

우리나라 주요하천 수계에서 다변수모델을 이용한 생태학적 수환경 평가

안광국[†] · 이재연 · 배대열 · 김자현 · 황순진^{*} · 원두희^{**} · 이재관^{***} · 김창수^{***}

충남대학교 생명과학부

^{*}건국대학교 환경과학과

^{**}(주)생태조사단 부설 두희자연환경연구소

^{***}국립환경과학원 환경진단연구부

Ecological Assessments of Aquatic Environment using Multi-metric Model in Major Nationwide Stream Watersheds

Kwang-Guk An[†] · Jae-Yon Lee · Dae-Yeul Bae · Ja-Hyun Kim · Soon-Jin Hwang^{*} ·

Doo-Hee Won^{**} · Jae-Kwan Lee^{***} · Chang-Soo Kim^{***}

School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University

**Department of Environmental Science, Konkuk University, SEoul 143-601*

***Doohee Institute of Ecological Research (DIER), Korea Ecosystem Service (KES), Inc.*

****National Institute of Environmental Research (NIER)*

(Received 26 June 2006, Accepted 16 August 2006)

Abstract

The objective of this research was to develop ecological multi-metric models using natural fish assemblages for a diagnosis of current stream health condition, and apply the model to nationwide lotic ecosystems of the Geum River, the Youngsan River, and the Sumjin River. The ecological stream health model was based on the index of biological integrity (IBI), which was originally developed in North American streams by Karr (1981), and the Rapid Bioassessment Protocol (RBP), which was scientifically established by the US EPA (1999). The metric numbers and metric attributes were partially changed for the regional applications, so the scoring criteria was modified for the assessment. Overall, metric values, based on the IBI calculations, reflected conventional water quality characteristics, based on nutrient regime, and agreed with results of static eco-toxicity tests. Some stations impaired in terms of stream health were identified by the IBI approach, and also major key stressors affecting the stream health were identified by additional evaluations of physical habitats. Our preliminary results suggested that biological integrity in stream ecosystems was largely disturbed by habitat degradation as well as chemical pollutions. This new approach would be used as a key tool for ecological restorations and species conservations in the degraded aquatic ecosystems in Korea and applied for elucidating major causes of ecological disturbances. Ultimately, this approach provides us an effective management strategy of stream ecosystems through establishments of ecological networks in various watersheds.

keywords : Ecological stream health, Fish assemblage, Index of biological integrity, Water quality

1. 서론

최근, 산업화 및 도시화에 따른 수질오염이 가중되는 우리나라의 상황에서 수중 생물을 이용한 평가기법의 확립이 절실히 요구된다. 기존의 하천평가 기법으로는 생물학적 혹은 화학적 산소요구량(BOD/COD)과 같은 대표 기준항목에 의거한 화학적 접근방식이 널리 이용되어 왔으며, 현재에도 전국의 수계에서 지속적인 모니터링이 이루어지고 있다. 그러나 유기물질 및 독성물질의 오염이 없는 상황에서도, 골재채취 및 하상구조 변경과 같은 물리적 변동은 어류의 산

란지 및 서식공간을 제한함으로써 어류의 급격한 감소를 가져오고 있다(Judy et al., 1984). 이런 이유로 해서 화학적 혹은 물리적 변수의 측정만으로는 수환경의 총체성을 파악하기 어려운 것으로 파악되고 있다.

한편, 미국과 같은 환경선진국에서는 수체 내 대표 분류군인 어류를 이용하여 생태계건강도 평가법(Ecosystem Health Assessment, EHA)을 이미 1981년에 개발하여 수생태계 보전 및 관리에 체계적으로 활용하고 있다. 미국에서의 어류에 의거한 EHA평가 모델은 1986년까지 각 지역의 생태적 특성을 고려한 모델 보정 및 수정작업이 12개 주 정부에서 실행되었고(Karr et al., 1986), 4년 뒤인 1991년에는 이미 35개 이상의 주 정부(Karr et al., 1991)에서 수환경 평가지침서로 채택되어 하천 위해성평가 및 건강성평

[†]To whom correspondence should be addressed.
khan@cnu.ac.kr

가에 실효를 거두고 있다. US EPA(1993)에서 가장 최근에 이용한 어류에 의거한 생물학적 수질지표 정책반영 사례를 보면 미국 전체 51개 주(state) 중 36개 주에서 어류를 이용한 생물학적 수질평가(Fish Bioassessment Program, FBP)를 실시하고 있다. 이런 부류의 어류에 의거한 평가기법은 미국 외에 캐나다(Lyons et al., 1995), 영국(Oberdorff et al., 1992), 호주(Harris, 1995), 일본(Koizumi et al., 1997), 독일(Huguency et al., 1996), 프랑스(Didier et al., 1996)와 같은 선진국들에 이미 도입되어 생태네트워크 구축 및 지역적 수환경 종합평가에 크게 기여하고 있다.

어류를 이용한 생물학적 수질평가가 각광을 받는 이유는 어류 지표종이나 어류 군집은 물리적, 화학적 변화에 민감할 뿐만 아니라, 생물군집간의 물질순환 및 에너지 흐름을 직접적으로 반영하고(Karr, 1981; Karr et al., 1986, 1991), 조사 시 비용 절감 효과(Ohio EPA, 1987), 수질 진단 및 오염된 수환경 복원 시 핵심기술로 이용된다는 점에서 생물학적 통합수질평가법으로 널리 인정받고 있다. 허나 우리나라에서는 이제 개념적 도입에 불과한 실정에 있어서 상기 선진기술의 연구 및 이를 이용한 수질 평가지표 개발이 시급한 실정에 있다.

본 연구에서는 첫째, 이미 도출된 어류 평가지표 및 기준의 타당성을 검토·검증하고 둘째, 생물분류간의 연계성을 분석하며 셋째, 조사지점 및 시기의 시공간적 적용타당성 조사하고 넷째, 정성적 서식지평가 모델(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)을 개발하며 다섯째, 트로픽걸드, 내성도 분석 및 등급별 생태 지표종을 확정하는데 있다. 따라서 본 연구의 목적은 위를 바탕으로 어류를 이용한 생물학적 수질기준과 평가방법의 보정 및 모델개발을 연구하여 우리나라의 수질정책 및 수질기준에 필요한 평가방법을 확립하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 현황

어류의 조사지점은 현행 환경부의 수질측정망에 포함된 하천의 지점을 대상으로 선정하였다. 금강수계에서는 영동천, 보청천, 갑천, 대전천 등을 포함하여 본류 및 지천에서 총 20개 지점을 선정하여 조사를 수행하였고, 영산강/섬진강 수계에서도 광주천, 황룡강, 지석천등을 포함하여 본류 및 지천에서 총 20지점을 선정하여 현장조사를 실시하였다(Table 1). 본 연구를 위한 1차 조사는 2005년 4월 14일~5월 7일에 실시하였고, 2차 조사는 2005년 6월 13일~18일에 실시하였다.

2.2. 분석방법

2.2.1. 수질자료 분석

어류조사지점에 대한 수질자료 분석을 위해 생물학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 총인(TP), 전기전도도(Conductivity), Chl-*a*, NH₄-N, NO₃-N 및 총부유물(Suspended solids)의 변수를 2003~2004년 기간의 4~8월

자료를 수계별, 하천별 및 조사지점별로 비교·평가하였다. 각 하천 지점에서의 평가 자료는 오염이 적게 된 대조군 지점(US EPA에서는 unimpaired site로 규정하고 있음) 및 오염이 예상되는 지점을 하천별로 선정하여 각 수계의 오염특성, 수문특성, 수질특성 및 서식지 특성의 차이에 따른 생물학적 수질건강도와 비교·평가하는데 이용하였다.

2.2.2. 물리적 서식지 평가 모델 구축

하천에서 어류의 물리적 서식지 평가는 복미의 환경부에서 널리 이용되는 정량적 평가가 가능한 서식지평가 모델(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI; Plafkin et al., 1989)을 기반으로 매트릭을 확립하였으며, 국내의 특성에 맞게 다변수(multi-metric)를 수정·보완하였다.

2.2.3. 서식지 현장 조사 시기 및 지점선정

물리적 서식지 평가는 같은 계절 내 변이가 적고 강우 집중기 전에 서식지의 가장 안정한 상태를 보인 2005년 5월 20일~6월 10일의 장마 전 기간에 실시하였으며, 물리적 서식지의 조사 대상 하천 및 지점은 어류조사지점과 일치한 지점을 선정하였다. 생태계 서식지의 분석을 통해 얻은 물리적 서식지 건강도 지수는 생태계 건강성평가모델을 통해 얻은 지수와 상관성 분석법 및 회귀분석법을 통해 조사 지점 별 하천 건강성의 차이가 하천의 물리적 구조교란 및 파괴에 의거한 것인지 여부를 분석 검토하였다.

2.2.4. 어류 현장조사 및 분석

본 기법 개발을 위한 첫째 단계는 수체 내 생태계의 정량적인 조사기법 확립으로서 Ohio EPA(1989a)에서 제시한 Wading method를 이용하였다. 채집은 정량화된 Catch Per Unit of Effort(CPUE)를 위해 조사거리 200 m로서, 각 조사 구간 내 어류 채집소구역은 여울(riffle), 소(pool) 및 유수지(run)와 같은 다양한 서식지가 존재할 경우 채집구역에 포함하여 조사를 실시하였다.

현장에서 어류채집은 정량화 실시를 위해 현장 경험 3년 이상의 전문가를 포함한 3인이 1조로 실시하였으며, 족대(망목: 5×5 mm 이하), 전기충격기(25A, 12V), 투망(망목: 5×5 mm)을 이용하였다. 채집된 어류의 개체수 산정은 어류체장의 길이가 20 mm 이하일 경우에는 본 조사에 포함시키지 않았다. 이런 기법은 Barbour 등(1999)에서 사용한 기법을 그대로 사용하였다.

조사에 소요되는 시간의 표준화를 위해 현장 채집 누적 횟수에 대한 최대 종수를 산정하는 방식을 이용하여 50분 조사를 원칙으로 하였다.

2.2.5. 어류의 실험실내 분석

채집된 어류는 가능한 현장에서 동정 분류 및 개체수 산정을 한 후 포획된 어류는 풀어주되, 동정이 모호한 종은 10% 포르말린 용액에 고정하여 실험실에서 분류하였다. 어류의 동정은 김 등(2002), 김(1997) 및 최 등(2002)을 이용하였으며, 분류체계는 Nelson(1994)의 방법을 따랐다. 수체 내 생물 지표종 선정 및 서식지 길드에 대한 분석은 국내

Table 1. The sampling sites for ecological health assessments, based on fish assemblages

Water shed	ID	Site name	Site location	Index
Geum River	1	Youngdong stream 1	Chungbuk Youngdong gun Youngdong eup Buyoung ri	Tributary
	2	Youngdong stream 2	Chungbuk Youngdong gun Simcheon myun Chogang ri (Chogang Bridge)	Tributary
	3	Bochung stream 1	Chungbuk Boeun gun Naebuk myun Iwon ri	Tributary
	4	Bochung stream 2	Chungbuk Boeun gun Boeun eup Jukjun ri	Tributary
	5	Okcheon stream	Chungbuk Okcheon gun Gunbuk myun Jio ri (Gaksin)	Tributary
	6	Gap stream 1	DaeJeon Seo gu Jungrim dong (Gasoowon Bridge)	Tributary
	7	Gap stream 2	DaeJeon Seo gu woalpyeong dong (Mannyen Bridge)	Tributary
	8	Gap stream 4	DaeJeon Yusung gu Junmin dong (Gapcheon Bridge)	Tributary
	9	Yudeung stream 1	DaeJeon Jung gu Sansung dong (Sansung intake tower)	Tributary
	10	Yudeung stream 5	DaeJeon Seo gu Samcheon dong	Tributary
	11	Daejeon stream 1	DaeJeon Jung gu Munchang dong (Munchang Bridge)	Tributary
	12	Daejeon stream 3	DaeJeon Jung gu Samsung dong (Hyunam Bridge)	Tributary
	13	Miho stream 6	Chungnam Nam myun Boktong ri	Tributary
	14	Youngpo	Jeonbuk Muju gun muju eup Yongpo ri (Yongpo Bridge)	Main stream
	15	Jaewon	Chungnam Kumsan gun Jaewon myun Jugok ri (Jaewon Bridge)	Main stream
	16	Youngdong	Chungbuk Youngdong gun Simcheon myun Godang ri (Yanggang Bridge)	Main stream
	17	Okcheon	Chungbuk Okcheon gun Dongyi myun Jukha ri	Main stream
	18	Hyundo	DaeJeon Daeduk gu Sukbong dong	Main stream
	19	Yeongi	Chungnam Yeongi gun Nam myun Nasung ri (Keumnam Bridge)	Main stream
	20	Gongju 1	Chungnam Gongju Keumsung dong (Keumgang Bridge)	Main stream
Youngsan River/ Sumjin River	1	Kwangju 1	Kwangju seo gu Chipyeong dong (Waste water disposal plant upstream 1km)	Main stream
	2	Kwangju 2	Kwangju Kwangan gu Sinchon dong	Main stream
	3	Kwangan	Jeonnam Naju Noan myun Haksan ri (Haksan Bridge)	Main stream
	4	Naju	Jeonnam Naju Namsan dong (Naju Bridge)	Main stream
	5	Hampyung	Jeonnam Hampyung gun Hakgyo myun Gokchang ri (Donggang Bridge)	Main stream
	6	Kwangju stream 1	Kwangju Dong gu Hak dong (Banghak Bridge)	Tributary
	7	Kwangju stream 2	Kwangju seo gu Yuduk dong (Pyungchon Bridge)	Tributary
	8	Hwangryong River 1	Jeonnam Jangsung gun Jangsung eup Youngcheon ri (Jindoo Bridge)	Tributary
	9	Hwangryong River 3	Kwangju Kwangan gu Seobong dong (Songjeong intake tower)	Tributary
	10	Jisuk stream 1	Jeonnam Hwasoon gun Neungju Myonmjung ri	Tributary
	11	Jisuk stream 2	Jeonnam Naju Nampyung eup Suwall ri (Nampyeong Bridge)	Tributary
	12	Bosung stream	Jeonnam Goksung gun Jukgok myun Yubong ri (Taeon Bridge)	Tributary
	13	Unam	Jeonbuk Imsil gun Unam myun Hakam ri (Imun Bridge)	Main stream
	14	Imsil	Jeonbuk Imsil gun Gangjin myun Youngsu ri (Sumjin River)	Main stream
	15	Juksung	Jeonbuk Soonchang gun Juksung myun Gowon ri (Juksung Bridge)	Main stream
	16	Namwon	Jeonbuk Namwon Keumji myun Hado ri (Keumgok Bridge)	Main stream
	17	Godal	Jeonnam Goksung gun Godal myun Sin ri (Godal Bridge)	Main stream
	18	Goksung	Jeonnam Goksung gun Ogok myun Aproz ri (Yesung Bridge)	Main stream
	19	Kyesan	Jeonnam Gurye eup Kyesan ri	Main stream
	20	Gurye	Jeonnam Gurye gun Togi myun Songjung ri	Main stream

의 문헌 및 현장채집어류를 해부하여 분석·평가하였으며 일부 자료가 미비한 어류 및 트로픽 길드가 모호한 종은 실험실에서 분석을 실시하였다. 분석 시에는 동일종 10개체를 대상으로 하였을 때 개체 당 최적빈도의 길드로 선정하여 길드군을 선별하였으며 식성의 분류는 1차적으로 이용하는 자원(primary source of food)에 근거하여 분류하였다. 수환경 내에서 트로픽길드에 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 어류문헌(정, 1977; 김, 1995, 1997; 최, 1988; 최 등, 1994)을 이용하였다.

2.2.6. 비정상어의 개체별 증상 분석

어류의 건강성을 평가하기 위하여 US EPA(1993)의 방법

에 의거하여 개체별 외형의 비정상성을 감별하였다. 외형의 비정상 분석(Abnormality analysis)은 비정상종류 및 증상을 세분화하여 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리적 서식지 평가 모델 구축 및 메트릭

본 연구에서는 하천의 물리적 서식지를 정량적으로 평가할 수 있는 모델 개발을 시도하였으며, 지난 30년 동안 북미지역에서 사용된 서식지평가 모델(Habitat Evaluation Model) 및 특성을 분석하였다. 분석결과 어류의 다변수 모델을 이용할 경우 Plafkin 등(1989) 및 Ohio EPA(1989a)에 개발된 정량적 서식지평가지수가 가장 적합한 것으로 평가되었다.

본 모델은 현장에서 물리적 서식지의 조사거리로서 200 m를 대상으로 하였으며(Plafkin et al., 1989)며, 지점별 조사구간은 다양한 서식지 특성을 반영하여 평가하였다. 물리적 서식처 건강성 모델에 이용된 변수는 아래와 같다.

본 연구에서 이용된 서식지모델은 총 11개 메트릭 변수를 이용하였으며, 1차적으로 모델에 적합한 메트릭수 및 변수는 다음 Table 2와 같이 선정하여 이를 기반으로 다변수 메트릭 모델을 구성·보정하였다. 얻어진 물리적 서식지의 건강도 지수는 4개의 등급으로 대별되었고, 각각에 대한 모델값 구간은 90%이상, 75~89%, 60~74% 및 59% 이하로 세분하여 평가하였다.

3.2. 메트릭 검증 및 다변수 평가모델 보정

본래 본 모델을 최초로 개발한 Karr(1981)는 북미의 어류군을 이용한 12개 메트릭 시스템을 제한하였으나, 본 연구에서는 8개 메트릭을 사용하였으며 메트릭 변수 및 속성은 다음 Table 3과 같다. 제외된 메트릭인 “육식성종의 상대빈도”와 “외래종의 출현 빈도”의 2개 메트릭은 실제 수질 특성에 대한 반영에서 우선순위가 떨어져 제거하는 방식을 취했다.

상기 메트릭 모델에서 메트릭 #1, #2, #3 및 메트릭 #7은 3개의 등급기준인 5, 3, 1에 대해 100%를 3개의 구간으로

정해놓고 있고, 상위 33%는 5점, 중위 33%은 3점, 하위 33%는 1점으로 구분하였다. 각 Metric에 대한 "5", "3", "1" 의 점수구분(Scoring category) 및 기준선정법은 Karr 등(1986) 및 US EPA(1993)에 의거하였다. 이런 점수는 실제 하천차수(Stream order)에 따라 종수 및 개체수가 큰 차이를 보이므로 하천차수에 의하여 보정되어야 한다(Barbour et al., 1999).

3.3. 어류의 서식지 길드 및 생태 지표종 분석

물리적 서식지길드 보정을 위해 하천의 상·하류 간의 분포특성(Longitudinal Gradient), 수층 내 표층 및 바닥사이의 수직분포 특성(Vertical Gradient), 하천의 하상 구조 특성(Bottom substrate)을 구분하였으며 미비한 생태지표종에 대한 특성분석 보안을 위해 채집된 어종의 해부학적 분석 및 폭넓은 문헌분석을 실시하였다. 분석은 US EPA(1993)에서 조사된 방식을 따랐으며, 민감종(sensitive species)은 주로 오염도에 따라 쉽게 사라지는 어종(US EPA, 1993)으로, Ohio EPA(1987) 및 US EPA(1993)처럼 전체어종의 5~10%로 제한하였다. 내성종(T)은 수질오염(역사적 자료근거)에도 불구하고, 종수 및 분포범위가 증가하는 어종, 중간종(I)은 두 범주사이에 포함되지 않는 종으로 분석하였다.

Table 2. The model for the Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI)

Qualitative habitat evaluation metric	Qualitative habitat condition			
	Excellent	Good	Fair	Poor
Primary factor - Substrate structure and vegetation coverage				
1. Substrate / Instream cover	16~20	11~15	6~10	1~5
2. Embeddedness	16~20	11~15	6~10	1~5
3. Flow velocity/depth	16~20	11~15	6~10	1~5
4. Channel flow status	16~20	11~15	6~10	1~5
5. Dam construction	16~20	11~15	6~10	1~5
Secondary factor - Channel characteristics				
6. Channel alteration	12~15	8~11	4~7	1~3
7. Bottom scouring/sediment deposition	12~15	8~11	4~7	1~3
8. Frequency of riffles or bends	12~15	8~11	4~7	1~3
Tertiary factor - bank characteristics and structure				
9. Bank stability	9~10	6~8	3~5	0~2
10. Bank vegetative protection	9~10	6~8	3~5	0~2
11. Riparian vegetative zone width	9~10	6~8	3~5	0~2

Table 3. Multimetric model for biological water quality assessments, based on fish assemblages

Category	Metric	Scoring criteria		
		5	3	1
Ecological characteristics: species richness and composition	1. Total number of native fish species	>67%	33~67%	<33%
	2. Total number of riffle~benthic species in the headwaters	>67%	33~67%	<33%
	3. Total number of sensitive species	>67%	33~67%	<33%
	4. Proportion of individuals as tolerant species	<5%	5~20%	>20%
Trophic composition	5. Proportion of individuals as omnivores	<20%	20~45%	>45%
	6. Proportion of individuals as native insectivores	>45%	20~45%	<20%
Fish abundance and health condition	7. Number of individuals in sample	>67%	33~67%	<33%
	8. Proportion of individuals with disease, tumors, fin damage, and skeletal anomalies	0%	0~1%	>1%

3.4. 어류의 트로픽 길드 보정

본 연구에서는 육식종(Carnivore species)의 메트릭을 제거하였다. 따라서 트로픽 구조를 반영하는 영양단계는 잡식성종(omnivore species, O)과 식충성종(insectivore or invertivore species, I)으로 대별하여 분석하였고, 문헌에 의거하여 육식성종(carnivore or piscivore species, C) 및 초식성종(herbivore species, H)을 부수적으로 보정하였다. Ohio EPA (1987)에 따르면 잡식성 종은 동, 식물질의 상당비율을 지속적으로 먹는 종, 식충성종은 주로 수서 무척추 곤충을 먹는 종, 육식성종은 주로 어류, 다른 척추동물을 먹는 종으로 정의하였으며, 그에 따른 보정을 실시하였다.

3.5. 5등급에 의거한 생물학적 수질평가 및 생태 지표종

본 연구에서는 8개 메트릭 지표를 이용하여 매우 좋음에서 매우 나쁨까지 5개 평가등급으로 대별하였다(Table 4). 이는 현재 환경부의 화학적인 하천수질등급인 5등급 체제와의 일치를 위하여 이전의 6등급 체제를 보완하여 적용하였다. 본 연구에서 수행된 등급점수 산정법은 미국에서 개발 당시 12 메트릭을 이용하여 계급구간을 “5”, “3”, “1”로 구분하였다. 따라서 12 메트릭이 모두 최고 점수인 5점을 획득 할 경우 $12 \times 5 = 60$ 점으로서 메트릭의 최대 가능 점수는 60점이다. 그러나 본 연구에서는 보정된 메트릭이 8개이므로 최대 점수는 $8 \times 5 = 40$ 점으로 표현하였다. 또한 각각의 구간에 대한 %는 기존 모델에서 적용한 메트릭 값에 대한 상대 빈도를 적용하여 산정하였다.

지금까지 조사된 80여개의 지점과 대조(Reference) 지점에서 도출된 5등급 체제의 생물학적 모델값을 이용하여 수질등급별로 지표종을 확정하였다. 1차적으로 생물학적 수질이 1등급(매우 좋음~ 좋음)인 지점 및 대조(Reference) 하천에서 출현한 민감 지표종(Sensitive species)이 선정되었다. 선정된 민감종 중 가장 많은 하천에서 공통적으로 출현한 종 중에서 각각의 항존도지수값(Constance index value)과 종에 대한 개체수, 민감종의 개체 풍부도(Individual richness)를 산정한 결과 버들치, 갈겨니, 금강모치가

1등급 생태 지표종으로 선정되었다. 반면, 4등급(약간 나쁨~나쁨) 지표종은 80여개 지점에서 도출된 생물학적 모델값이 4등급(수질모델값: 18~22)에 해당되는 하천에서 출현한 내성 지표종(Tolerant species)을 선정하였다. 선정된 내성종들은 민감종과 같은 방법으로 산정하여 붕어, 잉어, 미꾸라지 등이 4등급 생태 지표종으로 선정되었다. 2등급(좋음~보통) 지표종은 생물학적 모델값이 32~34인 하천에서 출현한 민감종(Sensitive species) 중 1등급에서 출현한 종을 제외하고 민감종 및 중간종(Intermediate species)의 최다 출현종으로 선정하였다. 3등급(보통~약간 나쁨)의 지표종은 생물학적 모델값이 26~29인 하천에서 출현한 민감종 및 보편종으로서 1, 2등급에서 출현한 종을 제외하고 내성종 및 중간종의 최다 출현종으로 선정한 결과 피라미, 누치, 꼬리로 확정되었다.

3.6. 생태학적 건강도 평가 등급의 보정

지금까지 얻어진 생태건강성 평가 변이도 분석을 위하여 각 메트릭에 대한 “5”, “3”, “1”의 점수구분(Scoring category) 및 기준선정은 Karr 등(1986) 및 Ohio EPA(1989a, 1989b)에 의거하였으며, 보정 값은 이전의 10개의 메트릭(안 등, 2005)을 이용했을 때의 값과 비교 평가하였다(Table 4).

등급의 보정측면에서는 이전의 6등급 체제의 경우 각 등급에 해당하는 지표종의 경계가 모호하였다. 따라서 본 연구에서는 차선택으로 5등급체제를 적용하였으며 이는 다음과 같은 근거를 둔다. 첫째, 현재 우리나라 환경부의 BOD를 기준으로 하는 화학적 수질등급 5등급 체제를 따르고 있으므로 이를 반영하기 위하여 시도하였고 둘째, Ohio EPA(1987, 1989a, 1989b) 및 Karr(1981) 등에 의하여 개발된 모델의 기본적 특성에 의거하여 북미 환경부에서 사용하고 있는 5등급 체제를 반영하였고 셋째, BOD에 따른 등급에서 나타나는 상위등급(I, II 등급)이 6등급 체제를 적용하였을 때에는 거의 존재하지 않는다. 따라서 이를 근거로 본 연구에서도 어류에 있어 학술적 차원의 수질등급을 고려하기 위하여 5등급 체제를 시도하였다(Table 4).

Table 4. The assessment rank, integrity class, and the ecological indicator species

Rank	Integrity class	IBI	Characteristics	Ecological indicator species
I	Excellent ~ Good	40 ~ 38	Comparable to pristine conditions, exceptional assemblage of species.	<i>R. oxycephalus</i> , <i>R. kumgangensis</i> <i>Z. temmincki</i> etc.
II	Good ~ Fair	34 ~ 32	Decreased species richness, intolerant species in particular; Sensitive species present	<i>C. splendidus</i> <i>M. yaluensis</i> <i>S. gracilis majimae</i> <i>P. esocinus</i> etc.
III	Fair ~ Poor	29 ~ 26	Intolerant and sensitive species absent; skewed trophic structure	<i>O. uncirostris amurensis</i> <i>Z. platypus</i> <i>H. labeo</i> etc.
IV	Poor ~ Very Poor	22 ~ 18	Top carnivores and many expected species are absent or rare; omnivore and tolerant species are general.	<i>M. mizolepis</i> <i>C. auratus</i> <i>C. carpio</i> etc.
V	Very Poor ~ No Fish	≤ 14	Few species and individuals present; tolerant species dominated; diseased fish frequently	-

3.7. 전국수계 적용을 위한 공간적 타당성 분석

1, 2차 현장조사에 의거한 생물학적 수질평가를 위해 공간적 타당성 분석을 실시하였다. 10개 메트릭을 이용하여 생물학적 6등급 수질기준으로 산정하였을 때, 금강수계 1차 조사에서의 영동천2, 보청천1, 용포, 제원, 영동, 옥천은 매우 좋음~보통으로 나타났고, 반면, 미호천 6, 공주1은 약간 나쁨~나쁨으로 나타나 하천 간에 차이를 보였다. 한편, 섬진강/영산강수계 1차 조사에서 곡성, 계산, 구례는 매우 좋음~보통으로 나타났으며, 운암, 임실, 적성, 고달은 좋음~보통, 지석천1, 지석천2는 좋음~약간 나쁨, 광주1, 나주, 합

평, 황룡강3, 남원은 보통~약간 나쁨, 광주천2는 보통~나쁨, 광주천1은 약간 나쁨~나쁨, 광주2는 약간 나쁨~매우 나쁨으로 나타났다. 이런 조사지점에 대한 오류에 의거한 생물학적 수질특성은 다양하게 나타났으며, 다양한 수환경 특성을 반영하여 본 모델적용이 수계적용에 타당성이 있는 것으로 나타났다. 한편, 8개 모델 변수를 이용하여 생물학적 수질기준을 산정하고 이것을 5등급으로 나타낸 1차 조사 결과, 금강수계에서 보청천1, 용포는 매우 좋음~좋음으로 나타났고, 영동, 옥천은 좋음~보통, 영동천2, 제원은 보통~약간 나쁨, 영동천1, 갑천1, 갑천2, 현도는 약간 나쁨~나쁨,

Table 5. The ecological health assessments, based on the metric model

Sampling site		1st sampling			2nd sampling		
		IBI	6 Grade	5 Grade	IBI	6 Grade	5 Grade
1	Youngdong stream 1	20	III ~ IV	IV	22	III	IV
2	Youngdong stream 2	28	II	III	30	II	II ~ III
3	Bochung stream 1	38	I a	I	32	Ib ~ II	II
4	Bochung stream 2	13	IV ~ V	V	22	III	IV
5	Okcheon stream	16	IV	IV ~ V	24	II ~ III	III ~ IV
6	Gap stream 1	20	III	IV	18	III	IV
7	Gap stream 2	18	III	IV	20	III	IV
8	Gap stream 4	24	II ~ III	III ~ IV	10	IV ~ V	V
9	Yudeung stream 1	24	II ~ III	III ~ IV	24	II ~ III	III ~ IV
10	Yudeung stream 5	8	IV ~ V	V	10	IV ~ V	V
11	Daejeon stream 1	16	IV	IV ~ V	16	IV	IV ~ V
12	Daejeon stream 3	12	IV ~ V	V	8	IV ~ V	V
13	Miho stream 6	8	IV ~ V	V	8	IV ~ V	V
14	Youngpo	40	I a	I	28	II	III
15	Jaewon	28	II	III	26	II	III
16	Youngdong	36	I b	II	32	Ib ~ II	II
17	Okcheon	34	I b	II	32	Ib ~ II	II
18	Hyundo	18	III	IV	16	IV	IV ~ V
19	Yeongi	8	IV ~ V	V	16	IV	IV ~ V
20	Gongju I	12	IV ~ V	V	24	II ~ III	III ~ IV
1	Kwangju 1	12	IV ~ V	V	8	IV ~ V	V
2	Kwangju 2	8	IV ~ V	V	12	IV ~ V	V
3	Kwangsang	10	IV ~ V	V	10	IV ~ V	V
4	Naju	18	III ~ IV	IV	14	IV	IV ~ V
5	Hampyung	16	IV	IV ~ V	8	IV ~ V	V
6	Kwangju stream 1	8	IV ~ V	V	12	IV ~ V	V
7	Kwangju stream 2	10	IV ~ V	V	12	IV ~ V	V
8	Hwangryong River 1	26	II	III	30	II	II ~ III
9	Hwangryong River 3	16	IV	IV ~ V	12	IV ~ V	V
10	Jisuk stream 1	20	III ~ IV	IV	30	II	II ~ III
11	Jisuk stream 2	18	III	IV	24	II ~ III	III ~ IV
12	Bosung stream	30	II	II ~ III	34	Ib	II
13	Unam	26	II	III	28	II	III
14	Imsil	28	II	III	30	II	II ~ III
15	Juksung	20	III	IV	22	III	IV
16	Namwon	16	IV	IV ~ V	18	III	IV
17	Godal	22	III	IV	26	II	III
18	Goksung	34	I b	II	30	II	II ~ III
19	Kyesan	32	I b ~ II	II	28	II	III
20	Gurye	34	I b	II	32	Ib ~ II	II

보청천2, 유등천5, 대전천3, 미호천6, 연기, 공주1은 나쁨~매우 나쁨으로 나타났다. 한편, 섬진강 및 낙동강수계의 1차 조사에서 5등급기준에 의거할 때, 곡성, 계산, 구례는 좋음~보통으로 나타났으며, 광주1, 광주2, 광산, 광주천1, 광주천2는 나쁨~매우 나쁨으로 나타나 지점별 큰 차이를 보였다. 금강수계의 2차 조사에서 5등급에 의거할 때, 보청천1, 영동, 옥천은 좋음~보통으로 나타났고, 용포, 제원은 보통~약간 나쁨, 보청천2, 갑천1, 갑천2는 약간 나쁨~나쁨, 갑천4, 유등천5, 대전천3, 미호천6은 나쁨~매우 나쁨으로 나타났다. 한편, 섬진강 및 낙동강수계의 2차 조사에서 5등급기준에 의거할 때, 구례, 보성천은 좋음~보통으로 나타났고, 광주1, 광주2, 광산, 함평, 황룡강3은 나쁨~매우 나쁨으로 나타났는데, 이런 특성은 1차 조사와 유사한 결과를 보였다(Table 5).

3.8. 물환경 변화의 시간적 분석을 통한 적용 가능성 분석

본 연구에서는 어류의 시간적 특성 변이 분석을 위해 2회 조사를 실시하였다. 물리적으로 수체 안정기를 선택한 이유는 미국 환경부(US EPA, 1993)에서 어류를 이용한 생물학적 수질평가는 1일 대기 최대온도가 19°C를 상회해야 하며, 물리적으로 안정기인 여름에 해야 한다고 규정하는 것에 근거하였다. 이러한 시간적 특성을 반영하여 어류평가 모델을 적용한 결과, 1, 2차 조사에서의 계절적 변이는 적은 것으로 나타났다. 1차 및 2차 조사의 8개 메트릭을 이용한 5등급체제 분석에 따르면, 총 40개 지점에서 어류에 의거한 생물학적 평가등급이 전혀 차이를 보이지 않은 금강수계 지점은 영동천1, 갑천1, 갑천2, 유등천1, 유등천5, 대전천1, 대전천3, 미호천6, 제원, 영동, 옥천으로서 총 20개 하천 중 50%가 정확하게 2회 조사에서 모두 등급이 일치하였다. 또한, 섬진강/영산강 수계의 경우 광주1, 광주2,

광산, 광주천1, 광주천2, 운암, 적성, 구례의 7개 지점에서 일치하였다. 그 외의 지점들에서는 0.5등급에서 1등급 정도의 차이를 보였는데, 등급값의 기준 범위 상하 제한선에서 인접한 값들이 나와 거의 차이를 보이지 않았다. 8메트릭 모델에 의거한 5등급 수질기준안 측면의 1차 및 2차 조사에서 생물학적 수질등급이 2등급 이상의 차이를 보인 지점은 용포, 남원의 2개에 지나지 않아 뚜렷한 시간적 변이를 보인 것은 전체 40개 지점 중 2개 지점으로서 5%, 변이를 거의 보이지 않은 것은 95%로 나타나 본 모델은 시간적 변이가 거의 없음이 확인되었다. 이런 결과는 본 연구에서 생물학적 수질등급에 대한 시간적 변이가 적어 시간적으로 적용가능하다는 타당성을 보여 주는 것이다.

3.9. 화학적 수질과의 연계성 분석 및 하천생태계의 건강성 평가방법 도출

8개 메트릭을 이용한 모델값과 화학적 수질변수인 BOD, TP, COD 및 TSS와의 관계를 분석한 결과에 따르면 일반적으로 어류에 의거한 생물학적 수질평가 값은 화학적 수질값의 악화에 따라 감소하는 경향을 보였다. Outlier로 나타난 5개 지점의 데이터를 제외한다면 BOD, TP 및 TSS는 생물학적 수질평가지수와 1차 함수관계를 갖는 것으로 나타났다. 한편, IBI 값은 전기전도도 값과는 상관관계가 낮게 나타났다(Fig. 1).

섬진강 및 영산강 수계의 1차 조사에서의 생물학적 수질평가 지수(IBI), 화학적 수질(BOD) 및 정량적 서식지 평가 지수(QHEI)의 상관관계에 따르면, 화학적 수질이 악화된 하천 즉, 광주1(Y1), 광주2(Y2), 광산(Y3)에서는 정량적 서식지평가지수의 적절한 값에도 불구하고, 여전히 생물학적 수질평가지수는 낮게 나타났다(Fig. 2). 또한 수질이 양호하더라도 물리적 서식지평가지수가 낮은 경우, 즉 예로서 남원(Y16), 고달(Y17)의 하천에서는 어류에 의거한 생물학적

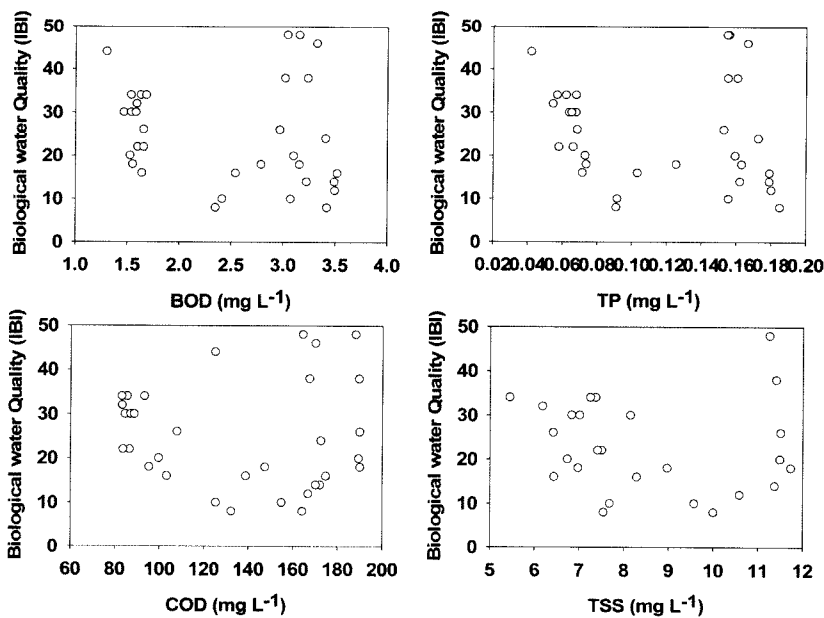


Fig. 1. The comparison between biological water quality assessment index, based on 8 metric models and chemical water quality.

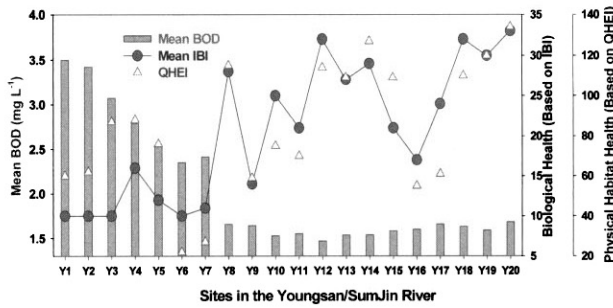


Fig. 2. The comparisons of biological water quality conditions, based on 8 metric models and chemical conditions of BOD along with the QHEI values in the Youngsan River and Sumjin River watershed.

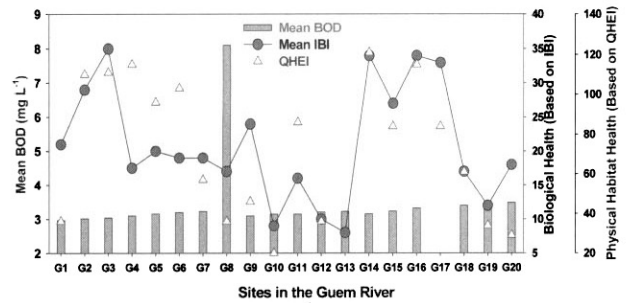


Fig. 3. The comparisons of biological water quality conditions, based on 8 metric models and chemical conditions of BOD along with the QHEI values in the Geum-River watershed.

수질평가지수는 낮게 나타나 생물학적 수질평가 값은 화학적 수질특성 뿐만 아니라 물리적 서식지환경에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 또한 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 서식지 평가도 동시에 수행되어야 생물학적 수질특성에 대한 원인 규명이 가능할 것으로 사료된다.

상기 외국의 문헌연구 및 본 어류평가 모델 분석을 총체적으로 고려할 때, 본 연구자는 어류에 의거한 생물학적 수질기준 및 생태 지표표를 아래의 Table 6과 같이 4등급으로 제안한다. 이런 이유로서는 첫째, 생물학적 수질등급이 화학적인 등급처럼 5~7등급으로 세분화될 경우에 각각의 수질등급에 대한 등급이 증가될 경우에 생태지표종 설정 시 지표종 특성에 대한 등급별 모호성을 내포하여 구분이 용이하지 않다. 셋째, 등급이 세분화될 경우 최상위와 최하위 등급에 해당하는 실제 하천이 거의 존재하지 않게 된다. 이런 이유로 해서 현재 북미 및 유럽에서 생물학적 수질기준 등급으로 4등급이 널리 이용되고 있다.

어류에 의거한 생물학적 수질등급은 매우 좋음~좋은 상태, 좋음~보통 상태, 보통~약간 나쁨 상태, 약간 나쁨~매우 나쁨 상태로 구분되었다. 매우 좋음~좋은 상태는 화학적 수질인 BOD 기준으로는 1 mgL^{-1} 이하이고 민감종의 개체수가 많으며 냉수성 지표어종이 단연 우점하는 상태, 좋음~보통 상태는 BOD 기준으로 $1 \sim 3 \text{ mgL}^{-1}$ 이하이고 민감종이 존재하며 내성종이 일부 출현하는 상태, 보통~약간 나쁨 상태는 BOD가 $3 \sim 8$ 이하 mgL^{-1} 로서 민감종이 희박하고 잡식어종의 상대풍부도 및 내성종 증가하는 상태, 약간 나쁨~매우 나쁨 상태는 BOD가 8 mgL^{-1} 이상으로서 어류가 거의 출현하지 않으며 내성종이 우점하고 어병 및 기형종이 출현하는 상태로 구분하였다.

상기 1, 2차 어류의 현장조사에 의거한 화학적 수질과 생물학적 수질과의 관계를 총체적으로 분석해 본 결과에 따르면, 본 연구는 물환경 변화를 적절히 평가할 수 있는 하천생태계 건강도 평가방법으로 사료되었다. 일반적으로 어류에 의거한 생물학적 수질지수 값은 화학적 수질 값의 악화에 따라 감소하는 경향을 보였는데 이런 지점은 총 40개 지점 중 35개에서 이런 양상을 보였다. 한편, 5개 조사 지점에서는 Outlier로 나타났으며, 이런 데이터를 제외한다면 생물학적 수질평가지수는 일반 화학적 수질항목(BOD, TP

Table 6. Ecological stream health criteria, based on BOD and ecological indicator species

Condition	BOD (mgL^{-1})	Characteristics	Indicat species
Excellent ~ Good	< 1.0	Sensitive species are rich, and coldwater species predominated	<i>R. kumgangensis</i> <i>O. masou masou</i> <i>B. lenok tsinlingensis</i> <i>R. oxycephalus</i> etc.
Good ~ Fair	$1 \sim 3$	Sensitive species present and tolerant species appear partly	<i>Z. temmincki</i> <i>C. splendidus</i> <i>P. altivelis</i> <i>S. scherzeri</i> etc.
Fair ~ Poor	$3 \sim 8$	Sensitive species are sparse, and relative abundance for omnivore species and tolerant species increase.	<i>Z. platypus</i> <i>O. uncirostris amurensis</i> <i>M. koreensis</i> <i>P. parva</i> etc.
Poor ~ Very Poor	$8 \leq$	Fish are rare, tolerant species are dominant, tolerant species are predominated and abnormal fishes are observed	<i>M. mizolepis</i> <i>S. asotus</i> <i>C. auratus</i> <i>C. carpio</i> etc.

및 TSS)과 1차 함수관계를 갖는 것으로 나타났다. 한편, 섬진강 및 낙동강 수계의 1차 조사에서의 생물학적 수질평가 지수, 화학적 수질 및 정량적 서식지 평가지수의 상관관계에 따르면, 화학적 수질이 악화된 하천 즉, 광주1, 광주2, 광산에서는 정량적 서식지평가지수의 적절한 값에도 불구하고, 여전히 어류에 의거한 생물학적 수질평가지수는 낮게 나타났다. 또한 수질이 양호하더라도 서식지평가지수가 낮을 경우(예, 남원, 고달), 어류에 의거한 생물학적 수질평가지수는 낮게 나타나 생물학적 수질평가 값은 화학적 수질특성 뿐만 아니라 물리적 서식지환경에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 또한 금강수계에서 화학적 수질이 양호한 상태에서 물리적 서식지 건강성은 생물학적 건강도 척도에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타나 생물학적 수질평가를 실시할 때, 물리적 서식지평가도 동시에 수행되어야 생물학적 수질특성에 대한 원인규명이 가능할 것으로 사료된다. 즉 본 연구에서 얻어진 모델 및 지수 검토에 의한 하천 건강도 평가기법은 물리적 서식지평가기법과 동시에 이용될 때 생태계 건강도를 과학적이고 체계적으로 예측할 수 있는 모델로 사료되었다. 이런 생태계 건강도 평가 기법은 향후 BOD와 같은 수질 준거치 대상물질을 선정해 생태학적 건강도 지수와 비교 평가할 때 핵심자료로 이용될 수 있을 것으로 사료되는 바이다.

사 사

본 연구는 환경부의 “물환경종합평가방법 조사연구” 사업의 지원으로 수행된 연구임.

참고문헌

- 김익수, 박종영, *한국의 민물고기*, 교학사 (2002).
- 김익수, *한국의 위기담수어류의 서식현황과 보존*, 한국생태학회, 한국어류학회공동 심포지엄 - 한국담수생태계의 특성과 어류상 (1995).
- 김익수, *한국동식물도감*, 37, 동물편 (담수어류) (1997).
- 안광국, 이재연, 장하나, 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상, *한국육수학회지*, 38(3), pp. 341-351 (2005).
- 정문기, *한국어도보*, 일지사 (1977).
- 최기철, *전남의 자연*, 담수어편, 한국과학기술진흥재단 (1988).
- 최기철, 이규원, *우리민물고기 백가지*, 현암사 (1994).
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목, *원색 한국담수어도감*, 향문사 (2002).
- Barbour, M. T., Gerritsen, J., Snyder, B. D. and Stribling, J. B., *Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish*, 2nd Ed. EPA 841-B-99-002 (1999).
- Didier, J., Kestemont, D. and Micha, J. C., *Indice Biotique d'Integrite Piscicole Pour Evaluer la Qualite Ecologique des Ecosystemes Aquatiques*, la Paix, Namur, Belgium (1996).
- Harris, J. H., *The Use of Fish in Ecological Assessments*, *Australian Journal of Ecology*, 20, pp. 65-80 (1995).
- Huguency, B., Camara, S., Samoura, B., and Magassouba, M., *Applying an Index of Biotic Integrity Based on Communities in a West African River*, *Hydrobiologia*, 331, pp. 71-78 (1996).
- Judy, R. D., Seeley Jr, P. N., Murray, T. M., Svirsky, S. C., Whitworth, M. R., and Ischinger, L. S., *National Fisheries Survey Vol. 1. Technical report: initial findings*. United States Fish and Wildlife Service. FWS/OBS-84/06 (1984).
- Karr, J. R. and Dionne, M., *Designing Surveys to Assess Biological Integrity in Lakes and Reservoirs*, in *Biological Criteria*, EPA-440/5-91-005, USA. pp. 62-72 (1991).
- Karr, J. R., *Assessment of Biotic Integrity using Fish Communities*, *Fisheries*, 6, pp. 21-27 (1981).
- Karr, J. R., Fausch, K. D., Angermeier, P. L., Yant, P. R., and Schlosser, I. J., *Assessing Biological Integrity in Running Water: A Method and Its Rationale*, p. 28, Illinois National History Survey: Spe. Pub 5., IL, USA (1986).
- Koizumi, N. and Matsumiya, Y., *Assessment of Stream Fish Habitat based on Index of Biotic Integrity*, *Bull. Jap. Soc. Oceanogr.*, 61, pp. 144-156 (1997).
- Lyons, J., Navarro-Perez, S., Cochran, P. A., Santana, E., and Guzman-Arroyo, C. M., *Index of Biotic Integrity based on Fish Assemblages for the Conservation of Streams and Rivers in West-central Mexico*, *Conservation Biology*, 9, pp. 569-584 (1995).
- Nelson, J. S., *Fisheries of the World* (3rd eds), John Wiley & Sons, New York, p. 600 (1994).
- Oberdorff, T. and Hughes, R. M., *Modification of an Index of Biotic Integrity based on Fish Assemblages to Characterize Rivers of the Seine Basin, France*, *Hydrobiologia*, 228, pp. 117-130 (1992).
- Ohio EPA, *Biological Criteria for the Protection of Aquatic Life, Vol.II, users manual for biological field assessment of Ohio surface waters*, Columbus., Ohio, USA (1987).
- Ohio EPA, *Biological Criteria for the Protection of Aquatic Life. Volume III: Standardized Biological Field Sampling and Laboratory Methods for Assessing Fish and Macroinvertebrate Communities*, Ohio EPA, Division of Water Quality Planning and Assessment Section, Columbus., Ohio (1989a).
- Ohio EPA, *Addendum to Biological Criteria for the Protection of Aquatic Life, Volume II: U.S.ers Manual for Biological Field Assessment of Ohio Surface Water*, Ohio EPA, Division of Water Quality Planning and Assessment, Ecological Section, Columbus., Ohio (1989b).
- Plafkin, J. L., Barbour, M. T., Porter, K. D., Gross, S. K. and Hughes, R. M., *Rapid Assessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Benthic Macroinvertebrates and Fish*, EPA/444/4-89-001. U.S. EPA (1989).
- U.S. EPA, *Fish Field and Laboratory Methods for Evaluating the Biological Integrity of Surface Waters*, EPA 600-R-92-111, Cincinnati, Ohio 45268 (1993).