

생태독성법을 이용한 산성배수 평가

전태성[†] · 박종호¹ · 최현일² · 연익준

충주대학교 환경공학과, ¹충청북도 내수면연구소, ²포스코건설(주)

Acidic Mine drainage Analysis based on Bioassay

Tae-sung Jun[†], Jong-ho Park¹, Hyun-ill Choi², and Ik-jun Yeon

Department of Environmental Engineering, Chungju National University,
Chung-ju Yiryu-meyon 123, Chungbuk 380-702, Korea

¹Department of Inland Fisheries Research Institute, The Provincial of Chung Cheong Buk-Do
Chung-ju Yongtan-dong 118-1, Chung-ju 380-250, Korea

²POSCO Engineering & Construction Co., Ltd, Seoul 135-769, Korea

Acidic shale mine drainage (ASMD) contains high content of mineral ions such as Al, Fe, and Mg, while its turbidity is low (0.4-0.6 NTU). Yellowish brown precipitation of iron hydroxide in valley deteriorates the natural views. ASMD results in changes in aquatic environments and the reduction of diversity and population size of aquatic ecosystem. Also, white colored precipitation at the point of ASMD injection to main stream might be originated by aluminium ion in ASMD. This causes physicochemical and social problem to users of this stream as drinking water source and irrigation water. Thus, ASMD in valley has to be neutralized and treated for the removal of mineral ions, before discharging to main water stream. The purpose of this research focused on evaluating various bioassay. *Carassius auratus* and *Pungtungia herzi* were exposed to mercury (HgCl₂), lead (PbCl₂) and copper (CuSO₄) during larval stage, more sensitive than other life stages to determine acute toxicity. The experiments were repeated three times and the LC₅₀ (24, 48, 72 and 96 hour) was determined for two species. Data obtained from the acute toxicity tests were evaluated using the probit analysis statistical method. *C. auratus* was found to be more susceptible than *P. herzi* to lead, while *P. herzi* was found to be more sensitive than *C. auratus* for mercury and copper. The sensitivity of three metals tested is likely ranked in the following order from highest to lowest toxicity on larval stage of these fish: mercury > copper > lead. It is suggested that acute toxic test at the larval stage of *C. auratus* and *P. herzi* which are indigenous species in Asia area is an important part of the ecotoxicological assessment of some heavy metals.

Key words : ASMD, *Carassius auratus*, *Pungtungia herzi*, mercury, lead, copper, acute toxicity tests

1. 서 론

광산에서 배출되는 폐수는 일반적으로 산성을 띠고 있으며 황산염기 및 금속을 다량함유하고 있다. 석탄을 비롯하여 금속의 원광석을 채굴하는 광산에서 배출되는 산성폐수에 대하여 여러 연구자들이 연구하였다. 점판암은 과거에는 온돌용으로 이용되어 왔으나 현재는 고급 장식용 건축재료 등의 제한된 분야에서만 사용되고 있다. 채석장은 일부지역에 국한되어 분포하며 여기

서 배출되는 폐수와 도로공사 등에 의하여 점판암이 노출된 지역을 흐르는 계곡류는 산성을 띠고 있다. 이러한 산성광산폐수(Acidic Mine Drainage; AMD)는 광석에 존재하는 중금속을 외부로 용출시켜 주변의 환경을 오염시키게 된다.

낮은 pH는 수중생물의 생리작용에 영향을 준다. 그 원인 중의 하나는 pH변화는 생물막 투과성에 영향을 주는 것으로 알려졌다. pH가 낮은 물에 물고기를 넣으면 아가미를 통하여 나트륨 등의 이온이 체외로 방출

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: tsjun@cju.ac.kr

되며, 또한 pH가 낮으면 물고기 아가미가 자극됨으로써 아가미의 표면에 점액이 분비되고 여기에 각종 이물질이 부착됨으로써 산소전달이 방해되어 질식사한다. Protozoa 등의 무척추동물(microinvertebrate) 체내의 염류균형(salt balance)이 pH에 민감하기 때문에 pH의 변화에 따라 이들의 생사는 빠르게 결정된다. pH 3.5 이하에서는 부화중인 연어와 송어알이 모두 죽으며 pH 4.5 이상에서는 부화에 영향을 주지 않는다고 알려졌다. 직접적으로 물고기에게 직접적인 영향을 미치지 않는 pH의 범위는 5~9로 알려졌다. 중금속 이온은 생물의 체내에서 효소중 cycteine과 methionine의 active site인 -SH 및 -SCH₃의 group과 강하게 반응함으로써 효소의 활성이 억제되거나 활성도가 감소함으로써 독성효과를 나타낸다. 중금속이온은 조류의 광합성 속도를 저하시키고, 수중에 서식하는 조류의 다양성과 양을 감소시킨다. 또한 금속이온은 물고기의 아가미를 자극하고, 점액의 분비를 유발하며 아가미의 빗살(lamelae)을 손상시킨다. 물고기가 Zn에 오염될 경우 수분 내지 수 시간 이내에 아가미가 손상된다고 알려졌다. 알루미늄의 독성은 중성에서 보다 산성이나 알칼리성에서 더욱 강하게 나타난다. 산성비에 의하여 토양에서 용출된 알루미늄이 수계에 유입되어 수중생태계에 악영향을 초래한 경우가 여러 연구자들에 의하여 보고되었다. 이들에 의하면 하천이나 호수중에 알루미늄이 0.1-0.2 ppm의 농도로 용존 될 경우 물고기에 대하여 독성을 나타낸다고 한다. 그러나 알루미늄 및 철이 주성분인 점판암 광산폐수가 하천에 유입되어 중화된 후 물고기와 미생물에 대하여 독성은 보고된 바 없다¹⁾.

산성배수중 다량 함유되어 있는 중금속은 철, 구리 등과 같은 생체 내 필수원소도 있지만 납, 수은 및 카드뮴과 같은 독성금속들도 있으며 이들 대부분은 생체 내에서 다양한 유해작용을 유발시키게 된다¹⁾.

따라서 수생생태계로 유입된 중금속의 독성적 영향을 평가하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있지만 수질에 대한 이화학적 분석만으로는 여러 가지 한계가 있다. 그 이유는 다양한 물질이 용존되어 있는 수질의 정확한 분석이 쉬운 일이 아니며 이들 물질의 혼합에 따른 상호작용 측면을 고려해야 하기 때문이다. 이러한 이유로 어류, 패류, 물벼룩 및 박테리아 등 다양한 생물학적 지표를 사용하여 오염의 수준을 파악하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다²⁻⁴⁾.

이 가운데 어류를 이용한 생물검정시험에 관한 연구는 많으며 이에 이용되는 주요 담수어종은 송사리

(*Oryzias latipes*), 잉어(*Cyprinus carpio*), 붕어(*Carassius auratus*), fathead minnow(*Pimephales promelas*) 및 무지개송어(*Salmo gairdneri*) 등 다양하다⁵⁻⁹⁾.

잉어목(Order Cyprinidae) 잉어과(Family Cyprinidae)에 속하는 붕어, *Carassius auratus*와 돌고기, *Pungtungia herzi*는 한국, 중국 및 일본 등 아시아권에 널리 분포하고 서식량도 풍부한 대표적인 담수어종이다¹⁰⁾. 또한, 실험실에서 순화가 잘 될 뿐만 아니라 채집에도 용이한 점이 있기 때문에 생물검정시험에 적합한 재료로 활용될 가능성이 크다. 그러나 기존 실험어종에 대한 독성시험은 주로 성어기(adult stage), 미성어기(immature stage) 및 치어기(juvenile stage)에서 실시되어 왔으며, 상대적으로 독성물질에 대한 내성이 상대적으로 민감한 것으로 알려진 자어기(larval stage)에 대한 연구는 미비한 실정이다¹⁰⁾. 또한, McKim¹¹⁾은 장기간의 부분생활사 독성시험(Long-term partial life-cycle toxicity test) 또는 완전생활사 독성시험(Complete life-cycle toxicity test)를 실시하지 않고 초기생활사 단계에서 실시한 독성시험 결과만으로도 최대허용독성농도(Maximum acceptable toxic concentration)를 설정할 수 있을 만큼 어류의 초기생활사는 독성물질에 민감하다고 주장하였다. 또한 Buhl¹²⁾은 카드뮴, 6가크롬 및 수은을 *Ptychocheilus lucius*, *Gila elegans* 및 *Xyrauchen texanus*의 각 생육단계에 노출시킨 결과 자어기가 치어기 및 배기(embryo stage) 보다도 더 민감한 것으로 나타났으며 자어기를 중금속 독성평가에 활용할 가치가 크다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 중금속 오염에 대한 생물검정의 표준공시어종 설정을 위해서 아시아권에 널리 분포하는 잉어과 어류인 붕어와 돌고기의 자어기를 이용하여 중금속 가운데 자연 방출량이 큰 수은, 납 및 구리에 대한 급성독성 및 산성배수에 대한 일반적인 실험을 실시하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험방법

붕어(*Carassius auratus*)와 돌고기(*Pungtungia herzi*)는 실험실내의 150×150×0.5 cm, 용량의 300 L 수조에서 3/4마력 수중모터를 이용하여 1일 4회전 순환시키면서 유수식 조건으로 유지하였고, 잉어용 부상사료를 공급하면서 10일간 순치시킨 후 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고 먹이 붙임이 좋은 어류(붕어, 185±18 g;

돌고기, 21±3 g)를 선발하여 각각 친어로 사용하였다. 이 친어는 광주기 L12:D12(조도 2000 Lux 이상), 수온 25-26°C 및 용존산소 7.5 ppm 으로 유지되는 수조로 옮겨졌으며, 1일 후에 각 암컷으로부터 얻어진 난(eggs)을 인공어소에 부착시킨 후 각 정자(sperms)로 수정시켜 29.5×16.5×20 cm, 12 L 용량 폴리에틸렌 수조에 넣어 부화시켰다.

3일 후 부화되어 나온 난황을 가진 자어는 1 L 유리 비이커에 30마리씩 수용하여 지수식방법으로 실험을 실시하였다. 각 실험용수는 1일을 원칙으로 환수하여 중금속의 독성 이외에 다른 요인에 의한 영향을 최대한 배제시켰다. 본 연구에서 사용한 수은(HgCl₂), 납(PbCl₂) 및 구리(CuSO₄)는 Junsei Chemical Co.에서 제조된 특급시약을 사용하였다. 예비실험을 바탕으로 설정된 각 중금속의 농도범위는 수은이 5-30 ppb이었고, 납은 250-4,000 ppb이었다. 구리는 붕어의 경우 50-250 ppb이고 돌고기의 경우는 5-200 ppb이었으며, 각 중금속 농도는 설정범위를 6 농도구로 나누어 실시하였다.

실험은 22±1°C로 유지되는 항온실에서 96시간동안 실시하였으며 24시간마다 LC₅₀(50% Lethal Concentration)을 구하였다. 실험용수의 수질분석 결과는 Table 2-1과 같다. 그 외의 실시한 실험방법은 US EPA¹³⁾에서 추천한 'Short-term method for estimating the chronic toxicity of effluent and receiving waters to freshwater organism'의 조건을 따랐다. 급성독성의 결과로서 LC₅₀은 24시간마다 치사한 개체를 관찰하여 US EPA에서 제공한 Probit program(version 1.5)에 의해 산출되었다.

Table 2-1. Chemical components of the water used in the experiment of metal acute toxicity.

Item	Ranges
Temperature	22±1°C
pH	7.0±0.7
Dissolved Oxygen (DO)	7.5±0.54 ppm
Ammonium nitrogen	0.3±0.1 ppm
Nitrite-nitrogen	0.01±0.008 ppm
Nitrate-nitrogen	2.10±1.05 ppm
Chemical Oxygen Demand (COD)	2.04±0.33 ppm
Total hardness as CaCO ₃	1.88±0.09 ppm
Hg	ND*
Cu	ND*
Pb	ND*

*ND: Not Detected

2.2. 산성폐수실험

2.2.1. 현장수질조사

본 연구 대상지역내 산성 광산폐수가 흐르는 지점과 이 폐수가 유입되는 하천의 수질분석 결과 여러 가지 금속 성분중 수은, 납, 구리등이 주성분인 것으로 나타났다. 현장에서 배출되고 있는 폐수의 pH는 2.3~3.5로 나타났고 황산염기의 농도는 200~1,500 ppm, 총고형물농도 500~2,000 ppm, 수은, 납, 구리의 농도는 각각 0.84~1.07 ppm, 1.4~1.53 ppm, 3.05~8.24 ppm으로 나타났다. 반면 탁도 수도물의 탁도와 같은 수준인 0.4~0.6 NTU로 매우 낮았다.

2.2.2. 실험동물

본 연구를 수행하기 위하여 실험동물은 생리생태 및 생식생물학적 등의 기초자료를 검토하여 붕어(*Carassius auratus*)을 선정하였다. 본 어종을 선택한 이유는 우리나라 전역에 서식하는 대표적인 종으로 필요한 개체수 확보 및 사육관리가 쉬운 측면이 있기 때문이다. 본 실험에 사용한 붕어는 실험실내의 300 L 순환여과식 수조에서 담수어용 부상사료를 공급하면서 10일간 순화시킨 후 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고 먹이 불임이 좋은 개체를 급성, 만성 및 산소소비율 조사에 사용하였다.

2.2.3. 실험방법

급성독성실험은 정수식 수조장치에서 일반 하천수를 사용하여 실시되었다. 현장에서 수거한 산성배수는 예비실험 결과를 기초로 하여 50% 정도 영향이 관찰된 농도를 중심으로 대조구를 포함하여 6개 농도구를 설정하였고, 이 때 대조구는 산성배수를 첨가하지 않고 하천수만을 사용하였다. 즉, 일반 하천수에 산성배수를 첨가하여 각 실험구의 pH를 대조구 7.52를 비롯하여 6.60, 5.98, 5.28, 4.91 및 4.75로 설정하였다. 만성독성실험은 96시간 LC₅₀인 pH 5.21을 최저점으로 하여 각각 0.5씩 증가시켜 pH 5.71, 6.21, 6.71, 7.21 및 대조구 7.51로 설정하였다. 30일간 아치사농도에 노출시킨 붕어의 생존, 성장 및 산소소비를 측정하였다.

2.2.4. 실험동물노출

실험실 환경에서 순화시킨 개체는 외관상 질병의 증세가 나타나지 않고 크기가 유사한 개체를 무작위로 선별하여 2마리씩 저농도에서 고농도, 고농도에서 저농도 순으로 각 실험구별로 수용하였다. 급성독성 실험은 어

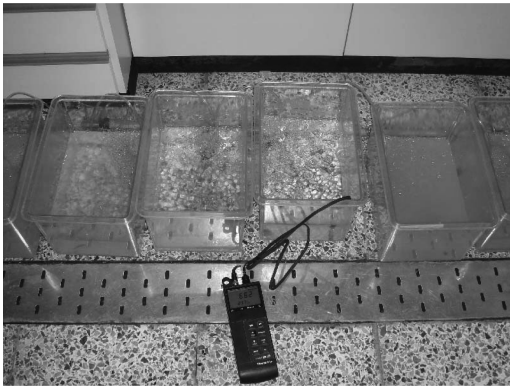


Fig. 2-1. Acute toxicity test.



Fig. 2-2. Chronicity test.

류에 먹이를 공급하지 않았으나, 30일간 실시한 만성독성 실험은 담수어용 시판사료를 하루에 2회씩 먹고 남은 정도로 충분히 공급하였다.

2.2.5. 조직검사

광학현미경 조직표본 제작은 아가미를 어체로부터 해부하여 Bouin's solution에 일정시간 고정 후 수세와 탈수과정을 거쳐 파라핀(paraffin)에 포매 후 4~6 μm 두께로 연속 절편하였다. 염색은 조직표본을 xylene에서 파라핀을 제거한 후 알코올에서 저농도순의 단계로 친수 과정을 거쳐 조직 내에 수분을 첨가시킨 후 Mayer's hematoxylin에서 약 5분 동안 핵염색을 한 후 0.5% eosin에서 약 1분 동안 세포질 염색을 실시하였다. 그리고 다시 알코올에서 고농도순으로 탈수과정을 거쳐 xylene에서 투명과정을 거친 후 canada balsam으로 봉입한 다음, Olympus BX-50 현미경을 이용하여 조직표본의 관찰과 사진촬영을 하였다.

2.2.7. 어류 생체내 중금속 축적조사

현장에서 채집한 어류 생체내 축적된 중금속을 분석하기 위하여 시료의 전처리는 dry oven에서 65°C이하에서 건조한 후 테프론 바(bar)를 이용하여 곱게 간 다음 산세척 된 용기에 보관하였다. 이 시료는 HNO_3 를 이용하여 산 분해되었으며, 시료용액 내에 들어있는 잔사 혹은 무정형 규소, 지방질 등은 분리하기 위해서 GF/C 여지를 이용하여 여과하였다. 이외의 산 분해방법은 Standard Methods에 따랐다.

2.2.8. 산소소비율 조사

산소소비에 대한 산성배수의 영향은 20일 동안 pH 7.51, 7.21, 6.71, 6.21, 5.71 및 5.21로 설정된 실험구에 노출된 붕어들 중에 2개체에 대한 산소소비율은 수온 $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 에서 호흡검량장치(YSI 5301) 및 산소측정기(YSI 53)를 사용하여 건조중량 mg당 1시간 동안 소비한 산소량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내실험결과

각 중금속에 대한 붕어와 돌고기의 급성독성 결과는 Table 3-1~3-3에 제시하였다. 실험 결과에 따르면 납독성에 대해서는 붕어가 돌고기보다 더 약한 것으로 조사되었으며, 반대로 수은과 구리독성에 대해서는 돌고기가 붕어에 비해 더 민감한 것으로 나타났다. 또한, 수은과 납에 대한 두 어종간의 감수성은 상대적으로 비슷한 경향을 보였으나 구리에 대해서는 붕어가 돌고기에 비해 약 2.5배정도 더 강한 것으로 나타나 감수성 차이가 큰 것으로 나타났다. 그러나 이들 중금속의 종류에 대한 두 어종의 민감도는 수은 > 구리 > 납으로 조사되어 같은 독성양상을 보였다.

중금속 노출에 대한 시간과 독성의 상관관계를 조사한 결과, 수은의 경우 붕어의 24시간 LC_{50} 은 15.790 ppb인 반면에 돌고기에 대해서는 16.140 ppb로 나타나 붕어가 더 감수성이 강한 것으로 조사되었으나, 48시간 이후에는 돌고기의 감수성이 더 강하게 나타났다. 납의 경우 실험기간 전반에 걸쳐 붕어가 돌고기에 비해 더 감수성이 강한 것으로 조사되었다. 구리의 실험결과에서는 실험기간 전반에 걸쳐 돌고기가 붕어에 비해 더 독성에 약하게 나타났다. 24시간째 붕어에 대한 구리의 LC_{50} 은 통계 프로그램 상에서 산출되지 않았으나, 48시간 LC_{50} 이 100.362 ppb로 나타나 96시간 LC_{50} 인

84.567 ppb와 시간에 따른 상대적인 감수성 차이는 크지 않았다. 그러나 구리에 대한 돌고기의 24시간 LC₅₀은 123.513 ppb인 반면에 96시간에는 33.218 ppb로 조사되어 약 73%정도로 크게 감소된 것으로 조사되었다.

특정 화학물질에 대한 수생생물의 급성독성을 실시할 경우 수온, pH, 경도 및 용존산소 같은 화학적인

Table 3-1. LC₅₀ values and 95% confidence limits of mercury for larvae of experimental species.

Species	Time (hour)	LC ₅₀ (ppb)	95% confidence limits	
			Lower	Upper
<i>Carassius auratus</i>	24	15.790	13.867	17.534
	48	12.689	10.756	14.131
	72	11.374	9.361	12.842
	96	10.221	8.387	11.476
<i>Pungtungia herzi</i>	24	16.140	14.771	17.137
	48	11.972	9.131	14.119
	72	9.367	5.968	11.271
	96	8.402	6.868	9.251

Table 3-2. LC₅₀ values and 95% confidence limits of lead for larvae of experimental species.

Species	Time (hour)	LC ₅₀ (ppb)	95% Confidence Limits	
			Lower	Upper
<i>Carassius auratus</i>	24	1457.368	227.194	2190.005
	48	1115.862	811.830	1372.428
	72	807.628	558.939	1019.124
	96	572.445	357.267	726.114
<i>Pungtungia herzi</i>	24	1637.762	1279.833	1938.103
	48	1019.091	783.762	1231.709
	72	806.323	628.884	963.207
	96	603.960	450.362	724.959

Table 3-3. LC₅₀ values and 95% confidence limits of copper for larvae of experimental species.

Species	Time (hour)	LC ₅₀ (ppb)	95% Confidence Limits	
			Lower	Upper
<i>Carassius auratus</i>	24	-	-	-
	48	100.362	91.160	110.303
	72	91.261	82.704	99.211
	96	84.567	75.587	91.348
<i>Pungtungia herzi</i>	24	123.513	104.476	137.285
	48	73.406	11.283	112.013
	72	43.896	34.289	53.102
	96	33.218	27.077	38.779

-: Not Calculated

측면뿐만 아니라 빛, 유속 및 수조공간 등의 물리적인 측면과 성(sex), 생육단계 및 건강상태 등 생물학적 측면에 따라 상당한 차이를 나타낼 수 있다¹⁴. 특히 이 가운데서도 생물의 생육단계에 따른 급성독성 결과는 많은 차이를 낼 수 있는데, 실제로 Crustacea와 Molluscs의 구리에 대한 48시간 LC₅₀값은 성어의 경우 30,000 ppb 인 반면에 치어의 경우에는 300 ppb 수준으로 큰 감수성 차이가 나는 것으로 알려져 있고 이러한 경향은 어류에서도 적용될 수 있다고 보고되었다¹⁵.

특히 환경변화에 민감한 어류의 초기생활사(난기, 자어기 및 치어기)에 대한 중금속의 독성연구는 수생생태계의 생산력에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 향후 군집 전체에 대한 피해양상을 예측하는데 중요하게 활용될 수 있다. 그러나 이중 오염물질에 대해 가장 민감한 생육단계라고 볼 수 있는 자어기에 대한 연구는 상대적으로 미비한 실정이다¹⁶.

수은은 상온에서 액체인 유일한 금속원소로서 자연계의 지각에 평균 0.08 ppm 정도 존재한다. 현재 전극, 농약, 안료, 플라스틱 및 방부제 등에 이용되고 있는 수은은 담수에서 평균 0.03 ppb 정도, 해수에서는 평균 0.1 ppb 정도 존재하는 것으로 보고되고 있다. 산업폐수에 포함된 무기 또는 유기 수은 화합물은 호소나 바다 밑에 침전되어 혐기성세균의 작용을 받아 메틸수은을 형성하는데, 이는 수생생물에 쉽게 흡수되어 축적되는데 먹이사슬을 통해 인체에 들어오면 뇌에 비가역적인 손상을 줄뿐만 아니라 태아에 유전적 손상을 유발시켜 여러 가지 독성 작용을 나타낼 수 있다¹⁶.

Adelman¹⁷ 등이 *Carassius auratus*에서 수은에 대한 24시간 LC₅₀ 값을 조사한 결과 0.4 ppm으로 나타났고, Hanumante와 Kulkarni¹⁸이 *Chana gachuma*에서 4.1 ppm으로 나타나 어종에 따라서 큰 차이를 보였으며, 또한 이러한 경향은 같은 어종이라고 할지라도 생육단계에 따라서도 차이가 나타남을 보고되어 있다¹⁹.

중금속 독성을 비교하는 데에는 실험방법이나 실험용수의 조성 등의 차이 때문에 직접 비교하기는 어려우나, Choi¹⁰ 등의 잉어 자어기에 대한 실험에서 중금속의 96시간 LC₅₀을 비교해 본 결과 수은의 독성이 구리보다 더 약한 것으로 보고되어 본 연구와 다른 결과를 보였다. 또한 무지개송어의 미성어기에 수은을 노출시킨 결과 24시간 LC₅₀이 360 ppb, 96시간 LC₅₀이 16 ppb 로 조사되어 시간에 따라 값의 차이가 크게 나타났다. 본 연구에서 수은은 붕어와 돌고기에 강한 독성을 보였으며 24시간과 96시간 사이의 LC₅₀ 차는 각

각 5.569 ppb와 7.738 ppb로 나타나 무지개송어 만큼 큰 차이는 보이지 않았다.

납은 자연계에서 주로 아연광의 황화물, 황산연광($PbSO_4$) 및 백연광($PbCO_3$) 등의 광물로서 존재하며 지구 표층의 납 존재량은 평균 13 ppm 정도로 알려져 있다. 주로 전기배터리, 전선의외장, 금속배관, 녹방지제 및 살충제 등에 이용되는 납은 세계적으로 하천, 호수 중의 1~10 ppb 로 검출되고 있다. 수생생물에 유독한 물질이지만 납 화합물의 종류뿐만 아니라 수질의 특성에 따라서 독성 수준이 매우 다르게 나타나는데 어류에 노출되었을 때 점액과다분비, 항문발적, 아가미 곤봉화, 척추만곡 및 간출혈 증세를 보인다¹⁶⁾.

Hodson²⁰⁾ 등에 따르면 *Cyprinus carpio*의 치어에 대한 납의 급성독성 실험 결과 96시간 LC_{50} 값이 440 ppb 로 나타났으며, 미성어기에 대한 실험결과는 800 ppb 로 조사되어 생육단계에 따라 2배 정도의 독성 차이가 나타난다고 보고하였다. 본 연구에서 붕어 자어의 납독성은 96시간 LC_{50} 값이 572.445 ppb로 나타났고, 돌고기에서는 603.960 ppb로 나타나 위의 실험결과와 어느 정도 비슷한 결과를 보였으나, Bae¹⁶⁾ 등이 수온 27°C에서 납을 메기 치어(*Silurus asotus*)에 노출시킨 결과, 72시간과 96시간 LC_{50} 값이 각각 24.390 및 13.250 ppm으로 조사되어 메기가 잉어과 어류에 비해 납 독성에 상당히 강한 것으로 생각된다.

일반적으로 어류가 구리에 노출되었을 때 난의 부화율 감소, 어류활력 감소, 괴사(Necrosis) 및 신경기능 이상을 유발시킬 수 있다¹⁶⁾.

구리를 한국산 송사리(*Oryzias latipes*)의 수정란에 노출시킨 후 24, 48 및 96시간 LC_{50} 을 측정된 결과, 각각

67, 65 및 65 ppb로 나타나 시간에 따른 독성차이는 거의 보이지 않았다¹⁰⁾. 반면에 본 연구에서 두 어종의 자어기에 구리를 노출시킨 결과, 시간에 정비례하여 독성 영향이 강하게 미치는 것으로 조사되어 수정란에 대한 실험결과와는 다른 양상을 보였다. 또한 실험조건에 따라 상대적이긴 하지만 붕어 자어기의 48~96시간에 따른 LC_{50} 범위는 84.367~100.862 ppb로 나타나 송사리의 수정란보다 민감하지 않은 것으로 보이며, 돌고기의 경우 LC_{50} 범위가 33.118~123.213 ppb로 72시간 이후에는 송사리의 수정란보다 더 민감한 경향을 보였다.

중금속이 비정상적으로 다량 유입된 수역에 서식하는 어류는 그 독성에 의해 다양한 피해가 발생하게 되고, 특히 외부 환경에 민감한 자어기에는 치명적인 피해를 유발시키게 된다.

3.2. 산성폐수실험 결과

3.2.1. 급성 독성실험 결과

1) 96시간 반수치사농도(LC_{50})

현장 산성배수에 대한 급성독성은 비교적 고농도의 시험물질에 단기간 노출된 결과로서 빠르게 나타나는 영향을 말하며, 보통 96시간(4일간)의 영향을 말한다. 실험결과 산성배수에 의한 붕어의 96시간 LC_{50} 은 pH 5.21로 나타났다.

2) 조직검사

붕어 치어의 아가미는 육안으로 관찰시 선홍빛으로 아주 건강하게 나타났으며(Fig. 3-2A, B), 빗 모양으로 줄지어 있는 많은 수의 새엽(gill filament)과 각각의 새엽에는 새판(gill lamellae)을 가지고 있다(Fig. 3-2C). 그러나 침추수에 노출된 붕어의 아가미는 육안 관찰시

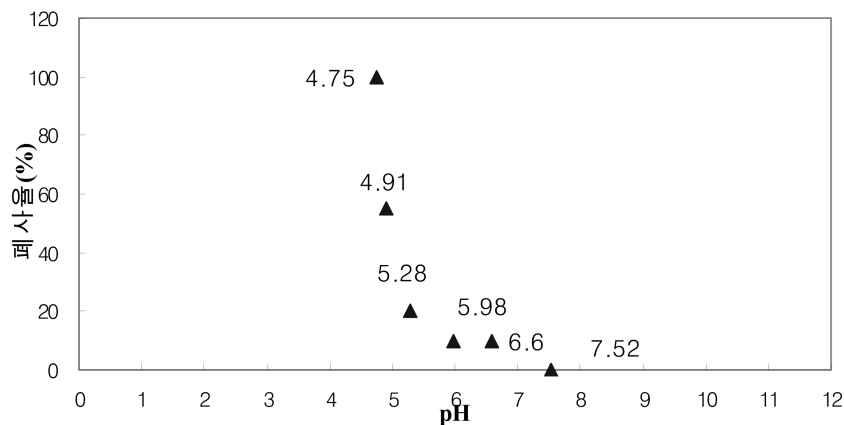


Fig. 3-1. Effect of exposure time of fish to acid drainage on LC_{50} .

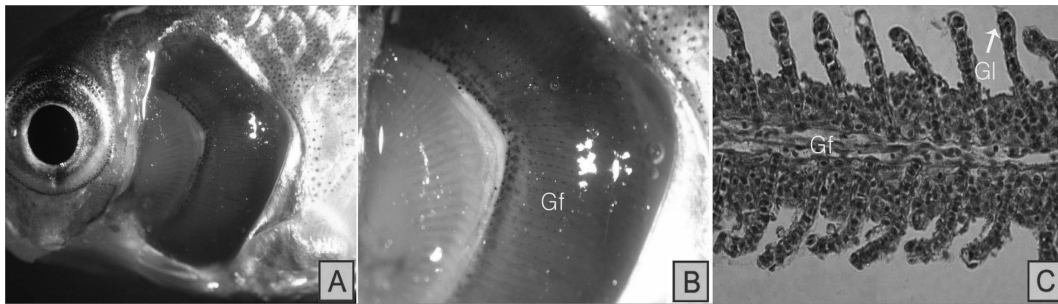


Fig. 3-2. A, the gills of a normal fish; B, magnified A; C, gills on microscopes.

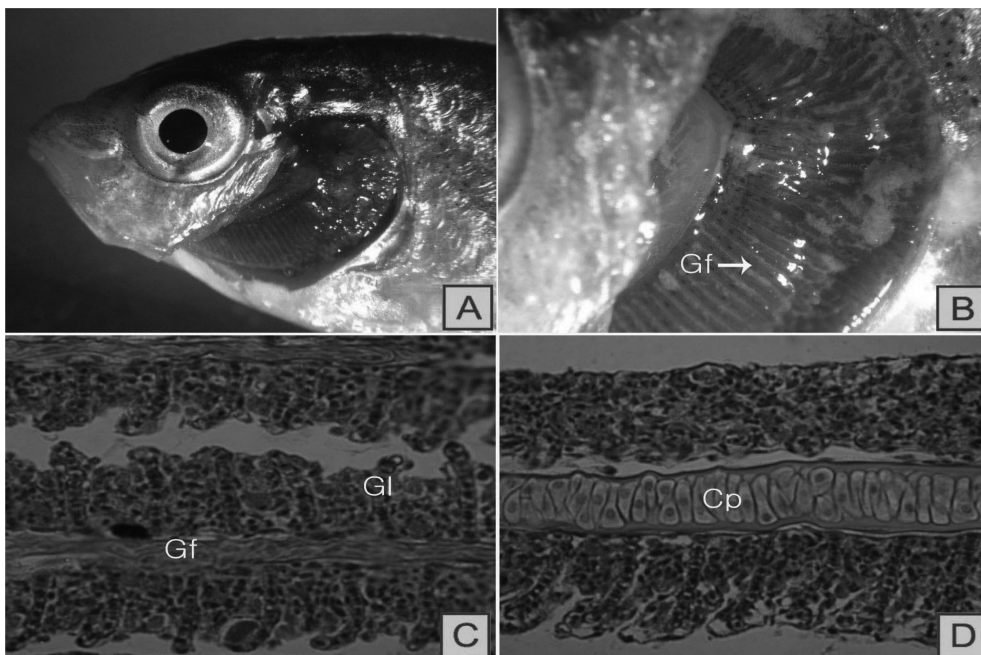


Fig. 3-3. the gills of a abnormal fish; B, magnified A; C, gills on microscopes.

표면에 Fe의 영향으로 보이는 황색 이물질과 어류표면에 존재하는 점액질이 서로 엉켜있는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 3-2A, B). 광학현미경상의 초기 증상으로 보이는 새엽의 팽창과 새판의 융합이 일부 보였고, 중기와 말기초의 증상인 모세혈관 팽창과 새판의 분리 및 괴사 현상이 관찰되었다(Fig. 4-3C, D).

3.2.2. 만성 독성실험 결과

1) 생존

대조구는 현장에서 산성배수의 영향을 받지 않는 상류 지역의 pH인 7.51로 정하였다. pH가 조절된 산성배수에 노출된 붕어의 생존을 결과는 실험 10일째 pH 5.21 실험구에서 75%의 폐사율을 보였으며, 타 실험구

에서는 큰 변화를 보이지 않았다. 또한 실험 20일째는 pH 6.21 이하의 실험구에는 모두 75% 이상의 폐사율을 보였다. 실험 30일째 pH 5.71 이하의 실험구는 전량 폐사보였고 pH 6.21 실험구에서는 41.7%로 조사되었다. 그러나 pH 6.71~pH 7.51 실험구간에서는 대체로 같은 경향을 보였다(Fig. 3-4).

2) 성장

붕어의 평균 성장은 실험기간 동안 pH 5.21 및 pH 5.71 실험구에서 특이적인 성장을 보이지 않았다. 실험 10일째 pH 6.71~7.51 실험구간에서는 2.6~2.75%로 조사되었으며, pH6.21 실험구에서 1.57%로 다소 낮은 경향을 보였다. 실험종료시 까지 pH 6.71~7.51로 실험구는 거의 비슷한 성장율을 보였으나 pH 6.21 이하

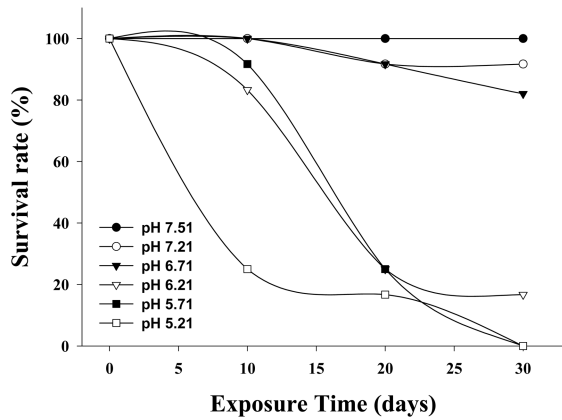


Fig. 3-4. Variation of survival rate exposure time on Acidic shale mine drainage at 30 days.

의 실험구에서는 낮은 성장도를 보였다(Fig. 3-5).

3) 산소소비율

만성독성실험에서 붕어 성어를 산성배수에 20일간 노출시킨 후 산소소비율의 변화를 관찰한 결과, 대체로 실험 10일째보다 20일째 붕어의 산소소비량이 다소 저하된 것으로 조사되었다. 실험 기간 동안 pH 6.21~7.51의 실험구간에서는 같은 경향의 산소소비량을 보였다. 그러나 pH 5.21과 pH 5.71 실험구에서 상당히 낮은 수준의 산소소비량을 나타내었다(Fig. 3-6).

4) 어류체내의 중금속 농축

현장에서 채집한 납자루, 피라미, 돌고기, 기름종개 및 송사리에 대한 중금속 축적상황을 조사한 결과를 Fig. 3-7에 나타냈다. Pb, Cu, As, Cd, Cr, Ni 및 B의 경우는 대략 0~0.01 ppb 정도로 조사되어 상대적으로 타 중금속에 비해 낮은 수준을 보였으며, Mn 및

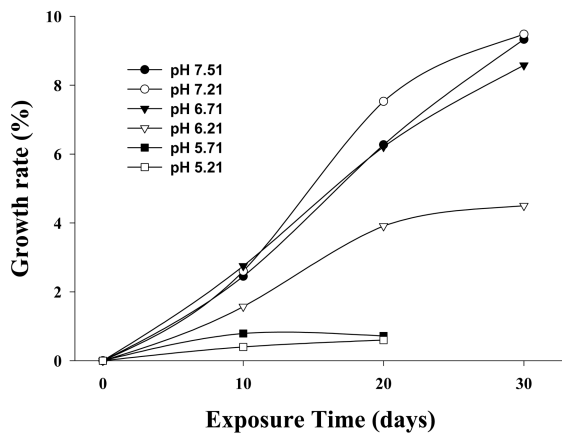


Fig. 3-5. Variation of growth rate exposure time on Acidic shale mine drainage at 30 days.

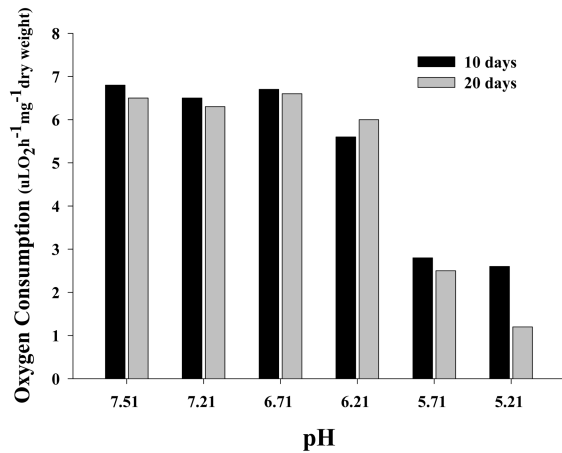


Fig. 3-6. Variation of oxygen consumption rate exposure Acidic shale mine drainage at 30 days.

Zn의 경우는 평균은 1.16 및 1.36 ppb 로 파악되었다. 특히 Fe과 Al의 체내 축적의 평균은 각각 9.97 및 12.33 ppb 로 조사되었다. 현장의 어류 중금속 축적은 어종에 관계없이 거의 같은 경향을 보였으나 타 어종에 비해 송사리의 축적률이 다소 낮은 것으로 조사되었다(Fig. 3-7).

4. 결 론

붕어, 돌고기의 중금속 독성노출에 따른 영향을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 96시간 LC₅₀ 값을 기준으로 각 어종의 자어기가 수온이 노출되었을 때 붕어는 10.221 ppb, 돌고기는 8.402 ppb 이상일 때, 납의 경우 붕어는 572.445 ppb,

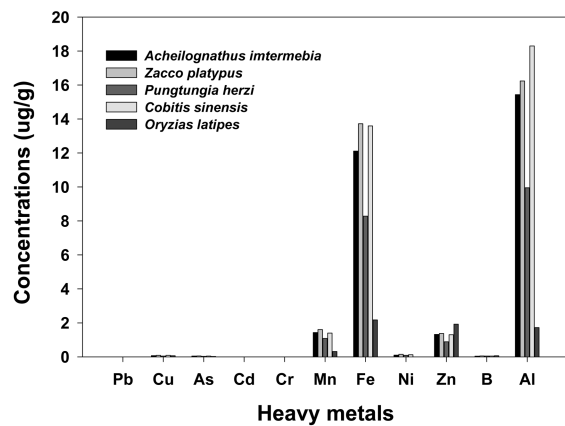


Fig. 3-7. Collect fishes of heavy metals concentration on field.

돌고기는 603.960 ppb 이상일 때, 구리의 경우 붕어는 84.567 ppb, 돌고기는 33.218 ppb 이상일 때 생존 가능성이 낮다고 볼 수 있다.

2) 본 연구결과와 타 어종 및 타 생육단계를 실험한 기존 연구결과를 절대적으로 비교하기는 어렵지만, 대체적으로 자어기가 중금속 독성에 상당히 민감한 것으로 보여지며 이를 중금속 오염에 대한 표준공시어의 생활사 단계로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 급성 독성실험 결과 산성배수에 노출된 붕어의 96 시간 LC₅₀은 pH 5.21에서 형성되었다.

4) 산성배수에 급성적으로 노출되었을 때 어류의 주요 사인(死因)은 아가미조직 변성에 의한 질식으로 판단된다.

5) 만성 독성실험 결과 산성배수에 만성적으로 30일간 노출된 붕어의 생존율 및 성장율은 pH 6.71 이상의 실험구에서는 영향을 받지 않았으나, pH 6.21 이하의 실험구에서는 저하되는 것으로 관찰되었다. 산소소비율은 pH 6.21 이상의 실험구에서는 큰 변동이 없었으나 pH 6.21 이하의 실험구에서는 저하되는 것으로 판단된다. 이는 산성배수에 장기간 노출된 붕어의 생존, 성장 및 산소소비가 감소하는 것으로 보아 그들의 분포 및 개체군에 많은 악영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 산성배수 유출지역의 수중 pH는 최소한 6.71 이상으로 유지해야 할 것으로 판단된다.

6) 현장에서 채집한 어류의 중금속 축적을 조사한 결과, 다양한 중금속이 체내에 축적되는 것으로 조사되었다. 이러한 체내 축적의 발생 이유는 수중에 용존된 중금속이 아가미와 체표로 흡수되거나 중금속이 농축된 먹이를 섭취하여 발생한 것으로 판단된다. 대부분의 동물들은 철과 같은 중금속을 배설할 기구가 없기 때문에 그 독성은 이미 체내에 축적된 중금속은 생체기능에 역기능을 유발시켜 치사를 유발시킬 수 있다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

1. 이상일 외, 보청천 수질오염 방지대책, 보은군, 1990
 2. Bitton, G., Rhodes, K., and Koopman, B., CerioFast :

an acute toxicity test based on *Ceriodaphnia dubia* feeding behavior. *Environ. Toxicol. Chem.*, **1986**, 15, 123-131.

3. 박종호, *Ceriodaphnia dubia*를 이용한 단기급성독성조사법 개발 및 응용, *충북대학교박사학위논문*, **2003**.

4. 박종호, 이상일, 조영옥, *Ceriodaphnia dubia*의 먹이 섭생 기작과 온도조절에 근거한 급성독성조사법의 비교, *한국물환경학회지*, **2004**, 20(1), 48-54.

5. Johansson-Sjoberg, M. L., and Larsson, A., Effects of inorganic lead on delta-aminolevulinic acid dehydratase activity and hematological variables in the rainbow trout, *Salmo gairdneri*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **1979**, 8, 419-431.

6. Flik, G., Stouthart, X. J. H. X., Spanings, F. A. T., Lock, R. A. C., Fenwick, J. C. and Wendelaar Bonga, S. E., Stress response to waterborne Cu during early life stages of carp, *Cyprinus carpio*, *Aquacult. Toxicol.*, **2002**, 56, 167-176.

7. Ling K. H., Sin Y. M., and Lam T. J., Effect of copper sulphate on ichthyophthiriasis (white spot disease) in goldfish (*Carassius auratus*), *Aquaculture*, **1993**, 18(2), 23-25.

8. Sippel, A., Geraci, J., and Hodson, P., Histopathological and physiological responses of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) to sublethal levels of lead. *Wat. Res.*, **1983**, 17, 1115-1121.

9. Grindley, J., Toxicity to rainbow trout and minnow of some substances known to be present in wastewater discharge to rivers, *Ann. Appl. Biol.*, **1964**, 33, 103-112.

10. Choi K. C., Jeon S. R., Kim I. S., and Son Y.M., *Coloured Illustrations of The Freshwater Fishes of Korea*, **2002**.

11. McKim, J. M., Evaluation of tests with early life stages of fish for predicting long-term toxicity, *J. Fish. Res. Board Can.* **1977**, 34, 1148-1154.

12. Buhl, K. J., Relative sensitivity of three endangered fishes, Colorado squawfish, bonytail, and razorback sucker, to selected metal pollutants, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **1997**, **37**(2), 186-192.

13. US EPA, Short-term Method for Estimating the Chronic Toxicity of Effluent and Receiving Waters to Freshwater Organism, EPA-821-R-02-013, Fourth Edition, Washington. D.C. U.S. EPA, **2002**.

14. Crompton T. R., *Toxicants in the Aqueous Ecosystem*, John & Sons Ltd, **1997**.

15. Martin, M., Osborn, K. E., Billig, P., and Glickstein, N., *Marine Ecology Prog.*, **1980**.

16. Bae Y. S. Study on the Acute Toxicity of Heavy Metal to Catfish, *The thesis of Kyonggi University*, **1998**.

17. Adelman, I. R., and Smith, G. D., Acute toxicity of mercuric chloride, pentachlorophenol, gathion and hexavalent chromium to fathead minnows and goldfish, *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **1976**, 33, 203-208.
18. Hannumante, M. M., and Kulkarni, S. S. Acute toxicity of molluscides, mercuric chloride and pentachlorophenol to a freshwater fish (*Channa gachua*), *Bull. Environ. Toxicol.*, **1979**, 23, 725-727.
19. Spehar, R. L., Christensen, G. M., Lemke A. E., and Pickering, O. H., Effect of pollution on freshwater fish, *J. WPCF*, **1982**, 54(6), 877-922.
20. Hodson, P. V, Blunt, B. R., and Spry, D. J., Chronic toxicity of water-borne and dietary lead to rainbow trout *Salmo gairdneri* in lake Ontario water, *Wat. Res.*, **1978**, 12, 869-878.