

## 탁도 변화가 참갈겨니 (*Zacco koreanus*) 조직에 미치는 영향

신명자 · 김정숙 · 황윤희 · 이종은 · 서울원\*

(안동대학교 자연과학대학 생명과학과)

Effect of Turbidity Changes on Tissues of *Zacco koreanus*. Shin, Myung-Ja, Jeong-Sook Kim, Yun-Hee Hwang, Jong-Eun Lee and Eul-Won Seo\* (Department of Biological Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

Present study aims to investigate the effect of muddy water on the gill and the kidney tissues of *Zacco koreanus* under high turbidity rearing condition. The gill of *Z. koreanus* showed abnormal shapes in its secondary lamellae and a rough surface with impure debris in the high level of turbidity and the longer raising period condition. In addition, the gills showed the edema, the exfoliation of epithelial cell, and the fusion of the secondary lamellae. In case of kidney tissue, the atrophied glomerulus was observed, and the empty space in Bowman's capsule was wider. The SOD activities in both gill and kidney tissues were increased in proportion to the high level of turbidity. On the while, CAT and GPX activities were shown constant level in the gill, but were increased in the kidney in the high turbid muddy water. These results indicate that the harmful radicals which generate by high level of turbidity could be removed partly by antioxidant enzymes in the kidney. The concentrations of micro heavy metal ions accumulated in the gill increased drastically at the 1,000 NTU. Based on the above results, it is considered that the exposure to the high level of turbidity for long period may affect on the structures of tissues, and change the enzymatic balance in *Z. koreanus*, causing the fatal disease.

Key words : turbidity, gill, kidney, antioxidant enzyme, heavy metal ion

### 서 론

최근 강수량의 계절적 편중과 집중호우에 의한 환경적 피해가 가중되고 있으며, 그중에서 탁수에 의한 수질문제는 사회적 문제로 대두되었고 여름철을 전후하여 전국적인 규모의 광역화 현상으로 전개되고 있다. 일반적으로 탁수는 집중강우가 발생한 후 수일 내로 정화되는 것으로 알려져 있으나 상류지역의 과도한 토사의 유출은 하류 지역에 서식하는 수중생물의 서식처를 파괴하며, 탁수에 포함된 미립성 입자들은 이들의 호흡장애 및 질병유발의 요인으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 탁수가 지

속적으로 하천으로 유입될 경우 하천생태계에 큰 영향을 미칠 것으로 우려된다. 대표적으로 임하호의 경우 2002년과 2003년 태풍 이후 최고 탁도가 1,221 NTU까지 증가하였으며, 탁수 발생 일수도 315일로 장기간 고탁도를 유지한 바 있다(이와 조, 2004). 임하호의 경우 임하호 주변 유역의 지질 및 토지피복 상태가 토사유실에 취약한 특성을 갖고 있어 강우발생시 토사가 하천에 유입되어 호소 내에 탁수가 발생하고 있으며, 또한 낙동강 상류지역에서 흘러 들어온 토사로 인하여 연중 고탁도의 탁수를 유지하고 있다. 임하호의 이러한 탁수 현상은 인근 지역 자연경관의 훼손 및 이에 따른 경제적 손실에도 막대한 영향을 주고 있으며, 또한 고탁도 현상은 수중 영양염

\* Corresponding author: Tel: (054) 820-5462, Fax: (054) 823-1627, E-mail: ewseo@andong.ac.kr

의 증가, 수질의 투명도 저하 및 서식처 교란 등을 유발하여 어류와 많은 수생생물에 스트레스로 작용하고 있다.

구미지역에서는 환경오염에 따른 수생태계의 변화를 파악하고자 이화학적 수질분석을 통한 수질관리뿐만 아니라 생물학적 감시망을 구축하여 악화된 수환경의 보전 및 복원을 위한 꾸준한 생물 모니터링 및 수생생물의 생태적 특성 및 생리·생화학적 연구를 실시하고 있다. 국내에서도 환경오염에 의한 수생태계의 변화를 수생생물의 형태·생리학적 측면에서 조사하고 있는데, 김 등 (2002)은 오폐수 등에 의해 수질이 심각하게 오염되어 있는 만경강에 서식하는 수생생물 중 어류는 오염물질과 오염수역의 원생생물 및 세균 등에 의해 아가미 조직이 병리적으로 형태의 변형이 나타난다고 하였으며, 이 등 (2006)은 탁수역에 서식하는 어류에서 아가미와 신장 조직이 비정상적 형태를 하고 있다고 보고한 바 있다. 또한 탁수의 정도가 심화되면 어류는 생리적으로 심한 스트레스를 받게 되어 여러 산화성 물질 중 다량의 활성산소를 발생하게 되어 (Chance *et al.*, 1979) 심각한 생리적 장애를 유발하게 되는데, 이러한 활성산소의 제거 기작에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

어류는 수서생태계 내에서 최고 소비자로서 수환경에 따라 다양한 반응을 보인다. 탁수와 같은 오염원에 대하여 어류는 단기간의 생리·생화학적인 반응을 통해 조직 및 기관의 병리적 변화를 초래하게 되고, 이러한 현상이 장기적으로 오래 지속되면 하나의 개체, 더 나아가 군집의 생존을 위협하게 된다. 따라서 본 연구에서는 고탁도의 탁수가 어류에 미치는 영향을 알아보기 위하여 탁도 변화에 따른 참갈겨니의 조직 및 생리적 변화에 관하여 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험 어류

실험어는 경북 안동시 길안면에 소재한 수질의 상태가 매우 양호한 갈라산 수계에 서식하는 참갈겨니 (*Zacco koreanus*)를 채집하였다. 현장에서 김 (1997), 김과 박 (2002)을 참고하여 동정한 후 즉시 실험실로 옮겨 7일간 순치과정을 거친 후 만 1년생 (전장  $6.62 \pm 1.3$  cm, 체중  $1.65 \pm 1.13$  g) 개체들을 선별하여 실험에 사용하였다. 실험은  $60 \times 30 \times 45$  cm 크기의 유리 수조를 사용하였고 사육수의 수질은 Table 1과 같다. 실험구의 어류는 대조구와 동일한 수질을 사용하였으며, 탁도의 조정은 임하호 유역에서 채취한 점토질을 건조시킨 후 2.36 mm (#8)와

**Table 1.** Fundamental water quality used in the experiment.

Parameters	Conditions
Water temperature (°C)	18~20
pH	7.17~7.27
ORP (mV)	-43~-44
Dissolved oxygen (mL <sup>-1</sup> )	7.73~8.31
Conductivity (μS cm <sup>-1</sup> )	145~155
Alkalinity (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	88~95
Hardness (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	80~85

0.15 mm 표준망체 (#100)를 통과한 미세 입자만을 사용하여 150, 300, 600, 1,000 NTU로 탁도를 조정하였다. 사육기간 동안 일정한 탁도의 유지를 위해 aeration과 수조 하부에 교반기를 설치하여 가급적이면 미세 입자가 균등하게 분포할 수 있도록 조정하였다. 사육기간은 한국수자원공사(2006)에 의거하여 최장 14일간, 각 수조 당 50마리씩 사육하였으며 수조의 수온은 18~20°C를 유지하였다. 실험어는 사육 후 이틀 간격으로 각 수조 당 6마리를 채취하여 2마리씩 3개의 시료를 만들었으며, 3회 반복하여 실험을 실시하였다.

### 2. 조직학적 변화 관찰

#### 1) 광학현미경적 연구

참갈겨니의 아가미와 신장을 절취하여 FAA로 24시간 고정 후 수세, 탈수 과정을 거친 후 일반적인 조직 제작 방법에 따라 조직을 파라핀 포매하였다. 이 후 파라핀 블록을 두께 4~6 μm로 제작하여 hematoxylin과 eosin에 이중염색한 후, 광학현미경 (Olympus BX50) 하에서 관찰하였으며 사진 촬영은 Olympus DP-71을 사용하였다.

#### 2) 주사전자현미경적 연구

주사전자현미경 관찰은 참갈겨니의 아가미를 절취하여 glutaraldehyde (2.5%)에서 2시간 전고정 후 0.1 M phosphate buffer (pH 7.0)로 15분씩 3회 세척하였다. 후고정은 1% osmium tetroxide (OsO<sub>4</sub>)에 1~2시간 고정시켜 탈수 과정을 거친 후 냉동건조기에서 완전히 건조시켜 표면 금 코팅을 실시한 후 주사전자현미경 (Hitachi S-2500C) 하에서 아가미 표면의 미세구조를 관찰하였다.

### 3. 항산화효소의 활성 측정

#### 1) 시료 추출

참갈겨니의 아가미, 신장 조직을 적출하여 PBS (phosphate buffer, pH 7.2)에 혈액 및 기타 이물질 등을 세척한 후 조직의 무게를 측정하였다. 무게를 측정한 시료는

homogenation buffer (pH 8.4)에서 완전히 균질화 시킨 후 시료는 13,000 rpm, 4°C에서 10분간 원심분리하여 지질층을 제외한 상등액만을 모아 -70°C에 보관하였다.

**2) Superoxide dismutase (SOD)**

Superoxide dismutase의 활성은 McCord and Fridovich (1969)의 방법에 따라 측정하였다. 50 mM potassium phosphate buffer (pH 7.8), 0.1 M cytochrome C, 50 mM xanthine, 0.1 mM EDTA 및 효소액이 포함된 용액을 25°C에서 예치한 다음 xanthine oxidase를 첨가하여 반응을 개시하였다. 효소의 활성은 550 nm에서 10초 단위로 150초간 흡광도를 측정하였으며, xanthine oxidase 첨가량은 효소액을 함유하지 않은 반응액의 흡광도 흡수가 분당 0.025가 되도록 조절하였다. 효소의 활성은 cytochrome C의 환원 속도를 50% 억제하는 양을 1 unit로 측정하여 unit/mg protein/min으로 나타내었다.

**3) Catalase (CAT)**

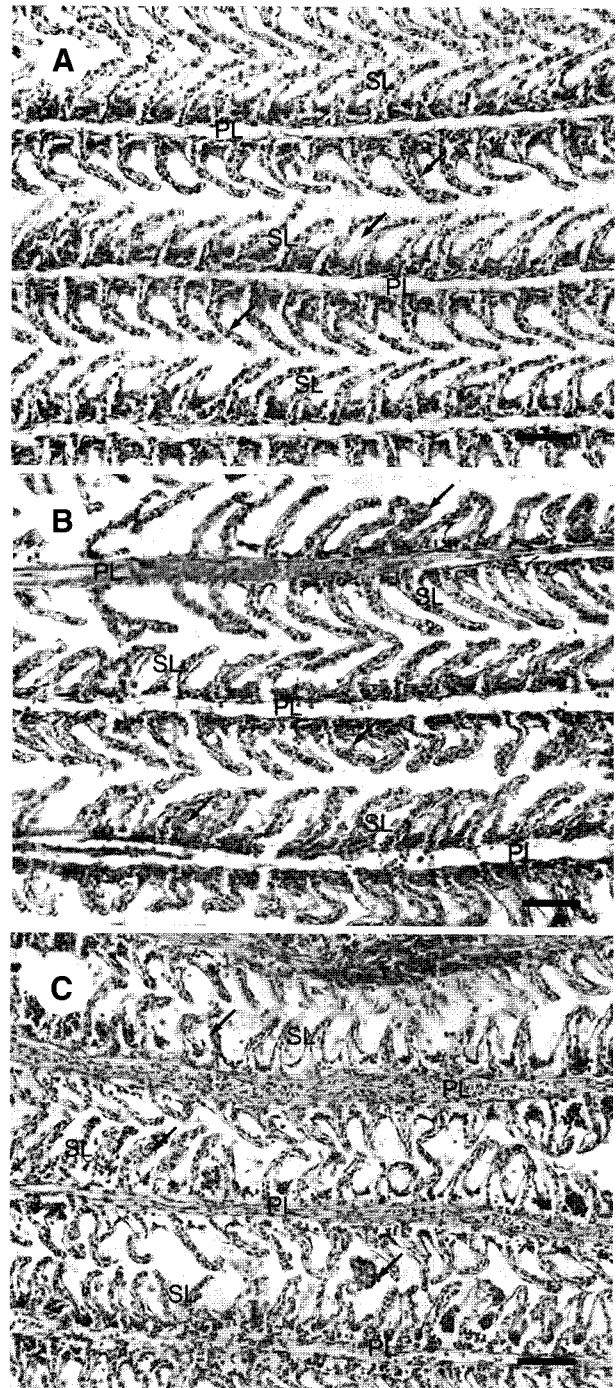
Catalase의 활성은 Aebi (1984)의 방법에 따라 측정하였다. 50 mM phosphate buffer (pH 7.0) 2 mL와 시료액 20 µL를 취하고 기질로 10 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액 1 mL를 가하여 잘 혼합한 후 240 nm에서 흡광도의 변화를 2분간 측정하였다. 대조실험으로는 기질인 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 용액 대신에 50 mM phosphate buffer (pH 7.0)을 가하고 위와 동일한 방법으로 흡광도의 변화를 측정하였다. 효소의 활성은 1분 동안에 1 µmol의 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 분해하는 효소의 양을 1 unit로 하였다.

**4) Glutathione peroxidase (GPX)**

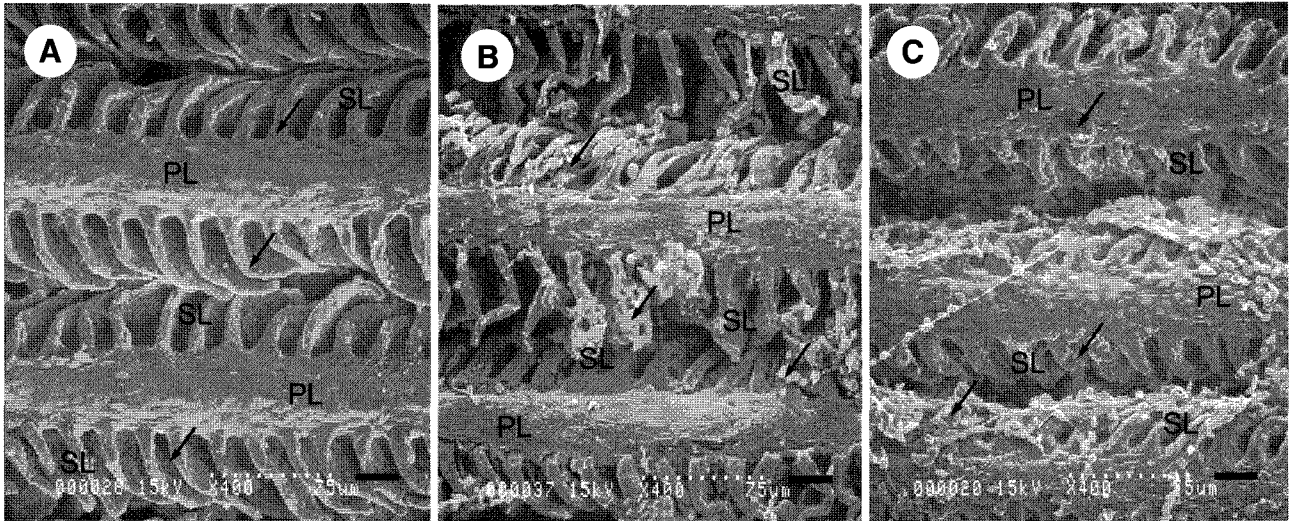
Glutathione peroxidase의 활성은 Flohe *et al.* (1984)의 방법에 따라 측정하였다. 1 mM EDTA가 함유된 100 mM phosphate buffer (pH 7.6)에 0.25 mM GSH, 0.12 mM NADPH가 포함된 반응액을 제조하였으며, 이 반응액에 효소 시료액을 혼합한 후 37°C에서 5분간 방치한 다음 4 mM cumene hydroperoxide를 60 µL를 가하여 340 nm에서 1분간 흡광도의 변화를 측정하였다. 효소의 활성은 1분 동안에 1 µmol의 NADPH를 NADP로 산화하는 효소 양을 1 unit로 하여 표시하였다.

**4. 미량원소 측정**

참갈겨니의 아가미 조직을 적출한 후 ultrasonic cleaner (5210, Branson)에서 표면에 부착된 점토의 미세입자 및 이물질들을 최대한 제거한 후 액체 질소로 처리한 후 재차 냉동건조기에서 완전히 건조하여 건조중량을 측정하였다. 아가미의 미량중금속(Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, Mn, As,



**Fig. 1.** Microscopic examination of *Z. koreanus* gill rearing for 12 days at the control, 300 and 1,000 NTU turbid water. A: Gills from the control were shown normal structure. B: Gills from 300 NTU turbid water. Respiratory epithelial cells were separated in secondary lamella (arrows). C: Gills from 1,000 NTU turbid water. Clubbing and winding were shown between primary and secondary lamella (arrows). Scale bars=20 µm; PL, primary lamella; SL, secondary lamella.



**Fig. 2.** Scanning electron micrographs of *Z. koreanus* gills rearing for 12 days at the control, 300 and 1,000 NTU turbid water. A: Gills from the control were shown normal structure. B: Gill from 300 NTU turbid water. Winding of secondary lamella and muddy debris were shown (arrows). C: Gills from 1,000 NTU turbid water. Fusion and muddy debris were shown between primary and secondary lamella (arrows). Scale bars=75  $\mu$ m; PL, primary lamella; SL, secondary lamella.

Cd) 측정을 위해 전처리하는 Microwave Equipment (Milestone ETHOS PLUS)를 이용하였다. 전처리된 아가미 내 미량중금속의 함량은 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, ELAN DRC-e)를 이용하여 측정하였다.

## 5. 통계처리

각 실험에서 얻어진 결과는 평균값 $\pm$ 표준편차로 표시하였고 통계 프로그램 패키지(SPSS Inc., ver 12.0K)를 이용하여 Levene의 등분산 검정과 평균의 동일성에 대한 T-검정을 통하여  $p < 0.05$ 의 수준에서 유의성을 검정하였다.

## 결 과

### 1. 아가미와 신장의 조직

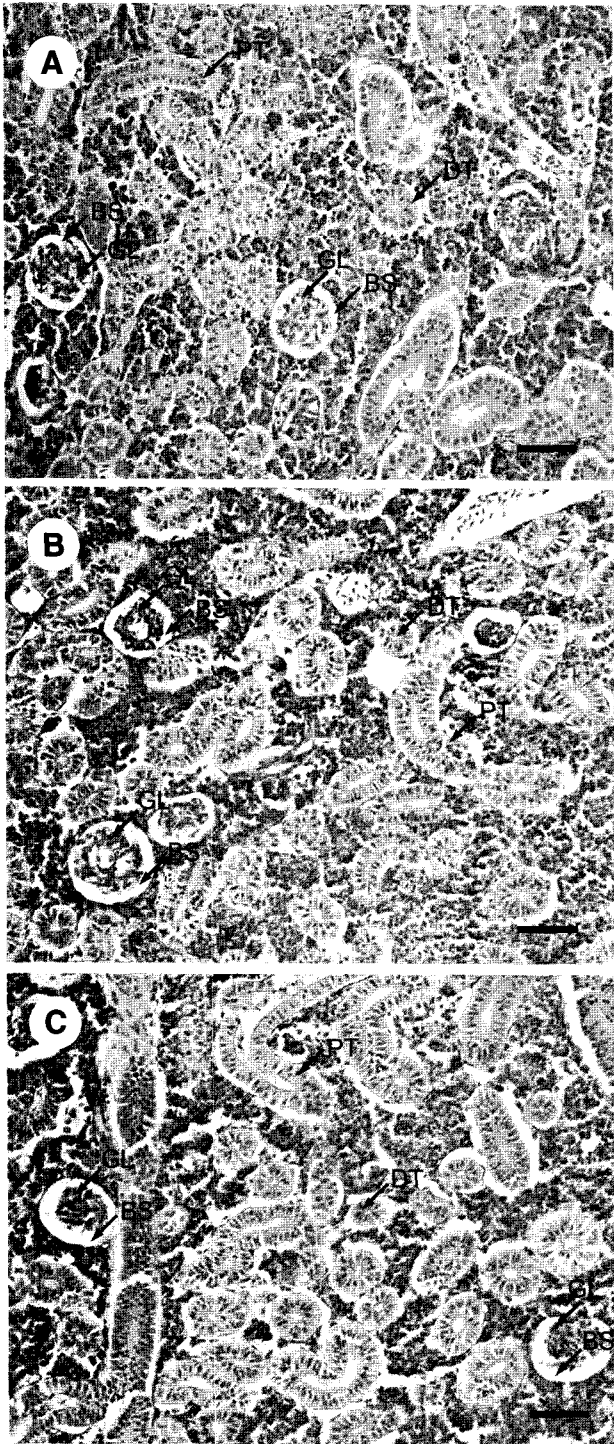
#### 1) 아가미 조직 관찰

탁도의 농도와 사육기간에 따라 탁수가 참갈겨니 아가미 조직의 미세구조에 미치는 영향을 조사하였다. 우선 청정 조건에서 사육한 대조군의 아가미 조직은 이차새변 사이의 공간이 일정하였고 새변 사이에 이물질도 존재하지 않았으며, 이차새변의 표면이 매끄럽고 규칙적으로 배열하고 있다(Figs. 1A, 2A). 한편 탁도 300 NTU에서 사육 후 4일에는 아가미 조직의 이차새변 간격은 비교적

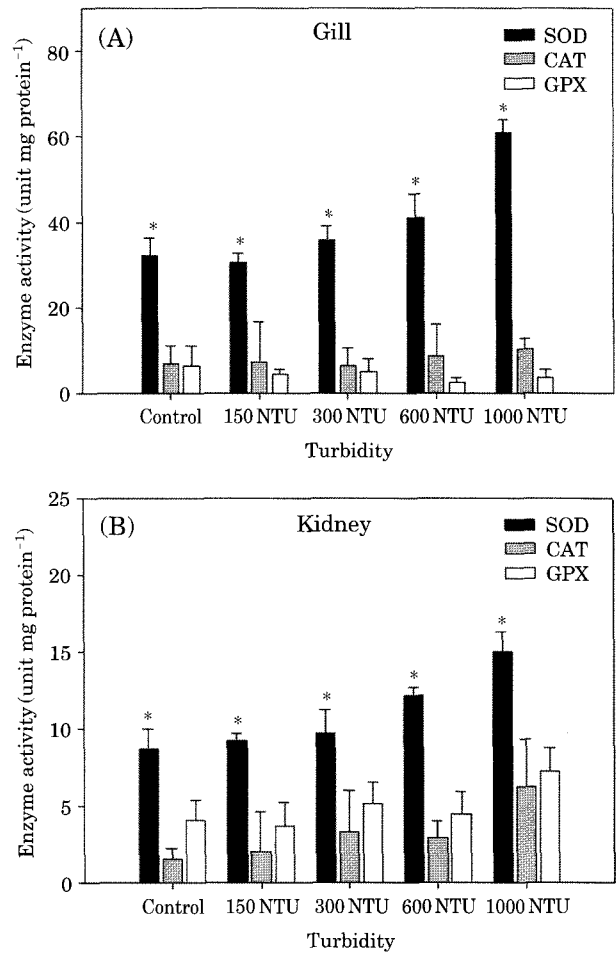
일정하였으나 이차새변의 부종과 이차새변 상피세포의 박리가 관찰되었다(data not shown). 사육기간이 길어져 사육 12일에는 이차새변 사이의 간격은 비교적 일정하였으나 이차새변의 끝이 부풀어 오르는 곤봉화와 부종이 관찰되었고, 부분적으로 이차새변과 이차새변이 인접하여 융합한 형태도 관찰되었으며(Fig. 1B), 전자현미경을 통한 표면 형태에서도 이와 유사하게 관찰되었다(Fig. 2B). 탁도 1,000 NTU의 고탁수 조건에서 사육 4일 경과 시에는 300 NTU의 조건에서 보다 훨씬 빨리 이차새변이 굽어져 있으며 새변 사이의 간격이 불규칙하고, 상피세포의 박리가 관찰되었다(data not shown). 사육 12일이 되면 이차새변 사이의 간격은 더욱 불규칙해지며, 곤봉화와 부종이 두드러지게 관찰되었고, 새변사이에 다량의 이물질이 부착되어 있으며 상피세포의 박리가 나타났다(Fig. 1C). 전자현미경적으로도 이차새변은 매우 굽고 부풀어져 있으며, 간격이 매우 불규칙하고 새변이 인접하여 새변 사이의 공간이 거의 없으며 많은 이물질이 부착되어 있는 것으로 나타났다. 또한 일차새변은 표면이 매끄럽지 못하고 혹처럼 부풀어 오른 것이 관찰되었다(Fig. 2C). 사육기간이 길어지고 고탁도로 갈수록 아가미 조직의 병리적 형태 변화가 두드러지게 나타나고 있다.

#### 2) 신장 조직 관찰

탁도와 사육기간에 따른 신장 조직의 변화를 살펴보면 대조군의 신장 조직은 보우만 주머니 안에 사구체가 가



**Fig. 3.** Micrographs of *Z. koreanus* kidney rearing for 12 days at the control, 300 NTU and 1,000 NTU turbid water. A: Kidney from the control was shown normal structure. B, C: Nephrosclerotic glomerulus was shown at 300 and 1,000 NTU turbid water. Scale bar=20  $\mu$ m; BS, Bowman's space; DT, distal tubule; GL, glomerulus; PT, proximal tubule.



**Fig. 4.** Comparison of antioxidant enzyme activities in the crude proteins from gill (A) and kidney (B) of *Z. koreanus* exposed for 12 days to various turbid water. A: In the gill, activity of SOD, but not CAT and GPX, was increased according to increasement of the water turbidity. B: Activities of antioxidants, SOD, CAT and GPX, in the kidney were increased gradually according to increasement of the water turbidity. The values are mean  $\pm$  SD (n=3). \* $P < 0.05$  as compared to muddy water and antioxidant enzyme.

두 차있는 정상적인 구조로 관찰되었다(Fig. 3A). 그러나 탁도 300 NTU에서 4일간 사육 후에는 대조군 조직에 비하여 사구체가 다소 수축된 형태로 관찰되었고(data not shown), 사육 12일 후에는 확연한 사구체의 수축이 나타났다(Fig. 3B). 1,000 NTU의 탁도에서 사육한 경우 사육 4일째에는 사구체의 수축이 나타났으며, 12일째에는 300 NTU에서 사육한 경우와 같이 완전한 사구체의 수축으로 인하여 보우만 주머니 안의 공간도 넓게 관찰되었다(Fig. 3C). 신장 조직은 300 NTU 이상의 고탁도에서는 사

**Table 2.** Concentrations of micro heavy metal from *Z. koreanus* gill exposed for 12 days to various density of muddy water. The values are mean  $\pm$  SD (n=3). (unit: ppm)

Micro heavy-metal	Turbidity			
	Control	300 NTU	600 NTU	1,000 NTU
Pb	4.985 $\pm$ 2.095	5.883 $\pm$ 1.078	20.799 $\pm$ 3.102	28.644 $\pm$ 1.057
Cd	0.044 $\pm$ 0.007	0.062 $\pm$ 0.025	0.158 $\pm$ 0.086	0.638 $\pm$ 0.025
As	0.163 $\pm$ 0.015	0.172 $\pm$ 0.099	0.201 $\pm$ 0.056	0.286 $\pm$ 0.012*
Cr	0.788 $\pm$ 0.124	2.451 $\pm$ 0.214	2.882 $\pm$ 0.087	5.064 $\pm$ 0.167
Cu	3.093 $\pm$ 0.064	48.704 $\pm$ 3.101	69.890 $\pm$ 2.243	210.098 $\pm$ 2.741
Zn	55.365 $\pm$ 4.142*	111.386 $\pm$ 3.348*	118.400 $\pm$ 2.324*	340.938 $\pm$ 4.099*
Mn	0.035 $\pm$ 0.014	0.277 $\pm$ 0.012	0.440 $\pm$ 0.175	0.563 $\pm$ 0.025
Fe	33.744 $\pm$ 4.154*	53.016 $\pm$ 2.945*	79.961 $\pm$ 4.546*	321.803 $\pm$ 5.325*

\* $P < 0.05$  as compared to muddy water and micro heavy metal.

육 4일째부터 급성적으로 조직의 수축현상이 나타나는 것으로 확인되었다.

## 2. 아가미와 신장 조직의 항산화효소 활성

탁도 변화에 따른 아가미와 신장 조직내 SOD (superoxide dismutase), CAT (catalase) 및 GPX (glutathione peroxidase)의 활성 변화를 조사하였다. 아가미 조직에서 SOD 활성은 대조군에 비해 1,000 NTU의 고탁수로 감에 따라 활성이 증가하는 경향을 나타냈으나 CAT 활성은 탁도 변화에 따른 유의적인 활성 변화를 나타내지 않고 있으며, GPX 활성은 전반적으로 매우 낮았으며 대조군에 비해 고탁수에서 오히려 활성이 낮아지는 경향을 보이고 있다 (Fig. 4A,  $P < 0.05$ ). 신장 조직에 포함된 SOD 활성은 아가미에서와 유사하게 탁도가 높아짐에 따라 증가하고 있으며, CAT 활성도 대조군에 비해 1,000 NTU에서 2배 이상 높은 활성을 나타내었다. GPX 활성도 대조군과 비교 시 600 NTU까지는 두드러진 활성의 변화는 나타내지 않았으나 1,000 NTU의 탁도에서는 1.5배 이상 높은 활성을 나타냈다 (Fig. 4B,  $P < 0.05$ ).

## 3. 미량 중금속의 변화

탁도 변화에 따른 아가미 조직에서 미량 중금속 (Fe, Cu, Zn, Pb, Cr, Mn, As, Cd) 농도의 변화를 조사하였다 (Table 2,  $P < 0.05$ ). 대조 실험군 참갈겨니 아가미 내에 축적되어 있는 중금속 중 Cd, As, Cr 및 Mn의 함량은 극소량 존재하고 있으며, Pb와 Cu는 미량 그리고 Zn과 Fe는 과량 함유된 것으로 조사되었다 (Table 2). 극소량으로 조사된 Cd, As, Cr 및 Mn의 함량은 탁도가 높아짐에 따라 증가하여 1,000 NTU에서는 Cd가 15배, As는 1.8배, Cr은 6배 그리고 Mn은 16배 가량 증가하고 있으나 절

대적인 함량은 낮은 것으로 나타났다. 미량으로 측정된 Pb와 Cu의 함량도 탁도가 높아짐에 따라 증가하여 1,000 NTU에서 Pb는 5.7배 그리고 Cu는 70배 정도로 극단적으로 높게 증가하는 경향을 나타내었다. 아가미 내에 비교적 높은 함량을 갖고 있는 Zn과 Fe도 탁도가 높아짐에 따라 증가하여 1,000 NTU의 탁수에서 Zn은 6배, Fe은 약 10배 정도 증가하고 있다.

## 고 찰

어류의 아가미는 수중 속에서 효율적인 가스 교환을 할 수 있는 체조직 중 가장 섬세하고 미묘하게 적응된 조직학적 구조를 갖고 있으나 환경수에 직접 노출되어 있기 때문에 각종 유해인자의 침입 또는 이들에 의한 손상을 쉽게 받을 수 있는 곳이다 (허와 정, 1993). 아가미는 수중에 독성물질이 함유되거나 탁수와 같은 수환경의 급격한 변화와 같은 환경적 스트레스를 받게 되면 조직학적으로 곤봉화를 나타내거나 새변은 두꺼운 상피층을 이루게 되며, 표면에 다수의 점액세포를 이루어 이차새변의 유합, 새변간 공간 소실, CO<sub>2</sub> 교환을 저하로 인해 호흡성 산증과 새변의 유합으로 인해 호흡면적의 손실과 호흡기능의 악화가 나타날 수 있다 (Ferguson, 1989; 신 등, 1993; 허와 정, 1993; 이 등, 2006). 본 연구에서도 참갈겨니의 아가미는 고탁도의 조건에서 이차새변 상피의 증생, 부종 및 새변간의 유합 등과 같은 구조적 변형이 일어나는 것으로 보아 탁수가 아가미에 병리적 영향을 미치는 것으로 생각되며, 이러한 요인으로 인해 호흡 면적이 축소되어 호흡기능이 약화될 수 있을 것으로 생각된다.

어류의 아가미와 더불어 신장도 수질오염과 같은 환경적 스트레스에 의해 사구체 수축의 구조적 변형을 나타

내는데 사구체의 표면적이 좁아지는 현상은 포유류의 만성 사구체 신염이나 위축신과 매우 유사한 병변으로 어류의 경우에도 이차 병변의 원인이 될 수 있으며 (Fennel and Pardo, 1967), 심할 경우 어류 폐사의 원인이 되기도 한다. 해수어의 경우 아가미를 통한 탈수증상을 예방하기 위해 신장의 사구체는 수축되어 배설되는 오줌의 양을 줄임으로써 체내 · 외의 삼투압을 조절하는 기능을 나타내기도 한다 (Galat *et al.*, 1985). 그러나 담수어에서는 사구체의 표면적이 좁아지면 삼투압 조절기능 보다는 오히려 노폐물을 걸러주는 효과가 떨어질 수 있다. 본 연구에서도 탁도가 높고 사육기간이 길어질수록 사구체의 수축 현상이 두드러지게 관찰되었으며, 보우만 주머니의 공간도 넓은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 탁도가 신장의 기능 손실이나 노폐물 제거에 영향을 줄 수 있으며, 더 나아가 2차 병변의 원인으로 작용할 수 있을 것으로 생각된다.

어류는 환경의 유해 물질이나 약물 등에 노출되었을 때 심각한 스트레스를 받게 된다. 이에 대한 반응으로 체내 여러 조직에서는 다량의 활성산소가 생성하게 되는데, 이는 생리적 대사 장애를 유발하여 조직에 치명적인 손상을 미치게 되며 결국 병적 상태에 이르게 된다 (Simon *et al.*, 1981; Moody and Hassan, 1982; Goldberg and Stern, 1997). 생체 내에서 발생하는 활성산소는 단백질, 핵산 및 생체막에 심각한 손상을 입히지만 항산화물질과 항산화효소에 의해 제거된다. 일반적으로 항산화효소는 어류의 종, 조직 및 계절에 따라 활성이 변화하는 것으로 알려져 있다 (Aksnes and Njaa, 1981; Wdzieczak *et al.*, 1981; Gabryelak *et al.*, 1983). 생체 내에서 산화-환원 반응을 통해 형성되는 활성산소는 반응성이 매우 큰 산화물 라디칼로서 자발적인 과정이나 항산화물질에 의해 분해되기도 하지만, 생리적으로는 항산화효소가 활성산소를 보다 안정된 물질로 환원시키고 있다. 항산화효소 중 SOD (superoxide dismutase)는 superoxide radical ( $O_2^{\cdot -}$ )을  $H_2O_2$ 와  $O_2$ 로 전환시키며, 전환된  $H_2O_2$ 는 CAT (catalase) 혹은 GPX (glutathione peroxidase)가  $O_2$ 와  $H_2O$ 로 분해하여 생체에 무해한 분자들로 전환시킨다 (Forman and Fridovich, 1973). 본 연구에서도 고탁도의 탁수가 아가미와 신장 조직 내 항산화효소의 활성에 미치는 영향을 조사하였다. 아가미와 신장 조직에서 SOD 활성은 대조군에 비해 1,000 NTU의 고탁수로 감에 따라 활성이 증가하였으나 CAT 활성은 아가미에서는 유의적인 활성 변화를 나타내지 않고 있으나 신장에서는 1,000 NTU에서 2배 이상 높은 활성을 나타내었다. 또한 GPX의 활성은 아가미에서는 대조군에 비하여 오히려 활성이 낮아지

는 경향을 보이고 있지만 신장 조직에서는 대조군에 비해 1,000 NTU의 고탁도에서는 활성이 1.5배 이상 높게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 고탁수의 스트레스에 의해 생성되는 활성산소는 기본적으로 아가미와 신장 조직의 SOD에 의해  $H_2O_2$ 와  $O_2$ 로 전환되고 여기서 생성되는  $H_2O_2$ 의 분해는 아가미보다는 신장에서 CAT와 GPX의 작용에 의해  $H_2O$ 와  $O_2$ 로 분해함으로써 생체에 생성된 유해한 라디칼을 제거하는 것으로 사료된다.

각종 오염물질들이 시간이 지남에 따라 하천수로 유입되고 바닥 퇴적물에 축적됨과 동시에 수중에 서식하는 어류에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 하상퇴적물의 오염물질 가운데 중금속은 Fe, Cu 등과 같은 생체 내 필수 원소도 있지만, Pb, Hg 및 Cd와 같은 독성중금속들도 있으며 이들 대부분은 생체 내에서 다양한 유해작용을 유발시키게 된다 (이 등, 2001). 따라서 수생태계로 유입된 중금속의 독성적 영향을 평가하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있지만, 수질에 대한 이화학적 분석만으로는 여러 가지 한계가 있다. 이러한 수중에 서식하는 어류의 중금속에 관한 연구 보고에는 금강유역에서 Pb, Cd, Mn, Zn과 낙동강 유역에서 Cr, Cd, Zn, 태화강유역에서 Hg, Cd, Pb, Cu, Zn에 대해 보고된 바 있다 (김 등, 1993). 또한 중금속을 비롯한 유해물질은 비록 미량일지라도 수생생물에 농축, 축적이 가능하며 먹이연쇄를 통해 인체에까지 영향을 미치게 되므로 중금속에 의한 수생생물의 오염은 사람의 공중보건에 직결되는 심각한 문제가 되기도 한다 (Friberg and Vosta, 1972). 본 연구에서 탁도의 증가에 따라 중금속이 어체에 축적되는 영향을 조사해 보면 탁도 300~600 NTU에서도 사육기간이 길어질수록 아가미 내에 축적되는 중금속의 양이 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 탁도가 매우 높은 1,000 NTU에서는 대조실험군 어류에 비해 중금속의 함량이 증가되고 있다. 물론 이러한 탁도는 자연상태에서 장기간의 폭우로 인해 일시적으로 나타날 수 있는 상황이지만 이러한 상황이 지속적으로 유지된다면 이는 어류에 치명적인 유해 작용을 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

적 요

본 연구에서는 고탁도의 사육조건에서 탁수가 어류의 조직과 생리에 미치는 영향을 조사하기 위하여 참갈겨니의 아가미와 신장을 사용하였다. 탁도가 높고 사육기간이 길어질수록 아가미에서는 이차 세변의 간격이 불규칙해지고, 곤봉화, 부종, 상피세포의 박리가 나타났으며 세변

사이에는 이물질의 부착이 두드러지게 관찰되었다. 신장 조직에서도 탁도의 증가에 따라 사구체가 수축되고 있으며 보우만 주머니의 공간이 넓게 관찰되었다. 고탁도의 탁수가 아가미와 신장 조직 내 항산화효소의 활성에 미치는 영향을 조사해 보면 SOD 활성은 아가미와 신장 조직에서 고탁수로 감에 따라 활성이 증가하였으나 CAT와 GPX의 활성은 주로 신장에서 높은 활성을 나타내었다. 즉 고탁수의 스트레스에 의해 생성되는 유해한 라디칼은 주로 신장 조직의 항산화효소에 의해 제거하는 것으로 사료된다. 탁도 변화에 따라 어체에 축적되는 미량 중금속 농도의 경우 탁도가 매우 높은 1,000 NTU에서는 대조실험군 어류에 비해 중금속의 함량이 급격히 증가되는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과로 보아 장기간 고탁도가 유지된다면 아가미와 신장 조직은 비정상적인 형태로 변형되고 중금속은 체내에 급격히 축적됨으로 치명적인 유해 작용을 나타낼 수 있을 것으로 생각된다.

## 인 용 문 헌

- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제37권 동물편 (담수어류). 교육부. p. 279-280.
- 김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사. p. 182-183.
- 김익수, 김선영, 박종영. 2002. 만경강 오염수에서 서식하는 붕어의 아가미와 신장의 비정상적인 조직. *한국어류학회지* **14**: 70-75.
- 김인숙, 한성희, 오성기. 1993. 전라북도 내 서해안 지역의 하천에 서식하는 붕어의 중금속 함량에 관한 연구. *한국영양식량학회지* **22**: 484-488.
- 신미영, 최동립, 정준기, 전세규. 1993. 과망간산칼리에 의한 어류 아가미의 병리조직학적 변화와 수질에 따른 영향. *한국어병학회지* **6**: 21-55.
- 이근상, 조기성. 2004. 탁수자료를 이용한 GIS 기반의 토사유실량 평가. *한국지형공간정보학회지* **12**: 75-81.
- 이정식, 강주찬, 신윤경, 마경화, 진 평. 2001. 구리에 대한 넙치, *Paralichthys olivaceus*의 조직학적 반응. *한국어병학회지* **14**: 81-90.
- 이 청, 신명자, 이종은, 서울원. 2006. 임하호 탁수역에 서식하는 치리 (*Hemiculter eigenmanni*)의 조직과 혈장단백질. *환경생물* **24**: 213-220.
- 한국수자원공사. 2006. 임하댐 탁수로 인한 어류영향조사. p. 287-293.
- 허민도, 정현도. 1993. 어류의 아가미의 조직학적 구조와 병변. *한국어병학회지* **6**: 65-70.
- Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. In Packer (ed): *Methods in Enzymology*. Vol, 105, p. 121-126. Academic Press, NY.
- Aksnes, A. and L.R. Njaa. 1981. Catalase, Glutathione peroxidase and superoxide dismutase in different fish species. *Comp. Biochem. Physiol.* **69**: 893-896.
- Chance, B., H. Sies and A. Boveris. 1979. Hydroperoxide metabolism in mammalian organs. *Physiol. Rev.* **59**: 527-605.
- Fennel, R.H. and V.M. Pardo. 1967. Experimental glomerulonephritis in rats. *Laboratory Investigation*. **17**: 483-488.
- Ferguson, H.W. 1989. Gill and pseudobranchs In: *Systemic pathology of fish*. p. 11-40. Iowa State University Press/Ames.
- Flohe, L., A. Wolfgang and W.A. Gunzler. 1984. Assay of glutathione peroxidase, p. 105-114. *Methods in enzymatic analysis*. Packer, L. ed. Academic Press, NY.
- Forman, H.J. and I. Fridovich. 1973. Superoxide dismutase: A comparison of rate constant. *Arch. Biochem. Biophys.* **158**: 396.
- Friberg, L. and J. Vosta. 1972. Mercury in the environment. p. 17-23. CRS Press, Cleveland.
- Gabryelak, T., M. Piatrowska, W. Leyko and G. Peres. 1983. Seasonal variation in the activities of peroxide metabolism enzymes in erythrocytes of freshwater fish species. *Comp. Biochem. Physiol.* **75**: 383-385.
- Galat, D.L., G. Post, T.J. Keefe and G.R. Bouck. 1985. Histological changes in the gill, kidney and liver of Lahontan cutthroat, *Salmo clarki henshawi*, living in lakes of different salinity-alkalinity. *J. Fish. Biol.* **27**: 533-552.
- Goldberg, B. and A. Stern. 1997. The role of the superoxide anion as a toxic species in the erythrocyte. *Arch. Biochem. Biophys.* **178**: 218-225.
- McCord, J.M. and I. Fridovich. 1969. Superoxide dismutase an enzymic function ferythrocuprotein (Hemocuprotein). *J. Biol. Chem.* **244**: 6049-6055.
- Moody, C.S. and H.M. Hassan. 1982. Mutagenicity of oxygen free radicals. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **79**: 2855-2859.
- Simon, R.H., C.H. Scoggin and D. Patterson. 1981. Hydrogen peroxide causes the fatal injury to human fibroblasts exposed to oxygen radicals. *J. Biol. Chem.* **256**: 7181-7186.
- Wdzieczak, J., G. Zalesna, A. Bartowiak, H. Witas and W. Leyko. 1981. Comparative studies on superoxide dismutase, catalase and peroxidase level in erthrocytes of different fish species. *Comp. Biochem. Physiol.* **68**: 357-358.

(Manuscript received 11 December 2007,  
Revision accepted 25 March 2008)