

어류를 이용한 한국의 하천생태계 건강성 평가

안광국* · 이상재

충남대학교 생물학과

Ecological Health Assessments, Conservation and Management in Korea Using Fish Multi-Metric Model. An, Kwang-Guk* (0000-0003-2018-580X) and Sang-Jae Lee (0000-0003-3491-9341) (College of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea)

Abstract The objective of this study was to describe the development and testing of an initial ecological health assessment model, based on the index of biological integrity (IBI) using fish assemblages, before establishing the final and currently used model for ecological health assessment, conservation and management of freshwater fish in Korea. The initial fish IBI model was developed during 2004~2006 and included 10 metrics, and in 2007 the final IBI 8-metric model was established for application to streams and rivers in four major Korean watersheds. In this paper, we describe how we developed fish sampling methods, determined metric attributes and categorized tolerance guilds and trophic guilds during the development of the multi-metric model. Two of the initial metrics were removed and the initial evaluation categories were reduced from six to four (excellent, good, fair, poor) before establishing the final national fish model. In the development phase, IBI values were compared with chemical parameters (BOD and COD as indicators of organic matter pollution) and physical habitat parameters to identify differences in IBI model values between chemical and physical habitat conditions. These processes undertaken during the development of the IBI model may be helpful in understanding the modifications made and contribute to creating efficient conservation and management strategies for stream environments to be used by limnologists and fish ecologists as well as stream/watershed managers.

Key words: ecological health, metric, fish model, biological integrity, conservation

서론

우리나라는 1970~1980년대 산업화 및 공업화의 급성장으로 각종 공장 및 산업시설이 급격히 증가하며 산업폐수가 하천 및 강으로 배출되었고, 또한, 다른 한편으로는 인구의 도시 집중화 현상으로 도심에서의 각종 주거시설

(아파트) 및 상가건설 등으로 가정하수 및 토사의 유입이 급증하며 하천 생태계의 이화학적 수질오염 및 하천의 하상구조에 변동을 가져오며 수생태계에 악영향을 끼쳤다. 특히, 수생태계 내 대표적 분류군인 어류의 경우 종다양성 감소, 민감종 감소, 내성종 증가 및 멸종 위기종 감소 현상을 가져왔고, 소하천 및 본류에서 빈번한 어류 폐사가 빈번히 보고된 바 있다. 이런 다양한 생태계의 문제들로 수생태계 건강성을 급격히 악화되고 있는 것으로 파악되었다(Yeom *et al.*, 2007). 정부 부처인 환경부에서는 이런 수질오염, 생태계 교란 및 불균형 현상을 파악하고 대처하기

Manuscript received 5 January 2018, revised 31 January 2018, revision accepted 21 March 2018
* Corresponding author: Tel: +82-42-821-6408, Fax: +82-42-822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

위해 2000년대 중반 2004~2006년 생물을 이용한 생태계 건강성평가기법 개발의 필요성에 대한 어류를 포함한 기존의 생물분포조사는 물론이고 생물학적 수질평가, 수생태 자연도 작성, 생태 권역도 파악 및 통합적인 생태계 평가가 이루어졌다(MEK, 2004, 2005).

우리나라에서 수환경의 생태적 평가에 대한 연구 동향에 따르면, 전국 규모의 자연생태조사가 환경부 주도 하에 시행된 바 있다(MEK, 2006). 이 연구 취지는 생물종 분포도, 풍부도 산정 및 보호종의 조사를 목적으로 기초생태조사 및 생태계 파악을 위해 추진되었으며, 최근에는 이들 자료를 기반으로 다양한 분류군에 의한 생물학적 수환경 평가가 이루어졌다(Hwang *et al.*, 2006; Won *et al.*, 2006). 즉, 2000년 이전에 실제적이며 과학적이고 체계적인 생물학적 수질평가법에 대한 연구는 우리나라에서 거의 전무한 실정이었으나, 최근에는 다각적인 연구계획들이 수립하여 생태건강도 평가에 적용하여 실효를 거두고 있는 실정이다(Ko *et al.*, 2016). 2000년 이전에 국내에서도 수환경 평가의 일환으로 환경부 주도 하에 수행된 각종 생태모니터링 조사자료에 따르면, 하천내 생물 분포, 상대풍부도, 종조성 및 보호종 등에 대하여 기술한 바 있으나, 하천간 혹은 수계별 상대적 생물학적 수질 비교평가는 더더욱 기대하기 어려운 현실에 있었다.

현재, 미국을 비롯한 환경 선진국들에서는 하천생태계에서 어류를 이용한 수질특성 파악 및 수생태계 건강성 파악을 위한 기반연구가 활발히 진행되고 있다. 미국의 오하이오 환경부에서는 수체내 대표 분류군인(An *et al.*, 2001a) 어류를 이용하여 생태건강성모델(Ecological health model)을 이용하여 생물학적 수질을 평가하고 있고, 미국 전역에 대해 생물학적 수질평가 네트워크 구축을 수행하여 생물에 바탕을 둔 수질등급을 세분하여 구분하고 있다. 심하게 훼손된 수계는 이런 생물학적 수질평가를 핵심자료로 이용하여 친환경적 복원을 기획하고 있다. 특히, 사이버 가상공간에 각 수계 및 특정지역의 생물학적 수질등급을 분류군별 칼라로 구분하여 컴퓨터의 GIS 가상공간에 주정부의 수질평가 구축의 핵심자료로 활용하고 있다. 또한, 미국내 수계관리 동향에 따르면, USGS 및 USDA에서는 수계관리프로그램(Watershed Management Program, WMP), 수계정보네트워크(Watershed Information Network, WIN), 수계연구단(Watershed Initiative, WI), 수질모니터링·평가프로그램(Water Quality Monitoring & Assessment Program, WQMAP)을 산하 기관에서 운영하면서 어류와 같은 분류군을 이용한 생물학적 수질평가 기준안 마련 및 생태 건강도 등급을 확립하였고, 수생태 건강성보전 및 생태복원에 실효를 거두고 있다. 특히, 어류를 이용한 생물학적 수

질평가기법으로서 미국 환경부 주도하에 확립된 Barbour *et al.*(1999)의 “신속한 생물학적 수질평가법”(Rapid Bioassessment Protocol, RBP)은 “생태 위해성 평가법”(ERC) 등과 함께 이미 표준화된 지침서로 작성되어 수질관리 및 수생태 관리에 미국전역에서 광범위하게 이용하고 있다.

수체의 생물학적 수질평가법(Biological assessment)은 생물학적 통합지수(Index of Biological Integrity) 및 생태 건강성 평가 모델(Ecological Health Assessment Model, EHA)의 개념에 기초를 두고 있는데, 이는 1981년 미국 정부의 하천에서 어류조사 자료를 기반으로 한 다변수 모델(Multimetric model) 개발에 의해 최초로 도입되었다. 그 후 1986년까지 각 지역의 생태적 특성을 고려한 다각적인 모델 수정작업이 12개 주 정부에서 실행되었고, 4년 뒤인 1991년에는 이미 35개 이상의 미국 주정부에서 생물학적 수질평가 지침서로 채택되어 하천의 수질평가 및 생태계 건강성평가에 실효를 거두고 있다. 본 평가기법은 미국 외에 캐나다, 영국, 호주, 일본, 독일, 프랑스와 같은 선진국들에도 어류를 이용한 생물학적 수질평가법을 도입하여 이미 수질보존, 생태계 종보존 및 지역적 수환경 종합평가에 크게 기여하고 있다. 아울러 최근에는 아프리카, 인도, 남미 등에서 본 기법에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다.

우리나라의 경우 2007년 수생태건강성 평가를 위한 어류평가 모델이 확립되었다. 2000년 초반의 경우 문헌 검토 결과 어류를 이용한 생물학적 수질평가 시 걸림돌로 작용하는 여러 핵심 원인을 다음과 같이 제시한 바 있다. 첫째, 어류 조사시 발생하는 정량화 문제, 둘째, 하천 차수(크기)를 고려하지 않은 상태 하에서 종 다양도 및 풍부도 산정의 문제점, 셋째, 수체 불안정기 동안(하절기)의 어종 분포 및 물리적 영향을 고려치 않은 데서 파생되는 평가시기 규정의 모호성, 넷째, 어류의 단일지표에 의한 획일화된 생태평가, 다섯째, 미국을 포함한 선진 외국에서는 생태 네트워크 구축을 위해 최적에서 최악상태까지 4~6등급의 세분화된 생태 평가등급이 적용되고 있으나, 우리나라에서는 조사 권역을 중심으로 3등급으로 구분하는 평가지침을 준비하고 있는 상황이어서 등급 세분화 작업을 포함한 생물학적 수질평가에 대한 연구가 절실하다는 점, 여섯째, 수생생물의 종다양성이 급격히 감소하는 상황 하에서, 생태계 건강성 진단을 정량적으로 분석할 수 없다는 점, 일곱 번째, 향후 수질오염 가중에 대한 미래의 생태 위해성 예측이 불가능하다는 점, 여덟 번째, 어류군집 혹은 개체군이 파괴되어 복원이 필요할 경우 복원 여부 결정 및 복원 수준을 어느 정도로 할 것인가에 대한 규정안 및 연구기법 부재 등이 큰 문제점으로 부각되었다. 또한, 2000년초 정부 주도 하에 실시한 어류의 분류군을 이용한 수생태 관련

연구 개발 사업들에 의한 많은 조사 자료 축적에도 불구하고, 어류를 생물학적 수질평가 혹은 총체적 수생태 건강성을 비교 검토할 수 없다는 점 또한 2000년 초반 큰 문제점으로 제시되어 체계적이고 과학적인 생태모니터링기법의 확립은 시급히 해결되어야 할 현안 과제로 부각된 바 있다. 따라서 2000년대 초반부에 증장기적 수환경 생태기준 마련 및 생태관리 측면에서 기존의 생태 모니터링 기법의 문제점 및 효율성에 대한 제반 문제점들이 제기되고 있어 이들을 보완할 수 있는 생물학적 수환경평가기법 및 모니터링기법 개발에 대한 제도적 장치가 시급한 실정에 있었다. 이런 상황에서 환경부는 2004~2007년까지 어류를 이용한 건강성 평가법 및 기준 마련에 R&D를 투자하였고, 어류를 이용한 다변수 생태건강도 평가기법을 확립하였다. 본 논문에서는 2000년 초반에 연구된 어류를 이용한 생태건강도 평가법에 대한 매트릭 선정, 모델 적용, 현장 조사법을 논의하고, 이를 적용해 평가한 등급체계(현재의 4등급체계가 아닌)와 수질특성과의 관계를 비교분석하였다.

현장조사 및 연구방법

1. 생태 건강성평가를 위한 연구초기의 현장 조사 시기 및 야외조사

생태건강도 평가를 위한 어류의 현장 조사 및 채집은 봄(4~5월) 및 가을(9~10월)에 시행하는 것으로 확정하였다. 여름철의 경우 조사시기는 배제되었는데 이런 원인은 수리수문학적으로 장마에 의해 불안정하여 어류의 특성 차이가 하천수량 증가에 의해 직접적으로 영향을 받기 때문이었다. 또한 겨울의 조사시기에서 배제되었는데 이는 수온의 급격한 하강으로 어류분포가 수온에 의해 영향 받기 때문이었다. 미국의 환경부에 따르면 어류는 일주기 최대 기온이 19°C 이하일 경우 수심이 깊은 곳으로 어류가 이동하기 때문에 겨울에는 건강성평가를 실시하면 안되는 것으로 제시하고 있다.

2. 어류 조사거리 및 채집구역

본 기법 개발을 위한 첫째 단계는 수체내 생태계의 정량적인 조사기법 확립으로서 Ohio EPA(1989) 및 Barbour *et al.*(1999)이 제시한 Wading method에 기초하였다. 어류채집은 정량화된 Catch Per Unit of Effort (CPUE)를 위해 조사거리는 1정점(좌표)으로부터 상류 100 m 및 하류 100 m를 포함하여 총 200 m로서, 각 조사 구간내 어류 채집소구역은 여울(riffle), 소(pool) 및 우수지(run)와 같은 다양한

서식지가 존재할 경우 채집구역에 포함하여 조사를 실시하였다.

3. 어류채집도구 및 방법

현장에서 어류채집은 정량화 실시를 위해 3인이 1조가 되어 실시하며, 이중 1인은 반드시 현장 어류조사에서 경험이 5년 이상인 전문가를 포함한다. 3인중 1인은 수심이 얇은 수초 근처 및 물살이 빠른 여울지역에서 족대 조사(망목: 5×5 mm 이하)를 실시하고, 또한 다른 하나는 여울 및 수심이 깊은 구간에서 투망 채집법(망목: 5×5 mm)을 실시한다. 채집된 어류의 개체수 산정은 어류체장의 길이가 20 mm 이하일 경우에는 본 조사에 포함시키지 않는다. 이런 조사기법은 Barbour *et al.*(1999)에서 사용한 기법에 의거하였다.

4. 어류조사 소요시간

조사에 소요되는 시간의 표준화를 위해 현장 채집 누적 횟수에 대한 최대 종수를 산정하는 방식을 이용하여 조사시간을 결정하였으며, 현장조사 결과 각 조사하천별 최대 종수는 조사 시작과 동시에 종수가 증가하였으며, 최대 종수는 60분이 경과하였을 때 최고 빈도로 나타났으며, 그 이후에 종수는 더 이상 큰 변이 폭으로 증가하지 않는다는 것을 검정하였다. 이런 기법은 생태 건강성 평가기법 개발 초기에 적용하였으나 차후 이런 결과에 의거하여 채집 소요시간은 채집개체수의 정량화를 위해 이런 소요시간은 족대 및 투망의 투척횟수로 전환되었다. 상기 2000년대 초반에 개발된 조사시기 및 조사법은 대부분 현재 그대로 유지하고 있으나, 조사법에서 소요시간의 개념은 투망 및 족대의 횟수 개념으로 일부 수정되어 이용되고 있다.

5. 어종분류 및 종 특성 분석

채집된 어류는 가능한 현장에서 동정 분류 및 개체수 산정을 한 후 포획된 어류는 풀어주되, 분류감별이 모호한 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정된 후 실험실로 운반하여 동정, 분류하였다. 우리나라 어류의 동정은 분류기준을 최근에 가장 잘 확립한 Kim and Park (2002)을 기반으로 하였으며 분류체계는 Nelson(1994)의 방법을 따랐다.

6. 생태 지표종 평가 및 서식지 길드 평가법

어류를 이용한 수생태 건강성 평가기법 개발을 위해 수체내 생물 지표종 선정(민감종, 내성종, 중간종) 및 서식지 길드 분석은 Ohio EPA(1989)에서 제시한 방법을 따랐으

며, 국내의 종에 대한 특성은 국내의 다양한 도감 및 문헌에 의거하여 생태지표특성 종을 분류하였고, 현장 채집종에 대해서는 어류를 해부하여 분석을 실시하되 어류의 위장내 먹이의 상대적 우점도에 의거하여 분석하였다.

7. 어류의 트로픽 길드분석

생태 건강성 평가기법 개발을 위해 어류의 트로픽길드의 분석이 선행되었다. 일부 자료가 미비한 어류 및 트로픽 길드가 모호한 종은 현장에서 채집된 어류를 15% 알코올에 고정하여 실험실로 옮긴 후 분석을 실시하였으며, 분석시에는 동일종 10개체를 대상으로 하였을 때 개체당 최적빈도의 길드로 선정하여 길드군을 선별하였다.

8. 비정상종(Abnormality)의 개체별 증상 분석

어류의 개체별 건강도를 위해 외형의 비정상성 감별을 실시하였다. 외형적 감별은 U.S. EPA (1993)의 방법에 의거하여 실시하였다. 외형의 비정상 분석(Abnormality analysis)은 비정상종류 및 증상을 세분화하여 분석을 실시하였다.

결 과

본 연구결과에서는 2004~2006년 어류를 이용한 생태건강성 평가 모델을 개발하기 전에 생물학적 수질평가를 위해 다각적 메트릭 속성 및 메트릭수에 대한 기초적인 검토가 이루어졌고, 생태 지표종 특성 분석 및 생태길드 분석에 대한 방법론적인 검토 과정을 거쳤다. 이를 통해 어류에 의거한 생물학적 수질평가를 위해 다변수 생태건강도

모델을 확립하였다.

1. 어류의 다변수 평가모델 구축 및 개발

본 연구에서는 어류를 이용한 수질평가기준(안) 도출을 위해 Table 1과 같은 다변수평가 모델을 개발하였다. 본 모델 메트릭 결정(안)은 우리나라 수생태계의 지역적, 생태적 특성을 반영하는 메트릭 모델로 수정 변경하였다. 본래 본 모델을 최초로 개발한 Karr (1981)는 북미의 어류군을 이용한 12개 메트릭 시스템을 제한하였으나, 본 연구에서는 “장수하는 어종(Species of long-lived fish)” 및 “Sunfish 수(Number of sunfish species) 항목”은 본 연구에서 배제하여 10개 메트릭 모델을 선정하였다.

상기 10개의 메트릭은 크게 3개 부류의 속성으로 대별된다. 첫째, 종의 구성성분에 특성을 반영한 생태지표특성, 둘째, 영양단계구성으로 어류의 트로픽 구조에 대한 반영, 셋째는 어류의 개체풍부도 및 개체 건강성에 대한 속성으로서 어류의 생태계 건강성 및 수환경평가에 가장 일반적이면서, 우리나라에 적용 가능한 통합지수를 이용하였다. 따라서 상기 어류평가모델을 이용하여 얻은 지수는 수계내 생물학적 지표인 어류지표종을 이용한 수질평가로 간주되나, 기본적으로 서식지교란에 의거한 생태적 간섭효과는 US EPA의 기존 모델에서 제시된 것처럼 거의 반영되지 않는 것으로 간주되었다.

원래 개발된 모델의 12 메트릭 모델에서 2개 메트릭은 현재 우리나라 연구체제에서 어류 연령산정에 대한 부정확성, Sunfish종류에 대한 국내 메트릭 적용의 부적합성 및 일부 메트릭 특성의 중복성을 피하기 위해 배제하였다. 또한, 원래 Barbour *et al.* (1999) 및 Karr (1981)가 제시한 총어종수(Total number of fish species), Darter 종수(Number

Table 1. The 10-metric fish model developed in 2006 by An (2006), but two metric attributes of M2 and M7 (asteric mark) were removed in current fish model (2017), so the current fish model is 8-metric model.

Category	Metric Attributes	Rank distribution		
		5	3	1
Ecological Characteristics: Species Richness and Composition	M1: Total Number of Native Fish Speices	>67%	33~67%	<33%
	M2*: Total Number of Riffle-Benthic Species in the Headwaters	>67%	33~67%	33~67%
	M3: Total Number of Sensitive Species	>67%	33~67%	33~67%
	M4: Proportion of Individuals as Tolerant Species	<5%	5~20%	>20%
Trophic Composition	M5: Proportion of Individuals as Omnivores	<20%	20~45%	>45%
	M6: Proportion of Individuals as Native Insectivores	>45%	20~45%	<20%
	M7*: Proportion of Individuals as Native Carnivores	>5%	1~5%	<1%
Fish Abundance and Health Condition	M8: Number of Individuals in Sample	>67%	33~67%	<33%
	M9: Proportion of Individuals as Exotic Species	0%	0~1%	>1%
	M10: Proportion of Individuals with Disease, Tumors, Fin Damage, and Skeletal Anomalies	0%	0~1%	>1%

of darter species), 식충성 어종의 개체수빈도(Proportion of individuals as insectivore) 및 육식성 어종의 개체수 빈도(Proportion of individuals as carnivore)의 5개 메트릭은 한국 어종의 생태적 특성 및 물리적 특성을 고려하여 각각 총 토착 어종수(Total number of native fish species), 여울 저서성종(Number of riffle-benthic species), 식충성 토착종의 개체수 빈도(Proportion of individuals as native insectivore) 및 육식성 토착종의 개체수 빈도(Proportion of individuals as native carnivore)로 각각 수정한 후 대치하였다. 그 외의 메트릭들은 현재 전 세계적으로 널리 이용하고 있고, 국내의 수환경 평가에 적합한 것으로 사료되어 원래의 모델에서 이용한 동일 메트릭으로 결정하였다.

상기 메트릭 모델에서 메트릭 #1, #2, #3 및 메트릭 #8은 3개의 등급기준인 5, 3, 1에 대해 100%를 3개의 구간으로 정해놓고 있고, 상위 33%는 5점, 중위 33%는 3점, 하위 33%는 1점으로 구분하였다(Table 1). 각 Metric에 대한 “5”, “3”, “1”의 점수구분(Scoring category) 및 기준선 정법은 Karr *et al.* (1986) 및 US EPA (1993)에 의거하였다. 이런 점수는 실제 하천차수(stream order)에 따라 종수 및 개체수가 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 조사 하천마다 Reference 하천에 대한 상대적 값이 보정되어야한다. 이런 이유 때문에 본 조사지점 이외에도 어류의 Reference 하천에 대한 현장조사가 수반되어야하고, 어류조사에서는 4개의 항목에 대한 Reference 하천에서 조사된 결과에 따라 각각 다른 값을 보여주게 된다(An *et al.*, 2001b).

그 외의 항목들은 이미 북미(US EPA, 1983)뿐만 아니라, 그 외의 많은 나라들에서 유사한 항목을 사용하고 있다. 아홉 번째 메트릭의 예를 들면, 이미 전 세계적으로 어떤 군집에서 종수의 빈도가 0%이면 상위권에 해당되고, 1% 이상이면 하위권, 0~1%에 들면 중위권의 점수를 줄 수 있다는 것이다. 즉 도입종이 1%를 상회하면 그 생태계는 도입종 측면에서 파괴되었다고 진단하는 것이 현재 평가 방법이다.

2. 어류평가모델 메트릭 선정과정 및 선정기준

어류의 메트릭 선정은 미국 외에, 캐나다, 영국, 호주, 일본, 독일, 프랑스, 인도, 남미 등의 다양한 나라에서의 모델(Judy *et al.*, 1984; Koizumi and Matsumiya, 1997) 및 메트릭 속성 분석에 의거하여 결정되었다. 분석 결과에 따르면, 기존의 원래의 Karr (1981)가 개발한 미국 환경부의 RBP 메트릭 모델이 주류를 이루고 있었으며, 나라마다의 생태적 특성에 맞게 모델을 수정 변경하여 이용하였다. 본 연구에서는 생태건강도 평가모델 토착종 특성, 외래도입종

특성, 서식지상황, 및 어종분포특성에 의거하여 10개 메트릭을 선정하였다. 이를 기초로 하여 8 메트릭 모델의 검토를 실시하였다. 이런 이유는 전국의 1,000여 개 이상의 하천을 평가할 경우 등급이 거의 변하지 않으면서 메트릭수를 감소시키면 생태 건강성 분석에서 효율적일 수 있기 때문이었다. 8-메트릭 모델을 검토한 결과에 따르면, 모델 메트릭의 생태 건강도 등급은 10-메트릭 모델과 큰 차이가 없는 것을 확인하여(An *et al.*, 2001a, b) 최종적으로는 M2와 M7을 모델 메트릭에서 삭제한 후 모델을 적용하였고, 현재 사용하는 어류평가모델이 바로 8-메트릭 모델이다.

3. 생태 지표종 특성 분석 및 생태길드 특성

1) 생태 지표종 특성

생태 지표종 분석을 위해 채집종은 수질 오염도에 따라 쉽게 사라지는 민감종(Sensitive species, or strong intolerant species, S), 내성종(Tolerant species, T)과 두 범주사이의 중간종(Intermediate species, I)으로 구분하였다. 지표종 구분방식은 US EPA (1993) 및 Barbour *et al.* (1999)의 조사된 방식을 따랐으며, 본 분석을 위해 국내외 문헌 조사 및 현지 어류조사에서 얻은 시료분석을 동시에 실시하였다. 민감종은 주로 오염도에 따라 쉽게 사라지는 어종(U.S. EPA, 1993)으로서, Ohio EPA (1987) 및 U.S. EPA (1993)처럼 전체어종의 5~10% 범위로 제한하였다.

내성종(T)은 수질오염에도 불구하고, 종수 및 분포범위가 증가하는 어종, 중간종(I)은 두 범주사이에 포함되지 않는 종으로 규정하였다. 지표종 분석을 위한 예를 들면, 붕어에 관한 문헌 즉, 개체군 조사 논문, 출판자료 혹은 도감 등의 포괄적 문헌조사에 의거하여 붕어는 오염에 내성이 강하고, 낮은 용존산소에도 잘 견디며, 높은 수온에도 잘 생존하며, 수질등급 3~4급수에서 주로 발견 된다는 종합적 문헌에 의거하여 내성종으로 분류하였다(An *et al.*, 2001a). 한편, 현재 이용하는 내성도 분류 시스템 중 초기에 MEK (2006)이 분류체계를 만든 것들 중 가장 크게 변형된 어류종은 피라미(*Zacco platypus*)이다. 본 종은 우리나라에서 가장 널리 하천에 분포하는 보편종으로서 피라미를 내성종으로 분류하였다. 이는 그 어떤 도감 및 문헌에서도 내성종(Tolerant sp.)으로 기술하고 있으나, 2010년 경에 피라미를 중간종(Intermediate sp.)으로 분류하면서, 그 이듬해 전국 4대강의 어류를 이용한 생태건강도가 이전에 비해 향상된 것으로 나타났다(Choi *et al.*, 2017). 이런 이유는 생태건강도가 좋아진 것이 아니라 종조성의 분류체계 변경에 의해 나타났다. 피라미 개체군의 연구에 의하면 피라미의 다양한 수질환경 내성도 특성 연구에서 본

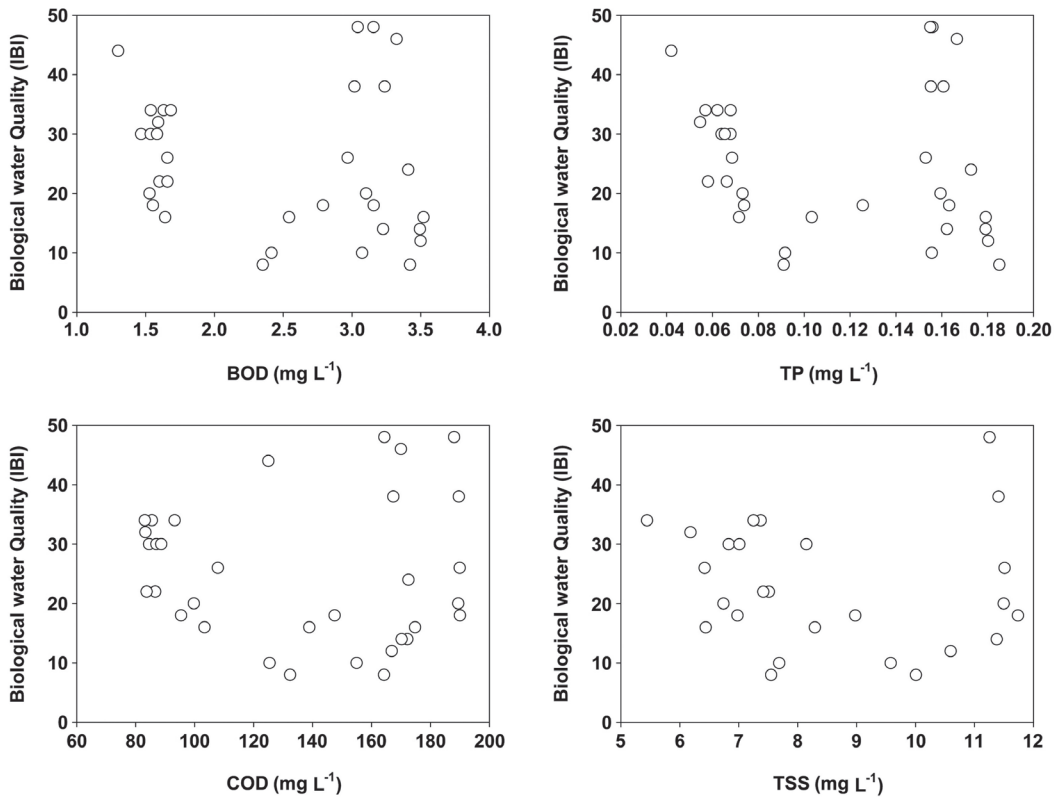


Fig. 1. Comparison of biological water quality and physicochemical quality.

종을 내성종으로 평가되어 향후 이에 대한 분류기준이 수정되어야 할 것으로 평가되어 어류에 대한 내성도 평가 지표가 수정 되어야 할 것으로 평가되었다.

2) 어류의 물리적 서식지 길드특성

본 연구에서 어류는 Nelson (1994)의 분류체계를 이용하였고, 각 어종에 대한 서식지 길드 분류방식은 하천의 상하류간, 수층내특성, 및 하상특성을 구분하여 여울성 저서종 메트릭 특성을 분석하였다. 하천의 상-하류 간의 분포 특성은 Longitudinal Gradient로서 나타냈으며, 이는 상류(U), 중류(M), 하류(D) 및 기수역(E)로 구분하였고, 수층내 표층 및 바닥사이의 수직분포 특성은 Vertical Gradient로서 나타냈으며, 이는 표층(S), 중층(M) 및 하층(B)으로 대별하였다. 또한 하천의 하상 특성은 Substrate Type으로 나타냈으며, 수생식물(P), 자갈(G), 모래(S) 및 진흙(M)으로 대별하여 분류하였다.

3) 대상종의 트로픽 길드 특성

본 트로픽 길드분석에서 어류는 Nelson (1994)의 분류체계를 이용하였고, 수체내 에너지 흐름을 반영하는 영양단계는 잡식종(Omnivore species, O), 식충종(Insectivore 혹은

invertivore species, I), 육식종(Carnivore 혹은 Piscivore species, C) 및 초식종(Herbivore species, H)으로 대별하여 분석하였다. Ohio EPA (1987)에 따르면 잡식성 종은 동·식물질의 상당비율을 지속적으로 먹는 종, 식충성종은 주로 수서 무척추 곤충을 먹는 종, 육식성종은 주로 어류, 다른 척추동물물 먹는 종으로 정의하였으며, 식성의 분류는 1차적으로 이용하는 자원(primary source of food)에 근거하여 분류하였다. 분류시 1차적으로는 기존의 도감 및 문헌을 이용하였고(Kim and Park, 2002; Son and Song, 2006). 채집한 종들의 일부에 대해서는 1종당 10개체의 해부를 실시하였고, 전체 위내용물에 대한 상대적 우점성 여부(섭식물에 대한 과수준 및 중동정)은 본 연구에서 배제됨)를 조사하였다. 예를들어 영양 구조체계의 분류에서 Choi and Lee (1994)에 따르면 *Coreoleuciscus splendidus*는 수서곤충 및 소동물물 섭식한다고 보고한 반면, Kim and Park (2002)은 수생곤충 및 부착조류를, 그 외의 연구들에 따르면 곤충 및 실지렁이를 혼식한다고 보고하였다. 이런 경우 본 연구에서는 1차적인 먹이원으로서 수서곤충을 먹는 식충성 어종(insectivore species)으로 분류하였고, 이는 현장 채집된 종들의 해부를 통해 확인하였다. 본 수 환경 평가

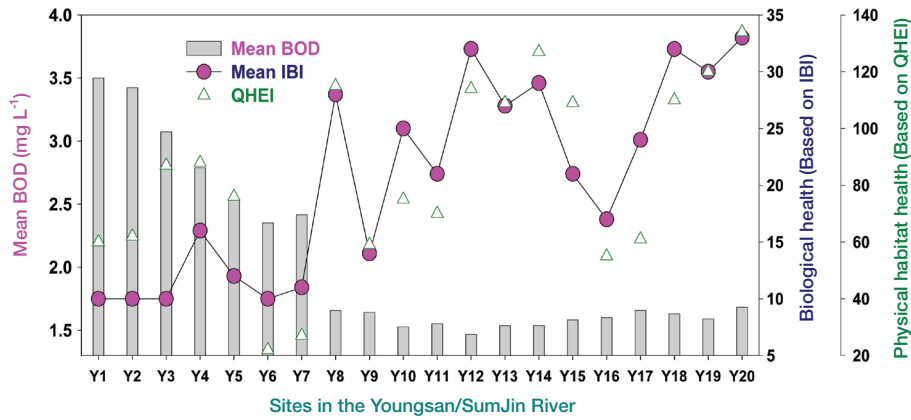


Fig. 2. Comparison of Index of Biological Inegrity (IBI), physicochemical water quality and Qualitative Habitat Evaluation Index (QEI) in Youngsan River.

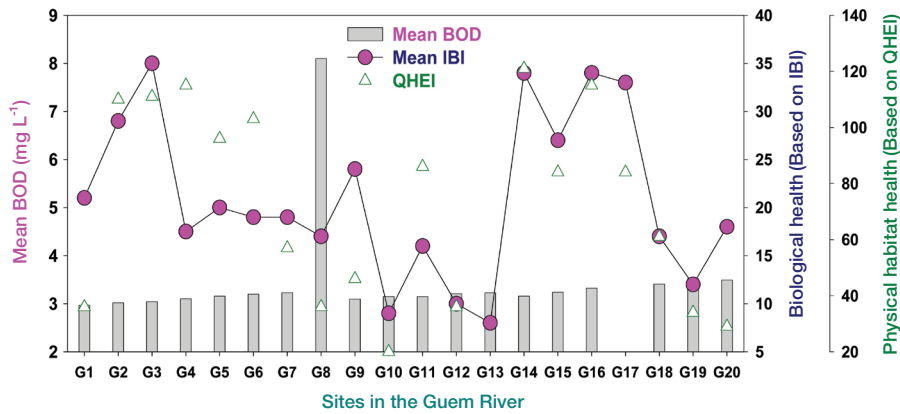


Fig. 3. Comparison of Index of Biological Inegrity (IBI), physicochemical water quality and Qualitative Habitat Evaluation Index (QEI) in Guem River.

에서 트로픽 길드에 대한 분석 기준은 1차적으로 지형적, 국지적 생태의 특성을 반영해야 하기 때문에 (Karr *et al.*, 1986), 국내에서 널리 인용되는 담수 어류의 종별분류 및 생태적 특성을 기술한 도감 및 어류문헌에 의거하였고, 현장 채집종을 분석하여 문헌을 뒷받침하였다.

4. 어류 건강도평가에 대한 기준 및 모델의 현장적용 · 평가

1) 어류의 건강도 평가기준

2006년 개발된 초기의 생태건강도 평가 모형은 생태건강도기준 등급을 아래와 같이 6등급체계로 대별되었으며, 세부등급은 최고상태, 청정상태, 양호상태, 보통상태, 불량상태 및 최악상태로 대별되었다. 그러나 환경부에서 4등급체제로 통일화하는 과정에서 최적상태, 양호상태, 보통상태, 불량상태의 4등급으로 되었고, 이는 다시 2017년 이

후는 5개 등급에 대한 체계를 고려하고 있어 일부 변경될 것으로 사료된다. 등급점수 산정법을 보면 각 등급에 대한 점수는 원래 미국에서 개발 당시 12 메트릭을 이용하여 계급구간을 5, 3, 1로 구분하였다. 따라서, 12 메트릭이 모두 최고 점수인 5점을 획득할 경우 12×5=60점으로서 메트릭의 최대 가능 점수이다. 그러나, 2006년도 초기 확정되지 않은 모델에서 메트릭수는 10개였고 이에 대한 최대 점수는 10×5=50점으로서 산정되었다. 또한 각각의 구간에 대한 퍼센트 설정법은 원래 모델에서 적용한 메트릭값에 대한 상대빈도를 적용하여 산정하였다. 그 후 2008년 모델은 8개 메트릭을 사용하여 최대 8×5=40점을 반영하였다.

2) 등급별 생태특성

본 연구에서는 수질등급은 6등급으로 대별하였고, 등

급별 생태특성은 본 어류를 이용한 생물학적 평가모델이 개발된 원래의 모델 및 최근 미환경부의 Barbour *et al.* (1999)이 선정한 특성을 1차적으로 반영하였고, 그 외에 캐나다, 영국, 호주, 일본, 독일, 프랑스와 같은 선진국에서 이용되는 등급특성을 반영하여 결정하였다. 제 1등급의 특성은 어류의 종적 구성이 풍부하고, 청정지역의 생태 지표어종(민감어종)의 단연 우점하는 것으로 정의되었고, 불량상태는 어류가 거의 존재하지 않고 비정상종이 빈번히 나타나는 것으로 정의되었다.

3) 하천생태계의 건강성 평가모델값(IBI)과 수질변수와의 관계

연구초기에 2004~2006년에 개발된 모델은 10개 메트릭 모델이었으나, 8개 메트릭 모델과 등급 측면에서 큰 차이가 없어 8개 메트릭 모델이 더 효율적인 것으로 나타났다(An *et al.*, 2001a, b). 8개 메트릭을 이용한 모델값과 이화학적 수질변수인 BOD, TP, COD 및 TSS와의 관계를 분석한 결과에 따르면, 일반적으로 어류에 의거한 생물학적 수질평가 값은 이화학적 수질값의 악화에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 극히 일부지점에서 수질과의 상관성이 떨어졌으나, 이런 데이터를 제외한 대부분의 지점의 BOD, TP 및 TSS는 생물학적 수질평가지수와 1차 함수관계를 갖는 것으로 나타났다(Fig. 1). 한편, IBI 값은 전기전도도 값과는 상관관계가 낮게 나타났다.

하천생태계의 건강성 평가모델값(IBI)과 수질변수와의 관계는 섬진강의 예에서 아래와 같이 평가되었다. 본 수계에서 생물학적 수질평가 지수(IBI), 이화학적 수질(BOD) 및 정량적 서식지 평가지수(QHEI)의 상관관계에 따르면, 이화학적 수질이 악화된 하천 즉, 광주1(Y1), 광주2(Y2), 광산(Y3)에서는 정량적 서식지평가지수(QHEI)의 적절한 값에도 불구하고, 여전히 어류에 의거한 생물학적 수질평가지수(IBI)는 낮게 나타났다(Fig. 2). 또한 수질이 양호하더라도 물리적 서식지평가지수(QHEI)가 낮을 경우, 즉 예로서 남원(Y16), 고달(Y17)의 하천에서는 어류에 의거한 생물학적 수질평가지수는 낮게 나타나 생물학적 수질평가 값은 이화학적 수질특성 뿐만 아니라 물리적 서식지환경에 의해 결정되는 것으로 나타났다.

또한 하천생태계의 건강성 평가모델값(IBI)과 수질변수와의 관계는 금강 수계에서도 잘 보여진다. 금강수계에서 화학적 수질이 양호한 상태에서 물리적 서식지 건강성은 생물학적 건강도 척도에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다(Fig. 3). 따라서 이런 생물학적 수질평가를 실시할 때, 물리적 서식지평가도 동시에 수행되어야 생물학적 수질특성에 대한 원인규명이 가능할 것으로 사료되었다.

고 찰

어류에 의거한 생태건강도평가모델(IBI)의 핵심은 기존 어류연구에서 가장 문제가 된 하천차수를 반영하는 방식을 취하였고, 또한 평가 메트릭 속성에 첫째, 생태지표특성 반영, 둘째, 어류의 트로픽 단계반영, 셋째, 어류풍부도 및 개체 건강도를 반영하는 복합적 속성을 근간으로 한 어류 다변수 복합모델로 개발되어 어류의 환경생태적인 특성을 잘 반영하는 모델로 사료된다. 다만, 피라미(*Zacco platypus*)와 같은 종은 현재 내성도 분류(Tolerance guild)에서 중간종으로 분류되고 있으나 내성종으로 수정보완되어야 할 것으로 사료되었다. 어류에 의거한 생태건강도 평가값(IBI 모델값)의 다양한 생태변수들과의 상관관계를 분석한 결과에 따르면, 다변수 모델값은 오염에 대한 생태 지표 특성을 갖는 민감종, 내성종, 그리고 총 종수, 총개체수, 트로픽길드 및 개체 건강도에도 뚜렷한 상관관계를 보였는데, 이는 즉 본 생물학적 수질값이 각각의 메트릭 속성에 잘 부합됨을 제시하였다. 또한 어류 다변수 산정값에 의거한 생물학적 수질등급을 기존의 일반적인 이화학적 수질등급에 대해 회귀분석을 한 결과에 따르면, 이화학적 수질값(BOD)이 높은 범위에서는 생물학적 IBI 모델값을 반영하였으나, BOD값이 낮을 때 변이폭은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 다변수 IBI 모델값의 변이의 폭이 큰 원인은 1차적으로 수체내 서식지교란 현상으로 설명되었다. 변이를 보인 핵심 원인은 하상내 토사축적(모래)에 의한 하천서식지의 단순화 및 하천수로 공사에 의한 천변서식지 교란 등으로 규명되었다. 이런 결과에 따르면, 단순 이화학적 수질평가는 총체적 생물학적 수질특성을 대표할 수 없는 반면, 본 모델에서 개발한 어류평가모델등급의 결정은 이화학적 수질뿐만 아니라 수체 내 서식지교란도 잘 반영하는 것으로 평가되어 생물학적 수질평가 시 핵심기법으로 이용될 수 있음을 확인하였다. 한편, 2010년부터는 4대강 사업에 시행되었고, 이에 따라 4대강에 16개의 보(weir)가 건설되었다. 이런 구간에서는 하천과 호수의 중간형태의 또 다른 수체로 변형되어 어류를 이용한 하천생태 건강성 평가법은 일부 이런 구간에서 변형이 필요할 것으로 사료된다. 특히 어류 조사법 및 조사도구의 추가적 연구가 이런 생태적인 중간수체의 적용을 위해 필요할 것으로 사료되었다. 현재 어류를 이용한 생태건강도 평가기법은 생태계 복원성 평가에 널리 이용되고 있는 바 향후 생태복원성 평가를 위한 추가적인 어류복원성 통합모델을 개발하면 효율적으로 생태관리에 이용될 것으로 기대된다.

적 요

본 연구의 목적은 국가하천의 생태건강도 평가, 보존 및 관리를 위해 현재 국가에서 이용되는 확립된 하천다변수 모델이 개발되기 이전의 초기에 개발된 어류를 이용한 생물통합지수에 기반을 둔 생태건강도 평가모델을 소개하는 것이다. 초기의 어류를 이용한 IBI 모델은 2004~2006년 사이에 개발되었고, 연구 초기에 건강성 평가모델은 10개 메트릭 모델로 구성되었고, 이후에 현재 국가에서 어류에 의거한 생태건강성 평가를 위한 8개 메트릭 모델로서 4대강 수계의 하천 및 강들에 적용하기 위해 최종적으로 확립되었다. 본 논문에서는 어류조사법이 어떻게 확립되었고, 어떻게 메트릭 속성이 선정되었는지를 설명하며, 어류 메트릭 모델 개발과 함께 내성도 길드 및 트로픽 길드가 어떻게 분류체계를 대별하게 되었는지를 제시한다. 초기에 제시된 10개의 메트릭 모델은 현재 쓰는 8개의 메트릭 모델로 전환되었고, 이 모델에서는 초기모델에서 포함된 M2 및 M7 메트릭이 제거되었다. 또한 초기에는 건강도의 기준이 6개 범주로 나누었으나, 현재는 4개 범주(최상, 양호, 보통, 불량)로 대별하여 이용하고 있다. 이런 초기의 모델은 4대강의 여러 강 및 하천에 적용 평가 되었다. 2000년대 초반에 모델 개발을 위해 어류 IBI 값들은 화학적 변수(BOD, COD: 유기물 오염 지표) 및 물리적 서식지 변수들과의 값들과 비교 평가 한 후, 화학적 지표를 이용한 수질과 물리적 서식지 변수를 이용한 서식지 건강성을 비교 평가하여 왜 차이가 나타나는지를 설명하였다. 이런 초기의 IBI 모델 개발 프로세스는 적용된 IBI 모델 및 메트릭 속성의 확립을 이해하는 데 도움이 될 것이다. 따라서, 이런 노력은 하천 및 수계 관리자들에게 뿐만 아니라 육수학자 및 어류 생태학자들에게 효율적인 생태계 보존 및 관리전략을 제공할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 대전녹색환경지원센터(Daejeon Green Environment Center)의 2016년 연구비에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- An, K.G., D.H. Yeom and S.K. Lee. 2001a. Rapid Bioassessments of Kap Stream Using the Index of Biological Integrity. *Korean Journal of Environmental Biology* **19**(4): 261-269.
- An, K.G., S.H. Jung and S.S. Choi. 2001b. An Evaluation on Health Conditions of Pyong-Chang River using the Index of Biological Integrity (IBI) and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI). *Korean Journal of Limnological Society* **34**(3): 153-162.
- Barbour M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stribling. 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish, 2nd Ed. EPA 841-B-99-002.
- Choi, G.C. and W.G. Lee. 1994. One hundred kinds of freshwater fish we really should know. Hyeonamsa.
- Choi, S., J.H. Han, J.W. Choi and K.G. An. 2017. Trophic Gradients of Two Minnow Species with Similar Eco-type and Their Relations to Water Chemistry and Multi-metric Biological Integrity. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* **10**(3): 371-378.
- Hwang, S.J., N.Y. Kim, D.H. Won, K.G. An, J.K. Lee and C.S. Kim. 2006. Biological assessment of water quality by using epilithic diatoms in major river systems (Geum, Youngsan, Seomjin River), Korea. *Journal Of Korean Society On Water Quality* **22**: 784-795.
- Judy, R.D. Jr., P.N. Seeley, T.M. Murray, S.C. Svirsky, M.R. Whiworth and L.S. Ischinger. 1984. National Fisheries Survey. Vol. 1. Technical Report: initial findings. United States Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/06.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Karr, J.R., K.D. Fausch, P.L. Angermeier, P.R. Yant and I.J. Schlosser. 1986. Assessing biological integrity in running water: A method and its rationale. pp. 28, Illinois National History Survey: Spe. Pub 5., IL, USA.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater Fishes of Korea. Kyohak Publishing.
- Ko, D.G., J.W. Choi and K.G. An. 2016. Preliminary Ecological Assessments of Water Chemistry, Trophic Compositions, and the Ecosystem Health on Massive Constructions of Three Weirs in Geum-River Watershed. *Journal of Ecology and Environment* **39**(1): 61-70.
- Koizumi, N. and Y. Matsumiya. 1997. Assessment of stream fish habitat based on Index of Biotic Integrity. *Bulletin of the Japanese Society of Fisheries Oceanography* **61**: 144-156.
- MEK (Ministry of Environment, Korea). 2004. Researches for integrative assessment methodology of aquatic environments (I). National Institute of Environmental Research. p. 321-344.
- MEK (Ministry of Environment, Korea). 2005. Researches for integrative assessment methodology of aquatic environments (II). National Institute of Environmental Research. p. 400-440.
- MEK (Ministry of Environment, Korea). 2006. Researches for integrative assessment methodology of aquatic environments (III) : Development of aquatic ecosystem health

- assessment and evaluation system. National Institute of Environmental Research (NIER). Incheon, Korea.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world (3th ed.). John Wiley and Sons, New York.
- Ohio EPA. 1987. Biological criteria for the protection of aquatic life. Vol.II, Users manual for biological field assessment of Ohio surface waters. Columbus, Ohio, USA.
- Ohio EPA. 1989. Biological criteria for the protection of aquatic life (Vol III); Standardized biological field sampling and laboratory method for assessing fish and macroinvertebrate communities. USA.
- Son, Y.M. and H.B. Song. 2006. Freshwater Fishes of Geum River, Korea. Jisungsa Publishing.
- U.S. EPA. 1983. Technical support manual: Waterbody surveys and assessments for conducting use attainability analyses. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards, Washington, D.C. Volumes 1-3. 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, USA.
- Won, D.H., Y.C. Jun, S.J. Kwon, S.J. Hwang, K.G. An and J.K. Lee. 2006. Development of Konan Saprobic Index using Benthic Macroinvertebrates and Its Application to Biological Stream Environment Assessment. *Journal Of Korean Society On Water Quality* **22**: 768-783.
- Yeom, D.H., S.A. Lee, G.S. Kang, J. Seo and S.K. Lee. 2007. Stressor identification and health assessment of fish exposed to wastewater effluents in Miho Stream, South Korea. *Chemosphere* **67**: 2282-2292.