

## 하천 서식지 특성에 따른 피라미 (*Zacco platypus*)의 총수은 함량 및 생태 건강성 분석

이의행 · 윤상훈 · 이재훈 · 안광국\*

(충남대학교 생명과학부)

Total Mercury Contents in the Tissues of *Zacco platypus* and Ecological Health Assessments in Association with Stream Habitat Characteristics. Lee, Eui-Haeng, Sang-Hun Yoon, Jae Hoon Lee and Kwang-Guk An\* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

This research was a preliminary case study to determine the levels of total mercury in the tissues of sentinel species (*Zacco platypus*) and ecological health in relation to habitat characteristics and chemical conditions. We collected fishes in Gap Stream during June~October 2007 and analyzed the total mercury from five types of tissues such as liver, kidney, gill, vertebrae and muscle of *Zacco platypus* using Direct Mercury Analyzer (DMA-80, US EPA Method 7473). Mean concentrations of total [Hg], based on all tissues, was 67.2 and 20.7  $\mu\text{g kg}^{-1}$ , in the upstream and downstream site, respectively, indicating 3 times greater level in the upstream. In other words, the levels were higher in the pristine upstream than the downstream influenced by the wastewater disposal plant. Chemical water quality, based on BOD, COD and nutrients (TN, TP) showed that severe degradation occurred in the downstreams than the upstreams. Index of Biological Integrity (IBI) using fish multi-metric model averaged 32, indicating a "good~fair" condition and varied from 42 (excellent~good) at S2 to 22 (fair~poor) at S5 depending on the sites sampled. Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) in the all sites averaged 142, which was judged as "good" habitat health, but showed a high variation (181 in Site 2 vs. 67 in Site 5). Overall data suggest that health conditions, based on IBI and QHEI, was better in the upstream sites but the mercury bioaccumulation levels in the fish tissues were opposite. We believe that measurements of various parameters are required for a diagnosis of integrative ecosystem health.

**Key words :** Total mercury, ecological health, habitat, water quality, *Zacco platypus*

### 서 론

최근 각종 산업화로 인해 방출되는 산업폐수는 다량의 중금속 및 독성 화학물질을 함유하고 있어 수생태계 내 어류를 비롯한 수생생물에 중금속 농축 및 이를 섭취하

는 인간에게도 피해를 가져다주고 있다(조 등, 2004a). 특히, 담수 어류의 섭취가 많은 우리나라의 경우 인체의 중금속 농축 영향이 외국에 비해 더욱 심각할 것으로 우려된다. 수체 내 오염물질 가운데 중금속은 철, 구리 등과 같은 생체 내 필수 원소도 있지만 수은, 납, 카드뮴 등은 생체 내에서 다양한 위해작용을 일으키는 것으로 보고되

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

었다(Lee et al., 2001). 이러한 중금속은 하천수 및 하천 하상의 침전물에 잔존하며 수생생물 생체 내에 농축되어 어류폐사 유발 및 그 외의 여러 수생생물의 다양성을 감소시키고, 종체적인 생태계 건강성에 크게 악영향을 끼치고 있다. 이러한 위해중금속 중 수은(Hg)은 수체 내에서 높은 독성을 보이고, 수생생물의 체내에 축적되며 특히 어류 체내의 간 조직 및 지방 조직에 높게 농축되는 것으로 알려져 있다(US EPA, 1994). 미국 환경부에 따르면, 인간이 수은을 함유한 어류를 지속적으로 섭취할 경우 심각한 수은 농축으로 인하여 각종 신경장애, 시·청력 감퇴 및 언어장애 등의 심각한 영향을 가져와 가장 위해성이 높은 환경 오염물질로 보고되고 있다(US EPA, 2000, 2005). 그러나 수은 농축의 심각한 악영향에도 불구하고 수은의 생태적 영향에 대한 국내 연구는 주로 수체 내의 농도 측정이 대다수를 차지하고 있을 뿐, 수생태계 내 담수 어류의 수은 농축에 관한 연구는 극히 미미한 실정이다(Lee and An, 2007).

2006년 환경부와 보건복지부의 국민 혈중 중금속 농도 조사 결과 수은의 평균 농도는  $4.34 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 미국 ( $0.82 \mu\text{g L}^{-1}$ )이나 독일( $0.58 \mu\text{g L}^{-1}$ )의 국민 혈중 농도에 비해 5~8배가량 높고, 독일의 권고 기준( $15 \mu\text{g L}^{-1}$ )을 초과한 사람이 1.8%, US EPA 권고기준  $5.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 초과한 가임기 여성이 약 27%를 차지한다는 결과를 발표하였다(환경부, 2006). 이처럼 우리나라 국민이 미국 및 독일 국민보다 수은농도가 높은 원인이 다량의 어패류소비 때문인 것으로 밝혀졌으나, 우리나라 수계 어류의 수은농도 분포 현황에 대한 연구는 극히 미미한 현실이다. 따라서 수은 오염 문제를 해결하기 위해서는 수생태계 내 수은 농축에 관한 자료 확보 및 과학적이고 체계적인 조사를 통해 수생태계 내 수은을 체계적으로 모니터링하고, 생태계 및 인체의 건강성 관리 시스템을 개발하는 것이 시급하다.

최근, 생태계 건강성 평가의 일환으로 우리나라는 다변수 메트릭 모델 개발 및 수계적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(안 등, 2006; 안과 이, 2006; 안과 최, 2006; 안과 한, 2007). 특히, 도심하천의 경우, 생물을 이용한 생태 건강성 진단법, 물리적 서식지 교란 평가법 및 화학적 오염 평가방법은 수생태계를 효율적으로 진단·평가하는 데 핵심 역할을 하고 있다(안과 김, 2005; 안 등, 2005; 배와 안, 2006). 따라서 이러한 기법의 적용은 생물학적, 물리학적 생태계 교란성 평가 시 교란 원인을 찾아내는 데 중요한 역할을 할 것으로 사료된다.

본 연구는 우리나라의 담수어류에 축적된 수은농도 조사를 위한 예비연구로서 우리나라에서 분포범위가 가장

넓은 종인 피라미(*Zacco platypus*)를 이용하여 어류 체내의 조직·장기별 수은 농축도를 분석하였다. 본종은 이러한 분포 특성 때문에 하천에서의 중금속 오염도 특성을 가장 적절히 반영하는 지표생물로서 사료되었다. 아울러, 본 연구에서는 어류군집의 다변수 메트릭 모델 및 물리적 서식지 평가 모델을 이용하여 생태 건강성을 평가하였고, 일반 수질변수를 분석하여 화학적 오염도 특성을 비교·평가하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사 기간 및 지점 특성

본 연구에서는 어류 조직 내 수은 농축도 분석을 위해 우리나라에서 분포범위가 가장 넓은 종인 피라미(*Zacco platypus*)를 선정하였고, 현장조사는 2007년 7월~10월까지 총 세 차례에 걸쳐 실시하였으며 채집된 개체는 수은 분석을 실시하였다. 어류의 수은농도 및 생태 건강성 분석을 위해 선정한 조사지점은 아래와 같다(Fig. 1). 1차 조사에서는 생태 건강성 평가를 위해 조사했던 7개의 지점(S, Fig. 1) 중 S1, S4, S7의 3개 지점을 분석하였다. 3개 지점의 특성을 살펴보면, S1은 갑천 수계의 상류지역으로 점오염원이 미미하고, 수변구역이 산림으로 둘러싸여 있다. 한편, S4는 갑천 중류의 상가 및 도심의 영향을 받기 시작하는 지점이며, S7은 금강과 합류되기 전 지점으로 대전 1·2공단, 하수종말처리장 등의 많은 점오염원에 의한 영향이 예상되는 지점이다. 2, 3차 조사는 1차 분석의 결과를 토대로 변이를 줄이고, 상·하류의 차이를 분석하기 위해 조사 지점을 조정하였다. 중류인 S4는 조사에서 제외하였고, 상류는 S1 대신 수체가 좀 더 크고 안정된 S2로, 최하류 지점은 금강 합수부의 영향을 배제하기 위해 합수부에 가까운 S7 대신 S6으로 각각 조정하여 분석을 진행하였다.

S1 : 대전광역시 서구 우명동 우명교	(3차하천)
S2 : 대전광역시 서구 봉곡동 봉곡2교	(3차하천)
S3 : 대전광역시 서구 정림동 모세골교	(4차하천)
S4 : 대전광역시 서구 월평동 만년교	(4차하천)
S5 : 대전광역시 서구 만년동 대덕대교	(4차하천)
S6 : 대전광역시 유성구 전민동 갑천교	(5차하천)
S7 : 대전광역시 유성구 구즉동 불무교	(5차하천)

### 2. 어류 조사 방법

어류 조사는 지점을 중심으로 상·하류간 100 m 이내

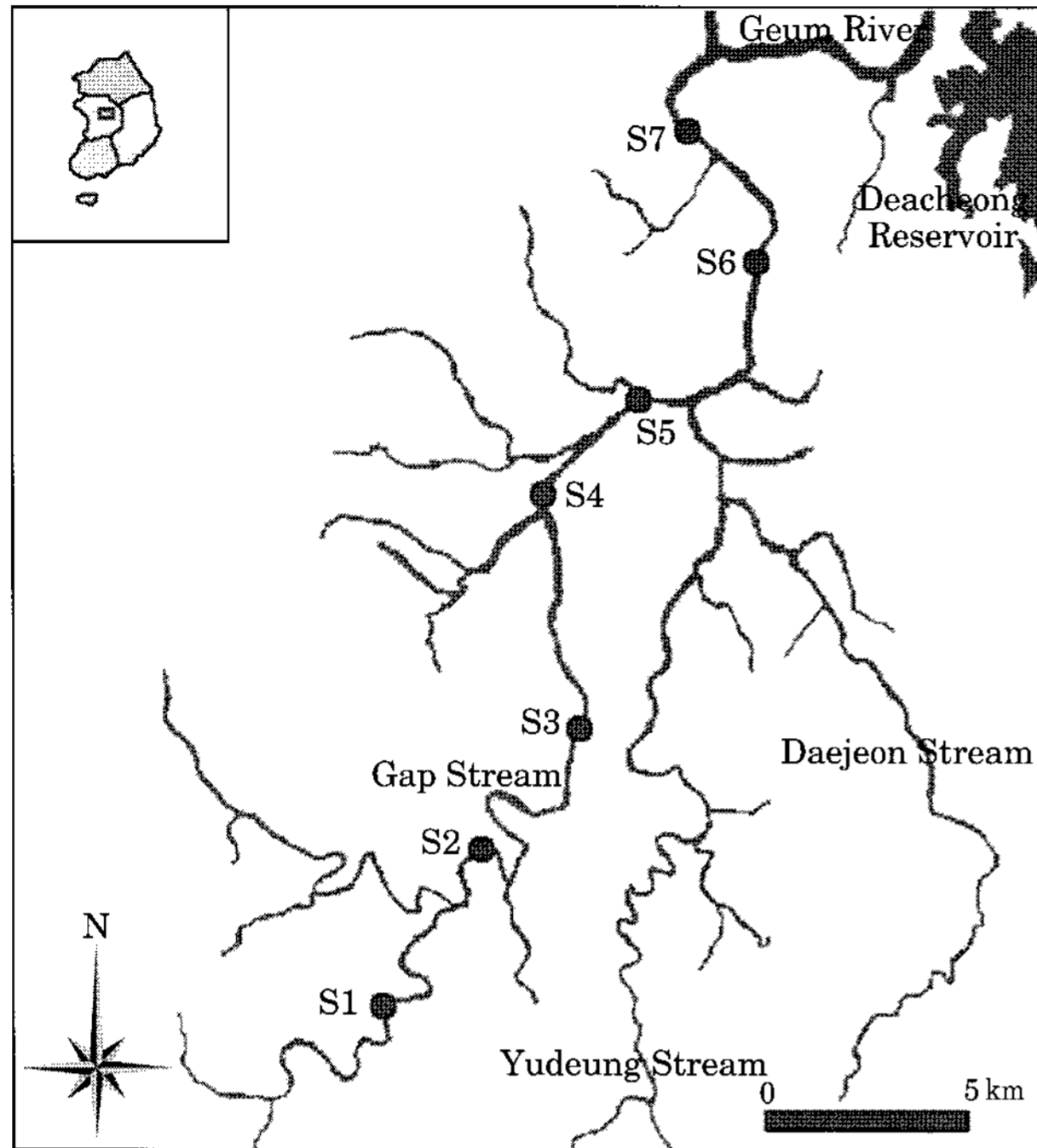


Fig. 1. The sampling sites in Gap Stream, tributary of Geum River.

를 대상으로 실시하였고, 채집도구는 투망(망목 5×5 mm)을 이용하였다. 채집된 어류는 피라미를 제외하고 전량 방류하였고 피라미는 해부를 위해 얼음에 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

어류 조직에 농축된 수은의 개체별 농도 변이를 줄이기 위하여 채집한 피라미들의 전장과 체중을 측정하고 크기가 유사한 개체들을 선별하여 수은 농축도를 분석하였다. 수은 농축도 분석을 위해 채집된 피라미 개체의 간(Liver: Li), 신장(Kidney: Ki), 아가미(Gill: Gi), 척추(Vertebra: Ve), 근육(Muscle: Mu) 등 총 5개의 조직을 적출하였고, 수은 직접분석기(Direct mercury analyzer, DMA-80)를 사용하여 조직별 수은 함량을 측정하였다. 수은 분석을 위한 표준물질은 MESS-3(0.091±0.009 ppm, National Research Council Canada)을 사용하였다.

### 3. 화학적 수질자료 분석

본 연구에서 이용된 화학적 수질자료는 환경부 측정망 지점 자료 중, 2004년 9월부터 2007년 8월까지 3년간 측정된 자료를 사용하였다. 자료 분석에 이용된 변수는 생물학적 산소요구량(Biological Oxygen Demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총인(Total Phosphorus, TP), 총질소(Total Nitrogen, TN),

전기전도도(Electric Conductivity, EC, at 25°C) 및 부유물질(Suspended Solid, SS)의 6가지 항목을 분석하였고, 화학적 수질등급 기준은 2007년 1월에 환경부에 고시된 7등급 기준체계에 의거하였다. 생태 건강성 평가를 실시한 갑천의 7개 지점 중 S1의 경우 환경부 측정망이 없기 때문에 S1을 제외한 6개의 지점을 분석하였다.

### 4. 생태 건강성 평가 및 물리적 서식지 분석

본 연구에서는 어류 체내의 수은 농축도 분석에 앞서 분석을 위한 대상종 선정 및 분석 후 결과 비교를 위하여 강우가 집중되기 전인 2007년 6월 갑천 수계의 7개 지점을 선정하여 생태 건강성 평가 및 물리적 서식지 평가를 실시하였다. 조사 지점의 하천차수는 Horton(1945)과 Strahler(1957)의 하천의 규모(Stream order)에 따른 분류 기준에 의거하여 분류하였고, 총 7개 지점을 분석하였다.

본 조사에서 어류 채집은 정량적인 생태 건강성 평가를 위해 개발된 Ohio EPA(1989)의 Wading method를 수정·적용하였다. 채집도구는 투망(망목 5×5 mm) 및 족대(망목 4×4 mm)를 사용하였다. 물리적 서식지 특성 차이에 따른 채집 변이를 줄이기 위해 조사지점 내의 여울(Riffle), 소(Pool), 흐름이 느린 곳(Run) 등을 가능한 모두 포함하여 각 조사지점을 중심으로 상·하류 100 m 구간에서 50분간 실시하였다. 각 지점에서 채집된 어류는 김과 박(2002), 손과 송(2006)에 의거해 동정 후 즉시 놓아주었으며, 동정이 확실치 않은 종은 10% 포르말린 용액으로 고정하여 실험실에서 동정하였다.

채집 자료를 바탕으로 생태 건강성 평가를 위해 적용된 생물통합지수(Index of Biological Integrity, IBI) 산정은 Barbour *et al.* (1999)과 US EPA(1993)의 기준에 의거하였다. 생물통합지수는 국내 환경에 맞게 수정·보완된 10개 다변수 메트릭 모델을 이용하였고(안 등, 2005), 5등급체제 [I등급: 최적(46~50), II등급: 양호(36~40), III등급: 보통(26~30), IV등급: 악화(16~20), V등급: 매우악화(10)]로 대별하여 평가하였다.

물리적 서식지 평가 모델(Qualitative Habitat Evaluation Index, QHEI)은 Plafkin *et al.* (1989)에 의해 정성적 서식지 평가지수로 개발되고 Barbour *et al.* (1999)에 의해 체계화되어 US EPA에서 RBP모델로서 생태계 서식지 평가를 위해 사용되고 있다. 본 물리적 서식지 평가는 우리나라 서식환경에 맞게 안과 김(2005)에 의해 수정된 11개 다변수 메트릭 모델을 이용하였다.

결과 및 고찰

본 연구는 갑천에 서식하는 피라미 (*Zacco platypus*)의 다양한 조직의 수은 농축도를 지점별로 분석한 결과로서, 1~3차 조사의 어류 조직에 포함된 총 수은 농도는 하류보다 상류지점에서 높게 나타났으며, 농도범위는 분석된 조직의 종류에 따라 다르게 나타났다(Table 1).

1차 분석에서는 상류(S1), 중류(S4), 하류(S7)의 피라미를 각 지점별로 선별하여 조직별 수은 농도를 분석하고 개체별 평균값을 산정한 결과, S1지점은  $82.6 \mu\text{g kg}^{-1}$ , S4지점은  $38.2 \mu\text{g kg}^{-1}$ , S7지점은  $19.3 \mu\text{g kg}^{-1}$ 로서 상·하류 간에 어류 체내 수은 농도가 높은 것으로 나타났다. 상기 수은 농도분석이 제시하는 바와 같이, 어류조직 내

총수은 농도는 대전 1·2공단 및 하수종말처리장 등의 점오염원에 의해 영향 받는 지점(S7) 보다는 오염원이 거의 없는 것으로 사료되는 상류지점(S1)에서 더 높게 나타나 오염원에 의해 어류 조직 내 수은의 농축이 심화될 것이라는 예상과는 상반되는 결과가 도출되었다(Fig. 2).

1차 수은 분석을 실시한 후 조사지점 조정을 통한 비교평가를 위해 S2와 S6에서 2차 및 3차 분석을 실시한 결과에 따르면, 1차와 유사한 결과를 보였다. 즉, 2차 및 3차 분석에서 S2는 각각  $68.8, 50.2 \mu\text{g kg}^{-1}$ 이고, S6는 각각  $30.1, 12.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ 이 검출되어 하류지점(S6)에 비해 상류지점(S2)에서 높은 중금속 농축도를 보였다(Table 1, Fig. 2). 서울특별시 보건환경연구원(조 등, 2004b)의 보고에 따르면, 한강 본류와 지류에 서식하는 붕어, 잉어,

**Table 1.** Total [Hg] concentration of each tissue on 2nd and 3rd analysis in Gap Stream. In the table, abbreviations are as follows; Li=Liver, Ki=Kidney, Gi=Gill, Ve=Vertebra, Mu=Muscle.

Site	2nd analysis			Site	3rd analysis		
	Individual No. (Length, Weight)	Tissue	Mercury ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )		Individual No. (Length, Weight)	Tissue	Mercury ( $\mu\text{g kg}^{-1}$ )
Upstream (S2)	#1 (9.5 cm, 6 g)	Li	54.3	#1 (12.5 cm, 16 g)	Li	101.1	
		Ki	61.1		Ki	234.2	
		Gi	8.1		Gi	14.1	
		Ve	50.8		Ve	34.3	
		Mu	15.5		Mu	38.8	
	#2 (9.0 cm, 6 g)	Li	76.2	#2 (12.6 cm, 17 g)	Li	19.5	
		Ki	93.1		Ki	58.7	
		Gi	32.4		Gi	9.5	
		Ve	40.7		Ve	55.3	
		Mu	39.9		Mu	24.8	
	#3 (8.6 cm, 6 g)	Li	101.5	#3 (11.3 cm, 14 g)	Li	24.8	
		Ki	149.3		Ki	42.1	
		Gi	19.3		Gi	15.4	
		Ve	69.2		Ve	34.3	
		Mu	221.2		Mu	46.3	
Downstream (S6)	#1 (11.0 cm, 9g)	Li	11.9	#1 (11.8 cm, 16 g)	Li	13.0	
		Ki	20.6		Ki	32.7	
		Gi	6.8		Gi	13.6	
		Ve	11.9		Ve	10.4	
		Mu	7.4		Mu	14.3	
	#2 (9.8 cm, 6 g)	Li	130.6	#2 (12.5 cm, 20 g)	Li	12.4	
		Ki	91.3		Ki	15.5	
		Gi	3.3		Gi	4.8	
		Ve	15.5		Ve	10.5	
		Mu	18.0		Mu	13.7	
	#3 (9.0 cm, 5g)	Li	48.2	#3 (11.3 cm, 16 g)	Li	8.2	
		Ki	32.3		Ki	12.7	
		Gi	14.6		Gi	8.0	
		Ve	19.3		Ve	8.8	
		Mu	19.2		Mu	12.7	

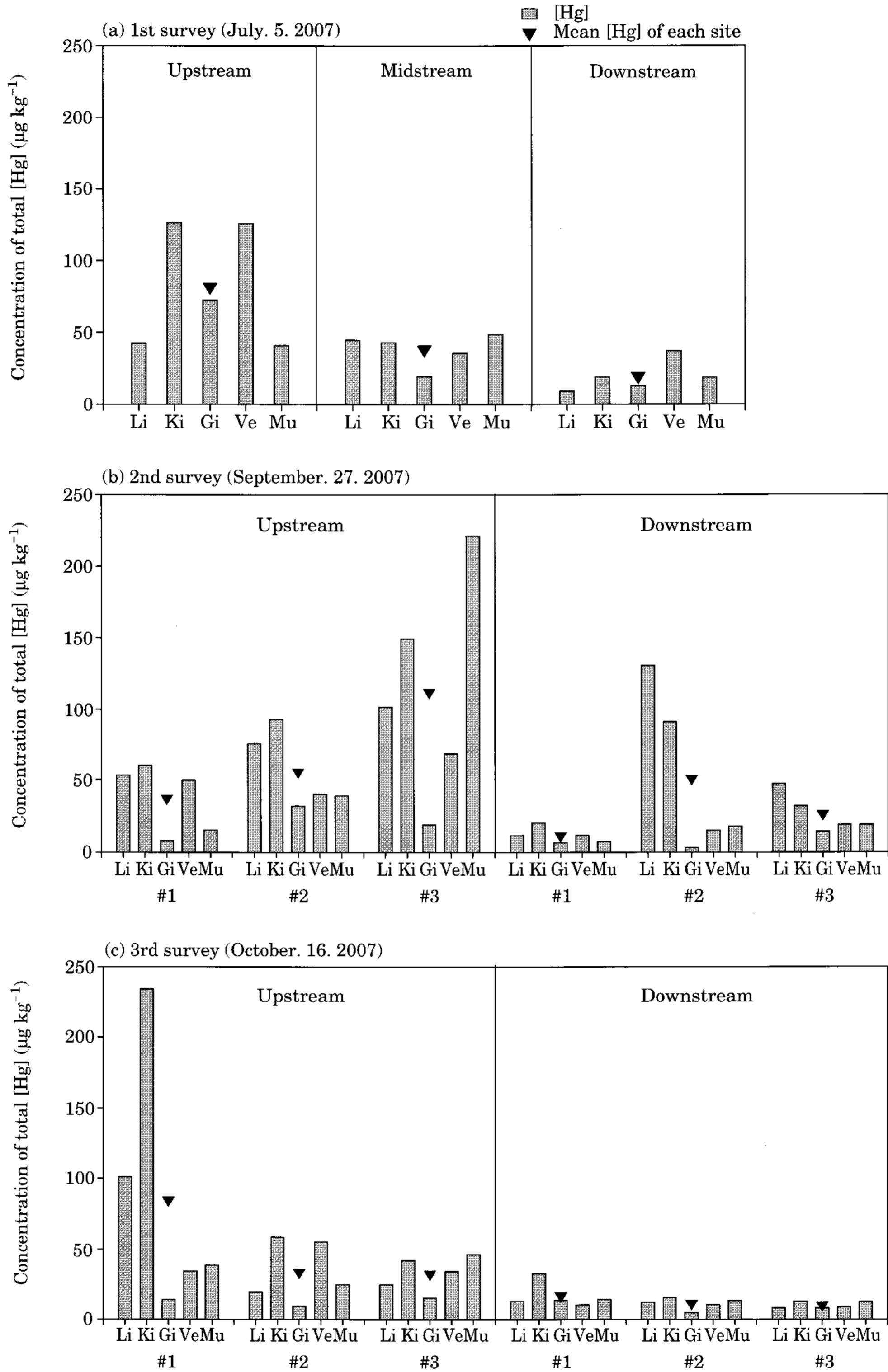


Fig. 2. Total [Hg] concentration in each tissue of *Zacco platypus*.

누치 등의 어류 체내 수은 농도를 분석한 결과, 한강 본류에서 채집된 어류에서 34 µg kg<sup>-1</sup>로 나타났고, 안양천

43 µg kg<sup>-1</sup>, 중랑천 34 µg kg<sup>-1</sup>, 탄천 40 µg kg<sup>-1</sup>, 청평호 38 µg kg<sup>-1</sup>로 나타나 한강 수계의 하천에 비해 갑천 상류지



점(S1)의 어류 체내 수은 농도가 높은 것으로 나타났다. 그러나 이들 수계별 어류의 수은 농축량은 한국 식약청의 담수어 중금속 잔류 허용기준인  $500 \mu\text{g kg}^{-1}$ (식약청, 2007)을 초과하지 않은 상태여서 현재까지는 어류 체내 수은 농축이 어류 생태계나 인간에게 큰 영향을 미치고 있지는 않은 상황이지만, 생물 농축의 특성상 어류 수은 농축량이 섭식특성에 의한 먹이연쇄에 따라 상위 소비자로 갈수록 증가하고, 인간이 어류를 섭식하는 최상위 소비자인 것을 감안할 때 어류의 수은 농도 증가에 따른 피해 가능성은 주의해야 할 사항이다(Hamdy and Prabhu, 1979; 김과 박, 1981).

어류조직 내의 수은 농축은 지점별 변이뿐만 아니라 개체 및 조직별 수은 농도에 변이를 보였다. 2차 분석의 경우, S2의 1번 개체( $37.9 \mu\text{g kg}^{-1}$ )와 3번 개체( $112.1 \mu\text{g kg}^{-1}$ )는 개체 평균값에서 약 3배의 차이를 보였다. 또한 2차 분석에서 전체적인 피라미 수은 농축은 S2에서 높게 나타났지만 S6에서 개체 평균 농축량이 가장 높게 나온 2번 개체( $51.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ )의 경우 S2에서 가장 낮게 나온 1번 개체( $37.9 \mu\text{g kg}^{-1}$ )보다 수은 농축량이 약 1.4배 높게 나타나 개체에 따른 수은 농축 변이율이 결과에 영향을 미칠 수 있는 것으로 사료되었다(Table 1, Fig. 2). 이런 개체변이는 어류의 크기에 따라 차이를 보이는 것으로 알려져 있으며(Carlos, 1979; 손 등, 1982), 조직별로도 일반적으로 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.

세 차례의 분석에서 조직별 수은 농축량이 서로 다른 것을 관찰하였고, 이에 따라 조직별 수은 농축도 변이를 알아보기 위하여 한 개체 당 5개 조직에서 검출된 총수은의 양 중 특정 조직이 차지하는 양을 백분율로 환산하여 비교하여 보았다. 세 차례의 분석에서 사용된 피라미 총 15개체 각각의 조직을 비교·분석한 결과 5개의 조직 중 신장(Ki, 평균 31.2%)에서 가장 높고, 아가미(Gi, 평균 9.6%)에서 가장 낮은 농축을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3). 황 등(1998)에 따르면, 수은 농도는 일반적으로 신장 조직(Kidney)이나 간 조직(Liver)에서 가장 높은 것으로 나타나 본 연구와 일치한 반면에 강 등(1986), 김과 박(1981) 및 Lee and An(2007)에서는 근육 조직의 농축도가 높은 것으로 나타났다. 생물의 수은 농축 분석에 있어서 종별 및 개체별 특성이 분석에 미치는 영향을 고려할 때, 상·하류 간의 수은 농축도의 차이나 조직별 수은 농축량의 차이에 대해 더욱 정확한 결과를 도출하고 더 나아가 암·수의 차이, 개체의 크기별, 조사의 시기 및 수계별 변이를 알아보기 위해서 추후 분석 횟수와 대상 개체수를 늘려 실험이 필요할 것으로 사료되었다.

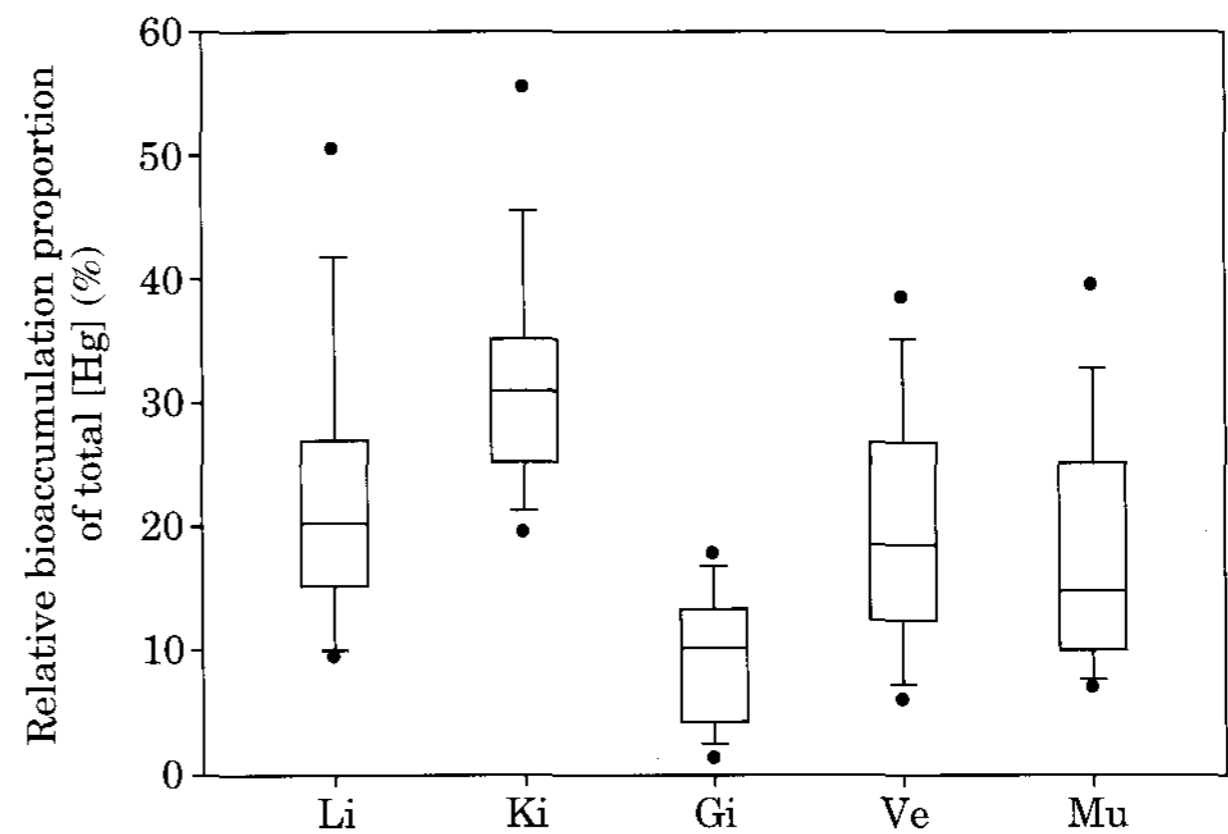


Fig. 3. Relative bioaccumulation proportion of total [Hg] in each tissue.

갑천의 지난 3년간 화학적 수질자료 분석에 따르면(Fig. 4), 하천의 수질등급을 나타내는 기준인 BOD는 평균  $3.8 \text{ mg L}^{-1}$ 로서 환경부의 하천 생활환경 기준 7등급 중 III등급인 “보통” 상태를 유지하였으나, 상·하류 간에 큰 변이를 보였다. S2에서 S5까지는  $3.0 \text{ mg L}^{-1}$  미만의 II등급 “약간 좋음 상태”를 유지하였으나 S6 및 S7은 평균  $6.7 \text{ mg L}^{-1}$ 로 나타나 IV등급의 “약간 나쁨 상태”로 급격히 악화되는 것을 볼 수 있는데, 이는 대전시를 관통하여 S6의 3 km 상류에서 합류되는 유등천(안 등, 2005)과 S6 상류에 위치한 대전 1·2 공단 및 하수종말처리장 등의 점오염원에서 배출되는 배출수의 유입에 의한 것으로 사료되었다(배와 안, 2006). COD도 마찬가지로 S2  $3.4 \text{ mg L}^{-1}$ 에서 S6  $7.9 \text{ mg L}^{-1}$ 로 2배 이상 증가하여 BOD와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 부영양화 지표인 TN 및 TP에서도 발견할 수 있었는데, TN은 S2~S5 평균값( $3.3 \text{ mg L}^{-1}$ )과 S6 ( $12.7 \text{ mg L}^{-1}$ )이 약 3.9배, TP는 S2~S5 평균값( $0.130 \text{ mg L}^{-1}$ )과 S6 ( $1.035 \text{ mg L}^{-1}$ )이 약 8배의 차이로 더욱 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 하수종말처리장을 통과하는 폐수 및 하수의 처리기준이 BOD나 COD에 비해 낮은 처리기준에 기인한 것으로 사료되었다(공, 2002). EC 및 SS 역시 하류로 갈수록 조금씩 증가하였으나, S6과 S7에서 급격히 악화되어 다른 항목들과 유사한 경향을 보였다.

강우가 집중되기 전 수체안정기에 실시된 생태 건강성 평가 결과, 평균 32로 “양호~보통상태”를 보였다. 지점별 분석 결과 S2에서 42로 “최적~양호상태”를 보여 가장 양호한 지점으로 나타났고, S5에서 22로 “보통~악화상태”를 보여 생태 건강성이 가장 악화된 지점으로 나타났다(Table 2). 가장 양호한 생태 건강성을 보이는 S2는 피

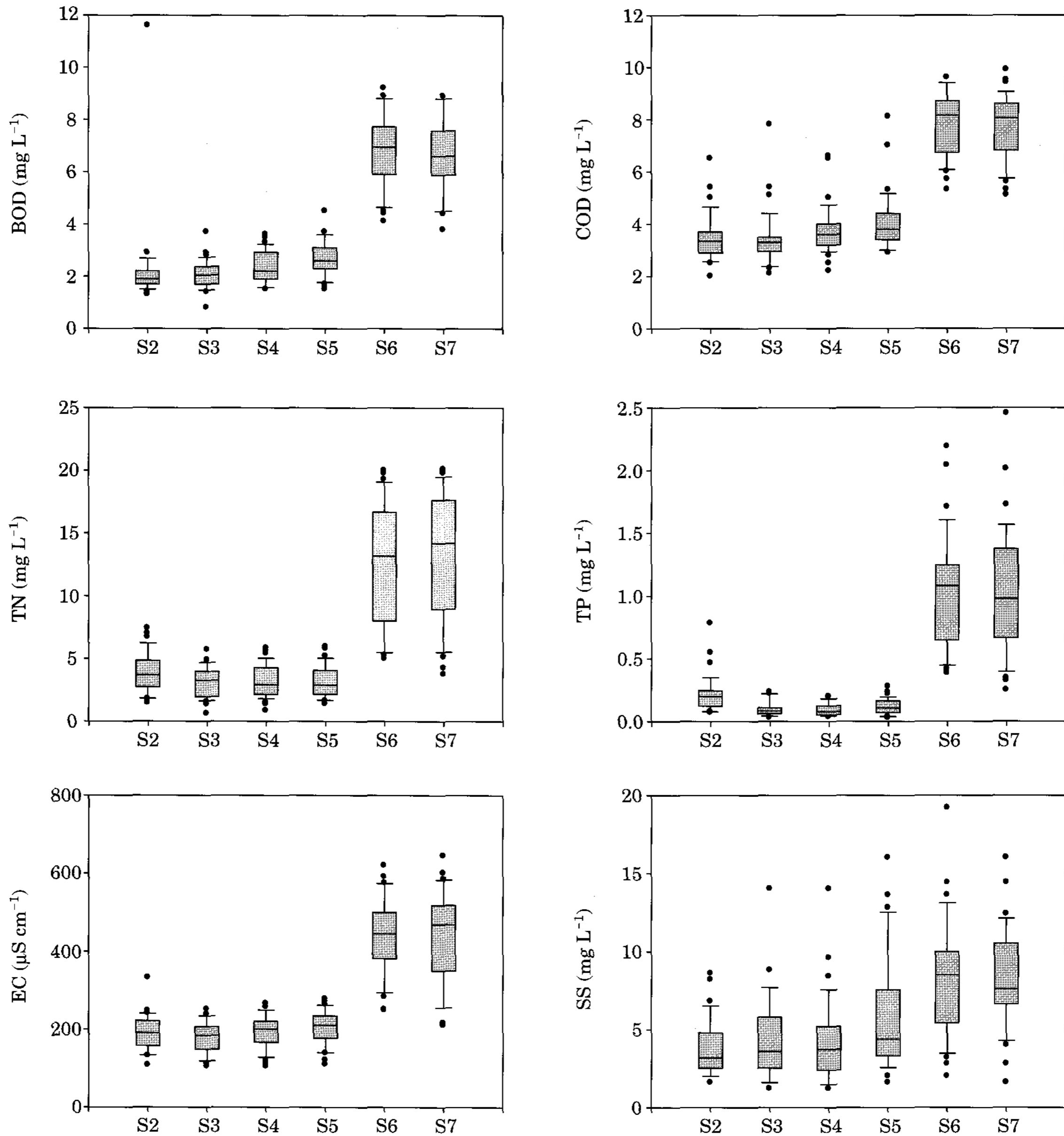


Fig. 4. BOD, COD, TN, TP, EC and SS in Gap Stream.

라미가 우점하여 내성종의 비율이 일부 높게 나타난 것을 제외하고 대체로 양호한 상태를 보였고, S5는 비정상 종이 출현하지는 않았으나 내성도 및 섭식특성에서 내성종과 잡식종이 65% 이상 우점하였고 외래어종이 상당수 출현하여 건강성이 가장 악화된 지점으로 나타났다. S6은 30으로 “보통상태”를 보여 점오염원의 영향에도 불구하고 S5보다 다양한 영양단계구조에 기인하여 일부 건강성이 양호해졌으나, 상류에서 하류로 갈수록 건강성이 악화되는 경향을 보였다. 이는 하천차수가 증가하거나 하

류로 갈수록 하천 오염원의 증가에 의하여 건강성이 낮아지는 것이 일반적이라는 US EPA (1993)의 보고와 일치하였다 (Table 2).

갑천의 물리적 서식지 평가 지수는 평균 142로 “양호상태”로 나타났다. 서식지 상태는 S2에서 181 “최적~양호상태”로 서식지 상태가 가장 양호한 지점으로 나타났으며, S3을 지나고 아파트단지 및 고수부지 등 도심의 영향을 받으면서 하류로 갈수록 서식지 상태가 악화되는 경향을 보이다 S5에서 67 “보통상태”로 가장 교란이 심

**Table 2.** The results of ecological health assessments, based on the 10 metric models after Karr (1981) and Barbour *et al.* (1999) in Gap Stream.

Sampling location	TNS	RBS	SS	TS	OS	IS	CS	TNI	XT	AI	Model values (Criteria)
S1	14 (5)	8 (5)	4 (3)	14 (3)	20 (3)	64 (5)	13 (5)	368 (5)	0 (5)	1.1 (1)	40 (II)
S2	16 (5)	9 (5)	4 (3)	29 (1)	31 (3)	60 (5)	5 (5)	256 (5)	0 (5)	0 (5)	42 (I~II)
S3	11 (3)	7 (5)	4 (3)	42 (1)	81 (1)	17 (1)	2 (3)	344 (5)	0.3 (3)	0.3 (3)	30 (III)
S4	18 (5)	7 (5)	7 (5)	67 (1)	76 (1)	23 (3)	1 (1)	242 (5)	0 (5)	0 (5)	34 (II~III)
S5	11 (3)	2 (1)	5 (3)	68 (1)	68 (1)	31 (3)	1 (1)	133 (3)	0 (5)	0 (5)	22 (III~IV)
S6	10 (3)	3 (1)	3 (1)	31 (1)	26 (3)	66 (5)	8 (5)	65 (1)	0 (5)	0 (5)	30 (III)
S7	15 (5)	1 (1)	2 (1)	48 (1)	38 (3)	54 (5)	3 (3)	96 (1)	3.1 (1)	3.1 (1)	26 (III)

TNS=Total number of native species, RBS=Number of riffle benthic species, SS=Number of sensitive species, TS =Proportion individuals as tolerant species, OS=Proportion individuals as omnivores, IS=Proportion individuals as native insectivores, CS=Proportion individuals as native carnivores, TNI=Total number of individuals, XT=Proportion individuals as exotics, AI=Proportion individuals with anomalies, I =Excellent, II=Good, III=Fair, IV=Poor

**Table 3.** Qualitative Habitat Evaluation Index (QHEI) based on 11 metric attributes after An and Kim (2005) in Gap Stream. In the table, abbreviations are as follows; I=Excellent, II=Good, III=Fair.

Habitat parameters	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
M <sub>1</sub> Substrate/Instream cover	16	15	5	13	3	11	18
M <sub>2</sub> Embeddedness	16	11	15	15	8	16	15
M <sub>3</sub> Flow velocity/Depth combination	16	18	20	18	5	18	18
M <sub>4</sub> Bottom scouring & Sediment deposition	20	18	18	11	18	11	18
M <sub>5</sub> Channel flow status	10	15	16	13	20	10	16
M <sub>6</sub> Channel alteration	13	18	11	8	1	6	11
M <sub>7</sub> Frequency of riffles or bends	16	16	13	5	1	5	5
M <sub>8</sub> Bank stability	20	20	19	17	2	10	13
M <sub>9</sub> Bank vegetative protection	20	20	19	20	2	13	14
M <sub>10</sub> Riparian vegetative zone width	12	10	19	8	2	6	10
M <sub>11</sub> Dam construction impact	11	20	16	8	5	13	10
Model values (Criteria)	170 (I~II)	181 (I~II)	171 (I~II)	136 (II)	67 (III)	119 (II~III)	148 (II)

하였고, 그 후 S6에서 S7로 갈수록 회복되는 양상을 보였다(Table 3). S2와 S5는 약 2.7배의 큰 점수 차이를 보였는데, 이는 S5의 제방 양옆은 인근 아파트단지과 도로가 인접하고 있고, 주민들의 휴식공간 역할을 하는 고수부지가 형성되어 있으며, 대형 라바보 및 콘크리트 인공제방의 축조, 그에 따른 유기물 침적으로 인하여 파괴된 서식지(Plafkin *et al.*, 1989)가 생태 건강성을 반영하는 것으로 사료되었다.

이처럼 갑천 수계의 하류가 생태 건강성과 물리적 서식지 상태에서 교란이 심하고, 화학적 수질에서 오염정도가 심하게 나타난 것과는 상반되게 어류의 수는 농축도는 3차례의 피라미 조직별 수은 농축도 분석에서 모두 하류에 비해 상류에서 더 높은 것으로 나타났는데, 갑천 상류 피라미의 수은 농축량이 높은 원인에 대해서는 상류지역의 수은 오염원 유무와 그 밖의 다른 원인에 대한 조사 등의 추후 연구가 필요할 것으로 사료되었다. 또한,

어류의 수는 농축은 생태 건강성 평가와 물리적 서식지 평가, 화학적 수질 분석 등의 다른 환경 평가들을 통해서 나타나는 지표로서, 어류 체내의 수은 농축이 일정 수준을 초과하지 않는 이상 어류 개체 자체에 영향을 미치지 않기 때문에 생태 건강성 평가나 물리적 서식지 평가와 같은 어류군집 이상의 수준에서 실시하는 평가뿐만 아니라, 일반적으로 실시하는 화학적 수질 평가 항목들과도 연관성이 거의 없는 것으로 나타났는데, 이는 지금 우리가 시행하고 있는 환경 평가 방법들만으로는 수계 내 어류의 수은 농축에 대한 모니터링을 실시할 수 없음을 의미한다. 현재, 국내 담수 어류의 중금속 잔류 허용 기준은 정해져 있지만 아직까지 어류 체내의 수은 농축에 관한 연구와 모니터링은 미흡한 실정이다. 향후, 각 수계와 수계별 하천생태계 내의 수생 생물들과 수은 함량에 대한 지속적인 모니터링을 실시하고 자료화하여, 개체군 및 광범위한 지역의 비교평가를 통해 우리나라 어



류의 자연적 총수은 농도(Natural background level)를 규명하고, 그에 따른 상대적 영향농도를 연구하여 각각의 수계와 지점에 대한 수은 권고안의 확립이 필요할 것으로 사료되었다(Lee and An, 2007).

## 적 요

본 연구는 피라미(*Zacco platypus*)를 대상으로 어류 조직별 총수은 함량을 규명하고, 서식지 특성 및 화학적 수질조건에 따른 생태 건강성을 평가하기 위한 사례연구로서 수행되었다. 2007년 6월~10월에 갑천을 대상으로 어류조사를 실시하였고 간, 신장, 아가미, 척추 및 근육 등 피라미의 5개 조직을 적출하여 직접수은분석기(DMA-80, US EPA Method 7473)을 이용하여 총수은 함량을 분석하였다. 전체 조직들의 평균 총수은 농도는 상·하류 각각  $67.2 \mu\text{g kg}^{-1}$  및  $20.7 \mu\text{g kg}^{-1}$ 로 나타나 맑고 깨끗한 상류지역이 하수종말처리장의 영향을 받고 있는 하류 지역에 비해 3배 이상 높게 나타났다. BOD, COD 및 영양염류(TN, TP)에 근거한 화학적 수질평가에서는 상류보다 하류에서 심각한 질적저하가 발생하였다. 어류를 이용한 다변수 모델인 생물통합지수(IBM)는 평균 32 “양호~보통상태”로 나타났고, S2는 42 “최적~양호상태”로 최고치를 보인 반면 S5에서는 최저치인 22 “보통~악화상태”로 나타나 지점별 변이를 보이고 있었다. 정성적 서식지평가지수(QHEI)의 경우 평균 142로서 “양호상태”로 나타났지만 지점별 변이(범위 67~181)가 크게 나타났다. 종합적으로 IBM 및 QHEI를 통한 생태 건강성 평가에서는 상류지역이 양호하게 나타난 반면 어류 조직 내 수은 생물 농축도는 상반된 결과를 보였다. 따라서 총체적인 수환경 건강성 평가를 위해서는 다양한 변수를 이용한 평가방법이 필요할 것으로 사료되었다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “에코스타 프로젝트 수생태복원사업”으로 일부 지원받은 과제임.

## 인 용 문 헌

- 강희곤, 윤원용, 박상현, 박성배. 1986. 북한강에(北漢江) 서식하는 담수어중의(淡水魚中) 중금속 함유량에 관한 연구(제2보). 한국육수학회지 **19**(1): 79-88.
- 공동수. 2002. 생물학적 수질기준 설정 필요성 및 접근방안. 환경생물 **20** (special issue): 38-49.
- 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.
- 김익수, 박종영. 2002. 원색도감 한국의 민물고기. 교학사.
- 배대열, 안광국. 2006. 생물학적 다변수 모델 적용 및 수화학 분석에 의거한 갑천 생태계 평가. 한국육수학회지 **39**(2): 198-208.
- 손동현, 홍순각, 송철용, 전상린. 1982. 담수어중의 총수은함량에 관한 연구. 한국식품과학회지 **14**(2): 168-173.
- 손영목, 송호복. 2006. 금강의 민물고기. 지성사.
- 식약청. 2007. 제1. 총칙-제4. 규격 외 일반가공식품, 식품공전(전면개정 개정 후). 23p.
- 안광국, 김자현. 2005. 물리적 서식지평가방법 및 어류 다변수 평가모델에 의거한 대전천의 생태학적 건강도 진단. 한국육수학회지 **38**(3): 361-371.
- 안광국, 이의행. 2006. 어류의 군집 메트릭 모델을 이용한 유구천의 생태 건강도 평가. 한국육수학회지 **39**(3): 310-319.
- 안광국, 이재연, 배대열, 김자현, 황순진, 원두희, 이재관, 김창수. 2006. 우리나라 주요하천 수계에서 다변수모델을 이용한 생태학적 수환경 평가. 한국물환경학회지 **22**(5): 796-804.
- 안광국, 이재연, 장하나. 2005. 유등천에서의 생태학적 건강도 평가 및 수질양상. 한국육수학회지 **38**(3): 341-351.
- 안광국, 최지웅. 2006. 초강의 통합적 생태건강성 평가. 한국하천호수학회지 **39**(3): 320-330.
- 안광국, 한정호. 2007. 정수 생태계 건강성 평가를 위한 다변수 메트릭 모델 개발. 한국육수학회지 **40**(1): 72-81.
- 조규석, 박종호, 강주찬. 2004a. 수은, 납 및 구리에 대한 붕어(*Carassius auratus*)와 돌고기(*Pungtungia herzi*) 자어의 급성독성. 한국물환경학회지 **20**(3): 265-268.
- 조석주, 배경석, 정의근, 윤종철, 이상열, 이종현, 이승천, 윤호균, 신정식, 김명희. 2004b. 한강 및 지천에 분포하는 어류 체내의 유해성 중금속 농도에 관한 연구. 서울특별시 보건환경연구원보 **40**: 465-473.
- 환경부. 2006. 수은관리 종합대책. 환경보건정책과-649.
- 황인담, 기노석, 정인호, 이점상, 이재형. 1988. 수은 중독에 관한 실험적 연구. 한국환경보건학회지 **14**(1): 103-113.
- 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. US EPA Office of Water, Washington, D.C., USA.
- Carlos, S. 1979. Mercury in marine and freshwater fish of Papua New Guinea. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* **30**(5): 617-623.
- Hamdy, M.K. and N.V. Prabhu. 1979 Behavior of mercury in biosystems III. Biotransference of mercury through

- food chains. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **21**(1-2): 170-178.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin* **56**: 275-370.
- Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communities. *Fisheries* **6**: 21-27.
- 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.
- Lee, J.-S., J.-C. Kang, and Y.-K. Shin. 2001. Histological responses of the flounder, *paralichthys olivaceus* exposed to copper, *Journal of Fish Pathology* **14**(2): 81-90.
- 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. U.S.A.
- Plafkin, J.L., M.T. Barbour, K.D. Porter, S.K. Gross and R.M. Hughes. 1989. Rapid bioassessment protocols for use in streams and rivers: benthic macroinvertebrate and fish. EPA/444/4-89-001. Office of water regulations and standards. US EPA. Washington. DC, U.S.A.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions* **38**: 913-920.
- US 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, US EPA, Cincinnati, Ohio 45268, U.S.A.
- US EPA. 1994. *Water quality standards handbook*. EPA-823-B-94-005a & b. US Environmental Protection Agency, Office of Water. Washington, DC.
- US EPA. 2000. Test Method for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods: Method #7473, SW 846, *Update IVA*, US GPO, Washington DC.
- US EPA. 2005. What You Need to Know About Mercury in Fish and Shellfish. EPA-823-F-04-009

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