

SL401

국내 수환경 평가 및 생물을 이용한 평가기법 확립

안 광 국
한국 화학연구소 환경독성팀

1. 국내 수질오염 현황 및 수자원 감소

산업화와 도시화에 따른 화학물질 및 영양염류가 수계로 빈번히 유입되어 수자원의 질적 악화는 자명하다 (이 와 박 1991; 정 등 1997; 김 등 1989). 최근 환경부의 자료에 따르면, 산업폐수에 의한 BOD 발생량 (처리전)은 88년 (1190 ton/일)에서 1996년 (3165 ton/일)로 2.7배 증가하였고, 하천수질에 직접영향을 미치는 BOD 부하량은 1988 (66.3 ton/일)부터 1997년 (98.9 ton/일)사이에서 1.5배 증가하였다. 같은 기간동안 폐기물 발생량 및 농약 사용량은 각각 1.7배, 1.2배 증가추세를 보였고, 유독물 유통량은 3배이상 증가하고 있다. 최근 김등 (1997)의 호수조사에 따르면 전국 대부분 대규모 인공호 (13개)에서 평균 1.0 mg/l (4급수기준: 1 mg/L이하)을 초과함으로 해서 부영양화현상을 보였다. 반면, 같은 기간동안 수자원 이용량은 25.3% 증가하였다 (249억 m³/년 = 1988; 1997 = 312억 m³/년; Fig. 1). 해마다 수자원의 요구는 증가하나, 각종오염물의 수계내 유입 가능성이 증가하는 상황에서 수중 생태계내 각종 오염에 의한 수생물의 영향을 파악하는 것은 시급한 현실이다.

2. 현재 우리나라 수환경 평가 현황 (전국 규모)

국내에서 전국규모의 수 생태계 조사로는 자연 환경조사의 일환으로 1차 조사는 1986에 시작되어 1990에 종결되었고 (환경부, 1987), 2차 조사는 1997년에 시작되어

Annual Trend Of Water-Use

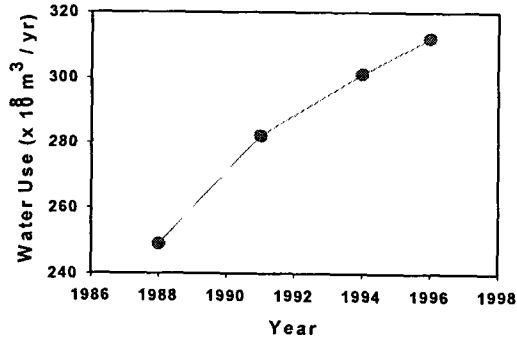


Fig. 1. Annual increase of water-use (volume/year) between 1988 and 1997 in Korea.

현재에도 수행되고 있으며 2002년에 완료될 예정이다. 담수환경에 관련된 조사내용은 일반 수질항목 및 수생물 군집조사 (어류, 수서곤충, 저서생물 및 담수 식물)로서 수 화학적 상태 와 생물 종 조성 및 분포상태를 제시하고 있다. 또한 1990년 환경청에서 실시되는 주요 강, 하천 및 호소에서 주기적인 (일주일/한달 간격) 일반 수질항목의 분석도 시행되어 오고있다. 이런 조사들은 수질기준에 적합여부를 판단하여 국민 생활에 크게 기여하는 것이 사실이다. 그러나, 기존 수환경 평가는 상기 조사항목들의 개개 숫자 분석에 그치고 있어서 통합적인 의미의 수환경 평가는 미약한 것이 사실이다.

3. 현행 국내 수 환경 조사에서 도출된 문제점

가) 일반 수질항목 조사: 첫째, 분석에서 얻어진 자료의 신뢰성 부족 (이기 및 분석오류등), 둘째, 많은 조사자료 축적에도 불구하고, 이를 이용한 현 상태 파악의 미미 - 숫자적 분석만으로 현상태 진단, 셋째,

각 수질항목에서의 수질 측정값이 왜 증가, 감소, 혹은 무 변동에 대한 원인규명의 불투명성, 넷째, 과거의 수질 월별 혹은 연별 자료 및 주변 기상자료 (강우)를 가지고 현재 및 미래 상태를 진단 혹은 예측 (Prediction)하는 분석 부족을 들 수 있다.

나) 수생 생물조사: 첫째, 기존 조사를 통해 알 수 있는 정보는 주로 수생종의 존재 여부, 분포 및 보호종 기술에 그칩. 둘째, 종의 다양도 및 풍부도 산정시 상대 풍부도 및 각종 지수 (Shannon-Weaver 등)의 이용시 문제점 - 하천 차수 (Stream order)에 상관없이 조사 지점 및 수체를 비교하는 것. 셋째, 정량적 조사방법의 미비, 따라서 특정 조사대상 하천에서의 과거 및 현재의 비교분석이 어렵고, 다른 수계들 사이에 비교분석이 어려움. 넷째, 수생물과 일반 수질조사와의 관계에 대한 통합적 의미의 규명 부재. 다섯째, 기존 서식지 특성의 평가법의 정량화 문제점을 들 수 있다.

4. 생물지표를 이용한 수환경 평가의 필요성

급격히 가속되는 수질오염에 대한 대책으로 수환경 평가작업 및 이에 대한 제반작업으로 수환경 복원작업 (River/Stream Restoration)이 활발히 이루어지고 있다. 기존의 환경 평가자 들은 급속도로 악화되는 수중 생태계 오염을 파악하기 위한 일환으로서 화학적 모니터링을 이용해 왔다 (U.S. EPA 1991). 그러나 Judy *et al.* (1984)에 따르면, 수질악화는 화학적 오염뿐만 아니라 유로변경 및 유량변동, 물리적 하상구조의 변경 등에 의해 크게 손상되기 때문에, 단순 화학적 평가만으로는 수계내의 총체적 건강 상태를 진단 할 수 없다 (Karr 1981; Karr *et al.* 1986). 또한 기존의 생물학적 모니터링을 이용한 평가는 많은 시간과 경비가 소요되었고, 해석의 모호성 때문에 수질평가에서 종종 무시되어 온 것이 사실이

다 (Loftis *et al.* 1983; U.S. EPA 1985). 이러한 단점을 보완하기 위해 미국의 환경청에서는 수자원 평가를 위한 Tool로서 수중 생태계내의 대표적 Trophic Composition으로 간주되는 어류, 대형 무척추 동물 (Macroinvertebrate), 및 조류 (Algae/Periphyton)를 이용한 생물지표를 이용한 평가법 (Index of biological Integrity), 소위 "Rapid Bioassessment Protocol" 제도를 도입하고 있다.

5. 생물보존지수를 이용한 수환경 평가의 세계 동향

생물지표를 이용한 평가법 (특히, 어류)은 1981년 "Index of Biotic Integrity (IBI)"의 개념이 미국에 도입된 이래, 미국내 지역적 특성 및 생태적 특성을 고려한 IBI 수정작업이 1986년까지 미국 12개 주 정부에서 실행되었으며 (Karr *et al.* 1986), 그 후 4년 뒤인 1991년에는 이미 35개 이상의 주 정부 (Karr & Dionne 1991)에서 채택되어 하천 평가에 실효를 거두고 있다. 이에 미국의 환경청에서는 하천에 서식하는 생물군집 조사시 정량화된 채집방법 (Ohio EPA 1987)과 하천의 하상구조와 형태학적 특징 등을 이용한 서식지 평가기법 (Habitat Quality Assessment; U.S. EPA 1983) 등을 제시하고 있으며, 이를 근간으로 한 생물 (어류, Algae, 대형 수서 무척추동물) 서식환경 평가를 위해 IBI 평가 기법을 핵심도구로 채택하고 있다. 이중 어류를 이용한 IBI의 적용은 미국 이외에 프랑스 (Oberdorff & Hughes 1992; Oberdorff & Porcher 1994), 아프리카의 기니아 (Huguency *et al.* 1996)와 나미비아 (Hocutte *et al.* 1994), 인도 (Ganasan & Hughes 1998), 남미의 베네수엘라 (Gutierrez 1994), 호주 (Harris 1995) 및 일본 (Kozumi & Matsumiya 1997) 등에서 활발히 진행되고 있다.

6. 어류를 이용한 국내수계 (하천 및 강) 건강도 평가기법의 개발

평가기법의 국내적용을 위해 다음과 같은 사항들이 선행되어야한다. 첫째, 조사방법 결정(Wading Method), 둘째, 대조군 하천 선정 (Reference Site) 및 분석방법결정, 셋째, 모델 설정 작업, 즉 메트릭 수 및 특성

변수의 결정, 넷째, 어류의 Guild 선정, 즉 영양단계 결정(Trophic Level), 내성도 결정 (Tolerance/Sensitivity) 및 서식지 상태 (Habitat Conditions)의 결정과정, 다섯째, Score 계급 기준 (Score criteria) 및 통합지수 계급 (Integrity class)에 의한 IBI 결정과정으로 대별된다 (Table 1, 2).

Table 1. Fish community metrics, scoring criteria, and class boundaries for the index of biological integrity (IBI) in Kap Stream and ManKeyong River.

Category	Metrics	Scoring criteria		
		5	3	1
Species composition	1. Total number of native fish species			
	2. Number of riffle benthic species			
	3. Number of water column species	>67%	33-67%	<33%
	4. Number of sensitive species			
	5. Proportion of individuals as tolerant species	<5%	5-20%	>20%
Trophic composition	6. Proportion of individuals as omnivores	<20%	20-45%	>45%
	7. Proportion of individuals as native insectivores	>45%	20-45%	<20%
	8. Proportion of individuals as native carnivores	>5%	1-5%	<1%
Fish abundance and condition	9. Total number of individuals in sample	>67%	33-67%	<33%
	10. Proportion of individuals as exotics	0	0-1%	>1%
	11. Proportion of individuals with disease, tumors, fin damage and other anomalies	0	0-1%	>1%

Table 2. Modified score interpretation for IBI values (after Karr 1981) in Kap Stream and ManKeyong River.

IBI	Integrity Class	Characteristics
53-55	Excellent	Comparable to pristine conditions, exceptional assemblage of species.
43-47	Good	Decreased species richness, intolerant species in particular; Sensitive species present.
35-39	Fair	Intolerant and sensitive species absent; skewed trophic structure
23-29	Poor	Top carnivores and many expected species absent or rare; omnivores and tolerant species dominant
8-17	Very Poor	Few species and individuals present; tolerant species dominant; diseased fish frequent

7. 평가기법의 실례: 갑천 및 만경강

평가기법의 실제 적용 범례를 보여주기 위해 갑천의 5개지점 및 만경강의 4개지점을 선정하여 2000년 5월에서 9월 사이에 어류조사를 실시하였다. 또한 두 수계내 대조군 조사 (Reference site)는 2000년 6월 14-16일에 수행되었다. 조사지점의 선정은 점오염원의 위치를 고려하여 선정하였다. 갑천의 경우 제 1-2지점은 인근 수계로 부터의 오염원이 거의 없으며, 3지점은 도시하수 및 농업활동으로부터 미약한 영향을 받는 지점을 선정하였다. 제4지점은 상류 유등천 및 대전천의 도시하수가 유입되며, 대화동 공단 및 폐수처리장의 영향을 직접 받으며, 제5지점은 그로부터 약 5km 하류에 위치해 있다. 만경강의 경우 제 1지점은 오염원이 없으며, 2, 3지점은 논, 밭 및 도시로부터의 오염원이 일부 존재하며, 4지점은 전주공단으로부터 직접적 영향을 받는 지점을 선정하였다. 갑천에서 IBI 값에 따르면, 상류 제1, 2지점에서는 "Good Condition" 이나 폐수처리장의 영향을 받는 하류 4지점에서는 "Poor Condition"으로 판정되었다 (Fig. 2).

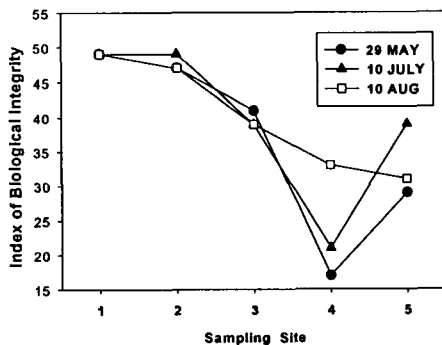


Fig. 2. Index of Biological Integrity (IBI) from the headwaters (Site 1) to the down-river (Site 5) in Kap Stream during May - August 2000.

만경강에서 역시 1지점에서는 "Good Condition" 이나 하류 4지점에서는 "Poor Condition"으로 판정되었다 (Fig. 3). 그러나 이런 상태는 여름 장마후 하류지점에서 급격히 IBI가 증가하여 물리적 영향을 받는 것을 확인하였다(Fig. 3). 이런 결과는 IBI가 국내에서 적용될 때 U.S. EPA에서 제시된 조사시기를 변경해야 하는 것을 제시하는 바이다.

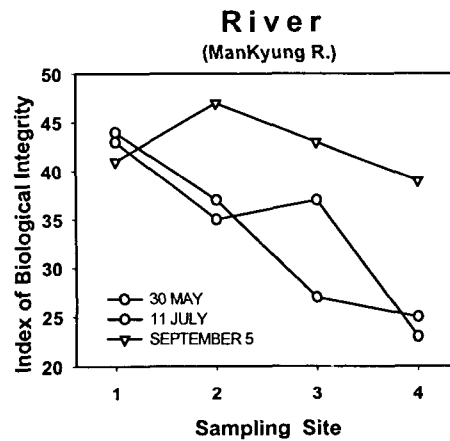


Fig. 3. Index of Biological Integrity (IBI) from the headwaters (Site 1) to the down-river (Site 4) in ManKeyong River during May - September 2000.

8. 참고 문헌

김범철, 김동섭, 권오길 (1989) 팔당호의 부영양화 실태. 한국수질보전학회지 5: 39-46.
 이선영, 박갑성 (1991) 대구지역식수의 휘발성 유기화합물질(VOCs) 오염. 한국수질보전학회지 7: 145-151.
 정영희, 김삼권, 신선경, 이재인, 이원석, 이준배 (1997) 유기오염물질 배출원 추적에 관한 연구. 한국수질보전학회지 13: 373-383.
 환경부 (1987) '87 자연생태계전국조사 (I) : 제 2차년도 (담수어류, 수서곤충). pp.827.
 Ganasan V & RM Hughes (1998) Application of index of biological integrity (IBI) to fish assemblages of the rivers Khan and Kshipra (Madhya Pradesh), *Freshwater*

- Biology* 40 (2), India.
- Gutierrez MAR (1994) Utilizacion de la Ictiofauna como Indicadora de la Integridad Biotica de los Rios Guache y Guanare, Estado Portuguesa, Venezuela, pp. 1-40. M.Sc. thesis, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora," Guanare, Venezuela.
- Harris JH (1995) The use of fish in ecological assessments, *Australian Journal of Ecology* 20: 65-80.
- Hocutt CH, PN Johnson, C Hay & BJ VanZyl (1994) Biological basis of water quality assessment: the Kavango River, Namibia, *Reviews Hydrobiologie Tropical* 27: 361-384.
- Hugueny B, S Camara, B Samoura & M Magassouba (1996) Applying an index of biotic integrity based on communities in a west african river, *Hydrobiologia* 331: 71-78.
- Judy RD, Jr. PN Seeley, TM Murray, SC Svirsky, MR Whitworth & LS Ischinger (1984) National Fisheries Survey. Volume 1. Technical Report: initial findings. United States Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/06.
- Karr JR (1981) Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* 6: 21-27.
- Karr JR & M Dionne (1991) Designing surveys to assess biological integrity in lakes and reservoirs, in biological criteria; Research and Regulation-Proceedings of a symposium. pp. 62 - 72. U.S. EPA, Office of Waters, Washington, D.C., EPA-440/5-91-005, U.S.A.
- Karr JR, KD Fausch, PL Angermeier, PR Yant & IJ Schlosse (1986) Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28. In Illinois national History Survey, Special Publication 5, Champaign, IL.
- Kim BC, JH Park, GS Hwang and KS Choi, (1997) Eutrophication of large freshwater ecosystems in Korea. *Korean J. Limnol.* 30:512-517.
- Koizumi N and Y Matsumiya (1997) Assessment of stream fish habitat based on Index of Biotic Integrity. *Bull. Jap. Soc. Oceanogr.* 61:144-156.
- Lofti JC, RC Ward & GM Smillie (1983) Statistical models for water quality regulation. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 55: 1098-1104.
- Oberdorff T & RM Hughes (1992) Modification of an index of biotic integrity based on fish assemblages to characterize rivers of the Seine Basin, France, *Hydrobiologia* 228: 117-130.
- Oberdorff T & JP Porcher (1994) An index of biotic integrity to assess biological impacts of salmonid farm effluents on receiving waters. *Aquaculture* 119: 219-235.
- Ohio EPA (1987) Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol.II, Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters. Division of Water Quality Monitoring and Assessment, Surface Water Section, Columbus. OH.
- U.S. EPA (1983) Technical support manual: waterbody surveys and assessment for conducting use attainability analyses. Office of Water Regulations and Standards, U.S. EPA, Washington, D.C., USA.
- U.S. EPA (1985) Technical support document for water quality-based toxic control. Office of Water Enforcement and Permits, Office of Regulations and Standards, U.S. EPA, Washington, D.C., USA.
- U.S. EPA (1991) Technical support document for water quality-based toxic control. EPA 505-2-90-001. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., USA.
- U.S. EPA (1993) Fish field and laboratory methods for evaluating the biological integrity of surface waters. EPA 600-R-92-111. Environmental Monitoring systems Laboratory - Cincinnati office of Modeling, Monitoring systems, and quality assurance Office of Research Development, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio 45268.

SL402

21세기 생태환경관리와 차세대 생태계 모형 개발을 위한 exergy의 적용

김 좌 관

부산가톨릭대학교 산업환경시스템학부

1. 엑서지 (exergy)와 생태계

1-1. 엑서지의 정의

엑서지 (exergy)는 열역학 제 3 법칙이