

## 정수 생태계 건강성 평가를 위한 다변수 메트릭 모델 개발

안 광 국\* · 한 정 호

(충남대학교 생명과학부)

**A Development of Multi-metric Approach for Ecological Health Assessments in Lentic Ecosystems. An, Kwang-Guk\* and Jung-Ho Han (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)**

The purpose of this study was to develop a multi-metric Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA) model and apply model to dataset sampled from Daechung Reservoir in September 2005. The metrics were composed of 11 parameters such as physical, chemical and biological variables. The metric attributes of  $M_1 \sim M_8$  followed after the model of biological integrity using fish assemblages that previously adapted in lotic ecosystems, while the metrics of  $M_9 \sim M_{11}$  were added on the basis of literature. The metric of  $M_9$  reflected habitat conditions in the littoral zone and the metric of  $M_{10}$  reflected chemical conditions of the reservoir. For the application of regression analysis of long-transformed conductivity [ $\text{Log}_{10}(\text{Cond})$ ] against  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , based on 150 sampling sites at Korean reservoirs, showed that the variation of conductivity was explained 77.4% [ $\text{COD}_{\text{Mn}} = 4.42 \times \text{Log}_{10}(\text{Cond}) - 5.43$ ;  $R^2 = 0.774$ ,  $p < 0.01$ ,  $n = 150$ ] by the variation of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ . The metric of  $M_{11}$  was based on Tropic State Index (TSI), based on chlorophyll-*a* concentrations (Chl-*a*). Analysis of TSI (Chl-*a*) showed that above 50 was estimated "1", 40~50 was estimated "3" and below 40% was estimated "5". Overall, values of LEHA in the reservoir averaged 30.5, indicating a "fair~poor condition", which is judged by the criteria of U.S. EPA (1993). More studies such as metric numbers and attributes should be done for the application of the model.

**Key words : Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA), multi-metric, TSI**

### 서 론

최근 산업발달, 인구증가에 따른 수자원 및 위락시설의 이용 증가로 인하여 각종 산업 폐수와 생활하수의 오염물 배출을 증가시켜 수환경의 오염을 가중시키고 있다(김 등, 1993). 특히, 대도시의 인구집중과 산업시설의 밀집으로 인하여 각종 유기물 오염 및 독성물질의 오염물 배출은 수생태계의 수질오염 및 생물종의 서식에 큰 영향을 미치고 있다(홍 등, 1989). 이로 인하여 최근에는 친

환경적인 수 환경 관리와 쾌적한 생활환경 유지에 대한 국민적 욕구가 날로 증대되고 있으며, 수생태계의 친환경적 관리강화를 위해 총체적인 생태계 건강성 평가와 같은 기법이 도입되어 효율적인 수 환경 관리 체제를 마련하고 있다.

우리나라의 하천 생태계 건강성 평가에 대한 모델은 안 등(2001a)에 의해 개발되어 유수생태체인 갑천(안 등, 2001a), 평창강(안 등, 2001b) 및 금호강(안 등, 2000) 등의 하천연구에 적용되어 하천 생태계를 총체적으로 평가하고 진단한 예가 있다. 갑천에서 사용된 모델은 생물

\* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

학적 평가기법 중 다변수를 적용한 생물평가모델로서, 수 생태계 내의 최상위 소비자로서 분류되는 어류를 이용한 IBI (Index of Biological Integrity; Karr, 1981) 모델이다. IBI 모델은 현재 유럽, 일본, 캐나다 등 선진국을 포함한 세계 여러 나라에서 수 환경 평가 모델로 사용되고 있으며 (U.S. EPA, 2002), 우리나라 역시 지역적 특성에 맞게 변형하여 실제 하천 건강성 평가에 적용되고 있다 (안 등, 2001a).

한편, 정수생태계의 생태건강성 평가는 호소생태계를 총체적으로 평가하고 진단할 수 있는 평가 기법으로서, 환경 선진국인 미국에서는 청정호소프로그램, 환경모니터링 및 평가 프로그램을 사용하여 그에 맞는 다변수 정수생태계 평가모델을 개발하고 (U.S. EPA, 1994), 이를 이용하여 호소생태계를 총체적으로 평가하는 호소의 관리 기법으로 이용하고 있다. 최근, 미국 환경부 (U.S. EPA, 1998)는 자연호 및 인공호의 생물평가 및 생물기준 (Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)을 마련하여 정수생태계의 건강성을 평가하고 있다. 이런 정수생태계 평가 기법은 초기에 Karr (1981)에 의해 개발된 생물통합지수 (IBI)에 기반을 두고 있으며, 다변수를 이용하여 건강성을 평가하고 있다. 그러나 현재 우리나라는 다변수 접근방식에 의한 호소생태계의 건강성을 총체적으로 평가하고 진단할 수 있는 기법이 전무한 실정인어서, 호소를 총체적으로 평가하고 진단할 수 있는 효율적 평가기법 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 최근 우리나라의 생태계 건강성 평가의 일환으로 안 (2001a)에 의해 수정·개발된 생물통합지수 (Index of Biological Integrity, IBI) 매트릭 속성에 기반을 두었으며, U.S. EPA (1998)에 의하여 개발된 호소평가 모델에 적용하였다. 아울러, 우리나라 인공호의 정수생태계를 평가를 위하여 본 연구에서는 LEHA 모델 (Lentic Ecosystem Health Assessment Model) 개발 및 이를 이용한 호소 생태계의 건강성 평가를 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 시기 및 조사지점

본 연구에서는 호소 생태계 평가모델의 개발 및 적용을 위해 금강 본류의 인공호인 대청호를 대상으로 2005년 9월 (수체 안정기)에 1회 현장조사를 실시하였다. 어류를 이용한 인공호의 생물학적 평가 시, 미국 환경부에서는 조사 빈도를 연 1회 수체 안정기에 실시하고 있다

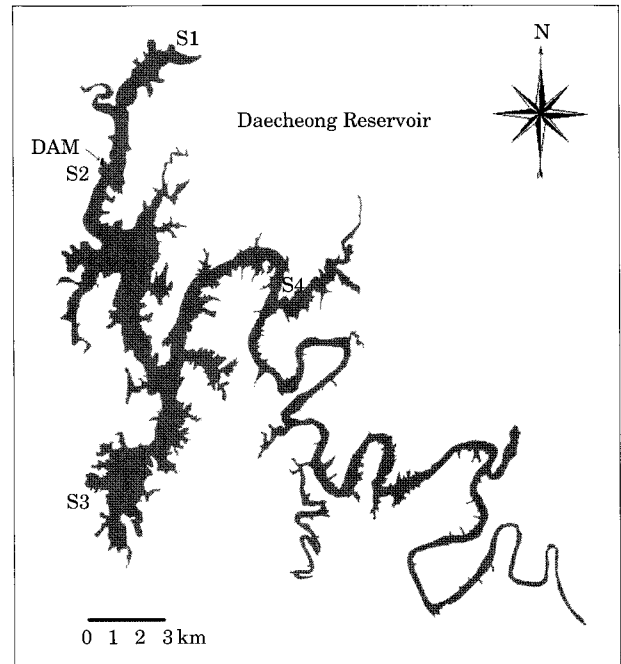


Fig. 1. The map showing the sampling site in Deacheong Reservoir.

(U.S. EPA, 1998). 이는 수체 안정기에 대부분 어종의 행동반경이 일정지역을 벗어나지 않으며 (Funk, 1957; Gerking, 1959; Cairns and Kaesler, 1971; Hill and Grossman, 1987), 가뭄이나 홍수에 상관없이 10년 동안 안정적인 어류군집 유지한다는 연구 결과 (Ross et al., 1985; Matthews, 1986)가 제시되어 이를 뒷받침하고 있다.

조사 지점은 호소의 특성과 환경부 지점을 고려하여 4개의 지점 (Fig. 1)을 선정하였다. 자세한 조사지점은 다음과 같다.

- S1 : 충북 청원군 문의면 (청주취수탑 부근)
- S2 : 충북 청원군 현도면 대청댐 (본댐 부근)
- S3 : 대전 대덕구 추동 (대전취수탑 부근)
- S4 : 충북 보은군 회남면 (회남대교 부근)

### 2. 조사 방법

본 연구에서의 어류 채집은 U.S. EPA (1998)의 정수생태계 평가 기법 (Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)을 일부 적용·평가하였다. 본 평가 기법의 적용을 위해 어류 채집 지점의 수심은 3~4m 미만의 수심이 얇은 호소의 연안부 (Littoral Zone)에서 실시하였고, 어류 채집 도구로는 투망 (망목: 5×5 mm), 어류채집용 전기 충격기 (12 V, 24 A) 및 족대 (망목: 4×4 mm)를 동시에

**Table 1.** The Lentic Ecosystem Health Assessment Model (LEHA Model), based on the physical, chemical, and biological metrics.

Category	Metric component	Scoring criteria		
		5	3	1
Species composition	M <sub>1</sub> . Total # of native species	>67%	33~67%	<33%
	M <sub>2</sub> . Number of sensitive species	>67%	33~67%	<33%
	M <sub>3</sub> . % individuals as tolerant species	<5%	5~20%	>20%
Trophic composition	M <sub>4</sub> . % individuals as omnivores	<20%	20~45%	>45%
	M <sub>5</sub> . % individuals as insectivores	<20%	20~45%	>45%
Fish abundance & Individual health	M <sub>6</sub> . Total individual number	>67%	33~67%	<33%
	M <sub>7</sub> . % individuals as exotics	0%	0~1%	>1%
	M <sub>8</sub> . % individuals with anomalies	0%	0~1%	>1%
Physical habitat condition	M <sub>9</sub> . % Vegetation coverage	<33%	33~76%	>77%
Chemical conditions	M <sub>10</sub> . Conductivity ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )	<81	81~385	>385
	M <sub>11</sub> . Tropic State Index (Chlorophyll- <i>a</i> )	<40	40~50	>50

이용하였다. 수심이 얇은 수초 근처 지역에서는 죽대를, 호소에 하천이 유입되는 곳의 연안부 및 수심이 있는 유수지에는 전기 충격기(12 V, 24 A)를, 호소 연안대의 개방된 구간에서는 투망(망목: 5×5 mm)을 이용하였다. 채집 소요시간은 60분으로 제한하였으며, 채집구간은 각 조사 지점 연안대의 100 m 구간 내에서 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류의 동정은 Nelson (1994)의 분류체계를 따랐고, 김과 박(2002), 김(1997) 및 최(1987)에 의거하여 동정하였으며, 동정이 확실치 않은 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정한 후 실험실로 운반하여 분류하였다.

서식지 상태(% vegetation coverage)는 미국 환경부(U.S. EPA, 1994)의 청정 호소 프로그램과 환경모니터링 및 평가 프로그램에서 제시되어진 잠재적 대형수생식물 메트릭(Crowder and Painter, 1991)을 도입하였으며, 서식지의 식피율(% vegetation coverage)을 측정 결과로 하였다.

전기전도도(Conductivity) 측정은 전기전도도 측정계(YSI model 33)에 전원을 넣고 측정 정점의 물로 셀을 2~3회 씻어준 다음 시료 중에 셀을 잠기게 하여 전기전도도를 측정하였다. 현장의 온도 하에서 측정된 전기전도도 수치를 현장 온도로 온도 보정(25°C)하여 측정 결과로 하였다.

Chlorophyll-*a* (Chl-*a*)의 측정은 에탄올 추출법(Sartory and Grobbelaar, 1984)을 이용하였으며, 분광광도계(Beckman Model DU-65)를 이용하여 흡광도를 측정한 후 Chlorophyll-*a*의 농도를 측정하였다.

### 3. LEHA Model 설정법

본 연구에서 수정·개발된 LEHA 모델의 설정을 위하여 메트릭 수 및 각 메트릭의 속성은 Table 1과 같다. 메트릭 수의 결정을 위하여 호소의 생물학적, 물리적, 화학적 특성을 반영하여서 모델 설정 작업이 선행되었다(Table 1). 본 연구에서는 정수생태계 건강성 평가를 위하여 기존의 어류의 다변수 모델을 이용한 연구(안, 2001b)에 기반을 두어 모델을 개발하였으며, 메트릭 수는 지역적 특성을 고려하여 선정하였다.

#### 1) 어류를 이용한 생물학적 평가 메트릭

본 연구에서의 생물학적 평가 메트릭은 안 등(2001a, b)에 의하여 우리나라 생태 특성에 맞게 수정·보완된 모델을 기반으로 하였다. 본 연구는 정수생태계를 대상으로 하였기 때문에, 여울성 저서중수 메트릭을 제거하였고, 육식성 본토종의 개체수 빈도는 호소의 건강성 변수에 부적절하여 모델 메트릭에서 제외하였다. 수체 내 생물 지표종 선정 및 서식지 길드에 대한 분석은 국내외 문헌 및 현장채집어류를 이용하여 분석·평가 하였다(김과 박, 2002). 수 환경 내에서 트로픽 길드에 대한 분석 기준은 지형적, 국지적 생태특성을 반영해야 하기 때문에(Karr *et al.*, 1986), 국내에서 널리 인용되는 담수 어류의 종별 분류 및 생태적 특성을 기술한 도감 및 어류문헌(최, 1989; 김, 1993; 최, 1994; 김, 1997)을 이용하였고, 현장 채집 종을 분석하여 문헌을 보완하였다. 비정상종의 개체별 증상 분석은 어류의 개체별 건강성을 위하여 외형의 비정상성 감별을 실시하였으며, 외형적 감별은 미국 환경부(U.S. EPA, 1993)의 방법을 따랐다.

2) 물리적 서식지 평가 메트릭

호소의 물리적 변수로서 미국 환경부(U.S. EPA, 1994)의 청정 호소 프로그램과 환경모니터링 및 건강성 평가 프로그램에서 제시되어진 잠재적 대형수생식물 메트릭(Crowder and Painter, 1991)을 도입하였다. 우리나라의 호소 환경에 적합하게 변형한 서식지 수변식물의 식피율을 LEHA Model의 변수로 이용하였다.

3) 화학적 수질 평가 메트릭

화학적 수질 변수로는 전기전도도(Conductivity at 25 °C) 지수와 Carlson (1977)의 Trophic State Index (TSI)를 변수로 적용하였다. 전기전도도 지수는 현장에서 측정이 아주 용이하며, 다양한 수질변수들과 수질특성을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다(An, 2001). 본 연구에서는 전기전도도 지수를 메트릭으로 선정하였는데 전기전도도 값과 호소의 수질지표로 이용되어지는 화학적 산소요구량(COD<sub>Mn</sub>)과 높은 상관관계를 보였다. 두 수질 지표간의 회귀분석은 SPSS (2004, Version 12.0 KO for windows) 프로그램을 이용하여 실시하였다. 결과에 따르면, 전기전도도가 COD의 변이를 77%까지 설명하였다( $R^2=0.774$ ,  $p<0.01$ ,  $n=150$ ). 또한 현장에서 측정이 간편하여 수질을 효율적으로 반영한다는 장점을 가지고 있기 때문에 COD의 유기물 오염특성을 반영하는 메트릭이 선정되었다.

호소의 부영양화 지수를 정량화하기 위하여 Carlson (1977)의 Tropic State Index (TSI)를 이용하였으며(Carlson, 1992), 이 중 TSI(Chl-*a*)를 LEHA 모델의 변수로 이용하였다. TSI(Chl-*a*)를 이용하여 호소의 오염도를 평가하는 방법은 다른 방법에 비해 간단하면서도 수질의 특성을 종합적으로 고려할 수 있는 장점을 가지고 있는 것으로 알려져 있어 메트릭으로 선정되었다.

4. LEHA 모델 등급

본 연구에서는 LEHA 모델 개발을 위해 우리나라 호소 생태 특성에 맞게 수정하였으며, 총 11개의 메트릭을 개발하였다. 이용된 메트릭은 본 연구 대상 호소인 대청호에 직접 적용하였다. 각 조사 지점의 LEHA 모델의 등급은 다음과 같이 구분하였다. 메트릭에 1, 3, 5의 수치값을 부여하였으며, 총 11개 조사 메트릭 점수를 합산하여 53~55는 최적 상태(Excellent), 43~47은 양호상태(Good), 35~39는 보통 상태(Fair), 23~29는 악화상태(Poor), 17 이하는 극히 악화된 상태(Very poor)의 5개 범주로 구분하여 호소 생태 건강성 평가를 실시하였다. 각 등급의 계급간격은 미국 환경부(U.S. EPA, 1993) 방법을

수정한 후 적용하였다.

결 과

1. LEHA 모델의 메트릭 (Metric: M) 특성분석

종 다양도 및 생태 지표특성을 반영한 메트릭은 M<sub>1</sub>(총 본토종수), M<sub>2</sub>(민감성 어종의 개체수), M<sub>3</sub>(내성 지표종의 개체수빈도)를 호소의 생태적 특성에 맞게 적용하였으며, 수체 내 에너지 흐름인 영양단계를 반영하는 메트릭은 M<sub>4</sub>(잡식성종의 상대빈도), M<sub>5</sub>(본토 총식성종의 상대빈도)를 적용하였고, 개체 풍부도 및 건강성을 반영한 메트릭은 M<sub>6</sub>(총개체수), M<sub>7</sub>(외래종 빈도) 및 M<sub>8</sub>(개체의 비정상도 빈도)을 적용하였다. 또한, 호소의 물리적 서식지 상태를 반영한 메트릭인 M<sub>9</sub>(호소의 수변 식피율)와 화학적 수질 상태를 반영한 메트릭인 M<sub>10</sub>(전기전도도 지수), M<sub>11</sub>(부영양화도 지수)을 새롭게 개발하여 총 11개의 메트릭을 호소 생태건강성 평가에 적용하였다. 각 메트릭의 특성 및 속성은 다음과 같다(Table 1).

M<sub>1</sub>: 본 항목은 환경이 악화된 지역에서는 종수가 감소하는 특성을 반영한 메트릭으로서 본 연구에서 잡종과 도입종은 본 항목에 제외시켰다. 대부분의 온대성 호소에서 수질이 오염될수록 총 종수는 감소하는 특성을 반영한 메트릭이다.

M<sub>2</sub>: U.S. EPA에 의거하여 내성종, 민감종, 중간종으로 구분하였으며, 어종 구분은 안 등(환경부, 2005) 기존 자료에 의거하였다. 본 조사항목은 유기성 및 무기성 부유물질로 인한 서식지의 하상구조 변경, 낮은 용존산소량, 수온 상승 및 독성 물질 등으로 인하여 종의 감소가 기대되는 특성을 살린 메트릭이다.

M<sub>3</sub>: 본 모델에 이용된 내성종은 잉어(*Cyprinus carpio*), 붕어(*Carassius auratus*), 피라미(*Zacco platypus*) 등과 같은 수질 저하 및 오염에 상대풍부도가 증가하고, 환경변화에 적응이 강한 종을 이용한 메트릭으로서, 내성종의 개체수 빈도가 오염도 증가에 따라 증가하는 속성을 반영한 메트릭이다.

M<sub>4</sub>: 동·식물을 구분하지 않고 섭식하는 종으로 정의되는 잡식성 어종을 반영한 메트릭으로서, 서식지의 물리·화학적 특성이 질적으로 하강함에 따라 잡식성 어종의 상대풍부도가 증가하는 속성을 반영한 메트릭이다(Ohio EPA, 1989).

M<sub>5</sub>: 주로 수서 무척추동물물 섭식하는 어종으로서, 서식지의 물리·화학적 특성이 질적으로 하강함에 따라 총식성 어종의 풍부도는 감소하는 속성을 반영한 메트릭이

다.

M<sub>6</sub>: 개체군의 풍부도를 평가하는 메트릭으로 (U.S. EPA, 1991), 오염도에 따라 개체군의 풍부도가 감소하는 효과를 반영하는 메트릭이다. 이를 위해 최대 종 풍부도 선을 산정하였다.

M<sub>7</sub>: 환경의 질적 저하에 따라 도입종의 상대 풍부도는 증가하는 특성을 반영한 메트릭으로 미국 환경부(U.S. EPA, 1991) 기준을 적용하였다. 우리나라의 경우 특히 외래종인 배스는 외래 육식종으로서 본토종의 치어 및 성체를 섭식하여 본토종 개체군 감소에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 이런 생태계 교란특성을 반영한 메트릭이다.

M<sub>8</sub>: 어류의 건강상태를 대표하는 메트릭으로서, 본 조사에서는 Sanders *et al.* (1999)의 방법에 따라 DELT (Deformity, Erosion, Lesion, Tumors)로 비정상성을 구분하였다.

M<sub>9</sub>: 호소 연안대의 서식지 특성을 반영한 메트릭으로서 수생식물의 피도를 나타내는 수변 식피율을 이용하였다. 이는 미국 환경부(U.S. EPA, 1994)의 청정호소프로그램, 환경모니터링 및 건강성 평가 프로그램에서 제시되어진 잠재적 대형수생식물 메트릭(Potential macrophyte metric, Crowder and Painter, 1991)을 도입한 것으로 물위로 나오는 유수식물(Emergent macrophyte)의 피도를 적용하였다. 유수식물은 조류나 수중식물과 직접적인 영양물질 경쟁을 하지 않으나 영양물질이 유입됨에 따라 성장이 촉진되고, 그 수가 증가하는 경향을 보인다(Harper, 1992). Harper and Stewart (1987)은 스코틀랜드의 3개 호소를 대상으로 갈대 식물의 밀도에 대하여 연구를 하였는데, 연구 결과 부양양화에 따라 광합성 효율이 증가하는 것을 제시하여 이를 뒷받침하고 있다. 따라서 호소 연안대의 유수식물의 식피상태에 따라 77% 이상은 부영양호로 "1", 33~76%는 중영양호로 "3", 33% 이하는 빈영양호로 "5"를 산정하였다.

M<sub>10</sub>: 현재 우리나라 호소의 주요 수질기준으로 사용되고 있는 COD의 기준 값을 반영하기 위한 메트릭으로서 이를 위하여 현재 측정되고 있는 주요 수질 항목들과의 상관분석과 회귀분석을 실시하였다. 이 중 호소의 이화학적 수질상태를 반영한 지수인 전기전도도(Conductivity) 변수를 이용하였으며, 이는 현장 측정이 간편하고 효율적으로 수질을 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그 결과, 전국의 150개 호소에서 전기전도도 값과 호소의 수질지표로 이용되어지는 화학적 산소요구량(COD<sub>Mn</sub>) 항목을 SPSS (2004, Version 12.0 KO for Windows)를 이용하여 회귀분석(Regression analysis)을 한 결과 큰 상관성을 보였다(Fig. 2). 결과에 따르면,  $COD_{Mn} = 4.42 \times \text{Log}_{10}$

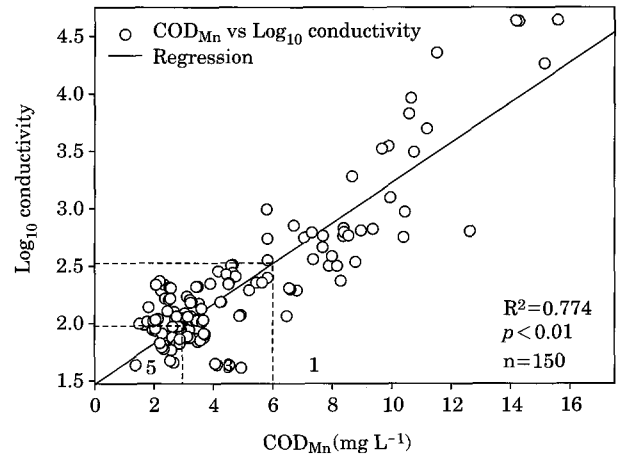


Fig. 2. The correlation of COD<sub>Mn</sub> to conductivity in various Korean reservoirs.

(Cond) - 5.43 ( $R^2 = 0.774$ ,  $p < 0.01$ ,  $n = 150$ )로서 전국의 150개 호소에서의 전기전도도 값은 COD<sub>Mn</sub>의 변이를 77.4% 설명하고 있다(Fig. 2). 환경부 자료에 의하면 COD<sub>Mn</sub>의 값이 1 mg L<sup>-1</sup> 이하는 1등급, 3 mg L<sup>-1</sup> 이하는 2등급, 6 mg L<sup>-1</sup> 이하는 3등급, 8 mg L<sup>-1</sup> 이하는 4등급 순으로 명시되어 있으며, 이를 적용하여 COD<sub>Mn</sub>의 수질 등급을 전기전도도로 환산한 결과 전기전도도 값이 81  $\mu\text{S cm}^{-1}$  이하면 "5", 81~385  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이면 "3", 385  $\mu\text{S cm}^{-1}$  이상이면 "1"로 산정하였다. 이는 향후 추가적인 연구를 통하여 보정할 필요가 있다고 사료된다.

M<sub>11</sub>: 호소의 부영양화도를 정량화하기 위한 메트릭으로서 Carlson (1977)의 Trophic State Index (TSI)를 계산하여 적용하였다. 엽록소-a에 의거한 부영양화 지수 [Trophic State Index, TSI (Chl-a)]를 산정하여 호소의 영양 상태를 판단하여 적용하였다. 엽록소-a의 양은 1차 생산자인 식물플랑크톤 양을 파악하는 방법으로서, 호소의 영양 상태를 산정하여 수질 건강성을 측정하는 핵심 지표이다. 부영양화 지수는 수질 항목 상호간의 높은 상관관계를 보였는데, 이 중 TSI는 호소 내 총인(Total Phosphorus) 및 투명도(Transparency)와 밀접한 관계가 있으므로 부영양화를 평가하는데 중요한 지수가 되고 있다(Carlson, 1977). 부영양화 지수는 현재 미국 환경부(U.S. EPA, 1998)에서 호소의 부영양화를 평가하는데 사용되고 있는 모델로서 이를 근거로 국내 실정에 맞게 수정 보완하여 TSI (Chl-a) 값이 50 이상이면 "1", 40~50은 "3", 40 이하는 "5"로 산정하였다. Carlson (1977)이 제시한 엽록소-a와 TSI 값과의 상관식은 다음과 같다.

$$TSI(\text{Chl-a}) = 30.6 + 9.8 \text{Log}_{10}(\text{Chl-a})$$

2. 조사 지점별 메트릭 특성

S1에서 M<sub>6</sub>, M<sub>8</sub>은 각각 “5”의 메트릭 값을 보여 “양호 상태”를 나타냈고, M<sub>1</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>9</sub>, M<sub>10</sub>, M<sub>11</sub>은 각각 “3”으로 “보통상태”를 나타냈으며, M<sub>2</sub>, M<sub>4</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>7</sub>은 각각 “1”로서 “악화상태”를 나타내 생태 건강성 평가 “29”로 나타났다. 이는 내성도 및 섭식특성 측면에서 민감종과 충식성 어종의 개체수가 적게 나타났고, 내성종 및 잡식성 어종이 높게 나타났으며 (Fig. 4), 또한 외래종의 개체수가 높게 나타나 S1의 생태 건강성을 낮추는 원인이 되었다 (Table 2). 이런 결과로 볼 때 S1의 생태계 내에 교란이 일어난 것으로 사료된다.

S2에서 M<sub>6</sub>, M<sub>8</sub>, M<sub>11</sub>은 각각 “5”의 메트릭 값을 보여 “양호상태”를 나타냈고, M<sub>3</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>9</sub>, M<sub>10</sub>은 각각 “3”으로 “보통상태”를 나타냈으며, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>4</sub>, M<sub>7</sub>은 각각 “1”로서 “악화상태”를 나타내 생태 건강성 평가 “31”로 나타났다 (Table 2). 이는 민감종의 개체수가 적게 나타났고, 잡식성 어종의 개체수가 높게 나타났으며 (Fig. 4), 외래종의 개체수도 높게 나타나 생태 건강성을 낮추는 원인이 되었으며, 댐 축이라는 특성으로 인하여 총 본토종수가 적게 채집되었기 때문이라 사료된다.

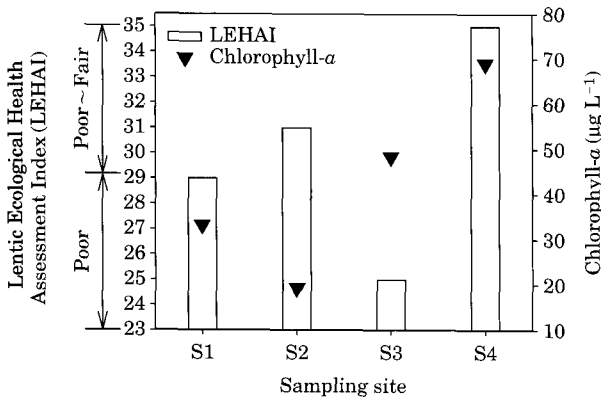


Fig. 3. The lentic ecological health assessments (LEHA) and chlorophyll-a values in Daecheong Reservoir.

S3에서 M<sub>8</sub>은 “5”의 메트릭 값을 보여 “양호상태”를 나타냈고, M<sub>1</sub>, M<sub>5</sub>, M<sub>9</sub>, M<sub>10</sub>, M<sub>11</sub>은 각각 “3”으로 “보통상태”를 나타냈으며, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>, M<sub>6</sub>, M<sub>7</sub>은 각각 “1”로서 “악화상태”를 나타내 생태 건강성 평가 “25”로 나타났다. 이는 비정상종은 나타나지 않아 높은 점수를 받은 반면 (Table 2), 내성도 및 섭식특성 측면에서 민감종과 충식성 어종의 개체수가 적게 나타났고, 잡식성 어종이 높게 나타났으며 (Fig. 4), 외래종의 개체수가 높게 나타나 낮은 점수를 받아서 전 지점에서 가장 낮은 생태건강성을 나타낸 것으로 사료된다 (Table 2).

S4에서 M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub>, M<sub>8</sub>은 각각 “5”의 메트릭 값을 보여 “양호상태”를 나타냈고, M<sub>1</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>, M<sub>9</sub>, M<sub>10</sub>, M<sub>11</sub>은 각각 “3”으로 “보통상태”를 나타냈으며, M<sub>2</sub>, M<sub>7</sub>은 각각 “1”로서 “악화상태”를 나타내 생태 건강성 평가 “35”로 전 지점에서 가장 높은 생태 건강성을 나타냈다 (Table 2). 이는 민감종의 개체수가 적게 나타났으며, 외래종의 개체수가 높게 채집되어 낮은 점수를 나타냈지만, 충식성 어종의 개체수가 많이 나타났고, 비정상종은 나타나지 않아서 높은 점수를 받은 것으로 사료된다 (Fig. 4).

3. 개발된 LEHA 모델에 의한 생태 건강성 평가

우리나라 호소에 맞게 수정·재개발된 생태계 건강성 평가 기법인 LEHA 모델을 이용한 대청호의 생태건강성 평가에 의하면, 조사결과 전 지점 평균 30으로서 “보통상태~악화상태” (Fair~Poor)로 나타났다. 지점별 건강성 지수는 S4에서 35점으로 가장 높고, S3에서 25점으로 가장 낮게 나타났으며, S1은 29점, S2는 31점으로 나타나 지점별 일부 차이를 보였다 (Table 2).

어류를 이용한 생물학적 평가 결과, 총 21종 1,650개체가 채집되었으며, 이중 외래종은 지점별 9%, 19%, 27%, 14%로 출현하여 전 지점에 평균 16%로 나타났다. S1에서는 11종 504개체, S2에서는 9종 560개체, S3에서는 10종 183개체, S4에서는 14종 403개체가 나타났다. 이 중 S2가 S4보다 종수는 적은데 비하여 개체 수는 높게 나

Table 2. The Lentic Ecosystem Health Assessments (LEHA), based on biological, physical and chemical parameters the 11 metric models.

Site	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>9</sub>	M <sub>10</sub>	M <sub>11</sub>	LEHA score (Criteria)
S1	9 (3)	2 (1)	15.2 (3)	84.6 (1)	12.6 (1)	460 (5)	9.6 (1)	0 (5)	35 (3)	124 (3)	46 (3)	29 (P)
S2	7 (1)	0 (1)	8 (3)	52 (1)	44.3 (3)	452 (5)	23.9 (1)	0 (5)	0 (5)	120 (3)	43 (3)	31 (F~P)
S3	8 (3)	0 (1)	21.8 (1)	65.4 (1)	33.1 (3)	133 (1)	37.6 (1)	0 (5)	65 (3)	108 (3)	47 (3)	25 (P)
S4	12 (3)	4 (1)	15.2 (3)	25.3 (3)	73.9 (5)	348 (5)	15.8 (1)	0 (5)	75 (3)	126 (3)	49 (3)	35 (F)

Biological parameters=M<sub>1</sub>~M<sub>8</sub> (M<sub>1</sub>~M<sub>3</sub>: Species composition, M<sub>4</sub>, M<sub>5</sub>: Trophic composition, M<sub>6</sub>~M<sub>8</sub>: Fish abundance and individual health) Physical habitat parameter=M<sub>9</sub>, Chemical parameters=M<sub>10</sub>, M<sub>11</sub>

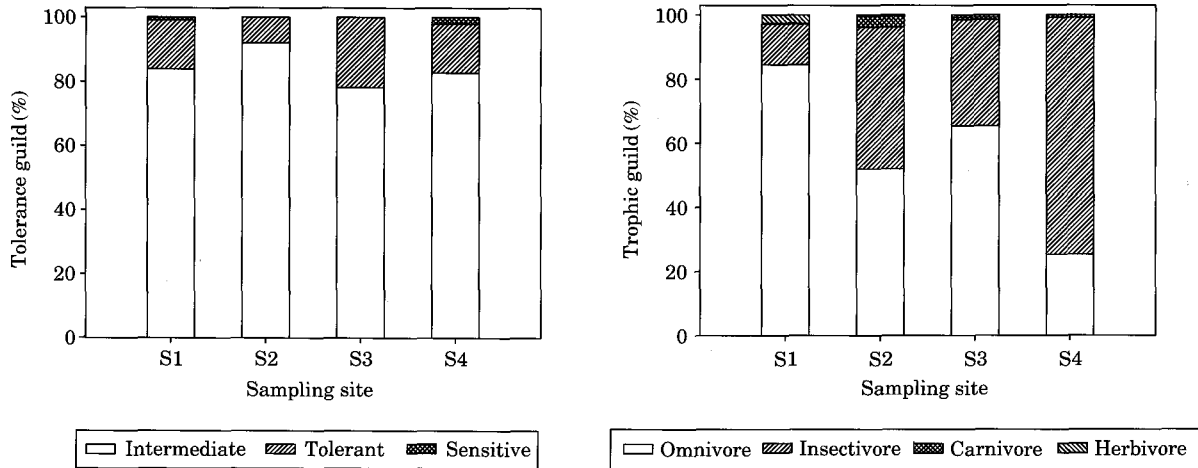


Fig. 4. The relations of mean LEHA (Lentic Ecological Health Assessment) values to relative proportions of tolerance guilds and trophic guilds.

Table 3. Tolerance guild, trophic guild, and habitat guild in Deacheong reservoir. The species list was rearranged by the sequence of sensitive (S), intermediate (I), and tolerant species (T).

Species	Tolerance guild	Trophic guild	Habitat guild	S1	S2	S3	S4
1 <i>Plecoglossus altivelis</i>	S	H		3			
2 <i>Siniperca scherzeri</i>	S	C	RB	1			
3 <i>Hamibarbus longirostris</i>	S	I					2
4 <i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	S	O					1
5 <i>Acheilognathus lanceolatus</i>	S	O					3
6 <i>Iksookimia koreensis</i>	S	I	RB				1
7 <i>Rhinogobius brunneus</i>	I	O	RB	58	200	44	250
8 <i>Tridentiger brevispinis</i>	I	O	RB	327	200	60	35
9 <i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	I	C		1	16		3
10 <i>Misgurnus mizolepis</i>	T	H		8	1		
11 <i>Carassius auratus</i>	T	O		1	1		1
12 <i>Zacco platypus</i>	T	O		35	21	12	3
13 <i>Hemiculter eigenmanni</i>	T	O		26	13	10	44
14 <i>Rhodeus uyekii</i>	T	O					1
15 <i>Squalidus japonicus coreanus</i>	T	O				2	
16 <i>Channa argus</i>	T	C				1	
17 <i>Cyprinus carpio</i>	T	O				3	
18 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	T	H				1	
19 <i>Squalidus gracilis majimae</i>	T	I					4
20 <i>Lepomis macrochirus</i>	T	I		35	98	16	31
21 <i>Micropterus salmoides</i>	T	C		9	10	34	24
Total number of species				11	9	10	14
Total number of individual				504	560	183	403

타났다 (Table 3). 내성종은 S1과 S4에서 각각 피라미 (*Zacco platypus*)가 14%와 16%가 채집되었다. 섭식 특성에서는 잡식성 어종이 S1, S2, S3, S4가 각각 85%, 51%, 65%, 25%로 S1이 가장 높게 나타났으며, 충식성 어종은 S1, S2, S3, S4가 각각 13%, 44%, 33%, 74%로 출

현하여 S4가 가장 높게 나타났으며, 내성도 특성에서는 S1, S4에서만 민감종이 각각 22%, 33%로 나타났고, 그 외의 지점에서는 출현하지 않았다 (Fig. 4).

물리적 서식지 평가지수인 수변 식피율은 S4에서 75%로 매우 높아 악화된 것으로 나타났고, S2에서는 0%로

수변의 식피가 전혀 없어 메트릭 값은 양호한 상태로 나타났다. 따라서 S2는 5점, 그 외의 지점은 3점으로 산정하였다.

화학적 수질 평가지수인 전기전도도는 108~126  $\mu\text{s cm}^{-1}$ 의 변이를 보였으며, S3에서 108  $\mu\text{s cm}^{-1}$ 로 가장 낮은 수치로 나타났고, 그 외의 지점에서는 120  $\mu\text{s cm}^{-1}$  이상의 수치로 나타났다. 부영양화 지수(TSI)는 43~49로 변동 하였는데 S2에서 43점으로 가장 낮은 수치를 보였으며, S4에서는 49점으로서 가장 높게 나타났다.

고 찰

본 연구결과에 따르면, 대청호의 생태 건강성은 일부 지점을 제외하고, 물리적 서식지 지수가 적절히 반영된 것으로 사료된다(Fig. 3). 호소의 최상류인 S3의 생태 건강성은 25 “악화 상태”로 전체 조사지점 가장 악화된 지점으로 나타났다. S3은 전기전도도가 가장 낮게 나타났지만, 내성도 측면에서 내성종이 채집어류의 약 22%를 차지하고 있으며, 하천차수에 따른 어류의 총 개체수도 적게 채집되어 낮은 점수를 나타내 다른 지점에 비하여 S3의 생태 건강성이 현저히 낮게 나타났다. 이는 일반적으로 생태 건강성은 이화학적 수질의 영향을 받지만 이외의 물리적 서식지 교란이나 생물학적 교란 등 다른 요인에 의한 영향도 크게 작용하기 때문으로 사료된다(안, 2001b).

S4의 생태 건강성은 35 “보통 상태”로 전 조사지점 중 가장 높은 점수를 보였다. S4는 다른 지점보다 물리적 서식지 지수에서 낮은 점수를 나타냈지만, 총 종수에서 12종으로 가장 많이 출현하였고, 섭식특성에서 총식성 어종이 74%로 나타나 전 지점에서 생태건강성이 가장 높게 나타났다. 이는 S4가 대청호의 전이대로서 부영양화 경향을 보여서 물리적 측면에서는 낮은 점수를 보였으나, 영양단계 및 섭식특성에서 높은 점수를 나타냈기 때문에 전 지점에서 가장 높은 점수를 나타낸 것으로 사료된다.

S1의 생태 건강성은 29로서 “악화 상태”로 S3보다 총 개체 수 측면에서 높은 점수를 나타냈지만, S2에 비해 물리적 서식지에서 낮은 점수를 나타냈다. 영양단계 구조 입장에서 볼 때, 전 지점에 잡식종이 57%를 차지하고 있어 총식성 어종과의 상대 빈도를 비교하여 볼 때, 대청호의 수 환경 내 에너지 흐름에 있어서 구조적인 왜곡성을 나타내고 있다. 또한 외래어종으로는 전 지점에서 배스(*Micropterus salmoides*)와 블루길(*Lepomis macrochi-*

*rus*)이 채집되어 이런 경향은 대청호의 생태계의 교란을 일으켜 생태 건강성을 감소시키는 큰 원인이 되었다. 비정상개체는 전 지점에서 전혀 채집되지 않았다(Table 3). 상기 11개 다변수 모델을 이용하여 대청호의 생태 건강성 평가 결과에 따르면, 대청호의 생태건강성 평균값은 “30”으로서, “보통상태~악화상태”(Fair~Poor)로 나타났다.

본 연구를 통해 수정·개발된 연구 기법은 우리나라 정수생태계에는 최초의 적용사례이다. 하지만 호소생태계의 정확한 건강성 평가를 위해서는 향후 모델보정에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구에서는 정수 생태계의 건강성 평가를 위하여 물리적, 화학적, 생물학적 다변수 메트릭 평가모델을 개발하고, 개발된 모델을 이용하여 2005년 9월에 대청호의 생태 건강성을 평가를 실시하였다. 메트릭의 특성을 위하여 사용된 변수로는 생물학적 변수, 물리적 변수, 화학적 변수를 적용하였다. M<sub>1</sub>~M<sub>8</sub>의 메트릭은 어류를 이용한 생물지수 모델을 적용하였고, M<sub>9</sub>~M<sub>11</sub>의 메트릭은 문헌에 의거하여 수정보완 하였다(U.S. EPA, 1998). M<sub>9</sub>의 메트릭은 호소 연안대의 서식지 특성을 반영하였고, M<sub>10</sub>의 메트릭은 호소의 화학적인 수질상태를 반영하였다. 즉, M<sub>10</sub>의 결과에 따른 회귀식은  $\text{COD}_{\text{Mn}} = 4.42 \times \text{Log}_{10}(\text{Cond}) - 5.43$  ( $R^2 = 0.774, p < 0.01, n = 150$ )로서 전국의 150개 호소에서의 전기전도도 값은  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 의 변이를 77.4% 설명하고 있다. M<sub>11</sub>의 메트릭은 호소의 엽록소-a에 의거한 부영양화도 지수(Tropic State Index, TSI)를 이용하였다. 호소의 TSI(Chl-a)값에 따라 50 이상은 “1”, 40~50은 “3”, 40 이하는 “5”로 산정하였다. 상기 11개 다변수 모델을 이용한 대청호 생태계 건강성 평가 결과에 따르면, 대청호의 4개 지점 생태건강성 평균값은 “30”으로서 미국 환경부(U.S. EPA, 1993)의 등급에 의거하여 “보통상태~악화상태”(Fair~Poor)로 나타났다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 “내수면 잠재력 조사 및 발전 방안” 연구지원으로 수행되었음.

인 용 문 헌

교육부. 1997. 한국동식물도감. 제37권 동물편(담수어류). p.



- 629.
- 김만영, 최용수, 김재용, 김광렬. 1993. 세제 및 생활하수 관련 오염성분이 수질오염에 미치는 영향, *공업화학* 4(3): 564-568.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감 동물편(담수어류). 교육부.
- 김익수, 강중언. 1993. 원색한국어류도감. 아카데미서적.
- 김익수, 박중영. 2002. 원색도감 한국의 민물고기. 교학사.
- 안광국, 염동혁, 홍영표, 이성규. 2000. 어류군집을 이용한 금호강의 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 평가, *환경생물* 18(2): 215-226.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계의 평가, *환경생물* 19: 261-269.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수 및 서식지 평가 지수를 이용한 평창강의 수환경평가, *육수지* 34: 153-165.
- 최기철. 1987. 충남의 자연 담수어편. 한국 과학기술 진흥재단.
- 최기철. 1989. 한국의 민물고기. 서문당.
- 최기철. 1994. 우리가 정말 알아야 할 우리 민물고기 백 가지. 현암사.
- 최영길, 한명수, 안태영, 박노태, 홍사육, 한상욱, 이길철, 정규혁. 1989. 합성세제 중의 인성분이 수질오염에 미치는 영향, *육수지* p. 47-55.
- 환경부. 2005. 물 환경 종합평가방법 개발 조사연구. p. 350.
- An, K-G. 2001. Hydrological Significance on Interannual Variability of Cations, Anions, and Conductivity in a Large Reservoir Ecosystem. *Korean J. Limnol.* 34(1): 1-8.
- Cairns, J. Jr. and R.L. Kaesler. 1971. Cluster analysis of fish in a portion of the Upper Potomac River. *Transactions of the American Fisheries Society* 100: 750-756.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 22: 361-369.
- Carlson, R.E. 1992. Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs. p. 59-71. In *Enhancing the state's Lake Management Society*, Madison, WI.
- Crowder, A. and Painter. 1991. Submerged macrophytes in Lake Ontario: Current knowledge, importance, threats to stability, and needed studies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48: 1539-1545.
- Funk, J.L. 1957. Movement of stream fishes in Missouri. *Transactions of the American Fisheries Society* 85: 39-57.
- Gerking, S.D. 1959. The restricted movement of fish populations. *Biological Review* 34: 221-242.
- Harper, D.M. and W.D.P. Stewart. 1987. The effects of land use upon water chemistry, particularly nutrient enrichment, in shallow lowland lakes: comparative studies of three lochs in Scotland. *Hydrobiologia* 148: 211-229.
- Harper, D.M. 1992. Eutrophication of Freshwaters. Chapman and Hall, p. 120-123.
- Hill, J. and G.D. Grossman. 1987. Home range estimates for three North American stream fishes. *Copeia* 1987: 376-380.
- 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. p. 28, Illinois national History Survey, Special Publication 5, Champaign, IL.
- Nelson, J.S. 1994. Fishes of the world (3th ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Matthews, W.J. 1986. Fish faunal structure in an Ozark stream: Stability, persistence, and a catastrophic flood. *Copeia* 1986: 388-397.
- 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.
- Ross, S.T., W.J. Matthews and A.E. Echelle. 1985. Persistence of stream fish assemblages: Effects of environmental change. *American Naturalist* 126: 24-40.
- Sanders, R.E., R.J. Miltner, C.O. Yoder and E.T. Rankin. 1999. The use of external deformities, erosion, lesions, and tumors (DELT anomalies) in fish assemblages for characterizing aquatic resources: A case study of seven Ohio streams. In *Assessing the sustainability and biological integrity of water resources using fish communities* (TP Simon ed). CRC Press LLC.
- Sartory, D.P. and J.U. Grobbelaar. 1984. Extraction of chlorophyll-a from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* 114: 177-187.
- SPSS. 2004. SPSS 12.0 KO for windows. Apache software foundation.
- 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, USA.
- U.S. EPA. 1994. Environmental Monitoring and Assessment Program: Integrated quality assurance project plan for the Surface Waters Resource Group, 1994 acti-

vities, Rev. 2.00. EPA 600/X-91/080. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV.

U.S. EPA. 1998. Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria. EPA 841-B-98-007. U.S. EPA, Office of Water, Washington, D.C., USA.

U.S. EPA. 2002. Summary of biological assessment pro-

grams and biocriteria development for states, tribes, territories, and interstate commissions: streams and wadable rivers. EPA-822-R-02-048. U.S. EPA, USA.

(Manuscript received 6 September 2006,  
Revision accepted 10 November 2006)