

## 탁수조건에 따른 피라미 치자어의 생존률 비교

문운기 · 배대열 · 정명숙<sup>1</sup> · 이상돈<sup>2</sup> · 김재구\*

((주)청록환경생태연구소, <sup>1</sup>국립환경과학원 물환경공학연구과,  
<sup>2</sup>이화여대 환경·식품공학부)

Comparison of Larval Fish Survival of Pale chub (*Zacco platypus*) Exposed to Different Levels Turbidity. Moon, Woon-Ki, Dae-Yul Bae, Myoung-Sook Jung<sup>1</sup>, Sangdon Lee<sup>2</sup> and Jaik-Ku Kim\* (Chungrok Environmental Ecosystem Research Institute, Anyang 431-701, Korea, <sup>1</sup>Water Environmental Engineering Research Division, NIER, Incheon 404-170, Korea, <sup>2</sup>Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womens University, Seoul 120-750, Korea)

To quantitatively assess the effects of turbidity on egg development and larval fish survival, a laboratory fish rearing experiment was applied to different life stages (newly hatched larval stage, juvenile stage and pre-adult stage) of the *Zacco platypus*, one of the most universal and tolerant species in Korea. According to the stress index of turbidity in water with exposure time, three different treatments, including a reference condition (1~7 NTU) as well as intermediate (20~150 NTU) and high turbidity conditions (400~1,000 NTU) were applied, and egg hatching and larval fish mortality rates were observed. The mortality rates of newly hatched larval fish were significantly different among treatments (ANOVA,  $F_{2,3}=17.79$ ,  $p<0.05$ ). Average rates of survival to hatching were 20.9% ( $\pm 0.1\%$ ) for reference condition, 11% ( $\pm 6.9\%$ ) for intermediate level and 3.2% ( $\pm 3.7\%$ ) for high level conditions, respectively. A sudden change of mortality at the high level was observed within 5 days of the experiment. About 84% of juvenile fish survived until 20 experimental periods under conditions of reference turbidity, while survival under conditions of intermediate turbidity was over 80% of larval fish until day 13 of the experiment, but dropped to less than 10% after day 14 and 15 of two experiments. Fish mortality appeared from day 6 of the high turbidity experiment, and 50% mortality was achieved at day 9 to 10 of experiment. Full mortality occurred at day 14 of the experiment (RM-ANOVA,  $F_{2,38}=17.89$ ,  $p<0.005$ ). In the pre-adult stage experiment, no mortality was observed during the experiment at reference level treatment (20 days), while only slight mortality rates were observed for both intermediate and high levels until day 5 of the experiment, however, no further fish died in either experiment. It was significantly different compared to reference condition (RM-ANOVA,  $F_{2,20}=8.28$ ,  $p<0.01$ ), but no difference was observed between intermediate and high level conditions. Consequently, this tolerant species has been determined to be well adapted to high levels of turbidity in its adult stage, but more vulnerable throughout earlier life stages.

**Key words :** *Zacco platypus*, stress index, turbid water, tolerance, survival rate

\* Corresponding author: Tel: 031) 478-3353, Fax: 031) 478-3350, E-mail: jaikim@kangwon.ac.kr

## 서론

지구온난화에 따른 기후변화는 전 세계적인 현상으로 인식되고 있으며, 이에 대한 각국의 현명한 대처가 요구되고 있다. 국내의 경우도 기후변화에 따라 강우패턴이 과거와는 전혀 다르게 국지성 폭우형태로 바뀌고 있으며, 이에 따라 강우발생 빈도와 강도가 높아져 탁수 발생 빈도가 크게 증가하고 있는 추세에 있다. 과거 탁수는 일시적인 자연현상으로 간과되어 왔으나, 탁수 발생빈도가 잦아지고, 총량이 증가하면서 생태계의 건강성을 악화시키는 심각한 오염원으로 부각되고 있다 (Kim and Jung, 2007). 탁수의 심각성에 따른 생태계 피해에 대한 영향 보고서 및 관련 논문들이 지속적으로 보고되고 있다.

국내연구현황을 보면 2000년대 이후부터 여름철 집중 강우에 따른 호수에서 탁수 발생실태 및 분포현황에 관한 연구가 많이 이루어졌다 (Shin *et al.*, 2003; Chung *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007b; Park *et al.*, 2008). 생태계 영향연구는 주로 어류와 플랑크톤 중심으로 많은 연구가 이루어졌다 (Park *et al.*, 2005; Shin 2005; Kim *et al.*, 2007a; Shin *et al.*, 2008). Lee *et al.* (2006)의 연구에 따르면 도압호 상, 하류 간의 부유물질 및 하상의 구조적 차이로 인해 어종의 구성이 다르게 나타나고 특히 탁수의 영향으로 인한 교잡붕어 출현을 보고한 바 있다. Kim *et al.* (2007b)의 보고에 따르면 탁수하천의 단위면적당 밀도는 대조하천에 비해서 1/4 정도로 감소하였고, 이러한 변화는 탁수로 인한 장기영향 (Chronic effect)의 증거로서 제시하였다. 또한 탁수하천과 대조하천간 저서대형무척추 동물 생태지표 비교를 통해 탁수하천에서 출현종수가 적고, 종 다양도가 낮음을 보고하였다 (Park, 2006). 그러나 대부분 탁수 관련 생태계 영향연구는 농도만을 대상으로 하고 있으며, 노출기간에 따른 고려는 이루어지지 않았다. 실제 탁수가 생태계에 미치는 영향은 탁수 농도와 노출기간을 함께 고려하는 것이 매우 중요하며, 타당할 것으로 판단된다.

미국을 비롯한 주요 선진국에서는 탁수에 대한 생태계 영향연구는 탁수 농도에 따른 지속기간을 고려한 스트레스 지수 (Stress index)를 기반으로 서식환경 영향 연구가 이루어지고 있다 (Newcombe and McDonald, 1991; Newcombe and Jensen, 1996; Kim *et al.*, 2007). Kim *et al.* (2007b)는 강우시 발생하는 탁수에 대한 어류 군집생태계 영향을 파악하기 위해 탁수의 유량가중농도 (Event mean concentration, EMC)에 지속시간을 곱하여 스트레스 지수로 이용한 바 있다. 그 외 어류에 대한 탁수 영향

연구는 스트레스지수에 따라 반수치사농도 (LC<sub>50</sub>) 및 내성범위 등이 결정되고 있다. 냉수어종인 무지개송어 (Rainbow trout)의 경우 스트레스 지수 8.5~9.0에서 약 5~17%의 치사어 사망률을 보이지만 10 이상에서는 사망률이 60% 이상으로 크게 증가하고, 성체에서도 치명적인 것으로 보고하고 있다 (Herbert and Merkens, 1961; Herbert and Richards, 1963; Slaney *et al.*, 1977). 태평양산 연어과 어류를 대상으로 실험한 결과 스트레스 지수 10~12 범위는 치사어의 반수치사농도 (LC<sub>50</sub>)인 것으로 보고되었다 (Noggle, 1978; Langer, 1980; Stober *et al.*, 1981). 북미의 브라운 송어는 스트레스 지수 12에서 수정란의 98%가 사망하였고, 16에서는 자연 개체군의 규모가 감소하는 것으로 나타났다 (Scullion and Edwards, 1980). Sigler *et al.* (1984)에 따르면 북미산 Steelhead는 스트레스 지수 10.2에서 성장률이 현저히 감소하는 것으로 보고하였고, Lawrence and Scherer (1974)는 스트레스 지수 14.3에서 Whitefish 치사어의 반수치사가 일어난다는 것을 보고하였다.

본 연구에서는 탁수농도에 따른 노출기간을 고려하여 생물모의실험을 수행하였고 이를 통하여 탁수의 영향에 대한 어류의 생존율 비교를 통해 내성도를 평가하였다. 향후 스트레스 지수를 활용하여 생태계 영향연구가 보다 체계적이고 정량적으로 이루어질 수 있을 것으로 기대한다.

## 재료 및 방법

### 1. 어종선정 및 발생단계 구분

본 연구에서 실험어종은 국내 하천환경에 대한 대표성을 고려하여 보편종이며 오염에 대한 내성 (Tolerance)이 강한 피라미 (*Z. platypus*)를 대상으로 하였다. 국내하천 전역에 분포하는 피라미는 전체 담수 어류의 약 20%를 차지하고 있어 가장 빈도가 높은 어종으로 알려져 있다 (Choi and Lee, 1994).

어류채집과 실내 인공수정을 위해 2010년 5월과 6월 2차에 걸쳐 북한강 상류인 인북천, 북천, 소양강 등에서 피라미를 채집하여 포란된 암수를 골라 인공 수정을 실시하였다. 인공수정 후 해부현미경을 통해 수정막이 형성되어 배 발생이 진행되는 것을 확인한 후 치사어 사육조로 옮겨 탁수배양실험을 진행하였다. 피라미의 발생단계는 크게 1) 부화직후 난황유생단계 (수정란~난황유생) 2) 치사어 단계 (난황유생~치사어) 3) 성체 전 단계 (치사어~성체 전 단계)로 구분하였다 (Nakamura, 1969).

2. 탁수배양실험

탁수영향실험을 위한 사육조는 실험기간 동안 일정농도의 탁수농도를 유지하기 위하여 어류배양수조를 자체

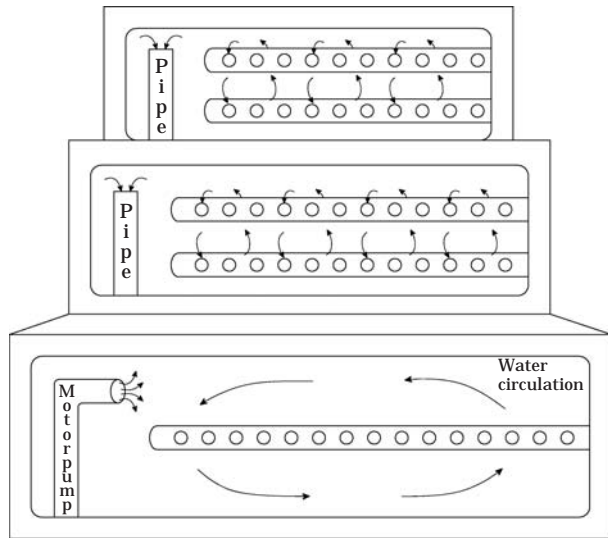


Fig. 1. Schematic diagram of water circulation system. Turbid water was mixed in the bottom and was supplied continuously to upper levels in which fish were reared. The upper two tanks were separated by a plastic septum.

제작 하였다(Fig. 1). 3단 구조로 이루어진 배양수조는 하부에 탁수를 넣어 지속적으로 교반을 해주고 펌프를 이용해 상부수조에 공급하는 순환 구조로서 상·하부의 탁수농도가 일정하게 유지하게 만드는 시스템이다. 탁수 교반장치를 10일간 지속적으로 가동하여 탁수농도를 비교한 결과 약 10 NTU 범위 이내에서 차이를 보였으나, 거의 동일한 조건을 유지하는 것으로 나타났다. 하부의 물이 상부로 공급됨으로써 자연스럽게 산소도 함께 공급되기 때문에 별도의 기포발생장치는 설치하지 않았다. 난황이 흡수된 이후 단계부터 매일 일정량의 먹이(부상사료를 갈아서 수조에 공급)를 투여하며 사육하였다.

3. 탁수실험조건

탁수에 대한 생태계 영향은 농도에 따른 지속시간을 고려한 스트레스 지수(Stress Index, SI)로 표현되고 있으며(Newcombe and MacDonald, 1991), 이를 이용하여 탁수 실험조건을 설정하였다[식 1]. 스트레스 지수는 생태계 미치는 영향 정도에 따라 SI 1-5는 생태계 영향을 주지 않는 범위, SI 6-8 범위는 중간 정도의 영향, 그리고 SI 9 이상인 경우 심각한 영향을 주는 것으로 알려져 있다(EIFAC, 1964; Wilber, 1969, 1983; Alabaster, 1972; NAS and NAE, 1973; Newport and Moyer, 1974; Hill, 1974; Alabaster and Lloyd, 1980; DFO, 1983; Mills *et al.*, 1985) (Table 1).

Table 1. General ranges of stress index based on concentration of suspended solids (mg · L<sup>-1</sup>) or turbidity (NTU) with time.

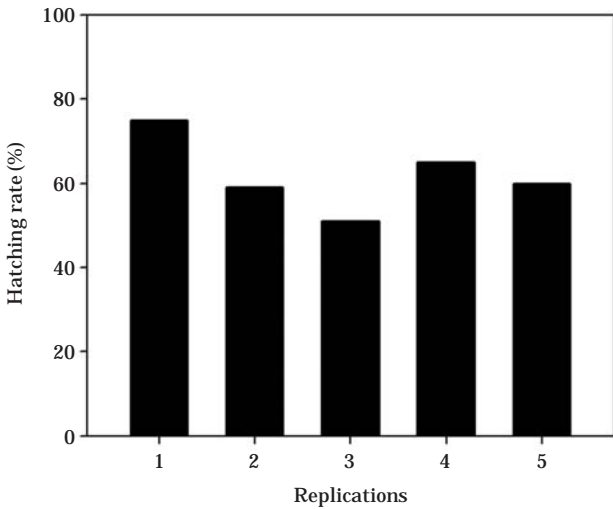
Day	Index									
	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5	SI 6	SI 7	SI 8	SI 9	SI 10
3	1	2	7	18	49	134	366	944	2701	7342
5	1	1	4	11	30	81	219	596	1621	4405
7		1	3	8	21	58	157	426	1158	3147
10		1	2	5	15	40	110	298	810	2203
20			1	3	7	20	55	149	405	1101
30			1	2	5	13	37	99	270	734
40			1	1	4	10	27	75	203	551
50				1	3	8	22	60	162	441
70				1	2	6	16	43	116	315
100				1	1	4	11	30	81	220

Table 2. Experimental condition based on stress index considering ecological impact on fish.

Turbidity condition	Treatments based on stress index	Ranges of turbidity during the experiment (NTU)	Ecological impact	Exposure duration (day)
Control	SI 1~5	1~7	Little	20
Intermediate	SI 6~8	20~150	Intermediate	20
High	>SI 9	400~1,000	Serious	20

**Table 3.** The range of water quality determined during the experimental period.

Developmental stage	Parameters				
	Water temp. (°C)	DO (mg · L <sup>-1</sup> )	DO saturation (%)	pH	Specific conductivity (μs · cm <sup>-1</sup> )
Newly hatched larvae	22~25	7.0~7.5	80~90	7.8~8.3	180~200
Yolksac larvae to Post-larval stage	24~30	7.0~8.2	85~105	7.5~8.5	180~270
Post-larval stage to Pre-adult stage	20~25	7.0~8.2	80~95	7.2~8.3	200~250



**Fig. 2.** Hatching rate of *Z. platypus* after artificial insemination.

스트레스 지수(SI)=Ln [탁수농도×시간(일)] [식 1]

본 연구에서는 탁수에 대한 생태계 영향범위를 고려하여 지속기간 20일을 기준으로 탁수농도를 결정하였다. 대조군의 탁수농도는 1~7 NTU 범위, 중간정도 영향은 20~150 NTU, 심각한 영향을 주는 고탁수의 농도는 400~1,000 NTU 범위로 설정하였다 (Table 2).

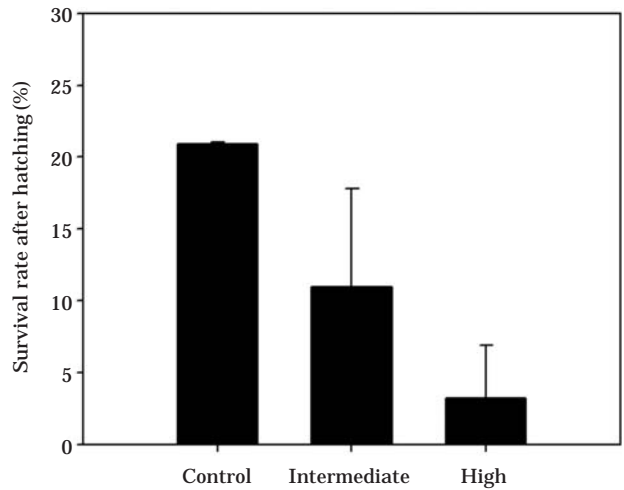
**4. 통계처리**

각 탁수조건에 따른 어류 생존률의 비교를 위해서 Repeated measure-ANOVA, One-way ANOVA를 실시하였고, 95% 유의수준에서 검증을 하였다 (Zar, 1984).

**결 과**

**1. 어류 배양조건**

발생단계별 어류 배양 실험기간 동안 측정된 수온, 용



**Fig. 3.** Comparison of survival rate of newly hatched larval stage under three different conditions of turbidity.

존산소, 산소포화도, pH, 비전기전도도 (Specific conductivity) 조건은 다음과 같다 (Table 3). 수온은 22~30°C 범위였고, 용존산소는 7.0~8.2 mg · L<sup>-1</sup> 범위로서 이에 따른 산소포화도는 80~105%를 유지하였다. pH 중성에서 약 알칼리성으로 7.2~8.5 범위였으며, 비 전기전도도는 180~270 μs · cm<sup>-1</sup> 상태를 유지하였다.

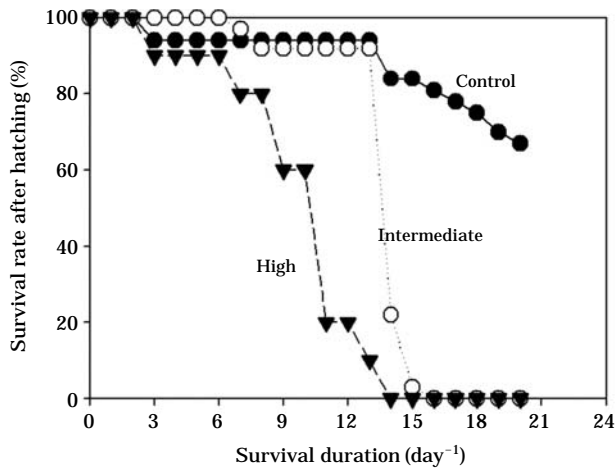
**2. 수정란 부화율 및 난황유생단계 생존율 실험**

**1) 피라미의 수정 난 부화율**

인공 수정된 피라미 난은 수온 약 24~27°C 범위에서 약 3일 후부터 부화되기 시작하였고, 부화율은 51~75% (평균 62%)였다 (Fig. 2). 부화직후의 유생들은 실험조로 옮겨서 탁수실험을 수행하였다.

**2) 난황유생단계 생존율 실험**

부화 직 후 개체들을 탁수에 노출시킨 결과 부화 후 Day 0~5에서 탁수의 영향에 따른 개체들의 생존율이 다르게 나타났다. 저농도(L)에서 개체의 평균 생존율은



**Fig. 4.** Comparison of survival rate at juvenile stage under three different conditions of water turbidity.

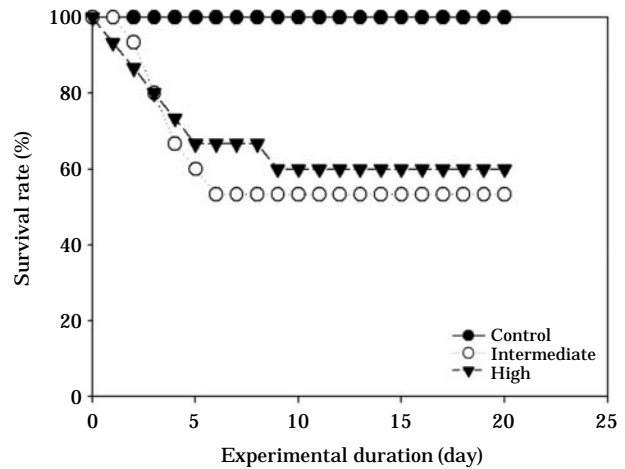
20.9% ( $\pm 0.1\%$ ), 중간농도 (I)에서 평균 생존율은 11% ( $\pm 6.9\%$ )였고, 고농도 (H)에서 개체의 평균 생존율은 3.2% ( $\pm 3.7\%$ )로서 생존율이 급격히 낮아졌다 (Fig. 3). (ANOVA,  $F_{2,3}=17.79$ ,  $p < 0.05$ ).

### 3. 치자어 단계 생존율 실험

유생의 난황이 완전히 흡수된 이후 단계인 치자어를 대상으로 탁수 농도에 따른 사망률을 비교한 결과 탁수농도에 따라 생존율은 유의적인 차이를 보였다 (RM-ANOVA,  $F_{2,38}=17.89$ ,  $p < 0.005$ ). 저탁수에 20일간 노출한 실험에서 84%의 생존율을 보인, 반면 중간탁수 그룹에서는 Day 13일까지 80% 이상 생존 하였으나 Day 14~15일에 10% 이하로 급격히 떨어졌다. 고탁수에서는 Day 6부터 사망 개체가 늘어나기 시작하였고, Day 14일 이 후 모든 개체가 사망하였다. 실험집단의 반수가 사망하기까지는 약 9~10일 정도가 걸렸다 (Fig. 4). 치자어 단계에서 피라미는 탁수에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

### 4. 성체 전 단계 생존율 실험

치자어 이후부터 성체의 모습을 갖추기 시작하는 단계에서 탁수노출 실험결과 저탁수 그룹에서는 100% 생존하였고, 반면 중간 및 고탁수 그룹에서는 초기인 Day 5까지 일시적으로 사망개체가 발견되었으나, 탁수환경에 적응한 이후부터 안정한 상태를 유지하였다 (Fig. 5). 성체 단계부터 탁수에 적응하는 개체들은 대조군과는 유의적 차이를 보였지만 (RM-ANOVA,  $F_{2,20}=8.28$ ,  $p < 0.01$ ), 중간과 고탁수 환경에서 피라미의 생존율은 차이가 없었다.



**Fig. 5.** Comparison of survival rate at pre-adult stage under three different conditions of water turbidity.

## 고 찰

본 연구는 수환경 교란의 중요한 요인이 되고 있는 탁수를 대상으로 생물모의 실험을 통해 영향을 파악하고자 하였고, 이를 위해 탁수 이외의 다른 영향에 대해서는 모두 배제하여 실험설계를 하였다. 실제 자연계에서 일어나는 생태계 영향들은 대부분 요인들간에 복잡한 상호작용을 통해 일어나고 있음을 가정할 때 본 연구의 실험적 한계가 될 수 있다.

어류생태계에서 탁수에 대한 영향은 발생단계에 따라 다르게 나타날 수 있어 이를 구분하여 영향 연구를 하는 것이 필요하다. 피라미를 포함하여 대부분의 잉어과 어류는 발생단계를 거치면서 먹이나 행동이 바뀌면서 Ontogenetic shift가 일어나게 되며, 이시기를 전후하여 면역성이 다르게 나타난다. 즉 유생기와 성체 때 먹이습성이나 성장, 행동이 다르고 이시기를 전후하여 이시기를 전후하여 면역성이 다르게 나타난다 (Bond, 1979). 본 연구에서도 치자어 단계에서 성체 전 단계로 전환되며 탁수에 대한 반응이 다른 것은 Ontogenetic shift의 결과로 판단된다. 따라서 발생단계를 구분해서 영향 정도를 실험하는 것이 매우 중요하며 이를 통해 개체군전체에 영향을 최소화 하기 위한 치자어 관리방안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

자연생태계에서 어류의 초기 사망율은 매우 높다. 개체군 생존전략에 따르면 출산율이 높은 어종일수록 성체단계까지 도달하는 경우는 극히 낮다 (r-선택). 본 연구에서 피라미 수정란 부화율은 평균 62% 정도였으나 이는 안정된 환경에서 부화율을 의미하는 것으로 실제 자연생태

계에서 일어나는 현상과는 많은 차이가 있을 것으로 사료된다.

부화 직 후 어류 치어들은 환경변화에 매우 민감하게 반응한다. 탁수에 대한 반응도 마찬가지로 판단된다. 그러나 대조군 실험에서 약 21%의 생존율은 탁수에 의한 영향보다 부화 직 후에 나타나는 일반적인 사망률로 볼 수 있다. 저농도 실험의 경우 탁수농도는 10 NTU 이내로서 실제 자연계에서 청정하천에 가까운 농도로서 탁수에 대한 영향은 미미하기 때문이다. 따라서 피라미 개체군의 경우 수정난의 부화율은 60% 정도 이지만 부화 직 후 초기 사망율은 약 80% 정도인 것으로 판단된다. 한편 중간농도 실험에서 평균생존율은 11%로 감소되었고 이는 탁수농도 범위가 20~150 NTU 범위로서 실제 탁수에 의한 영향을 받았을 것으로 여겨지며, 고탁수 실험에서 개체평균 생존율이 급감한 것은 탁수에 대한 직접적인 영향이 작용했을 것으로 사료된다. 결론적으로 자연계에서 봄철 어류 산란기에 부화한 치어들이 20 NTU 이상의 탁수농도에 장기간 노출되는 경우 이들의 생존률은 10% 이내로 낮아질 수 있음을 의미한다.

부화 직 후 난황유생단계이후부터 치자어 단계 유생은 입으로 먹이를 섭취하기 때문에 탁수농도에 직접적으로 영향을 받을 것으로 사료된다. 대조군 실험에서 80% 이상의 생존율을 보였으나 중간탁수에서 실험 15일 이후부터 급격한 사망을 보였고, 고 탁수에서는 실험 7일 이후부터 사망률이 크게 증가하였다. 이는 개체의 사망률은 탁수농도에 비례하였고, 같은 발생단계에서 대사율이 같다고 가정 할 경우 고 탁수환경에서 흡수되는 총량이 많아진 결과로서 판단된다. 20 NTU 이상의 중간 탁수환경에서 Probit 분석 결과 LC<sub>50</sub>는 약 10일 정도에서 집단의 절반이 사망하는 것으로 추정되었다. 이를 근거로 자연 생태계에서 피라미 치어가 20 탁수 환경에 10일 이상 노출되는 경우 개체군의 감소를 예상할 수 있다. 따라서 일반 잉어과 어류 산란기인 4~6월 사이에 20 NTU 이상의 탁수 농도가 10일 이상 지속되지 않도록 관리하는 것이 필요하다.

치자어 이후부터 성체의 모습을 갖추기 시작하는 단계에서 중간 및 고탁수 그룹에서 일시적으로 사망개체가 발견되었으나 탁수환경에 적응한 이후부터 안정한 상태를 유지하였다. 탁수에 적응하는 개체들은 고탁수 환경에서도 크게 영향이 없음을 의미하고 있다. 피라미 이외 내성어종인 붕어와 외래종인 블루길, 배스에서 성체단계 이후 고탁도 환경에서 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 민감종인 참갈겨니 성체의 경우 SI 5~6 (예시: 20 NTU 탁수가 20일간 지속, 혹은 40 NTU가 10일간

지속)에서 탁수에 대한 영향이 나타났으며, SI 8 이상 (150 NTU에서 20일 지속)에서 90% 이상이 사망하였다 (미발표 자료). 이러한 차이는 어종별 내성도의 차이로 여겨지며, 따라서 어류의 내성도에 따른 탁수관리 대책이 필요하다.

환경부에서 수행하고 있는 수생태 건강성평가는 생물의 내성도를 기반으로 하는 질적인 평가로서 하천건강성 등급은 생물의 내성도를 잘 반영하는 통합적 지수이다. 따라서 하천의 등급에 따라 탁수에 대한 농도와 배출 허용기간을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 4등급 체계로 되어있는 건강성평가에서 청정-양호등급의 경우 민감어종의 분포비율이 높기 때문에 SI 6 이하로 관리하고, 보통등급에서는 SI 7 이하, 그리고 불량등급의 경우 내성종의 우점화 비율이 높아 SI 10 이하로 관리하는 것이 필요하다.

## 적 요

본 연구에서는 탁수농도에 따라 생물서식지에 영향을 주는 스트레스 지수를 활용하여 탁수에 대한 어류영향실험을 수행하였다. 국내 하천에서 우점비율이 가장 높은 피라미를 대상으로 발생단계별로 탁수에 대한 모의실험을 수행한 결과 발생 초기단계에서는 탁수에 대한 반응이 민감하게 나타났지만 성체단계에 이르면서 고탁수에 대한 적응하는 것으로 나타났다. 그 외 어종에 대한 탁수 반응은 어종별 내성도에 따라 다르게 나타난다. 따라서 본 연구결과는 향후 수생태 건강성평가와 연계하여 하천의 건강성상태를 결정한 후, 평가등급에 따라 탁수에 대한 농도와 배출 허용기간을 적용하는데 유용한 지표가 될 것으로 기대한다.

## 사 사

본 연구는 환경부 한강수계 2009년도 환경기초조사사업 「한강수계 수환경 교란에 의한 수생태 영향평가」 일환으로 수행되었으며, 이에 대한 지원에 감사 드립니다.

## 인 용 문 헌

Alabaster, J.S. 1972. Suspended solids and fisheries. *Proceedings of the Royal Society of London Biological Sciences* **180**: 395-406.



- Alabaster, J.S. and R. Lloyd. 1980. Water quality criteria for freshwater fish. Butterworth, London.
- Bond, C.E. 1979. Biology of fishes. W.B. Saunders. Philadelphia.
- Choi, K.C. and W.K. Lee. 1994. One-hundred freshwater fishes in Korea. Hyeonam Publishing, Seoul, 531pp.
- Chung, S.W., H.S. Lee, S.W. Yoon, L. Ye, J.H. Lee and C.O. Choo. 2007. Characterization of physical properties of turbid flow in the Daecheong reservoir watershed during floods. *Journal of Korean Society on Water Quality* **23**(6): 934-944. (in Korean)
- DFO. 1983. A rationale for the suspended solids standards for Yukon streams subject to placer mining. Report to Interdepartmental Committee on Placer Mining, New Westminster, Canada.
- EIFAC (European Inland Fisheries Advisory Commission). 1964. Water quality criteria for European freshwater fish: report on finely divided solids and inland fisheries. United Nations, Food and Agriculture Organization, EIFAC Technical Paper 1, Rome, Italy.
- Herbert, W.M. and J.C. Merckens. 1961. The effect of suspended mineral solids on the survival of trout. *International Journal of Air and Water Pollution* **5**: 46-55.
- Herbert, W.M. and J.M. Richards. 1963. The growth and survival of fish in some suspensions of solids of industrial origin. *International Journal of Air and Water Pollution* **7**: 297-302.
- Hill, R.D. 1974. Mining impacts on trout habitat. Pages 47-57 in Proceedings of a symposium on trout habitat research and management. Appalachian Consortium Press, Boone, North Carolina.
- Kim, B. and S. Jung. 2007. Turbid storm runoffs in Lake Soyang and their environmental effect. *Korean Society of Environmental Engineers* **29**(11): 1-6. (in Korean)
- Kim, J.H., J. Seo, Y.E. Na and K.G. An. 2007a. Ecological health assessments on turbid water in the downstream after a construction of Yongdam Dam. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 130-142. (in Korean)
- Kim, J.K., J.S. Choi, Y.S. Jang, K.Y. Lee and B. Kim. 2007b. Effects of turbid water on fish community: Case studies of the Daegi stream and the Bongsan stream. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 459-467. (in Korean)
- Langer, O.E. 1980. Effects of sedimentation on salmonid stream life. In Report on the technical workshop on suspended solids and the aquatic environment. Edited by K. Weagle. Department of Indian Affairs and Northern Development, Whitehorse, YT.
- Lawrence, M. and E. Scherer. 1974. Behavioral responses of whitefish and rainbow trout to drilling fluids. Fish. Mar. Ser. Tech. Rep. No. 502, Env. Canada.
- Lee, S.H., J.S. Choi, K.Y. Lee, Y.S. Jang, I.S. Lim, W.M. Heo, J.K. Kim and B. Kim. 2006. A study of water quality and fish community in lake Doam. *Korean Journal of Limnology* **39**(2): 167-177. (in Korean)
- Mills, W.B., D.B. Porcella, M.J. Unger, S.A. GhErini, K.V. Summers. 1985. Water quality assessment: a screening procedure for toxic and conventional pollutants in surface and ground water. USEPA, Report 600/6-85/0.02a, Athens, GA.
- Nakamura, M. 1969. Cyprinid fishes of Japan. Res. Inst. Natur. Res., Tokyo. 455pp. (in Japanese)
- NAS (National Academy of Sciences) and NAE (National Academy of Engineering). 1973. Water quality criteria 1972. U. S. Environmental Protection Agency, Ecological Research Series Report R3-73-033, Washington, D.C.
- Newcombe, C.P. and D.D. MacDonald. 1991. Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management* **11**: 72-82.
- Newcombe, C.P. and J.O.T. Jensen. 1996. Channel suspended sediment and fisheries: a synthesis for quantitative assessment of risk and impact. *North American Journal of Fisheries Management* **16**: 693-727.
- Newport, B.D. and J.E. Moyer. 1974. State-of-the art: sand and gravel industry. U.S.EPA, Report 660/2-74-066, Covallis, OR.
- Noggle, C.C. 1978. Behavioral, physiological and lethal effects of suspended sediment on juvenile salmonids. Master's thesis. University of Washington, Seattle, USA.
- Park, H.J. 2006. A study of the community fluctuation of benthic macroinvertebrates of the muddy water area and not muddy water area. MS thesis. Andong National University, Korea. (in Korean)
- Park, J.W., K.L. Lee, J.S. Choi and H.S. Kim. 2005. Dynamics of phytoplankton community after formation of turbid water in lake Imha. *Korean Journal of Limnology* **38**(3): 429-434. (in Korean)
- Park, J.C., S.W. Jung, J.W. Park and H. Kim. 2008. Spatial and temporal dynamics of turbid water in hypolimnetic discharging reservoir (Andong), South Korea. *Korean Journal of Limnology* **41**(3): 360-366. (in Korean)
- Scullion, J. and R.W. Edwards. 1980. The effects of coal industry pollutants on the macro-invertebrate fauna of a small river in the South Wales Coalfield. *Freshwater Biology* **10**: 141-162.
- Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paltang reservoir, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**(3): 257-268. (in Korean).

- Shin, M.J., J.S. Kim, Y.H. Hwang, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008. Effect of turbidity changes on tissues of *Zacco koreanus*. *Korean Journal of Limnology* **41**(1): 73-80. (in Korean)
- Shin, W.K. 2005. Influence of turbidity on zooplankton dynamics in the Nakdong river. MS thesis. Pusan National University, Korea. (in Korean)
- Sigler, J.W., T.C. Bjornn and F.H. Everest. 1984. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelhead and coho salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* **113**: 142-150.
- Slaney, P.A., T.G. Halsey and A.F. Tautz. 1977. Effects of forest harvesting practices on spawning habitat of stream salmonids in the Centennial Creek watershed, British Columbia. Province of British Columbia, Ministry of Recreation and Conservation, *Fisheries Management Report* **73**: 45p.
- Stober, Q.J., B.D. Ross, C.L. Melby, P.A. Dinnel, T.H. Jagielo and E.O. Salo. 1981. Effects of suspended volcanic sediment on coho and chinook salmon in the Toutle and Cowlitz rivers. Fisheries Research Institute, University of Washington, Seattle. Technical Completion Report FRI-UW-8124.
- Wilber, C.G. 1969. The biological aspect of water pollution. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois.
- Wilber, C.G. 1983. Turbidity in the aquatic environment: an environmental factor in fresh and oceanic waters. Charles C. Thomas, Springfield, Illinois.
- Zar, J.H. 1984. Biostatistical analysis 3rd ed. Prentice-Hall, New Jersey, 718pp.
- (Manuscript received 30 May 2012,  
Revised 8 August 2012  
Revision accepted 4 September 2012)