시작하였으며, 이미 생물학적 물환경 평가를 도입하고 있는 실정이나(EEA, 1996; US EPA, 1999), 우리나라는 이제 그 중요성

을 인식하고 제도적 기반을 모색하고 있는 단계이다(환경부, 2005).

따라서 생태계의 건전성과 용수이용의 안정성을 고려하여 우리나라 수계특성에 맞고 물환경을 적절히 나타낼 수 있는 즉, 물환경의 총체적인 건강성을 평가할 수 있는 생물학적 물환경 평가가 크게 요구된다.

## 2. 수질환경기준과 물환경평가

물환경은 다양한 물질의 수용체로서 복잡한 물질들이 포함되어 나타나는 질적 문제(이화학적 수질)와 이러한 무생물적 요소들에 반응하는 생물학적 상태를 모두 포함한다. 따라서 물환경의 구성요소들의 종합적인 결과는 생태계 건강성(ecosystem health)으로 표현된다.

물환경의 상태에 대한 평가는 적절한 도구들을 필요로 하며 이들은 물리·화학적 및 생물학적 손상에 대한 원인과 기원을 찾아내고 해결하는데 도움을 준다. 물환경 평가를 위한 근거는 국가의 환경목표를 수립하고 이를 수행하기 위한 정책으로 반영되며 최종적으로 그것은 “수질환경기준”으로서 효력을 발휘하게 된다. 수질환경기준은 국가가 정하는 다양한 지표항목에 대한 수치적 기준으로 표현되거나 혹은 서술적 설명으로 만들어지고 이것은 수질개선과 보전이라는 환경정책의 목표를 달성하기 위한 근거로 이용된다.

우리나라의 환경정책기본법 제10조 제1항은 「정부는 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 환경기준을 설정하여야 하며 환경여건 변화에 따라 그 적정성이 유지되도록 하여야 한다」고 규정하고 있다. 이는 환경기준이 건전한 수생태계를 유지하고 이수목적에 적합한 수질을 유지확보하기 위한 정책목표를 분명히 하고 있다. 그러나, 공공수역의 수질이 물리, 화학, 생물학적으로 물이용의 목적에 부합되어야 함은 물론이며 동시에 수생태계의 건전성을 확보할 수 있어야 하나 생태계 보전을 위한 내용은 구체적이지 못하며 더불어 생물학적 기준과 평가방법에 대한 내용도 포함되어있지 않은 실정이다.

수질환경기준은 지역과 국가별로 필요에 따라 항목과 기준에 있어 어느 정도의 차이는 있으나 크게는 인간의 건강, 생활환경, 자연환경 보호를 위한 기준으로 나뉘게 된다. 미국과 유럽과 같은 선진국의 경우 인간의 건강 및 생활환경 보호기준 이외에 생태계 내의 야생생물에 대한 보호기준이 마련되어 있고 수질기준에서 생물학적 요소들을 매우 중요하게 고려하고 있다. 생태계의 보호와 보전은 그 안에 서식하는 생물의 건강을 뜻하며 이는 결국 인간의 생활환경 및 건강보호와 밀접한 상관관계가 있다.

미국의 청정수법(Clean Water Act)에서의 수질환경기준은 공공수역에서 어류, 조개류, 야생동물의 번식 및 보존, 낚시 및 수영의 레크레이션 용도로 사용가능한 수질기준을 유지하는 것을 목표로 하여 물리적, 화학적, 생물학적 건전성을 유지하는 규정을 포함하고 있다. 다시 말해, 미국 청정수법의 핵심은 어·패류와 야생동물의 보호 및 번식, 수변·수상에서의 여가활동에 적합한 수질을 제공해야하는

2) “Integrity”는 “종합성”이라는 의미를 가지고 있으며, 다른 표현으로는 “총체성”으로 볼 수 있다. 보다 명확한 이해를 위해서는 “온전함 혹은 온전성”으로도 표현할 수 있다. 물환경이 가지는 종합적 의미를 표현하는 말로서 “건강성”으로도 이해될 수 있다.

**Table 1.** Advantages and shortcomings of several methods of water quality assessments

Methods	Advantages	Shortcomings
Assessments using the concentration analysis of individual pollutants	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Protection of human health</li> <li>○ Comparable to data obtained from bioassay</li> <li>○ Accuracy</li> <li>○ Understanding of pollutant dynamics</li> <li>○ Cost effective with small number of parameters</li> <li>○ Usable to prevention of pollution effects</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Unable to account all the pollutants</li> <li>○ Unable to measure biological availability</li> <li>○ Unable to account the interaction among pollutants</li> <li>○ Increase of cost in analyzing all the parameters</li> <li>○ Unable to analyze directly the effects on organisms</li> </ul>
Assessment using bioassay	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Accounting for overall biological effects</li> <li>○ Evaluating the effect of unknown pollutants</li> <li>○ Measuring biological availability</li> <li>○ Testable in the laboratory scale</li> <li>○ Usable to prevention of pollution effects</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Difficult to obtain the information of human health</li> <li>○ Limited in the assay data of a few species</li> <li>○ Difficult to account the effects of biological accumulation</li> <li>○ Biological effects depend on environmental condition</li> <li>○ Hard to obtain the information of pollutants</li> </ul>
Bioassessment using biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Measuring the pollution effect in situ</li> <li>○ Representing long term accumulated pollution effect</li> <li>○ Providing the goal and criteria for ecological restoration</li> <li>○ Linking with water quality management and providing the goal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Difficult to interpret the results</li> <li>○ Difficult to understand the causes of pollution effects</li> <li>○ Difficult to use in the management of pollution source</li> <li>○ Difficult to obtain the information of human health</li> </ul>

원칙과 공공상수용수, 항해를 포함한 농업, 산업 등 이수목적별 필요 수질을 확보할 것을 동시에 포함하고 있다.

### 3. 생물학적 물환경 평가의 배경 및 의의

물환경을 평가하는데 있어 생물학적 기준과 지표의 중요성은 지대하다. 즉, 우리가 목표로 하는 최적상태의 물환경은 그 안에 서식하는 생물들을 건강하고 다양하게 부양하고 유지시킬 수 있는 능력을 보유하는 생태계, 즉 교란되지 않는 환경(unimpaired condition)을 의미하는 것이지 단순히 맑은 물로 채워진 환경은 아니다. 미국의 생물학적 수질 평가의 선도적인 역할을 해 온 Karr(1995)는 수생생태계를 보호하는 목적에서 볼 때, “깨끗한 물로는 충분하지 않다(Clean water is not enough)”고 역설하였다.

서식하는 생물의 구조와 기능에 근거한 생물학적 평가는 이화학적 평가에 비하여 해당 물환경에 대해 보다 종합적이고 장기적인 영향을 파악할 수 있게 하며, 교란된 환경이 궁극적으로 회복하여야 할 생물학적 상태에 대한 정보를 제공해 준다(Table 1).

USGAO(US General Accounting Office, 1988)는 환경적 지표로서 생물기준의 중요성을 인식하고 환경문제들을 관리하는데 생물지표종이 유용한 도구가 될 것이라고 결론 내린 바 있다. 그들은 이러한 측정치들이 생물체에 대한 오염물질의 영향을 대상으로 하기 때문에 생물지표와 기준들이 이전에는 미비하였던 환경적 건강성에 대한 직접적인 평가를 제공한다고 판단하였다. 미국 EPA는 이러한 USGAO의 권고와 결론에 동의하였으며(USEPA, 1990), 이 결과 지표수에 대한 최적의 환경지표는 “생물학적 총체성, 즉 온전성(biological integrity)<sup>3)</sup>”의 측정에 직접 관련되는

내용들이라는 결론에 도달하였다(USEPA, 1991).

우리나라에서 지금까지 시행되어온 정부의 물환경종합대책의 문제점으로 제기되는 내용들은 그간의 수질관리정책이 유기물과 독성물질 등을 포함하는 화학적 오염, 하수와 공장폐수 등의 점오염원, 그리고 인간의 건강관리를 위주로 시행되어 온 것과 관련이 있다. 즉, 지금까지의 수질관리 및 관련 수자원정책은 건강한 생물학적 시스템을 부양하고 유지시키는데 실패하였다고 말할 수 있다. 그 이유는 생태계와 그 안에 서식하는 생물들에 대한 관리에 노력을 기울이지 않았기 때문이다. 인간사회에 대하여 자연의 생물학적 그리고 생태학적 시스템이 매우 중요함에도 불구하고 우리는 관련된 생물학적 시스템이 사회에 대해 단순히 부수적인 것처럼 수자원을 관리해 왔다. 미국 청정수법(Clean Water Act, 1972) 내에서 야생생물 및 생태계의 보전과 관련된 법령들의 제정은 그들도 과거에 이와 같은 수자원 정책의 실패에 대한 충분한 인식이 있었기 때문에 가능하였다(Karr, 1995).

이미 선진 외국에서 도입하고 있는 생물학적 기준과 지표에 의한 물환경의 평가는 수자원 관리정책의 핵심개념으로 자리 잡고 있으며, 인간중심의 수자원관리에서 자연생태계의 회복으로의 인식이 전환되고 있다. 이러한 인식의 전환의 필요성은 아래에서 지적하는 바와 같은 중요한 문제들에 대한 반성과 필요성에 근거한다.

첫째로, 인간중심의 수자원 관리(예를 들면, 댐 건설, 하천정비, 수로직강화 등)는 자연생태계의 훼손과 생물의 감소에 대해 별로 관심을 두지 않았다. 이로 인해 지역적·광역적 그리고 지구적 규모에서 생물학적 요인들을 포함하는 수자원의 질적인 저하는 매우 급격하게 그리고 단순한 해당 행위의 차원을 넘어서 나타났다. 그 결과 생태계가 제공하는 각종 생태학적·경제적 서비스를 영원히 잃어버리는 결과를 초래하였다. 예를 들면, 인간 활동으로 인해 수생서식지에서 생물다양성이 위협 받고 있으며 미국의 주요하천에서 어획고의 80%가 감소하였다(Karr, 1995). 우리

3) 최상(최적)의 자연서식지에서와 비교할 수 있는 생물의 구성, 다양성, 기능적 단위를 가지는 균형적인, 종합적인, 그리고 적응적인 생물군집을 유지하고 부양시킬 수 있는 수생태계의 능력을 의미함(Karr et al., 1981).

나라의 경우에는 이 분야에 대한 장기적인 조사가 뒷받침되지 못하여 실제 어느 정도의 생태학적 피해가 있었는지에 대해 정량화하기 어려우나 그 규모는 굉장히 컸었을 것으로 추정된다. 이러한 광역적인 생물학적 악화는 수자원의 질을 보호하는데 있어 기술(공학)에 기초한 접근방법의 실패를 반증하는 것이다. 미국에서는 CWA(305(b))에 따라 주(state) 경계지역 내에서 수자원의 상태에 대한 보고를 하도록 되어 있는데, 화학적 분석에 기초하는 경우에는 모두 악화의 정도를 계속적으로 과소평가하고 있다. 실제, Ohio 주에서 생물학적 평가를 실시한 결과, 전반적인 수자원 상태가 두 배나 더 악화된 것으로 나타났다(Yoder, 1990). 달리 말하자면, 전통적인 화학적 수질기준은 지표수의 50% 피해를 감지하는데 실패한 것이다. 이 결과는 물환경 관리 계획이 하천이나 하천에서의 생물학적 자원들을 제대로 보호하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 왜냐하면 미국에서 초기의 청정수법은 맑은 물이 콘크리트로 정비된 하천수로 따라 흐르도록 하는 것이 목표인 것처럼 시행되어 왔기 때문이다. 이것은 우리나라에서도 유사한 상황이었다(환경부, 2005).

두 번째로, 생물학적 상태의 악화는 기존의 수질관리 정책에서 1차적인 대상이었던 화학적 오염보다도 더 넓은 범위로 퍼져있는 요인들에 의해 표출되고 있는 데에 그 심각성이 있다. 우리는 화학적 오염원으로부터 보호되는 물이 물리·화학·생물학적 총체성(즉, 수체의 건강성)을 담보받는 것으로 생각하고 있으나, 인간 행위의 누적적인 영향은 화학적 오염보다 훨씬 더 광범위하게 나타난다. 수자원 악화에 대한 누적적 영향은 궁극적으로 수질, 서식지 구조, 물의 흐름체계, 에너지원, 생물학적 작용을 포함하는 기본적인 요인들에 영향을 준다. 결국, 우리나라에서 과거 30여 년 동안의 기술(공학)적인 배이스에 의한 해결방안이 인간 활동의 아주 좁은 범위에 초점을 맞추어 온 반면 똑같이 심각한 위협(즉, 생물학적 상태의 악화)에 대해서는 간과해 왔다.

셋째로, 지금까지 수질정책에 대한 법과 제도가 계속되는 생물학적 악화에 대해 적절한 시기에 대응을 하지 못하고 있는데 문제가 있다. 정부의 기관들이 문제에 대해 부적절하게 대응해 왔고 그래서 수자원의 악화를 개선하는데 효율적이지 못했기 때문에 현재에도 수생태계의 교란과 질적 악화는 계속되고 있는 실정이다. 가장 중요한 것은 그것을 회복하는데 소요할 수 있는 재원이 없어서가 아니라 우리가 물환경 그리고 복잡하고 종합적인 자연자원 시스템으로서의 수자원의 연계성을 제대로 인식하지 못한 데 있다. 미국과 유럽에서는 이미 1990년대 초부터 수질환경기준을 종합적이고 총체적인 관점에서 인식하고 있으며, 이와 연계하여 물환경의 회복을 위한 도구로서 생물학적 기준과 평가를 도입하고 있다. 과거에 선진국에서도 그래왔듯이 우리나라의 물관리정책도 지난 30여 년 동안 점오염원 관리를 위한 오폐수 처리기술의 개발과 사람의 건강보호에만 주된 관심을 기울여 왔다. 이러한 두 가지 이슈의 팽배로 인해 우리 모두가 수자원의 실질적인 상태를 제대로 인식하지

못하였다.

사회적 관심과 물관리정책과 제도에 있어서 우리의 비전과 의무는 훨씬 더 넓은 개념 즉, 수자원의 생물학적 총체성과 생태학적 건강성 확보로 전환하여야 한다. 그리고 또 다른 전환의 필요성은 “오염”이라는 용어의 이용에 대한 것이다. 관례적으로 오염이란 화학적인 오염을 의미한다. 그러나 보다 적절한 정의는 “인간에 의해 만들어지거나 인간이 연루된 물리·화학·생물학적 물환경의 변경”이다. 이러한 이유로 우리는 수자원의 총체성에 대한 “위해성(risk)”이라는 의미를 다시 정의 하여야 하고, 또한 우리가 어떻게 위해성을 평가할 것인가에 대한 것도 재조명할 필요성이 크다.

현재까지의 이화학 중심의 수질정책 하에서는 수질보호를 위해 엄청난 비용을 지출하고서도 수질악화를 멈추는데는 실패하였다. 미국의 경우 1970년 이래로 수질오염 처리시설을 건설하고 가동하는데 4,730억 달러(약 500조원)를 소요하였고(WQ 2000, 1991), 우리나라는 과거 10년('96~'05) 동안 27조원 이상을 투자하였다(환경부, 2005). 그러나 많은 하천에서의 수질악화는 계속되고 있다. 그렇다면 실제로 이 엄청난 비용이 정말로 효율적으로 이용되었는가에 대해서는 의문의 여지도 있으며, 지역적인 수질악화에 실제로 책임이 있는 요인들에 대한 부적절한 분석을 통해 값비싼 오폐수 처리시설들을 너무 자주 건설하지는 않았는지에 대한 평가도 필요한 부분이다.

또한 우리는 수질보호를 위해 계획된 제도의 실질적인 편익을 간과하고 있다. 수십 년 동안 우리는 자원의 상태와 사회적 행위간의 관계를 충분히 이해하고 있는 것처럼 수질관리계획을 운영해 왔다. 그러나 정책들의 많은 부분이 검증되지 못하는 가설들이었고 그로 인해 이면에서는 자원의 악화를 계속적으로 허용해 온 것이 사실이다. 인간활동의 영향에 따른 자연시스템의 반응에 대한 가설들을 테스트할 수 있는 성격을 지닌 관리계획을 보다 활발하게 이용해야 한다. 그래야만 경제와 환경 모두에 이익이 되는 계획들로 수정할 수 있다.

## 4. 생물학적 물환경 평가

### 4.1. 생물학적 평가에 요구되는 개념

생물학적 평가(bioassessment)는 해당 수체의 생물학적 상태를 평가하는 1차적인 도구로서 물환경 내에 서식하고 있는 생물들(수생식물, 조류, 어류, 저서생물 등)에 대한 조사나 기타 직접적인 측정방법들로 구성된다. 생물학적 평가는 물환경 평가의 도구로 생물을 이용하지만 다른 물리·화학적 평가와 함께 최종적으로 수체의 건강성을 평가하는데 매우 중요하다.

#### • 생물학적 평가(Biological Assessment, Bioassessment)

물환경 내에 서식하고 있는 생물들에 대한 조사와 기타 직접적인 측정법을 이용하여 수체의 생물학적 상태를 평가하는 작업. 물환경의 생태적 건강성을 직접 평가하는 도구로서 지속적인 생물학적 모니터링 결과에 근거.

#### • 생물학적 준거치(Biological Criteria, Biocriteria)

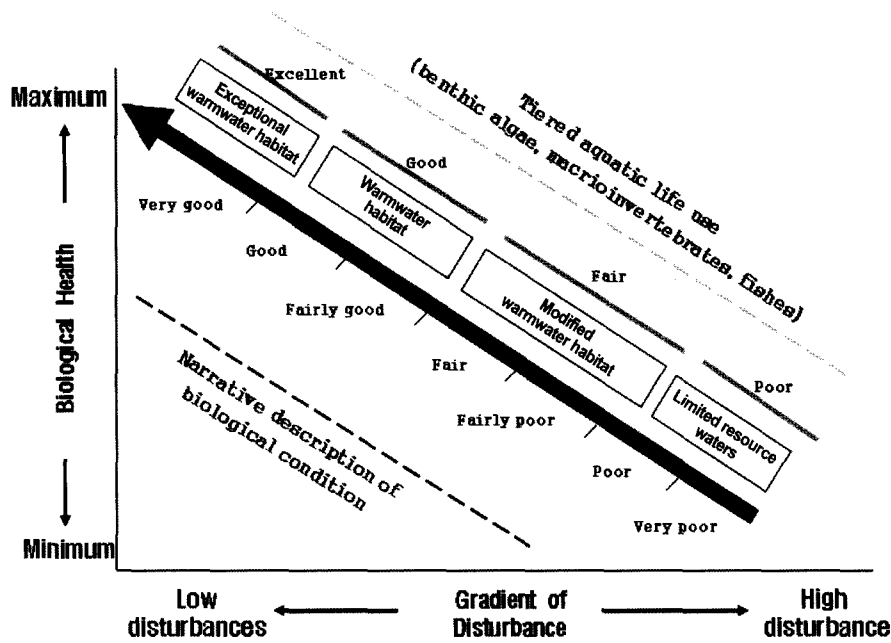


Fig. 1. A framework of using biological assessments and criteria to set aquatic life use (Source: US EPA, 2002).

수생생물의 생존과 번영의 유지를 목표로, 이수목표가 지정된 수계에 서식하는 생물들의 상태를 보호하기 위해 지정된 수치(numeric value: 생물의 종류, 분포 및 서식지의 상태 등의 생물학적 상태를 이용하여 지수화한 생물학적 기준) 또는 서술적 설명(narrative description: 지표종, 서식지 혹은 서식환경을 포함하는 생물학적 현상의 설명)

• 생물학적 총체성(Biological Integrity, Biointegrity)

자연상태의 서식지와 비교 가능한 종조성, 다양도 및 기능적 구조를 가지는 건강한 생물군집을 유지·관리 시킬 수 있는 능력. 생물학적 총체성은 물리·화학적 온전성이 뒷받침되어야 가능.

생물학적 평가는 생물을 대상으로 하고 있지만 궁극적으로는 생물에 영향을 미치는 이화학적 상태까지도 반영한다. 즉, 해당 수체에서 서식하는 생물들의 건강성은 양호한 이화학적 상태가 유지되어야 가능하기 때문이다. 따라서 생물학적 평가체계는 해당 서식지의 생물과 이에 영향을 미치는 다양한 이화학적 교란요인들의 종합적 결과를 유형화시킴으로써 가능하다(Fig. 1).

교란요인들에 의해 반응하는 생물의 상태는 Fig. 1에서와 같이 건강성으로 표현될 수 있으며 건강성의 범위는 필요에 의해 몇 단계의 등급으로 구분할 수 있다. 이러한 구분(등급)은 생물학적 상태나 이에 영향을 주는 환경상태가 반영된 서술적 설명으로 표현될 수도 있을 뿐만 아니라 오염<sup>4)</sup>에 반응하여 나타나는 서식생물의 종류, 분포, 특성 등에 기초한 정량적 상태(예를 들면, index)로도 표현이 가능하다.

4) 보다 정확하게는 스트레스 혹은 교란을 의미한다. 즉, 영양물질, 독성물질, 서식지, 침식 등 다양한 요인들이 포함되어 있기 때문이다.

4.2 생물학적 평가의 특성

수서생물군집의 생물학적 상태를 평가하는 가장 중요한 목적은 해당 수체가 그 안에 서식하는 생명체들을 얼마나 잘 유지(부양)할 수 있는가를 결정하는 것이다. 수계에 서식하는 생명체는 과도한 영양물질, 독성화합물질, 수온증가, 과도한 토사의 유입 등과 같은 여러 종류의 스트레스들에 대한 반응을 종합하여 보여준다. 따라서 생물학적 평가는 스트레스들에 대한 집합적인 영향의 측정을 가능하게 한다. 생물군집들은 시간에 따라 스트레스에 반응하기 때문에 신속하게 변화하는 수질의 화학적 측정이나 독성시험이 파악하기 어려운 정보를 제공하는 장점이 있다. 이처럼, 생물학적 평가는 수체의 상태에 있어 장기적인 생물변화를 평가하는 신뢰성 있는 방법을 제공한다.

생물학적 평가에 의해 도출되는 생물학적 정보는 물리·화학적 정보와 상당히 다를 수 있으며 생물이 가지고 있는 특성으로 인해 다음과 같은 특성과 장점이 있다.

- 수체의 영향에 대한 기준이 존재하지 않을 때(예를 들면, 서식지를 교란시키는 영향) 생물군집은 평가에 대한 유일한 실질적인 평가수단을 제공한다.
- 생물학적 자료는 수서생물을 이용한 분석과 지역적으로 차별적인 수질기준을 만들기 위해 필수적이다.
- 생물학적 자료는 경시적인 수질변화와 오염총량관리의 효율성을 평가하는데 사용 가능하다.
- 생물들은 수계에서 대부분 모든 종류의 스트레스에 대해 노출되어 있기 때문에 스트레스의 종합적 영향을 파악하는 수단을 제공한다.
- 생물들은 경시적으로 스트레스를 종합하며 따라서 변화하는 상태에 대한 측정방법을 제공한다.
- 생물군집에 대한 체계적인 모니터링은 개별적인 독성오염물질에 대한 모니터링 비용과 비교할 때 상대적으로

비용이 크게 소요되지 않는다.

- 일반 국민들은 오염이 없는 환경에 대한 측정치로서 생물의 상태를 쉽게 인식한다.

상기하였듯이, 생물학적 평가는 생태학적 총체성의 상태를 반영한다. 일반적으로 생물(생물 및 그들과 관련된 제반 현상)이 건강할 때 수체의 물리·화학적 상태도 양호하게 나타난다. 그러므로 생물학적 평가는 생태계의 건강성을 직접적으로 평가하는 것이며, 미국의 경우 청정수법(Clean Water Act)의 가장 기본적인 목표로 채택하고 있다. Table 2는 생물학적 평가가 지니는 편익을 보여주는 사례로서 미국의 청정수법의 여러 가지 조항과 관련되어 있음을 알 수 있다.

생물학적 상태를 평가하기 위한 도구인 생물학적 평가는 물환경의 상태에 대한 초기평가 또는 스크리닝, 손상과 진단에 대한 방법화, 개선 또는 질적 저하를 평가하는 모니터링을 포함하는 세 가지 기능을 포함한다. 따라서 생물학적 평가는 복잡한 수질문제를 관리하는데 중요한 정보를 제공한다. Fig. 2는 수질프로그램에서 생물학적 평가와 관련된 다양한 분야와의 연계성을 보여주고 있다.

4.3. 수체의 건강성(health) 개념

건강한 수체는 생태학적으로 온전한 자연상태 혹은 교란되지 않은 상태를 나타낸다. 미국의 청정수법에서는 생태학적 총체성을 화학적, 물리적 및 생물학적 총체성이라는 세 가지 요인들의 조합으로 규정하고 있다. 이중에서 하나 또

그 이상이 교란이나 파괴되었을 때 수체의 건강성은 영향을 받으며 대부분의 경우에 있어 서식하는 수생생물이 그 영향을 반영한다(Fig. 3). 따라서 생물학적 상태는 수체의 건강성을 가장 직접적이고 종합적으로 표현하는 지표이다.

미국이나 유럽에서는 수질정책의 기본적인 개념으로 수체의 건강성을 제시하고 있으며(Davis et al., 1995), 수질기준이라는 정책적 목표 내에 생물학적 요인들과 그에 관련된 기준과 평가의 중요성을 포함하고 있다. 이것은 수질목표를 물환경의 일부를 통해 달성하는 것이 아니라 생태계의 건강성의 통해 달성하려는 의지를 보여주는 것이다.

미국의 경우, 생태학적 건강성의 개념은 Clean Water Act의 법규 안에 녹아들어 있다. 미국 청정수법 제정의 장기적인 목표중의 하나는 생태학적 총체성(물리·화학·생물학적 총체성의 조합)을 회복하고 유지함으로써 수서자원들을 보호하는데 있다. 미국 청정수법에서는 주나 지방정부가 법의 목표를 달성하도록 그들의 수체들에 대해 수생생물의 이용(즉, 환경적 목표)을 지정하도록 요구하고 있으며, 대부분의 주에서는 생물학적 기준을 개발하여 적용하고 있거나 현재 개발 중에 있다(Table 3). 그 내용은 생물학적 총체성을 향상시키고 보호하는 것과 그에 필요한 기준을 채택하는 것을 포함한다.

우리나라에서 수질환경기준에 대해 명기하고 있는 환경정책기본법의 제정목표에서는 “자연환경을 적절하게 관리·보존함을 목적”으로 하고 있으나 이 내용은 미국의 경우처럼 생태학적 총체성의 유지 및 확보라는 구체적인 의

Table 2. Examples of benefits of biological assessments to requirements of the Clean Water Act (USA) (Source: US EPA, 2002)

Related articles	Benefits of bioassessment to requirements of CWA
Aquatic life use attainment (section 305b)	Bioassessments clearly determine if a waterbody has healthy aquatic life
Nonpoint source (section 319)	Bioassessments are the most effective way to evaluate commutative impacts from nonpoint sources (both chemical and non-chemical stressors)
TMDLs (section 303d)	Bioassessments help to provide an ecologically based assessment of the status of a waterbody and help prioritize waterbodies for TMDLs based on the severity of biological damage
NPDES (section 402)	Bioassessments directly measure the combined impacts of any and all stressors on the resident aquatic biota and can be determine the effectiveness of permit controls.

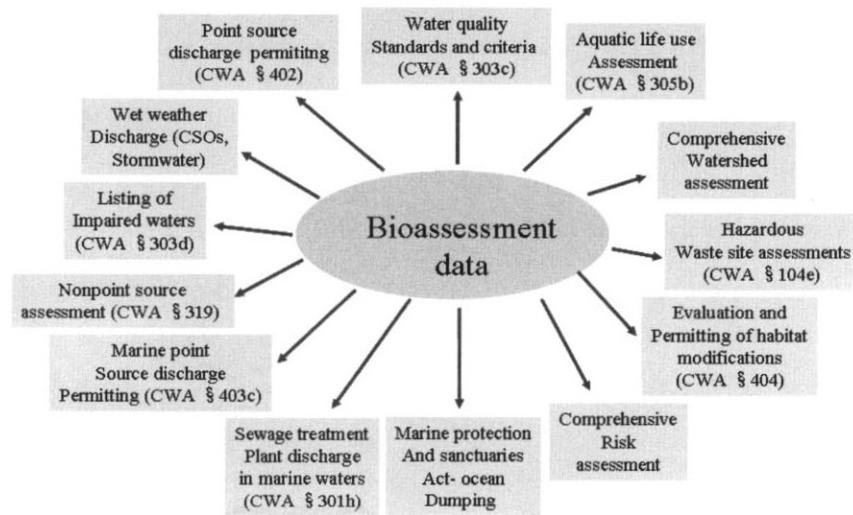


Fig. 2. Use and application of biological assessments in water quality program (Source: US EPA, 2002).

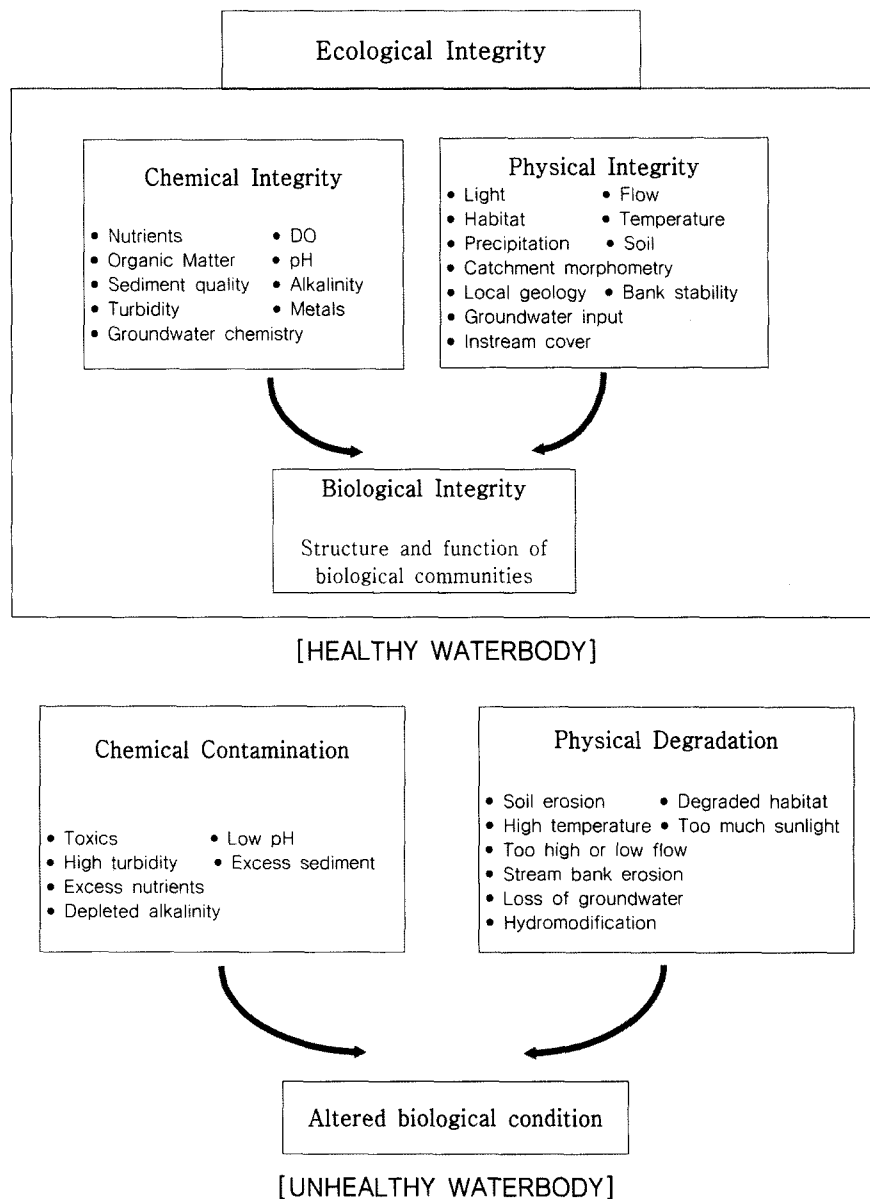


Fig. 3. Conceptual comparison of healthy and unhealthy waterbody.

미로 정리하지는 않고 있다. 또한 수질환경기준에 있어서도 생태계의 건강성 및 서식생물의 보호와 보존에 대한 내용은 포함하지 않고 있어, 앞으로 보다 구체적으로 개정될 필요성이 크다.

선진국의 사례와 생태학적 원리에서도 명백히 증명되듯이 수체의 건강성은 물리·화학적 환경의 총체성으로 대표되기는 어렵다. 수체의 존재는 궁극적으로 그 안에 서식하는 생명체를 유지하는 것에 연결되며 수자원의 총체성은 생물학적 총체성이 포함될 때 비로소 완성될 수 있다 (Davis et al., 1995).

#### 4.4. 생물학적 평가에 이용되는 생물

수체에 서식하는 생물종 다양하며 이들은 서식공간, 영양단계 및 에너지의 획득방법 등에 있어 차이가 있으므로 생물학적 수질평가는 여러 가지 생물군을 이용할 수 있다 (UNESCO, 1996). 각각의 생물군은 각기 특성이 달라 이들

을 모두 획일적인 방법으로 평가하기는 어렵다. 그러나 이는 역으로 다양한 생물군의 특성(장점)을 이용하여 상호보완적인 평가기준이나 지표를 설정할 수 있음을 의미한다.

하천(river)과 소규모 개천(wadable stream)에서의 생물학적 물환경 상태를 평가하기 위해 보편적으로 사용해온 생물군은 저서성대형무척추동물(macroinvertebrate)와 어류(fish)이다. 저서성대형무척추동물은 주로 수서곤충류를 대상으로 하며 하천에서의 오타계급 또는 부수성(saprobity)을 표현하는 대표적인 생물군이다. 이들은 생물학적 수질평가에서 가장 먼저 사용된 생물군들로 역사가 깊고(Kolkwrtz et al., 1902) 전 세계적으로 많이 이용하고 있다. 이들은 하천의 저질층(sediment)에 서식하며 대체로 하천 먹이사슬의 1차 소비자 영양단계를 점하며 국내외적으로 유기물 오염을 반영하는 지표종들이 많이 조사되어 있다.

어류는 하천 먹이사슬의 최상위 소비자로서 수질의 상태와 함께 생태계의 건강성을 평가하는 도구로 사용되어 왔

**Table 3.** States conducting biological assessment and types and examples of bioassessment programs in the USA (Source: US EPA, 2002)

States	Type of biocriteria	Examples of bioassessment programs
Oregon	Narrative biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streams monitored</li> <li>• Benthic macroinvertebrates</li> <li>• Regional reference conditions</li> <li>• Combined multivariate and biological metric assessments</li> <li>• Used to list impaired waters</li> </ul>
Arizona	Narrative biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Streams monitored</li> <li>• Benthic macroinvertebrates</li> <li>• Integrates biological and physical data</li> <li>• Montane and plains index</li> </ul>
Vermont	Narrative biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiered aquatic life use</li> <li>• Streams monitored, rivers/lakes in development</li> <li>• 3 stream categories (elevation/slope)</li> <li>• Used to list/de-list waters</li> </ul>
Maine	Numeric biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiered aquatic life uses</li> <li>• Streams and rivers monitored</li> <li>• Benthic macroinvertebrates</li> <li>• Multivariate predictive model</li> <li>• Reference conditions by aquatic life use</li> <li>• Impairment thresholds based on tiered uses</li> </ul>
Maryland	Narrative biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stream monitored</li> <li>• Multiple assemblages</li> <li>• Coastal and non-coastal bioregions</li> <li>• Biological indices and impairment thresholds by bioregion</li> <li>• Used to assess status and list impaired waters</li> </ul>
Ohio	Numeric biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiered aquatic life uses</li> <li>• Ecoregional reference conditions</li> <li>• Streams, rivers, wetlands monitored</li> <li>• Multiple assemblages</li> <li>• Integrates biological, physical, chemical, and toxicological data</li> <li>• Biological indexes for tiered uses</li> <li>• Adopted in WQ standards</li> </ul>
Florida	Numeric biocriteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rivers basin monitoring</li> <li>• Streams, rivers, lakes, estuaries, wetlands monitored</li> <li>• Integrates biological, physical, chemical, and toxicological data</li> <li>• 4 bioregions for assessment</li> <li>• Biological index and impairment thresholds by bioregion</li> <li>• Used to list/de-list impaired waters</li> </ul>

다. 현재 유럽과 미국 등에서 어류를 이용한 생물지수(예를 들면, IBI, RBP 등)의 사용이 상당히 보편화되어 있는 실정이다.

오랜 역사에도 불구하고 이들 두 분류군의 생물보다는 시간적으로 늦게 적용되었으나 생리·생태학적 특성으로 인해 최근 들어 생물학적 수질평가의 도구로 크게 인식되고 있는 생물군이 부착성조류(periphytic algae)이다. 이들은 저서성대형무척추동물과 같이 하천의 저질층에서 다양한 기질(substrates)에 부착하여 서식한다. 부착성 조류 중에서 특히 돌부착 규조류(epilithic diatom)는 채집과 조사의 분석이 다른 부착조류보다 용이하여 가장 널리 이용되고 있다. 이들은 이동성이 없고 영양염 뿐만 아니라 유기물 오염에도 민감하게 반응하며 생활사가 짧고 어떠한 환경에서도 쉽게 관찰되기 때문에 생물조사에 매우 유리한 조건을 갖추고 있다. 부착조류는 1차생산자인 동시에 영양염(질소, 인, 실리카 등)을 성장에 필수적으로 요구하므로 영양염과 유기물중

가를 동시에 반영할 수 있는 장점이 있다(UNESCO, 2004).

영양염이 생태계의 스트레스로 작용하는 경우에(예를 들면, 부영양화) 부착조류는 가장 민감하게 반응하는 생물이므로 환경변화의 조기경보지표종으로 활용이 가능하며, 온도가 스트레스 요인이라면 어류나 수생식물이 보다 더 적합한 지표가 될 수 있다.

수생식물(macrophyte)도 생물학적 평가에 이용되는 생물군으로서, 부착조류와 마찬가지로 이들 역시 이동성이 없어 환경적 누적영향을 평가하는데 유용하다. 수생식물은 계절적인 변이가 적고 생물자체의 변화가 느리기 때문에 상대적으로 큰 환경변화를 감지하는데 유리하다.

외국의 하천모니터링 프로그램에서도 볼 수 있듯이(Table 4) 국가마다 어느 한 생물군에 대해서만 생물학적 평가를 실시하는 것은 아니다. 다양한 생물군을 활용하여 평가함으로써 각 생물군이 가지는 특성을 불환경평가에 반영하고 있다.



**Table 4.** Stream monitoring and the use of aquatic lifes in EU countries (Source: European Environment Agency, 1996)

Countries	Name of programs	Objects and organisms for assessment	Survey network
Austria	Austrian ordinance for river water quality monitoring	Saprobic system, Benthic macroinvertebrates, Benthic algae	244 sites in national level
Denmark	Denmark national river monitoring program	Benthic macroinvertebrates, Benthic algae	261 sites in national level
France	France national watershed network	Benthic macroinvertebrates, Fishes, Benthic algae	1,082 sites in national level
Netherlands	Netherlands national surface water monitoring program(biology)	Benthic macroinvertebrates, Fishes, Zooplankton, Aquatic plants	15 fixed sites
Sweden	Sweden national reference stream	Benthic macroinvertebrates, Benthic algae	15-35 streams

### 5. 생물학적 기준의 도입 및 제도화

생물학적 물환경 평가를 위한 기준은 표준화된 평가방법에 따라 수집된 기초자료의 장기적인 축적 하에서 마련될 수 있으며, 최종적용을 제도화를 통해 적용된다.

수질상태에 따라 서식하는 어류, 저서생물, 부착조류 등 주요 생물에 대한 지속적인 모니터링을 실시하고 이로부터 확보된 기초자료를 바탕으로 생물지표종 및 생물지수를 이용한 생물학적 기준을 도입하여야 한다. 중장기적으로는 물리화학적 수질평가와 생물학적 평가를 종합한 계량화된 생태학적 등급체계를 개발하여 종합적인 물환경의 건강성을 평가하여야 한다(WFD, 2000/60/EC). 이를 위해 학술자료, 국외사례 및 현장조사 등을 통해 계량화된 다양한 지수 개발을 추진하는 등 중장기과제로 추진하여 생태학적 등급을 이용한 물환경 평가가 이루어져야 한다.

유기오염물질 혹은 유해물질 기준 뿐만 아니라 수질상태에 따라 서식하는 생물 지표종 등을 이용한 종합적인 물환경 평가를 통해 국민들이 수질상태를 쉽게 이해할 수 있어야 하고, 수질개선의 최종목표는 생태계의 보호를 통한 자연성의 회복과 인간이용의 극대화에 있지 깨끗한 물 그 자체를 확보하는 것은 아니라는 의식이 심어져야 한다. 시멘트 콘크리트 바닥과 호안에 맑은 물이 흘러가도 생물이 건강하게 살 수 없는 공간은 의미가 없기 때문이다.

따라서, 이화학적 수질기준(평가), 생물학적 기준(평가) 및 물환경의 생태적인 등급체계(기준 및 평가) 등이 우리의 현실에 맞게 충분히 검토·보완을 거쳐 궁극적인 목적에 부합되도록 단계적으로 도입되어야 한다.

#### 5.1. 생물모니터링 및 생물학적 수질평가제도 도입

생물학적 평가는 이화학적 평가만으로 해결할 수 없는 물환경 관리에 기초적인 방법을 제공하며, 수자원 관리에 있어 유역과 생태계 전체를 대상으로 한다. 기존의 화학적 수질기준이 깨끗한 물 그 자체를 지향하는 것을 목표로 하는 차원을 넘어 수계 내에 생물들이 건강하게 그리고 다양하게 살 수 있도록 하는 목표를 지향한다.

미국의 CWA(1972)는 제정 당시에 생물 기준을 수체의 생물학적 건강성을 평가하는데 이용하도록 하는 법적인 근거를 제시하고 있다. 즉, 미국 CWA는 화학적 오염의 개선을 넘어 수중의 다양하고 건강한 생물들이 번식하게 하고 또한 그들을 보호할 수 있도록 화학, 물리, 생물을 포함하는 모든 대상을 모니터링/평가하도록 하고 있다. 그러나 미

국의 경우 생물학적 평가의 법적 근거를 확보한지 거의 20년이 넘어서야 생물적 기준의 필요성을 주정부에서 인식하게 되었고 법적으로 채택하기까지 20-30년의 시간이 필요했고, 프랑스의 경우는 국가기준인 BDI(Biological Diatom Index)를 개발하여 국가유역망 채택하기까지 30여년의 시간이 소요되었다. 그러나 유럽의 다른 나라들이나 우리나라처럼 미리 경험한 국가들의 시행착오와 방법들을 참고하여 각국의 특성에 맞는 평가방법을 바탕으로 시간을 단축하는 경우는 있겠지만, 그래도 최소한 10년의 시간은 필요할 것이라고 판단한다. 이 기간 동안 그 나라 수계의 다양한 특성을 반영하고 또한 그 나라의 고유한 생물지표종을 개발하기까지 지속적인 모니터링과 평가가 지속되어야 함은 당연하다.

이러한 연장선상에서 생물모니터링 사업은 가능하면 현재 운영중인 수질측정망을 포함하도록 단계적으로 확대하면서 지속적으로 이루어져야 한다. 보다 많은 자료를 확보하여야만 우리나라의 하천의 생물학적 상태를 이해하고 또한 궁극적으로 훼손된 생태계가 회복되어야 할 목표치를 객관적으로 찾을 수 있을 것이다.

#### 5.2. 생물학적 기준 도입

물리, 화학, 생물에 모두 적용될 수 있는 서술적 기준은 일반적인 수질을 평가하는데 매우 광범위하게 채택되고 있지만(예: 미국, 일본, 유럽 등), 경계가 모호하고 경계 간에 중복되는 부분이 발생할 수 있고 특히 법적인 규제와 관련하여 오염발생자에 대한 법적인 문제가 발생할 때 가장 큰 한계가 나타난다.

생물기준에서 채택하는 서술적 기준은 서식지 및 수질의 상태, 생물지표종 등을 포함하게 된다. 서술적 기준을 채택하는 것은 문제가 없으나 이에 의한 평가는 생물기준이 구체적으로 달성해야할 목표를 찾기가 어렵다. 따라서 서술적 기준을 채택하더라도 이것이 수치적 기준(필요하다면 화학물질, 중금속의 농도, 생물지수, 또는 부착조류 생물량과 같은 숫자적 매트릭 등 포함)과 동시에 정리된다면 서술적 기준의 의미는 더욱 커지게 된다. 서술적 기준의 한계에도 불구하고 이들이 가지는 의미는 상당히 크기 때문에 서술적 기준을 1차적으로 고려하되, 궁극적으로 정량화된 수치기준을 포함하는 것이 생물기준의 이용도를 극대화할 수 있을 것이다.

수치적 기준을 현재의 하천·호소의 수질환경기준 적용등급과 같이 표기하는 것은 현실적으로 무리일 수 있다.

왜냐하면 생물기준에 대한 인식, 기초자료나 경험이 충분하지 못하기 때문에 수치적 기준(예를 들면 지수)을 바로 제시하기는 시기적으로 이르다고 판단된다. 그러나 일정 기간의 시범사업을 거쳐 어떠한 형태로든 생물학적 기준을 도입하여야 하며 적용시에는, 우리나라의 수계가 전부 생물들이 충분히 서식할 수 있는 상태로만 형성/관리되고 있는 것은 아니므로, 차별성(지류/본류, 또는 상/중/하류 등)을 두는 방안도 고려하여야 한다.

### 5.3. 생태학적 등급체계 도입

2000년에 마련된 유럽연합의 WFD(Water Framework Directive, 2000/60/EC)의 목표는 지표수 수질을 개선하고 악화를 방지하는데 있다. 즉, 종합적인 하천유역관리를 통해 양호한 상태(good)의 물환경을 유지하는 것이다. 이러한 물환경 상태를 분류하기 위해 각각의 영향요소를 평가(물리화학적, 생물학적, 수형태학적)하여 종합함으로써 물환경의 상태를 구분하고 있다. 이러한 “생태학적 등급체계”는 이화학적 수질기준의 한계를 극복하고, 비점오염원관리, 유역관리, 총량오염물질관리, 생태 위해성평가 등을 포함하는 종합적인 물환경관리의 방안을 제공하여 물환경 관리의 관점을 물에서 유역으로, 화학에서 생태계로, 점오염원관리에서 비점오염원 관리로, 농도규제에서 오염총량관리로, 개별 화학물질 관리에서 통합독성관리(생태 위해성평가)로 전환하는 우리나라와 선진외국의 물환경 관리 추세의 정당성과 타당성을 확보하는 근거가 된다.

생태학적 등급체계는 물환경 관리에 있어 현재 국가가 직면한 환경문제를 극복하고, 또한 이와 연계해서 우리나라 물환경 관리의 발전과 선진화에 가장 핵심적인 부분을 구성한다는 것을 인식하여야 하고 또한 국민들에게 인식시켜야 한다. 단순히 현재의 물관리 정책의 문제점을 생태개념의 도입으로 짐을 떠넘기는 것이 아니라 실제로 생태학적 기준과 평가가 가지는 의미를 바로 인식할 때 우리나라 물관리 정책이 한 단계 높은 차원으로 발전될 수 있을 것이다. 앞으로 반드시 가야할 방향이기 때문에 조급하거나 어설픈 것이 아니라 충분한 시간을 가지고 많은 자료를 확보하여 과학적으로 타당하고 객관성이 담보된 한국의 물환경 평가체계를 수립해야 한다.

## 6. 결 론

수자원의 보호를 장기적으로 성취하기 위해서는 생물학적 기준의 개발을 포함하는 오염영향의 최종점(end point, 즉 생태계의 건전성) 평가에 대한 주의 깊은 판단이 필요하다. 수자원은 단순히 물이 아니며 자원으로서는 질과 가치는 수질과 수량 그 이상에 의존한다. 이는 또한 생물종과 그들을 유지시키는 내면의 생물학적 과정들을 포함한다. 서식하는 생물종의 구성, 풍부도와 다양성, 개체군의 크기에 대한 평가와 같은 내용들이 생물학적 총체성을 유지시키는 목적을 정당화시키는 가장 직접적인 방법들이다.

하천들은 그들을 둘러싸고 있는 경관의 상태와 질을 반

영하기 때문에, 하천평가프로그램은 수질과 수량 그리고 물과 경관 속에 서식하는 생물상의 상호의존성에 대한 연계성을 만들어 내야 한다. 생물학은 이러한 복잡한 상호작용들에 대한 궁극적인 통합자이기 때문에, 하천의 상태에 대한 가장 직접적이고 효율적인 평가를 제공한다. 특히 물의 훼손은 많은 경우 비독성, 비화학적 요인들에 의해 나타나므로 생물학적 기준은 자원의 상태를 판단하는 가장 민감한 지표가 된다.

생태계의 건전성과 용수이용의 안정성을 고려하여 우리나라 수계특성에 맞고 물환경의 질을 적절히 나타낼 수 있는 물환경 평가기준이 되는 수질환경기준은 우선적으로 생물지표종을 포함하는 서술적 기준을 도입하여 지속적인 모니터링을 수행하면서 생물지수를 이용한 생물학적 수질환경기준을 도입하여야 한다. 궁극적으로는 물환경의 총체적인 건강성을 평가할 수 있는 생태학적 등급체계를 도입하여 종합적으로 물환경을 평가·관리할 수 있도록 체계적이고 단계적으로 미래의 물관리 방향을 새롭게 정립하여야 한다.

## 참고문헌

- 환경부, 4대강 물관리종합대책의 추진상황 및 평가 (2005).
- 환경부, 국립환경연구원, *물환경종합평가방법 개발 조사연구(II)* (2005).
- 환경부, *물환경관리기본계획(안)* (2006).
- Davis, W. S. and Simon, T. P., *Biological Assessment and Criteria- Tools for Water Resources Planning and Decision Making*, Lewis, Boca Raton, FL., p. 415 (1995).
- EEA, *Surface water quality monitoring, Topic report No. 2*, European Environment Agency (1996).
- Karr, J., Protecting Aquatic Ecosystems: Clean Water is Not Enough, In: (Davis and Simon, eds.) *Biological Assessment and Criteria*, Lewis, Boca Raton, pp. 7-14 (1995).
- Karr, J. R. and Dudley, D. R., Ecological Perspective on Water Quality Goals, *Environmental Management*, **5**, pp. 55-68 (1981).
- Karr, J. R., Heifinger, R. C. and Helmer, E. H., Sensitivity of the Index of Biotic Integrity to Changes in Chlorine and Ammonia Levels from Wastewater Treatment Facilities, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **57**, pp. 912-915 (1985).
- Kolkwitz, R. and Marsson, M., Grundsätze für die Biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora and Fauna, *Mitt. Prüfungsanst, Wasserversorg, Abwasserreinig*, **1**, pp. 33-72 (1902).
- Postel, S., *Last Oasis- Facing water scarcity*, W. W. Morton & Company, New York, p. 231 (1992).
- UNESCO, UNEP, IHP, *Integrated Watershed management- Ecohydrology & phytotechnology, Manual* (2004).
- UNESCO, WHO, UNEP, *Water quality assessments*, F & FN SPON, New York, p. 626 (1996).
- USEPA, *Feasibility Report on Environmental Indicators for Surface Water Programs*, EPA Office of Water Regulations and Standards and Office of Policy, Planning and

- Evaluation, Washington, DC (1990).
- USEPA, *Environmental Indicators: Politics, Programs, and Success Stories*, Workshop Proceedings Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington, DC (1991).
- USEPA, *Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers*, EPA 841-B-99-002, US Environmental Protection Agency, Washington, DC (1999).
- USEPA, *Biological Assessments and Criteria*, EPA 822-F-02-006 (2002).
- USGAO, *Environmental Protection Agency: Protecting human health and the environment through improved management*, GAO/RCED-88-101, Washington, DC (1988).
- Wetzel, R. G., *Limnology*, Academic Press, New York (2001).
- WQ2000(Water Quality 2000), *Challenges for the Future: Interim report*, Water Pollution Control Federation, Alexandria, Virginia (1991).
- Yoder, C. O., Answering Some Concerns about Biological Criteria Based on Experiences in Ohio. In: G.H. Elock (ed). *Water Quality Standards for the 21st Century*, Proceedings of a National Conference, USEPA, Office of Water, Washington, DC, pp. 95-104 (1990).