

다각적 수환경지표를 이용한 영산호의 생태영향 평가

최 지 웅 · 안 광 국*

(충남대학교 생명과학부)

Evaluation of Yeongsan Lake Ecosystem Using Various Environment Parameters. Choi, Ji-Woong and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The purpose of this study was to evaluate the ecosystem of Yeongsan Lake using physical, chemical, and biological indicators. We evaluated the integrative ecosystem health using Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA) model, Qualitative Health Evaluation Index (QHEI) model, and chemical water quality. The models of LEHA and QHEI were modified as 10 and 7 metrics attributes, respectively. Also, we analyzed bioaccumulation of total mercury on various fish tissues by method of U.S. EPA 7473 using Direct Mercury Analyzer (Model DMA-80). Model values of LEHA model averaged 19 (range: 14~26, n=15), which indicated a "poor" condition, and had slightly spatial variations. Values of the QHEI in the all sites averaged 72, which were judged as a "fair" to "good" condition. The QHEI values varied from 48 (fair condition) to 99 (good condition) and showed large longitudinal gradients between the upper and lower reach. Conductivity and salinity were increased from the up-lake to downlake reach. Analysis of total mercury in fish tissues showed that levels of total Hg ranged between 0.002 and 0.087 mg L⁻¹ depending on the types of tissues. Overall, the ecosystem health in the Yeongsan Lake was judged as a "poor" and the effects of bioaccumulation on the fish tissues were minor. Therefore, it is necessary to keep an efficient management for the lake environment to maintain their ecological health.

Key words : ecosystem health, fish, LEHA, biological integrity, Yeongsan Lake

서 론

한반도 남서해안에 위치한 영산호는 전라남도 무안군과 영암군 사이에 위치한 인공 담수호로서 몽탄대교 부터 영산강 하구언까지 약 23.5 km의 구간을 지칭하고, 총 34.6 km²의 호수면적과 2억 5천만 톤의 유효저수량을 확보하고 있으며, 인근 중소도시의 상수원 및 농·공업용수로 이용되고 있다. 용수의 효율적인 이용을 위하여 영산강 상류에는 담양댐, 광주댐, 장성댐, 나주댐 등 4개의 다목적댐이 축조되어 있고, 하류에는 상수원 및 농·공업용수의 취수원에 염수유입을 막기 위하여 1981년 영

산강 하구둑이 완공되었다. 그러나 이러한 댐들과 하구둑의 건설은 수리·수문학적 변화를 일으켜 수질악화 및 부영양화를 가속화시키고 더 나아가 어류를 비롯한 여러 분류군들의 군집변화에 주요인으로 작용하고 있다(Leentvaar and Nijboer, 1986; 권, 1991; 이, 1992; 임과 최, 2005).

특히, 영산호는 영산강 본류 외에 여러 지류하천이 유입되면서 생활하수, 공장폐수, 축산폐수 등의 유입과 퇴적물의 집적으로 영산강 수계중에서도 오염이 심하다(Ki *et al.*, 2007). 또한, 연결수로를 통해서 영암호, 금호호와 연결되어 영산호의 수질오염은 영암호, 금호호의 수질에 곧바로 영향을 미치고 있어 영산호와 함께 부영양화 및

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

수질오염의 심각성이 매우 우려되고 있는 실정이다. 이러한 수문, 수질 및 물리적 변화와 더불어 최근 외래 도입 어류의 번성은 기존의 생물군집에 많은 변화를 초래할 것으로 예상되며 이에 대한 환경영향평가 및 대책마련이 시급한 상황에 있다.

과거, 영산호에서 시행되었던 수생태계 평가는 이·화학적 수질 및 수리·수문학적 평가가 주를 이루었으며(이 등, 1993; 박 등, 2001; 양과 최, 2003), 식물플랑크톤(김, 2003), 동물플랑크톤(유 등, 1987), 저서무척추동물(위, 1974), 어류(최, 1973; 위 등, 1977; 최 등, 1984; 송과 이, 1987) 등의 생물분류군을 이용하여 종 특성 분석, 분포현황 분석, 군집분석 등을 평가한 단편적인 연구만이 진행되어져 왔다. 그러나 이러한 기법은 수환경 내 생물 서식 특성 및 생태 건강성에 대한 정보 부재로 인하여 수생태계의 통합적 건강성을 평가하기 어렵기 때문에 하천 내 수질상태와 생물을 통합적으로 연구하는 수생태계 평가법이 절실히 요구되고 있는 실정이다(Karr, 1981).

정수생태계 건강성 평가는 호소생태계를 총체적으로 평가하고 진단할 수 있는 평가기법으로, 환경 선진국인 미국에서는 이미 정수생태계 평가모델을 개발하여(U.S. EPA, 1994) 호소생태계를 총체적으로 평가하는 호소 관리기법으로 이용하고 있다. 또한, 미 환경부(U.S. EPA, 1998)는 자연호 및 인공호의 생물평가 및 생물기준(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)을 마련하여 정수생태계의 건강성을 평가하는 도구로 이용하고 있다. 우리나라의 경우, 정수생태계의 총체적인 건강성 평가를 위하여 최근 안과 한(2007)이 정수생태계

건강성 평가(Lentic Ecosystem Health Assessment, LEHA) 모델을 개발하였고, 대청호에 적용한 바 있으나 그 이외에는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 영산호를 대상으로 다각적 수환경평가 지표인 이·화학적 수질지표, 어류모델에 의한 생물학적 건강성평가 지표(LEHA), 물리적 서식지평가 지표(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI) 및 어류조직 내 농축된 총수은 농도 지표 분석을 통하여 영산호의 현재 상태를 진단하고 더 나아가 영산호의 수질 관리 및 생태계 보전에 활용하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사 시기 및 조사 지점

본 연구의 조사지점은 영산호 하구언과 몽탄대교 사이의 5개 지점(Fig. 1)을 선정하였다. 1차 현장조사는 하천 내 유지유량이 가장 풍부한 시기인 2006년 7월(풍수기), 2차 현장조사는 장마 후 수체가 수리·수문학적으로 가장 안정된 시기인 2006년 10월(평수기)에 조사하였다. 또한, 3차 현장조사는 하천 내 유지유량이 감소되어 수환경 및 수질특성을 잘 반영하고 어류가 본격적으로 출연하는 시기인 2007년 5월(갈수기)에 실시하였다.

2. 어류 현장 조사 및 분석

현장 어류채집 방법은 정량화된 Catch per unit of effort (CPUE)를 위하여 채집거리는 200 m로 제한하였고, 조사지점 내 모든 서식지를 포함하였다. 조사 도구로는 투망(망목: 5×5 mm 이하), 족대(망목: 4×4 mm), 및 어류 채집용 전기충격기(12V, 24A)를 이용하였다. 총 채집 소요시간은 최대 종풍부도곡선(Maximum Species Richness Line)을 산정하여 50분으로 한정하였다. 어류의 효율적인 채집을 위하여 조사인원은 현장 채집 경험이 3년 이상인 조사원을 포함하여 3인 1조로 하였다. 채집된 어류는 현장에서 동정, 분류 및 개체수 산정을 한 후 바로 놓아주는 것을 원칙으로 하였다. 동정이 모호한 종의 경우 10% 포르말린 용액에 고정한 후 실험실로 운반하여 김(1997), 김과 강(1993), 김과 박(2002)에 의거하여 동정하였고 Nelson(1994)의 분류체계에 따라 분류하였다. 비정상어종의 외형적 감별은 U.S. EPA(1993)에 따라 기형(Deformity), 지느러미 짓무름(Erosion), 조직손상(Lesion) 및 종양(Tumors) 등으로 구분하여 분석하였다. 또한, 종 조성 분석을 위하여 군집 분석을 실시하였고, 군집

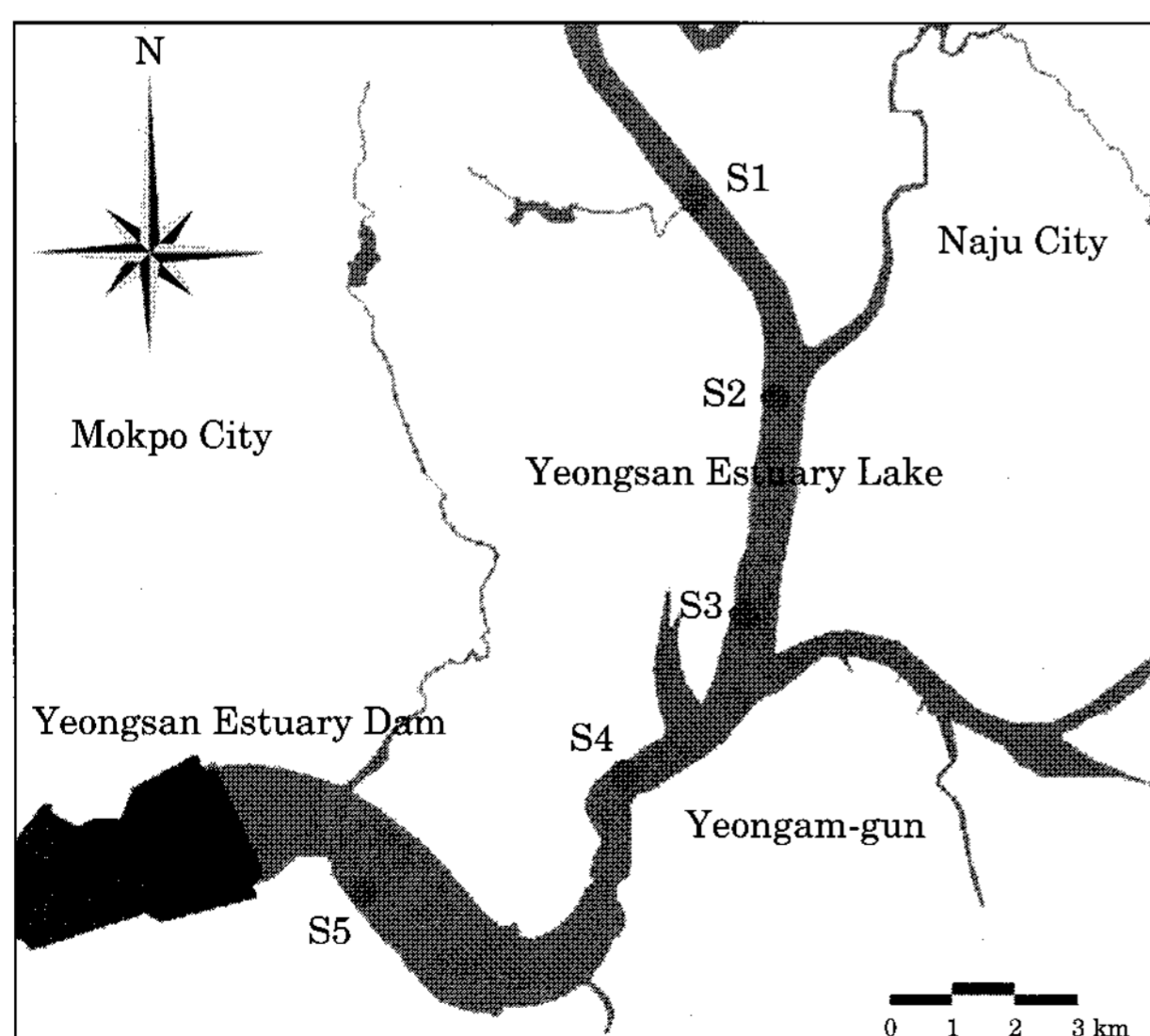


Fig. 1. Map showing each sampling site.

우점도 지수(Simpson, 1949), 종 풍부도 지수(Margalef, 1958), 종 다양도 지수(Shannon and Weaver, 1949) 및 종 균등도 지수(Pielou, 1975)를 산정하였다.

3. 일반 수질 항목 측정

일반 수질 항목 조사는 어류의 현장 조사와 동시에 실시하였고 수질 측정을 위하여 YSI 6600 다항목 수질 측정기를 이용하였다. 측정된 수질 항목은 수온, 용존산소량(Dissolved oxygen), 전기전도도(Conductivity, 25°C), 염도(Salinity), 탁도(Turbidity), 엽록소-a(Chl-a) 등 총 6개 항목이고, 각각의 수질값에 대하여 조사시기별 변화양상을 분석하였다.

4. 정수생태계 건강성 평가 모델의 메트릭 분석 및 진단

정수생태계 건강성 평가(LEHA) 모델은 U.S. EPA (1998)의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)에 기초를 두었으며, 이 모델을 우리나라에 맞게 수정·보완한 안과 한(2007)의 모델 조사 기법을 따랐다. 본 연구에 적용된 정수생태계 건강성 평가 모델의 세부 메트릭은 다음과 같다. M₁ 총 본토종수(Number of native species), M₂ 민감성 생태 지표종수(Number of sensitive species), M₃ 내성 지표종의 개체수빈도(Proportion of tolerant species), M₄ 잡식성종의 상대빈도(Proportion as a number of omnivore species), M₅ 본토 충식성 종의 상대빈도(Proportion as a number of insectivore species), M₆ 총개체수(Total number of individual), M₇ 외래종 빈도(Proportion as a number of exotic species), M₈ 개체의 비정상도 빈도(Proportion as a number of abnormal individual), M₉ 전기전도도(Conductivity), M₁₀ 부영양화도 지수(Trophic State Index(Chlorophyll-a))으로 각 메트릭 속성은 안과 한(2007)에 자세히 기술되어 있다. LEHA 모델 등급은 각 메트릭에 “5”, “3”, “1”의 모델값을 부여한 뒤, 각 메트릭의 최종값을 산정하여 최적상태(Excellent, 50~46), 양호상태(Good, 40~36), 보통상태(Fair, 30~26), 악화상태(Poor, 20~16), 최악상태(Very Poor, ≤10)의 5개 등급으로 대별하여 평가하였다(U.S. EPA, 1993).

5. 물리적 서식지 평가 모델(QHEI)

물리적 서식지 평가 모델은 Plafkin *et al.* (1989)과 Barbour *et al.* (1999)이 제시한 서식지평가 정성지수(Quali-

tative Habitat Evaluation Index, QHEI) 모델을 바탕으로 국내 호소 서식환경의 특성을 반영하여 수정·적용하였다. 물리적 서식지 평가 모델의 세부 메트릭은 M₁ 하상 구조/서식처 피복도(Substrate/Instream cover), M₂ 하상 매몰도(Embeddedness), M₃ 수량 상태(Channel flow status), M₄ 인위적 수로 변경도(Channel alteration), M₅ 제방 안정도(Bank stability), M₆ 제방식생 보호도(Bank vegetative protection), M₇ 천변 식생대의 폭(Riparian vegetative zone width)의 총 7개 메트릭이다. 서식지 평가 등급은 U.S. EPA (1993)의 기준을 적용하여 최적상태(Excellent, 140~116), 양호상태(Good, 106~78), 보통상태(Fair, 69~41), 악화상태(Poor, 32~4)의 4개 등급으로 대별하여 평가하였다.

6. 총수은 농축도 분석

총수은 농축도 분석 시 개체크기에 따른 총수은 농축도의 변이를 줄이고 지점 간 비교를 용이하게 하기 위하여 체장과 체중이 유사하고 전 지점에서 출현한 종을 선별하여 수은 분석을 실시하였다. 수은 분석은 총 5개의 조직에 대하여 실시하였고 선별된 개체의 간(Liver), 신장(Kidney), 아가미(Gill), 척추(Vertebra), 근육(Muscle)을 적출한 뒤 각 조직별로 수은직접분석기(Direct mercury analyzer, Model DMA-80)를 사용하여 가열기화금아말감법(U.S. EPA Method 7473)으로 수은 함량을 측정하였다(U.S. EPA, 2000).

결 과

1. 이·화학적 수질특성

영산호의 화학적 수질특성을 파악하기 위하여 수온, 용존산소량, 탁도, 전기전도도 및 염도에 대한 지점별, 계절별 변화양상을 분석하였다(Fig. 2). 수온은 풍수기인 1차 조사시 평균 25°C(범위: 24~25°C), 평수기인 2차 조사시 평균 24°C(범위: 23~26°C), 갈수기인 3차 조사시 평균 19°C(범위: 18~19°C)로 나타나 계절변이에 따른 수온차이를 보였다. 용존산소는 1차 조사시 평균 8.2 mg L⁻¹(범위: 7.4~9.9 mg L⁻¹), 2차 조사시 평균 7.7 mg L⁻¹(범위: 7.1~8.2 mg L⁻¹), 3차 조사시 평균 8.2 mg L⁻¹(범위: 7.1~11.2 mg L⁻¹)로 계절별로 큰 차이를 보이지 않았다. 탁도는 1차 조사시 평균 96 NTU(범위: 29~274 NTU), 2차 조사시 평균 30 NTU(범위: 13~55 NTU), 3차 조사시 평균 30 NTU(범위: 5~76 NTU)로 1차 조사에서 가

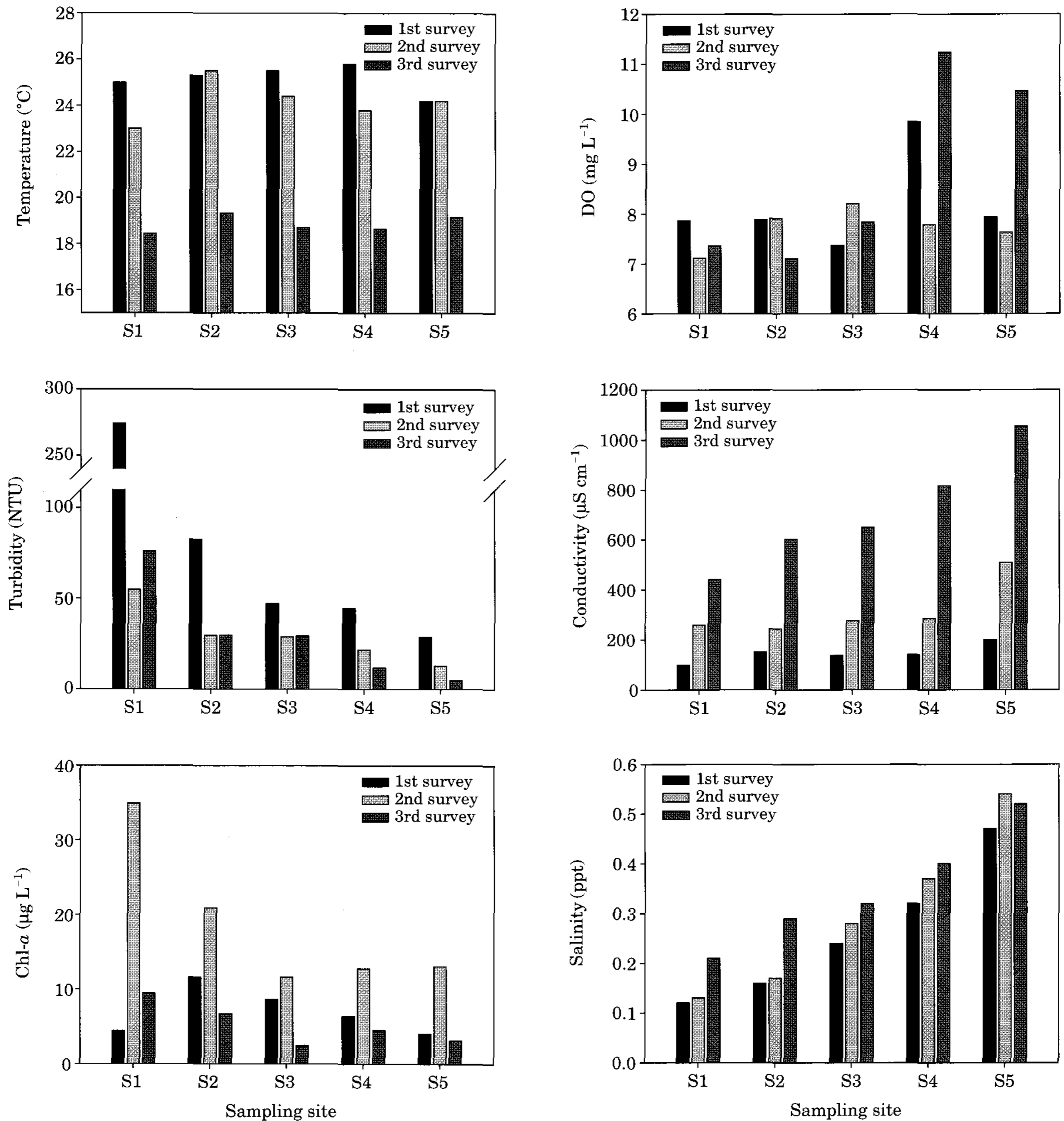


Fig. 2. Dynamics of temperature, DO, Turbidity, Conductivity, Chl-*a*, and salinity in each survey.

장 높게 나타났다. 이는 강우시 유입되는 유기물과 대량의 무기성 부유물(Inorganic suspended solids)에 의한 것으로 사료되었다. 전기전도도는 1차 조사 시 평균 145 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (범위: 99~200 $\mu\text{S cm}^{-1}$), 2차 조사 시 평균 315 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (범위: 244~509 $\mu\text{S cm}^{-1}$), 3차 조사 시 평균 713 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (범위: 440~1,055 $\mu\text{S cm}^{-1}$)로 갈수기인 3차 조사에서 높게 나타났다. 1차 조사 시 전기전도도는 강우에 의한 이온희석 현상에 의해 낮은 값을 보였고 3차 조사에

서는 유량의 감소로 오염물의 농도가 높아져 상대적으로 높은 값을 나타낸 것으로 사료되었다. 엽록소-*a*는 1차 조사보다 평수기인 2차 조사에서 높게 나타났다. 이것으로 보아 조류 생체량은 영양염류의 농도뿐만 아니라 수층의 안정화에 영향을 받는 것으로 판단되었다(An and Park, 2002). 또한 풍수기의 엽록소-*a* 농도가 평수기보다 낮은 이유는 풍수기 호소의 유입량과 방류량의 급격한 증가로 인한 수체류 시간의 감소로 인하여 조류 성장이 제한되

고 무기성 부유물질의 유입량 증가로 인하여 탁도 증가와 광투과도 감소에 의해 엽록소-*a*의 농도가 낮게 나타난 것으로 사료되었다.

지점별 분석에 따르면, 탁도는 지점 1(평균: 135 NTU, 범위: 55~274 NTU)에서 가장 높게 나타나 영산강으로 유입되는 유입수의 영향이 큰 것으로 나타났고 상류에서 하류로 갈수록 점점 감소하는 경향을 보였다. 전기전도도와 염도는 상류에서 하류로 갈수록 점점 증가하는 것으로 나타나 해수의 영향을 받으며, 수온과 용존산소량은 지점별로 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 어류의 종 조성 및 생태 지표 특성

본 연구의 어류 채집 결과에 따르면 영산호 1차 조사에서 7과 22종 389개체, 2차 조사에서 7과 21종 631개체, 3차 조사에서 7과 19종 330개체가 채집되어 총 10과 30종 1,350개체가 채집되었다 (Table 1). 채집된 어류 종과별 다양도는 잉어과 어류가 15종으로 가장 높았고, 그 외에 망둑어과가 4종, 검정우렁과, 미꾸리과, 송어과가 각각 2종 등의 순으로 나타났다. 한국 고유종은 1종(중고기, *Sarcocheilichthys nigripinnis morii*)이 확인되었고, 천연기념물과 보호종은 채집되지 않았다. 영산호에서 이루어진 기존의 연구에 따르면, 1986년 조사 시 12과 41종이 출현하였고(김 등, 1986), 송과 이(1988)에 의해 8과 46종이 서식하는 것으로 보고되었으나 본 연구에서는 10과 30종만이 확인되어 과거에 비하여 종다양도가 크게 감소하였다.

어류의 상대풍부도(Relative abundance) 분석에 따르면, 채집된 어종 중 전체 개체수의 5% 이상을 차지하는 종은 5종으로 큰납지리(*Acheilognathus macropeterus*, 28%), 치리(*Hemiculter eigenmanni*, 15%), 붕어(*Carassius auratus*, 14%), 배스(*Micropterus salmoides*, 12%), 떡붕어(*Carassius cuvieri*, 8%)로 나타났다.

내성도 길드(Tolerance guild) 분석에 의하면, 민감종(Sensitive species)은 0% (1개체), 내성종(Tolerant species)은 63% (850개체), 중간종(Intermediate species)은 37% (499개체)로 나타났다. 수질오염과 생태계 교란에 민감하게 반응하는 민감종은 지점 4에서만 1종이 채집되었고 그 외의 지점에서는 채집되지 않았다. 전 지점에서 내성종의 개체빈도가 높게 나타나고, 종수 면에서도 내성종 우점현상을 보여 영산호의 생태계 교란현상이 존재함을 시사하였다.

섭식특성 길드(Trophic guild) 분석에 의하면, 잡식성(Omnivore) 어종은 1,034개체로 77%, 육식성(Carnivore)

어종은 189개체로 14%, 총식성(Insectivore) 어종은 75개체로 6%, 초식성(Herbivore) 어종은 35개체로 3%, 여과섭식성(Filterfeeding) 어종은 17개체로 1%를 차지하였다. 지점별 상대빈도 분석에 따르면, 거의 모든 지점에서 잡식성 어종의 상대빈도가 높게 나타나 육식종 및 총식종에 비하여 우점하는 것으로 나타났다.

Karr(1981)와 U.S. EPA(1993)의 보고에 따르면, 내성종과 잡식종의 풍부도는 유기물 오염, 서식지 파괴 등 수환경의 이·화학적 질적 하강에 따라 어종의 풍부도가 증가하는 경향을 보인다. 영산호의 경우, 내성종과 잡식종의 상대풍부도가 각각 63, 77%로 나타나 화학적 수질악화나 물리적 서식지 교란현상이 심각한 것으로 사료되었다.

환경의 질적 저하에 따라 증가하는 양상을 보이는 외래어종(Exotics species)은 전 지점에서 채집되어 어종구성 및 영양구조의 교란을 일으켜 생태계 건강성에 영향을 주는 것으로 사료되었다(Ohio EPA 1989; U.S. EPA 1993). 또한, 피부손상 및 기형 등 외형적 비정상 상태를 보인 어종이 다수 채집되어 수환경의 질적저하를 시사하였다. 조사기간 중 비정상 상태를 보인 주요 어종은 붕어(*Carassius auratus*), 잉어(*Cyprinus carpio*), 치리(*Hemiculter eigenmanni*)로서 피부짓무름, 종양 및 지느러미 변형을 보였다.

각 지점별 종다양도, 균등도, 우점도 지수를 분석한 결과에 따르면, 다양도지수는 군집의 종풍부 정도와 개체수의 상대적 균형성을 의미하는 것으로 지점 1에서 0.84로 가장 높게 나타났고, 지점 2에서 0.63로 최소치를 보였다. 풍부도지수는 지점 1에서 2.32로 가장 높게 나타났고, 지점 2에서 1.53로 가장 낮게 나타나 다양도 지수와 유사한 양상을 보였다. 균등도지수는 군집 내 종 구성의 균일한 정도를 나타내는 것으로 지점 4에서 0.90로 가장 높게 나타났고, 지점 2에서 0.66로 가장 낮게 나타났다. 특정종이 우세한 정도를 나타내는 우점도지수의 경우 지점 2에서 0.35로 가장 높게 나타났고, 지점 1에서 0.19로 최소치를 보였다. 일반적으로 인공호에서는 특정종의 개체들이 많이 출현하여 우점도 지수가 높게 나타나고 다양도 및 균등도 지수가 낮게 나타난다(최 등, 2003; 최 등, 2004). 그러나 영산호의 경우 다양도, 균등도 지수가 높게 나타나고 우점도 지수가 낮게 나타나 기존의 연구와 다른 경향을 보였다(최 등, 2005). 이는 영산호가 다른 인공호와 달리 높은 염도와 탁수에 의한 것으로 사료되었다.

3. 생물학적 생태계 건강성 진단 (LEHA)

안과 한(2007)에 의하여 정수 생태계 특성에 맞게 수

Table 1. Fish fauna and the various guilds of trophic level, tolerance and habitats in Yeongsan Lake.

Species	Tolerance guild		Trophic guild		Habitat guild		1st survey					2nd survey					3rd survey					
	IS	TS	O	I	RB	g	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	
Anguillidae																						
<i>Anguilla japonica</i>	IS		C		-																	1
Engraulidae																						
<i>Coilia nasus</i>	IS		C		-											1						
Cyprinidae																						
<i>Abbotina rivularis</i>	IS		O		-		6						17									
<i>Acheilognathus macropeterus</i>	IS		O		-		2		2	1	32	282	4	22	16	5	3	4	7			
<i>Aphyocypris chinensis</i>	IS		O		-									1								2
<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	IS		C		-								2									2
<i>Rhodeus ocellatus</i>	IS		O		-		1	1			5				3							3
<i>Sarcocheilichthys nigripinnis morii</i>	IS		I		RB				2	5					2							5
<i>Hemibarbus labeo</i>	SS		I		-				1													
<i>Acheilognathus rhombeus</i>	TS		H		-						2											
<i>Carassius auratus</i>	TS		O		-		8	21	4				1				7	5	4			4
<i>Carassius cuvieri</i>	TS		O		-		1	78	1	3	4						2	2	10			3
<i>Cyprinus carpio</i>	TS		O		-		4	10	1	1	2						3	3	4			4
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	TS		O		-		10	30	21	5	17	9	5				41	43	1			14
<i>Pseudorasbora parva</i>	TS		O		-			12	1			2					2	9				2
<i>Rhodeus notatus</i>	TS		O		-		16	12									2	5				
<i>Zacco platypus</i>	TS		O		-		8				4						2	5				
Cobitidae																						
<i>Cobitis lutheri</i>	IS		I		RB						3						1					
<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS		H		-		2				11						7	5	2			6
Bagridae																						
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	IS		C		-		1			1							2					
Mugilidae																						
<i>Chelon haematocheilus</i>	IS		F		-				2													
<i>Mugil cephalus</i>	IS		F		-				2						1	2						
Adrianichthyidae																						
<i>Oryzias sinensis</i>	IS		F		-						1						9					
Centrarchidae																						
<i>Lepomis macrochirus</i>	TS		I		-			9	2			15	2				2	1	13	3		
<i>Micropterus salmoides</i>	TS		C		-		28	6	17	8	10	6	2	11	5	11	17	2	18	11		13
Odontobutidae																						
<i>Odontobutis platycephala</i>	IS		C		RB							1										
Gobiidae																						
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	IS		C		-							13										
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	IS		O		-							1										
<i>Tridentiger brevispinis</i>	IS		O		RB							12										1
<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS		I		RB												1					5
Total number of species							10	10	10	11	6	10	6	4	7	10	14	10	8	6	10	
Total number of individual							79	178	80	29	23	104	431	28	21	47	113	86	46	26	59	

SS=Sensitive species, IS=Intermediate species, TS=Tolerant species, O=Omnivore, I=Insectivore, C=Carnivore, H=Herbivore, RB=Riffle-benthic species

정·적용된 정수 생태건강성 평가 모델(LEHA Model)의 등급 평가 기준에 의하면, 영산호의 생태계 건강성 평가 지수는 평균 19 (범위: 14~26, n=15)로 “악화상태”를 나타냈다(Fig. 3). 1차, 2차 및 3차 조사 시 생태계 건강성 평가 지수는 21, 18, 17로 “보통~악화상태”를 나타냈고 계절변이에 따른 건강도 차이는 보이지 않았다. 지점별 건강도는 지점 5에서 평균 22 (보통~악화상태, 범위: 20~26)로 가장 높게 나타났고 지점 1, 3에서 평균 17 (악화상태, 범위: 14~20)로 낮게 나타났으나 지점별로 큰 건강도 차이는 보이지 않았다(Table 2). 각 메트릭별 특성 분석에 따르면 민감종수(M₂)를 산정하는 메트릭은 민감종이 거의 채집되지 않아 가장 낮은 평균 메트릭 값을

보였고, 내성종(M₃) 및 잡식종(M₄)의 상대풍부도가 각각 56, 72%로 높게 나타나 메트릭 값이 낮게 나타났다. 또한, 전 조사지점에서 외래어종(M₇) 및 비정상종(M₈)이 다수 채집되어 총 메트릭 값의 감소를 가져온 것으로 분석되었다. 전기전도도(M₉)는 계절변이에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 풍수기인 1차 조사 시 강우에 의한 이온희석 현상에 의하여 평균 메트릭 값이 “3”로 “보통상태”를 보였고 3차 조사에서는 유량의 감소로 오염물의 농도가 높아져 메트릭 값이 전 지점에서 “1”로 나타나 “악화상태”를 보였다. 호소의 부영양화도를 정량화하기 위한 메트릭(M₁₀)인 TSI(CHL)은 평균 메트릭 값이 “4”로 대부분의 지점에서 “양호상태”를 보여 가장 높은 평균값을 나타냈다.

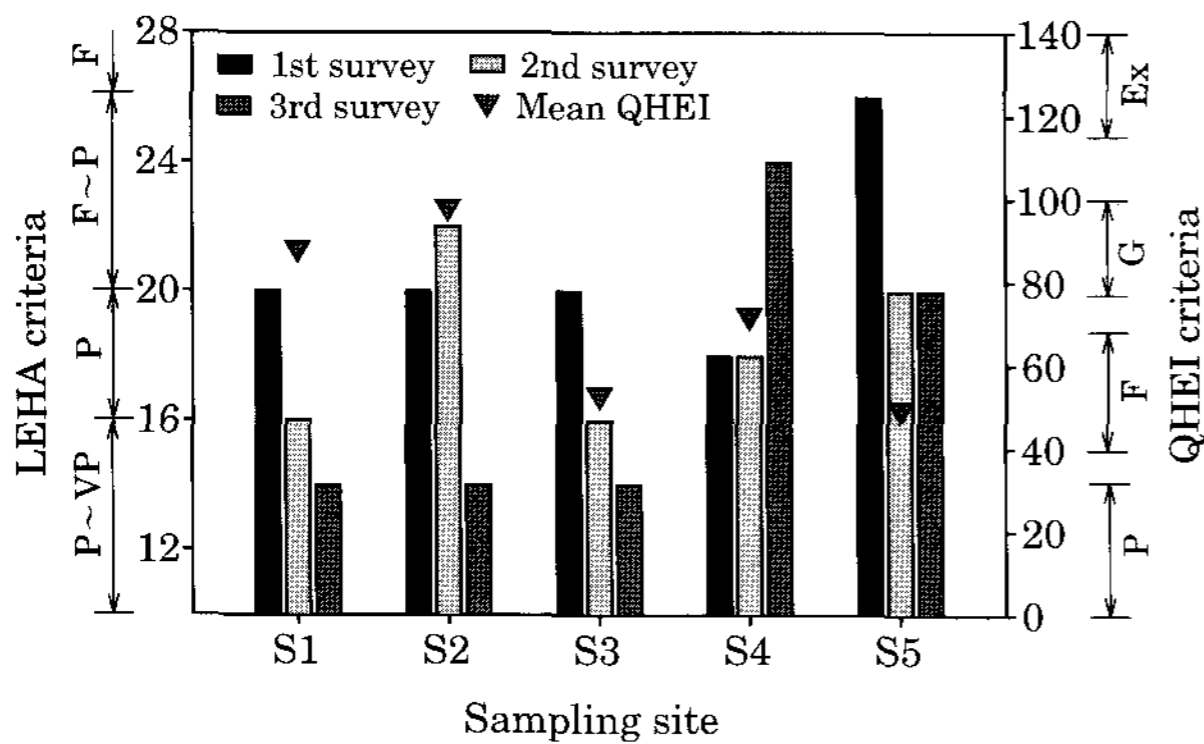


Fig. 3. Lentic Ecosystem Health Assessment (LEHA) and Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) in Yeongsan Lake.

4. 서식지의 물리적 메트릭 특성 및 평가(QHEI)

본 연구에서 산정한 물리적 서식지 평가 결과에 따르면 영산호의 물리적 서식지 건강도 지수는 평균 72로 “보통~양호상태”를 나타냈다(Fig. 3). 지점별 서식지 건강도는 지점 2에서 평균 98(양호상태)로 가장 높게 나타났고, 지점 5에서 평균 50으로 가장 낮게 나타나 하류부에 가까워질수록 점점 악화되는 양상을 보였다(Table 3). 지점 2는 M₂(하상구조특성)를 제외한 모든 메트릭에서 양호상태(범위: 12~16) 이상으로 평가되어 전 지점에서 가장 양호한 서식지 상태를 보였다. 특히 M₁(하상구조/서식처 피복도)에서 가장 좋은 건강도를 보여 다른 지점

Table 2. Biological water quality assessments, based on the 10 metric LEHA model in Yeongsan Lake.

Sampling location	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	LEHA (Criteria)	
1st survey	S1	8(3)	0(1)	96(1)	94(1)	0(1)	50(1)	36.7(1)	18.0(1)	99(5)	36.9(5)	20(IV)
	S2	8(3)	0(1)	90(1)	100(1)	0(1)	94(1)	47.2(1)	0.0(5)	151(3)	41.0(3)	20(IV)
	S3	7(1)	0(1)	51(1)	75(1)	16(1)	53(1)	33.8(1)	0.0(5)	137(3)	39.8(5)	20(IV)
	S4	8(3)	1(1)	38(1)	50(1)	19(1)	16(1)	44.8(1)	6.3(1)	140(3)	38.5(5)	18(IV)
	S5	4(1)	0(1)	22(1)	33(3)	56(5)	9(1)	60.9(1)	0.0(5)	200(3)	36.5(5)	26(III)
2nd survey	S1	10(3)	0(1)	58(1)	83(1)	3(1)	98(1)	5.8(1)	2.0(1)	259(3)	45.7(3)	16(IV)
	S2	5(1)	0(1)	30(1)	100(1)	0(1)	429(5)	0.5(3)	0.7(3)	244(3)	43.5(3)	22(III~IV)
	S3	2(1)	0(1)	100(1)	100(1)	0(1)	2(1)	92.9(1)	100.0(1)	276(3)	38.1(5)	16(IV)
	S4	4(1)	0(1)	42(1)	75(1)	0(1)	12(1)	42.9(1)	0.0(5)	285(3)	41.5(3)	18(IV)
	S5	8(3)	0(1)	15(3)	85(1)	6(1)	34(1)	27.7(1)	0.0(5)	509(1)	41.5(3)	20(IV)
3rd survey	S1	12(3)	0(1)	66(1)	79(1)	4(1)	94(1)	16.8(1)	10.6(1)	440(1)	40.1(3)	14(IV~V)
	S2	7(1)	0(1)	92(1)	93(1)	1(1)	73(1)	15.1(1)	6.9(1)	602(1)	38.7(5)	14(IV~V)
	S3	6(1)	0(1)	73(1)	80(1)	0(1)	15(1)	67.4(1)	60.0(1)	650(1)	34.3(5)	14(IV~V)
	S4	4(1)	0(1)	8(3)	42(3)	41(3)	12(1)	53.9(1)	0.0(5)	816(1)	37.0(5)	24(III~IV)
	S5	8(3)	0(1)	60(1)	67(1)	19(1)	43(1)	27.1(1)	0.0(5)	1055(1)	35.4(5)	20(IV)

Biological parameters=M₁~M₈ (M₁~M₃: Species composition, M₄, M₅: Trophic composition, M₆~M₈: Fish abundance and individual health), Chemical parameters=M₉, M₁₀. The LEHA criteria of III, IV, and V indicate fair, poor, and very poor, respectively

Table 3. Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) at five sampling locations in Yeongsan Lake.

Habitat parameters	1st survey					2nd survey					3rd survey				
	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
M ₁ Substrate / Instream cover	8	13	8	6	8	8	15	6	6	6	8	15	6	6	6
M ₂ Embeddedness	6	6	6	6	8	8	8	8	8	10	8	8	8	8	10
M ₃ Channel flow status	18	16	16	16	16	15	13	13	13	13	13	13	11	13	13
M ₄ Channel alteration	11	15	6	11	6	11	15	8	11	6	11	15	8	11	6
M ₅ Bank stability	11	12	2	12	4	14	15	4	13	4	14	15	4	13	6
M ₆ Bank vegetative protection	18	18	6	15	5	16	15	12	15	5	16	15	12	15	5
M ₇ Riparian vegetative zone width	16	18	6	6	4	16	18	4	6	4	18	16	5	6	4
Total score	88	98	50	72	51	88	99	55	72	48	88	97	54	72	50
	II	II	IV	I~III	III	II	II	III	II~III	III	II	II	III	II~III	III

The QHEI criteria of II, III, and IV indicate good, fair, and poor, respectively.

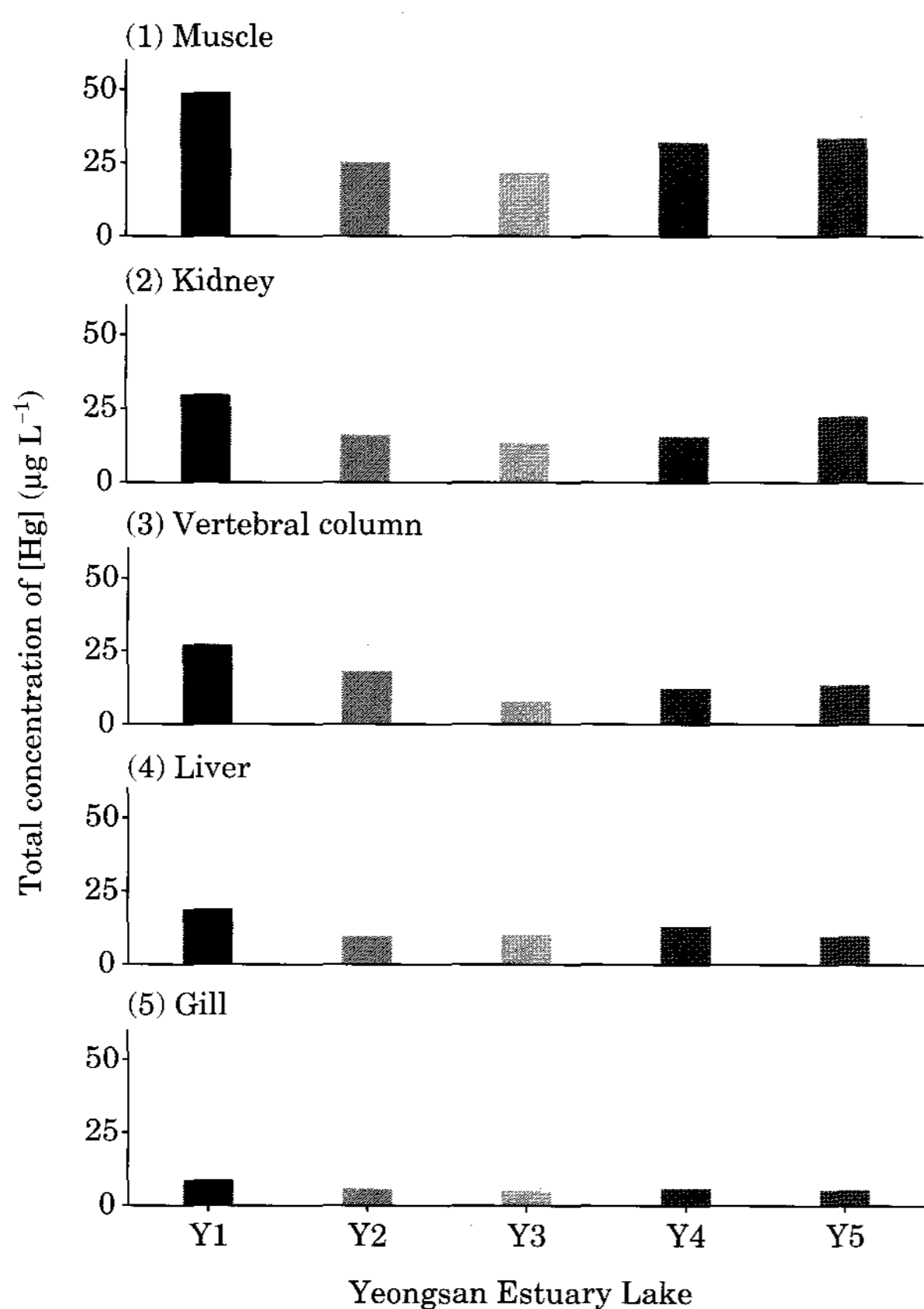


Fig. 4. Total [Hg] concentration of each tissue in sampling sites.

에 비하여 어류가 분포함에 있어 적합한 서식지 상태를 유지하고 있다. 또한, 제방식생의 피복도(M₆)가 높고 수변구역(M₇)이 넓게 분포하여 제방침식을 제한하고 하천으로 유입되는 오염물질에 대한 완충작용을 통하여 하천의 건강성을 유지하는데 큰 역할을 하는 것으로 사료되

었다. 지점 5는 M₃(수량상태)을 제외한 모든 메트릭에서 악화상태(범위: 6~10) 이하로 평가되었고, 특히 제방 식생 평가 메트릭인 M₆과 수변구역 평가 메트릭인 M₇의 건강도가 낮은 것으로 나타났다. 이는 인공적으로 만들어진 제방으로 인하여 제방식생과 수변구역이 교란되었기 때문인 것으로 사료되었다. 메트릭별 서식지 건강도 결과에 따르면 하상구조를 평가하는 M₂가 가장 낮은 건강도(평균 7.7, 보통상태)를 보였고, 수량 상태를 평가하는 M₃이 가장 높은 건강도(평균 14.1, 양호상태)를 보였다. 조사시기별 분석에 따르면 풍수기인 1차 조사는 M₃(수량상태)에서 높은 서식지 건강도를 보였고 다른 시기의 조사에 비하여 더 높게 나타났으나 강우에 의한 다량의 토사 및 퇴적물 유입과 제방 침식으로 인하여 M₂(하상구조)와 M₅(제방안정성)는 다른 조사보다 낮게 나타났다.

5. 어류의 조직 특성별 총수은 (Total Hg) 농축도

총수은 농축도는 종별, 조직별 및 지점별로 다양한 변이를 보였다. 조직별 총수은 농축도 분석에 따르면, 간과 신장의 평균 총수은 농축도는 각각 0.014, 0.017 mg L⁻¹로 나타났고, 근육과 척추의 농축도는 각각 0.037, 0.017 mg L⁻¹로 나타나 근육의 총수은 농축도가 가장 높게 나타났다(Fig. 4). 또한, 대부분의 지점에서 근육과 척추의 농축도가 높게 나타나 간과 신장에서 높은 농축도를 보였던 기존의 연구들과 다른 결과를 나타냈다(김과 박, 1981; 이, 1985; 강 등, 1986; 황 등, 1998). 이는 수체가 갖는 특성이 각 지역마다 다르기 때문에 종별, 조직별 농축도에 변이를 보인 것으로 사료되었다(Lee and An, 2007). 종별 총수은 농축도 분석에 따르면, 수체 내 유기물을 비롯하여 동·식물을 구분하지 않고 섭식하는 치리, 붕어와 같은 잡식성 어종은 낮은 농축도(0.005~0.052 mg L⁻¹)

를 보였고, 배스와 같은 육식성 어종들은 비교적 높은 농축도(0.006~0.087 mg L⁻¹)를 보였다(Lee and An, 2007). 육식성 어종은 수생태계 내 먹이사슬의 최종 소비자로서 생물농축에 의하여 다량의 수은이 체내에 농축되는 것으로 사료되었다. 또한 생태지표 특성이나 섭식 특성에 따라 총수은 농축도에 차이를 보여 어종별로 체내에 농축되는 양에는 차이가 있는 것으로 판단되었다. 지점별 총수은 농축도 분석에 따르면, 지점 1은 다른 지점에 비하여 높은 농축도(0.003~0.087 mg L⁻¹)를 보였고, 지점 3에서 가장 낮은 농축도(0.002~0.041 mg L⁻¹)를 보였으나, 미국 식품의약청(U.S. FDA)에서 규정한 어류생체 내 수은농축함량 허용한계치인 0.5 mg L⁻¹을 초과하지 않았다(U.S. FDA, 2001).

고찰

정수생태계 건강성 평가분석에 따르면, 영산호의 생태계 건강성 평가 지수는 U.S. EPA(1993)의 등급 평가기준에 의거하여 “악화상태”로 나타나 물리적 서식지 교란 및 이·화학적 수질 악화에 의하여 영향을 받는 것으로 사료되었다(안 등, 2001a, b).

영산호의 환경영향평가에 따르면, 첫째, 생태지표 특성과 섭식구조의 단순화로 인한 내성종과 잡식종의 우점현상으로서 내성종과 잡식종의 상대풍부도가 각각 63, 77%로 높게 나타나 화학적 수질악화나 물리적 서식지 교란현상의 심각성을 시사하였다. 둘째, 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 블루길(*Lepomis macrochirus*), 배스(*Micropterus salmoides*)와 같은 외래종이 전 지점에서 채집되었고, 전체어종의 23.4%를 차지하여 높은 상대풍부도를 나타냈다. 또한, 피부 짓무름 및 기형 등 외형적으로 비정상상태를 보인 어종이 다수 채집되어 수환경의 질적저하를 시사하였다. 셋째, 뱀장어, 은어와 같은 회유성 어종의 분포가 극히 저조한 것으로 나타나 하구둑(Barrier)에 의한 영향으로 사료되었다. 넷째, 주변 농경지에서 유입되는 인(N), 질소(P)와 같은 영양염에 의한 부영양화가 수질오염의 주된 요인으로 사료되었다. 따라서, 향후 영산호의 총체적인 생태계 건강성 복원을 위하여 효율적인 호소 관리와 생태학적 교란 원인에 대한 복원이 시급한 것으로 사료되었다.

한편, 생태계에 미치는 중금속의 영향을 알아보기 위하여 실시한 총수은 농축도 분석에 따르면, 어류생체 내 존재하는 총수은의 농축도는 미국 식품의약청(U.S. FDA, 2001)에서 규정한 허용한계치(0.5 mg L⁻¹)에 미치지 못

하는 것으로 나타나 총수은의 생물농축에 의한 영향은 미미한 것으로 사료되었다. 그러나 수은은 계속적으로 어류 체내에 축적되기 때문에 지속적인 모니터링을 통하여 이를 예방할 필요성이 있다(U.S. EPA, 1997).

적요

본 연구의 목적은 다각적 수환경지표를 이용하여 영산호의 현재 상태를 평가하고 더 나아가 영산호의 수질 관리 및 생태계 보전에 활용하기 위함이다. 본 연구에서 적용한 정수생태계 건강성 평가 모델은 U.S. EPA(1998)의 정수생태계 평가 기법(Lake and Reservoir Bioassessment and Biocriteria)에 기초를 두었고, 이 모델을 바탕으로 우리나라 호소의 특성에 맞게 수정·보완한 안과한(2007)의 모델을 따랐다. 또한 영산호의 물리적 서식환경을 평가하기 위하여 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 개발된 물리적 서식지 평가 모델을 이용하여 호소환경에 맞는 7 메트릭 모델을 적용하였다. 조직별 수은 분석은 수은 직접분석기(DMA-80)를 이용하여 U.S. EPA 7473 method로 측정하였다. 본 연구의 조사 결과, 채집된 어류는 1차 조사에서 7과 22종 389개체, 2차 조사에서 7과 21종 631개체, 3차 조사에서 7과 19종 330개체로 총 30종 1,350개체가 채집되었다. 생물학적 건강성 평가 지수는 평균 19로 악화상태(범위: 14~26, n=15)인 것으로 나타났고 지점별 큰 변이는 보이지 않았다. 이는 외래종의 우점, 생태계 교란에 의한 기형어종과 사체의 빈도가 높았기 때문인 것으로 사료되었다. 물리적 서식지 평가 결과에 따르면 영산호의 서식지 건강도는 평균 72로 보통~양호상태(범위: 48~99, n=15)를 보였고, 영산호 하류쪽이 상류에 비하여 물리적 서식지 건강도가 낮은 것으로 나타났다. 일반 수질 항목 측정 결과, 염도는 하구둑에 가까워질수록 증가하는 것으로 나타나 해수의 영향을 반증하였다. 총수은 농도는 조직별, 지점별로 일부 차이를 보였으나, 전반적으로 수은농축의 영향은 미미한 것으로 사료되었다. 영산호의 생태 건강성 향상을 위해 외래종에 의한 교란 억제, 물리적 서식지의 복원 등이 필요한 것으로 판단된다.

인용문헌

강희곤, 윤원용, 박상현, 박성배. 1986. 북한강에(北漢江) 서식하는 담수어종의(淡水魚中) 중금속 함유량에 관한 연구

- (제2보). 한국육수학회지 **19**(1): 79-88.
- 권오섭. 1991. 낙동강 하구언 건설에 의한 환경요인의 변화. 한국육수학회지 **24**(4): 231-238.
- 김명희, 박성배. 1981. 담수어중의(淡水魚中) 총수은함량에(總水銀含量) 관한 연구(1)-수종의(數種) 금강하류(錦江下流) 담수어에(淡水魚) 대하여. 한국육수학회지 **14**(3): 13-20.
- 김용재. 2003. 영산강의 식물플랑크톤 군집 동태. 한국조류학회지 **18**(3): 207-215
- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제37권 동물편(담수어류). 교육부.
- 김익수, 강연중. 1993. 원색 한국 어류도감. 아카데미서적.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기, 교학사, 465p.
- 김익수, 최충길, 손영목. 1986. 영산호의 어류군집에 관하여. 자연보존연구보고서 **8**: 56-66.
- 박래환, 조양기, 조철, 선연중, 박경양. 2001. 2000년 여름 영산강 하구의 해수 특성과 순환. 한국해양학회지(바다) **6**(4): 218-224.
- 송태곤, 이완욱. 1987. 영산강 중·상류의 담수어상. 연안생물연구 **4**(1): 81-90.
- 송태곤, 이완욱. 1988. 영산강수계의 어류상과 영산호 내의 어류상의 변화. 연안생물연구 **5**(1): 113-129.
- 안광국, 염동혁, 이성규. 2001a. 생물보전지수(Index of Biological Integrity)의 신속한 생물평가 기법을 이용한 갑천수계의 평가. 환경생물 **19**(4): 261-269.
- 안광국, 정승현, 최신석. 2001b. 생물보전지수(Index of Biological Integrity) 및 서식지 평가지수(Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 **34**(3): 153-165.
- 안광국, 한정호. 2007. 정수 생태계 건강성 평가를 위한 다변수 매트릭 모델 개발. 한국육수학회지 **40**(1): 72-81.
- 양해근, 최희철. 2003. 영산강과 섬진강 유역의 하천 수질환경 평가. 대한지리학회지 **38**(1): 16-31.
- 위인선. 1974. 영산강의 저생동물에 의한 생물학적 수질판정. 한국육수학회지 **7**(3): 29-36.
- 위인선, 라철호, 최충길, 김익수. 1977. 영산강 상류의 어류상에 대하여. 임해연구지 **2, 3**(1): 21-32.
- 유광일, 임병진, 최정일. 1987. 영산호의 동물플랑크톤 군집의 생태학적 연구. 한국육수학회지 **20**(2): 61-72.
- 이성기, 유태중, 강인숙. 1993. 영산호 수질에측에 관한 연구. 상하수도학회지 **6**(1): 15-24.
- 이춘구. 1985. 메기의 장기내 LDH isozym과 단백질에 미치는 급성 수은 중독의 영향에 관한 연구. 한국육수학회지 **18**(2): 73-84.
- 이충렬. 1992. 금강하구의 하구언 축조 이후 어류군집의 변화. 한국육수학회지 **25**(3): 193-204.
- 임현식, 최진우. 2005. 영암호 저서동물군집에 미친 하구둑 건설의 영향. 한국수산학회지 **38**(3): 172-183.
- 최기철. 1973. 휴전선 이남에서의 담수어의 지리적 분포에 관하여. 한국육수학회지 **6**(3): 29-36.
- 최기철, 전상린, 김익수. 1984. 한국산담수어분포도. 한국담수생물학연구소. p. 1-104
- 최재석, 이광열, 장영수, 고명훈, 권오길, 김범철. 2003. 소양호의 어류군집 동태. 한국어류학회지 **15**(2): 95-104.
- 최재석, 장영수, 이광열, 김진국, 권오길. 2004. 파로호의 어류상 및 어류군집. 환경생물 **22**(1): 111-119.
- 최재석, 이광열, 장영수, 최의용, 서진원. 2005. 평화의 댐 어류군집 분석. 한국육수학회지 **38**(3): 297-303.
- 황인담, 기노석, 정인호, 이정상, 이재형. 1998. 수은 중독에 관한 실험적 연구. 한국환경보건학회지 **14**(1): 103-113.
- An, K.G. and S.S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-*a* total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological Modelling* **152**(2-3): 191-203.
- Barbour, M.T., J. Gerritsen, B.D. Snyder and J.B. Stripling. 1999. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish, Second Edition. EPA 841-B-99-002. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Water; Washington, D.C.
- Karr, JR. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- Ki, S.J., Y.G. Lee, S.-W. Kim, Y.-J. Lee and J.H. Kim. 2007. Spatial and temporal pollutant budget analyses toward the total maximum daily loads management for the Yeongsan watershed in Korea. *Water Science and Technology* **55**(1-2): 367-374.
- Lee, E.H. and K.G. An. 2007. Preliminary studies on mercury bioaccumulation within various fish tissues as heavy metal stressor in aquatic ecosystems. *Kor. J. Limnol.* **40**(4): 569-575.
- Leentvaar, J. and S.M. Nijboer. 1986. Ecological impacts of the construction of dams in and estuary. *In: Estuarine and coastal pollution; detection, research and control.* p. 181-191. ed. by D.S. Moulder and P. Williamson. Pergamon Press, Oxford.
- Margalef, R. 1958. Temporal succession and spatial heterogeneity in natural phytoplankton. *In perspectives in marine biology.* Univ. of California Press, p. 323-349.
- Nelson, J.S. 1994. *Fishes of the world* (3th ed.). John Wiley & Sons, New York.
- 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.
- Pielou, E.C. 1975. *Ecological diversity.* Wiley. New York, 165p.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and

- R.M. Hughes. 1989. Rapid assessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrates and fish, EPA/444/4-89-001, Office of Water Regulations and Standards, U.S. EPA, Washington, DC, U.S.A.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. University of Illinois Press, Urbana.
- Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 688.
- 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.
- U.S. EPA. 1994. Environmental Monitoring and Assessment Program: Integrated quality assurance project plan for the Surface Waters Resource Group, 1994 activities, Rev. 2.00. EPA 600/X-91/080. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, NV.
- U.S. EPA. 1997. Mercury Study Report to Congress, Volume I: Executive Summary. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1997. Publication EPA-452/R-97-003.
- 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. 2000. Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: Method #7473, SW 846, Update IVA, US GPO, Washington DC.
- U.S. FDA. 2001. Consumer advisory: An important message for pregnant women and women of childbearing age who may become pregnant about the risks of mercury in fish. Washington: FDA, 2001.

(Manuscript received 14 May 2008,
Revision accepted 31 May 2008)