

생태계 건강성 회복과 보전을 위한 생물학적 물환경 평가

- 생물의 기초 분류와 생태학의 응용 -

황순진¹⁾*

I. 들어가며

물은 지구상의 생명유지를 위한 필수적인 매질이며 깨끗한 물의 공급과 생태계의 보전은 21세기의 인류의 생존을 위한 핵심적인 문제로 그 중요성이 점점 더 크게 인식되고 있다. 국제적인 물문제 전문가들은 21세기에 인류의 생존을 위협하는 가장 큰 스트레스요인으로 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 확보해야 할 요소로 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 중

합적인 의미를 파악하지 못하였음을 인정하지 않을 수 없다.

물환경의 종합적인 특성 속에서 수질은 일부뿐이며 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 온전성¹⁾(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 통하여 수행할 수 있지만(UNESCO, 1996) 궁극적인 물환경의 지속가능성을 확보하기 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 뿐 만 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 중요성을 인식하고 제도적 기반을 모색하고 있는

1) "Integrity"는 "종합성"이라는 의미를 가지고 있으며, 또한 "총체성"으로도 표현된다. 보다 명확한 이해를 위해서는 "온전함 혹은 온전성"으로도 표현할 수 있다. 물환경이 가지는 종합적 의미를 표현하는 말로서 "건강성"으로도 이해될 수 있다.

¹⁾ 건국대학교 환경과학과

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.

II. 생물학적 물환경 평가의 배경 및 의의

물환경을 평가하는데 있어 생물학적 기준과 지표의 중요성은 지대하다. 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 해온 James 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

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)²⁾”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 건

관관리를 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 핵심 개념으로 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, 하천직강화 등)는 자연생태계의 훼손과 생물의 감소에 대해 별로 관심을 두지 않았다. 이로 인해 국지적·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 위협받고 있으며 미국의 주요하천에서 어획고의 80%가 감소하였다(Karr, 1995). 우리나라의 경우에서는 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 보고하도록 되어 있는데, 화학적 분석에 기초하는 경우에는 모두 악화의 정도를 계속적으로 과소평가하고 있다. 실제, Ohio주에서 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 관리계획이 하천이나 하천에서의 생물학적 자원들을 제대로 보호하지 못하는 것으로 판단할 수 있다. 왜냐하면

2) 최상(최적)의 자연서식지에서와 비교할 수 있는 생물의 구성, 다양성, 기능적 단위를 가지는 균형적인, 종합적인, 그리고 적응적인 생물군집을 유지하고 부양시킬 수 있는 수생태계의 능력을 의미한다(Karr and Dudley, 1981)

미국에서 초기의 청정수법은 맑은 물이 콘크리트로 정비된 하천수로를 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 담보 받는 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 30 여 년 동안의 기술(공학)적인 베이스에 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 보지 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 30 여 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.

현재까지의 이화학 중심의 수질정책 하에서는 수질 보호를 위해 엄청난 비용을 지출하고서도 수질악화를 멈추는 데는 실패하였다. 미국의 경우 1970년 이래로 수질오염 처리시설을 건설하고 가동하는데 4,730억 달러(약 500조원)를 소요하였고(WQ 2000, 1991), 우리나라는 과거 10 년('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.

III. 생물학적 물환경 평가

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)

수생생물의 생존과 번영의 유지를 목표로, 이수목표가 지정된 수계에 서식하는 생물들의 상태를 보호하기 위해 제정된 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·관리시킬 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 생물

과 이에 영향을 미치는 다양한 이화학적 교란요인들의 종합적 결과를 유형화시킴으로써 가능하다(그림 1).

교란요인들에 의해 반응하는 생물의 상태는 <그림 1>에서와 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 뿐 만 아니라 오염)에 반응하여 나타나는 서식생물의 종류, 분포, 특성 등에 기초한 정량적 상태(예를 들면, index)로도 표현이 가능하다.

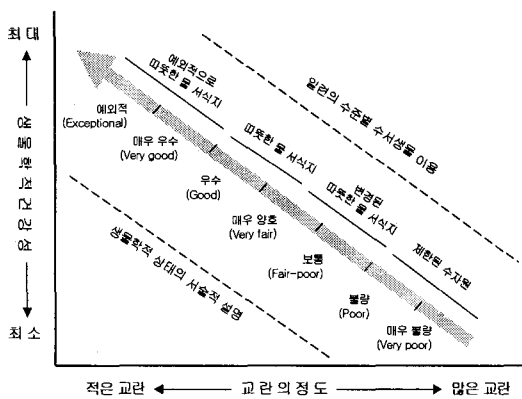


그림 1. 수생생물의 이용을 설정하는 생물학적 평가와 준거치에 대한 체계 (출처: US EPA, 2002)

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 과다한 영양물질, 독성화합물질, 수온증가, 과다한 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.

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

생물학적 평가에 의해 도출되는 생물학적 정보는 물리·화학적인 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 수단을 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 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 제한현상)이 건강할 때 수체의 물리·화학적 상태도 양호하게 나타난다. 그러므로 생물학적 평가는 직접적으로 생태계의 건강성을 평가하는 것이며, 미국의 경우 청정수법(Clean Water Act)의 가장 기본적인 목표로 채택하고 있다.

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. 이 중에서 하나 또 그 이상이 교란이나 파괴되었을 때 수체의 건강성은 영향을 받으며 대부분의 경우에 있어 서식하는 수생생물이 그 영향을 반영한다(그림 2). 따라서 생물학적 상태는 수체의 건강성을 가장 직접적이고 종합적으로 표현하는 지표이다.

미국이나 유럽에서는 수질정책의 기본적인 개념으로 수체의 건강성을 제시하고 있으며(Davis and Simon,

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.

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 의미로 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 and Simon, 1995).

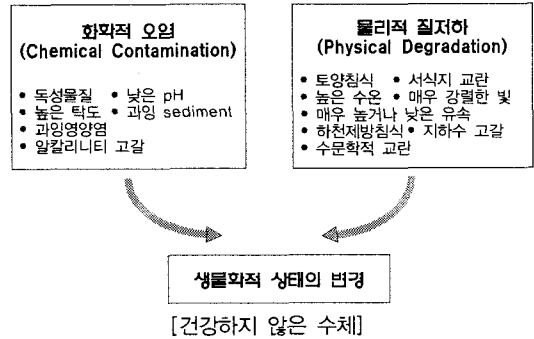


그림 2. 강한 수체와 건강하지 못한 수체의 개념적 비교

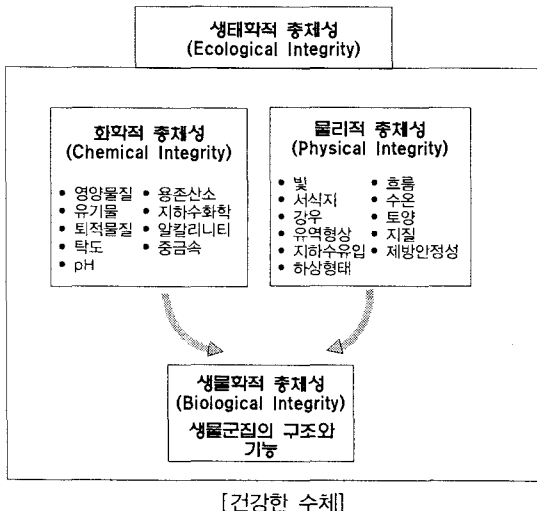
4. 생물학적 평가에 이용되는 생물

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 이들을 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 가장 보편적으로 사용해온 생물군은 저서성대형무척추동물(macroinvertebrate)과 어류(fish)이다(그림 3). 저서성대형무척추동물은 주로 수서곤충류를 대상으로 하며 하천에서의 오타계급 또는 부수성(saprobity)을 표현하는 대표적인 생물군이다(그림 4). 이들은 생물학적 수질평가에서 가장 먼저 사용된 생물군들로 역사가 깊고(Kolkwitz and Marson, 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 많이 사용되어 왔다. 현재 유럽과 미국 등에서 어류를 이용한 생물지수(예를 들면, IBI, RBP 등)의 사용이 상당히 보편화되어 있는 실정이다.

상기한 두 분류군의 생물에 비해 그 인식에 역사는 뒤지지 않으나 시간적으로 늦게 적용되었으나 생리·생태학적 특성으로 인해 최근 들어 생물학적 수질평가의 도구로 크게 인식되고 있는 생물군이 부착성조류(pre-



phytic algae)이다(그림 5). 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 뿐 만 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 유기물증가를 동시에 반영할 수 있는 장점이 있다(UNESCO, 2004).

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.

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

외국의 하천모니터링 프로그램에서도 볼 수 있듯이(표 1, 그림 6)) 국가마다 어느 한 생물군에 대해서만 생물학적 평가를 실시하는 것은 아니다. 다양한 생물군을 활용하여 평가함으로써 각 생물군이 가지는 특성을 물 환경평가에 반영하고 있다.

표 1. 유럽국의 하천 모니터링 프로그램에서 수생생물의 이용(출처: Eucopean Environment Agency, 1996)

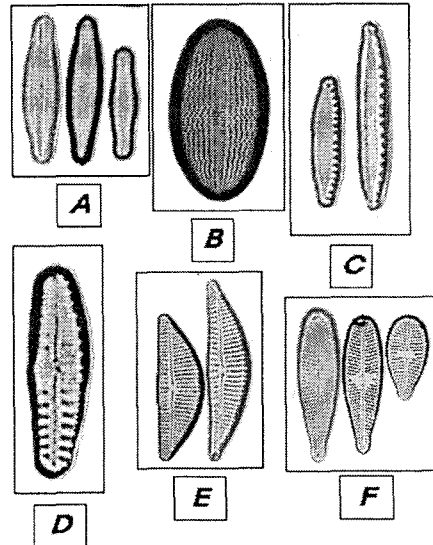
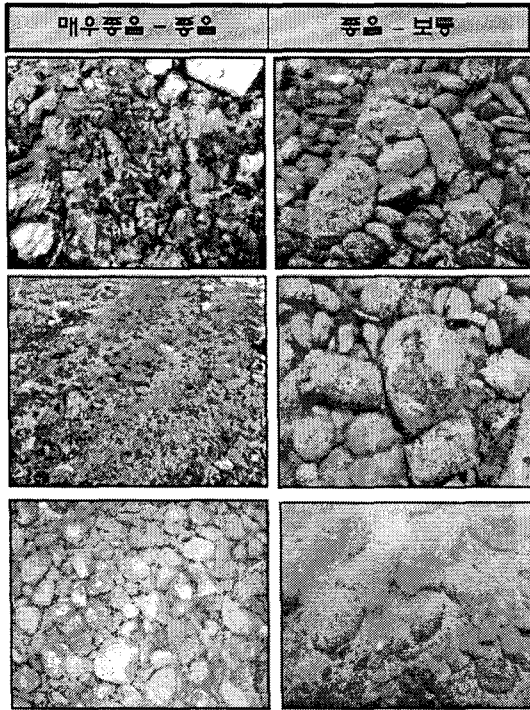
국가명	프로그램명	평가대상 생물군	조사하천망
오스트리아	하천수질모니터링에 대한 오스트리아 법령	부수생물시스템, 저서성대형무척추동물, 저서조류(부착조류)	국가차원 244 지점
덴마크	덴마크 국가하천 모니터링 프로그램	저서성대형무척추동물, 저서조류(부착조류)	국가차원 261 지점
프랑스	프랑스 국가유역망	무척추동물, 어류, 저서조류(부착조류)	국가차원 1,082 지점
네덜란드	네덜란드 국가지표수 모니터링 프로그램(생물분야)	저서성대형무척추동물, 어류, 동물플랑크톤, 수생식물	국가차원 15개 고정 지점
스웨덴	스웨덴 국가 시계열 reference 하천	저서성대형무척추동물, 저서조류(부착조류)	35개 하천
스웨덴	국가중점 시계열 reference 하천	저서성대형무척추동물, 저서조류(부착조류), 어류, 수생식물	15개 하천



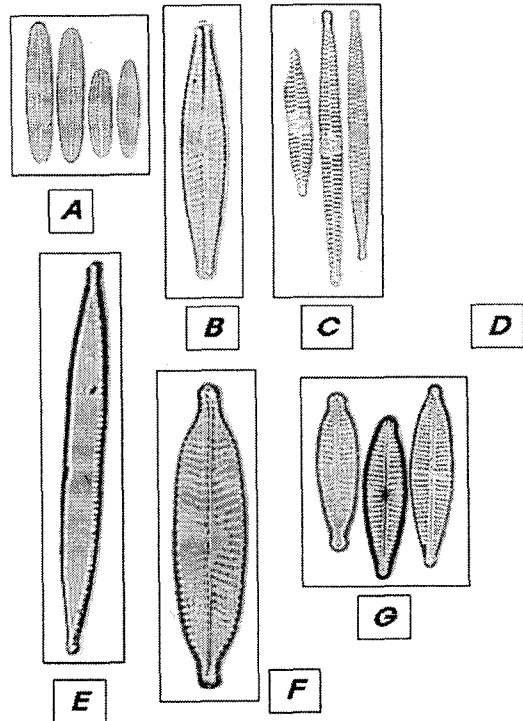
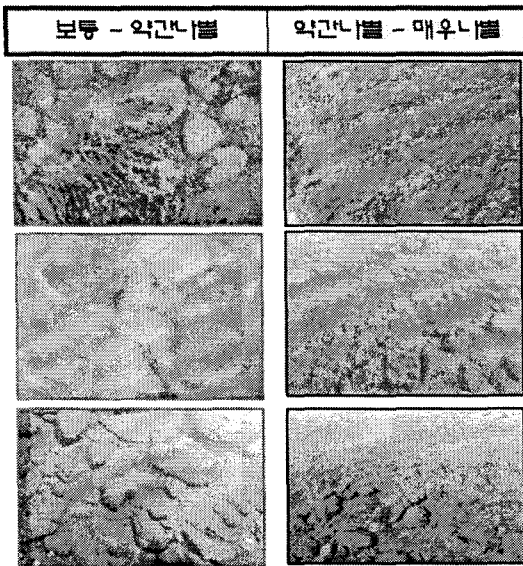
그림 3. 어류 지표종



그림 4. 저서성대형무척추동물 지표종



A: *Achnanthes minutissima*
B: *Cocconeis placentula* var. *lineata*
C: *Nitzschia microcephala*
D: *Cymbella sinuata*
E: *Cymbella sileciaca*
F: *Gomphonema quadripunctatum*



A: *Achnanthes convergens*
B: *Navicula cryptocephala*
C: *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae*
D: *Fragilaria ulna*
E: *Nitzschia palea*
F: *Navicula viridula* var. *rosellata*
G: *Gomphonema parvulum*

그림 5. 부착조류의 서식처 상태 및 지표종

IV. 생물 모니터링 체계정비를 위한 인프라 구축의 필요성과 시급성

생태계 건강성 평가와 회복을 위한 가장 기본적인 도구는 생물학적 방법이다. <표 2>에서 보는 바와 같이 여러 유럽국가에서의 생물학적 하천평가는 이미 상당한 수준에 있으며, 모니터링도 일정한 시간 간격으로 다양한 하천에 걸쳐 시행되고 있다. 이러한 모니터링의 시행은 미국과 일본 등의 국가에서도 비슷한 수준이다.

표 2. 생물학적 수질평가에 기초한 유럽국가의 하천모니터링 프로그램

프로그램	평가대상	주기	조사 빈도	조사범위
덴마크 하천질의 생물학적 평가 Inventory	저서성 대형무척추동물 조사방법과 분류체계가 완전히 비교가능하지는 않음	1989년부터 매년 하천의 생물분류결과 수집	1~2회 /년	표준화된 네트워크는 없음. 연간 총 10,000 지점 조사
독일 하천질의 수질지도	오수생물체계 저서성 대형무척추동물, 미소식물, 미소동물	1976년부터 5년 주기 1976, 1980, 1985 & 1990		국가의 모든 주요 하천
아일랜드 하천질의 생물학적 평가	저서성 대형무척추동물, 수생식물, Filamentous algae, Siltation	1971~1993년까지는 4년 주기 1994년부터는 3년 주기	1회/년 6~9월 사이	1971년 2000km, 1981년 7,000km, 및 1990년 12,700km로 확장 1,200하천에서 약 3,000지점 조사
노르웨이 저서성 대형무척추 동물 모니터링	부착조류 저서성 대형무척추동물, 종목록, acidification index	1981년부터	2회/년	8개 하천에서 15-20지점
영국 하천과 수로의 생물학적 분류	저서성 대형무척추동물	1970년 초부터 5년 주기	2~3회/년	영국과 웨일즈는 40,000km 하천과 수로에서 약 7,000 지점 스코틀랜드는 11,000km에서 976지점 북아일랜드 2,500 km, 290지점

자료 : EEA. Surface Water Quality Monitoring. European Environment Agency, Copenhagen. 82pp. (1996)

결국 생물학적 평가를 실시하는데 가장 핵심적인 부분은 모니터링 측정망을 구성하는 것이고 이를 수행하기 위한 인프라를 구축하는 것이다. 현재 정부(환경부)에서는 국가의 생물학적 모니터링 측정망을 구성하는 안을 개발하고 있는 단계이다. 그러나 문제는 이러한 평가와 모니터링을 실제로 수행하는 인력은 턱없이 부족하다는데 있다. 우리나라 4대강 전역을 주기적으로 조사하고 평가한다고 볼 때 이를 담당하기 위한 정부의 조직뿐 만 아니라 이를 수행하는 충분한 인력이 확보되어야 할 것이다.

아직 우리나라의 생물학적 수질평가는 시작 단계에 있으며, 보다 객관적이고 과학적인 생물평가방법을 확립하기 위해서는 앞으로 많은 자료와 경험의 축적을 필요로 한다. 그러나 현실적으로는 그 역할과 정책적 중요성으로 인해 인적인 인프라가 제대로 구축되기도 전에 생물학적 물환경평가 시스템이 진행되고 있기 때문에 당분간 여러 가지로 어려움이 예상된다. 장차 이 분야를 공부하는 전문가들과 학생들의 많은 관심과 인력양성이 매우 절실하다.

V. 결론

“수자원의 보호”라는 목표를 장기적으로 성취하기 위해서는 생물학적 기준의 개발을 포함하는 오염영향의 최종점(end point, 즉 생태계의 건전성) 평가에 대한 주의 깊은 고려가 필요하다. 수자원은 단순히 물이 아니며 자원으로서 질과 가치는 수질과 수량 그 이상에 달려있다. 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 반영하기 때문에, 하천평가프로그램은 수질과 수량 그리고 물과 경관 속에 서식하는 생물상의 상호존성에 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, 비화학적인 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 우선

적으로 생물지표종을 도입하여 지속적인 모니터링을 수행하면서 생물지수를 이용한 생물학적 수질환경기준을 도입하여 궁극적으로는 물환경의 총체적인 건강성을 평가할 수 있는 생태학적 등급체계를 도입하여 종합적으로 물환경을 평가·관리할 수 있도록 체계적이고 단계적으로 미래의 물관리 방향을 새롭게 정립하여야 한다.

이를 위해서는 분류학, 생태학을 포함하는 기초과학 분야의 교육을 활성화시켜야 하고 또한 정부적 차원에서의 지원과 인프라 구축이 매우 절실하다. 특히, 종합과학으로서 그리고 수자원의 관리와 개선에 핵심적인 역할을 하는 육수학(limnology)에 대한 이해도 필요하다.

참고문헌

- 환경부, 4대강 물관리종합대책의 추진상황 및 평가 (2005).
- 환경부, 국립환경연구원, 물환경종합평가방법 개발 조사 연구(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. R. and Dudley, D. R., Ecological Perspective on Water Quality Goals, Environmental Management, 5, pp. 55-68 (1981).
- 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., 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, Abwasserreinigung, 1, pp. 33-72 (1902).
- Postel, S., Last Oasis- Facing water scarcity. W.W. Morton & Company, New York, p. 231 (1992).
- UNESCO, WHO, UNEP, Water quality assessments, F & FN SPON, New York, p. 626 (1996).
- UNESCO, UNEP, IHP, Integrated Watershed management-Ecohydrology & phytotechnology, Manual, (2004).
- 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 21th Century, Proceedings of a National Conference, USEPA, Office of Water, Washington, DC, pp. 95-104 (1990).