

## 부유토사가 담수 어류 3종(붕어, 잉어, 송사리)의 초기 생활사에 미치는 영향

문성대<sup>1,2</sup> · 강신길<sup>1</sup> · 이창훈<sup>1</sup> · 성찬경<sup>1,3</sup> · 안광국<sup>2</sup> · 최태섭<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>(주)네오엔비즈 환경안전연구소, <sup>2</sup>충남대학교 생명과학과, <sup>3</sup>서울시립대학교 에너지환경시스템공학과

**Effect on Early Life Stage of Three Freshwater Fish (*Carassius auratus*, *Cyprinus carpio*, *Oryzias latipes*) Exposed to Suspended Solids. Moon, Seong-Dae<sup>1,2</sup>, Sin-Kil Kang<sup>1</sup>, Chang-Hoon Lee<sup>1</sup>, Chan-Gyoung Sung<sup>1,3</sup>, Kwang-Guk An<sup>2</sup> and Tae Seob Choi<sup>1,\*</sup> (<sup>1</sup>Institute of Environmental Protection and Safety, NeoEnBiz Co., Bucheon 420-806, Korea; <sup>2</sup>Department of Biological Science, College of Biosciences and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; <sup>3</sup>Department of Energy and Environmental System Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea)**

**Abstract** To assess the adverse effects of suspended solids on fishes, the hatching rate of embryo, and survival and growth of larvae were measured with common fish species of river such as crucian carp (*Carassius auratus*), common carp (*Cyprinus carpio*) and medaka (*Oryzias latipes*). Bioassay on hatching rate of embryo was conducted with a range of turbidity as 10 levels from 0.2 to 8,080 NTU. Another bioassay on 4-day larval survival and 21-day larval growth were also conducted with a range of turbidity as 8 levels from 0.1 to 8,260 NTU, and 6 levels from 0.7 to 2,030 NTU, respectively. The hatching rate of *C. auratus* was not significantly different from that of control at turbidity below 4,040 NTU, whereas it decreased when turbidity was 8,080 NTU ( $p < 0.05$ ). The hatching rate of *C. carpio* was not affected by concentration of suspended solids. For *O. latipes*, the hatching rate significantly decreased from 254 NTU ( $p < 0.001$ ) and it was zero when turbidity was 8,080 NTU. The 4-day survival of larvae of all 3 species was not affected by turbidity, while the larval growth of all 3 species was significantly affected. The turbidity effect on the growth of *C. auratus* and *C. carpio* was observed from 7 days after the exposure at turbidity level of 145, 143 NTU, respectively. The turbidity effect on the growth of *O. latipes* was observed from 14 days after the exposure at turbidity level of 254 NTU. The results of this study will provide the basic information for the derivation of water quality criteria on suspended solids for the protection of aquatic ecosystem and the quantitative ecological risk assessment of freshwater environment.

**Key words:** *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio*, *Oryzias latipes*, suspended solids, ELS (early life stage)

## 서론

몬순기후의 영향을 받는 우리나라는 최근 여름철에

강우가 집중되면서 하천 또는 호소에서 부유토사 발생 빈도가 크게 증가하고 있는 추세이다. 하천 또는 호소에서 부유토사로 인한 탁도 증가의 주요 원인은 홍수나 태풍과 같은 자연재해도 있지만, 토목사업을 포함한 인간 활동에 의해 발생하기도 한다(Newcombe and MacDonald, 1991; Bash *et al.*, 2001). 하천에서 부유토사의 발생으로 인한 탁도의 증가는 일시적인 자연현상으로

Manuscript received 28 March 2014, revised 2 May 2014,  
revision accepted 13 June 2014  
\* Corresponding author: Tel: +82-32-718-9440, Fax: +82-32-718-9409,  
E-mail: tschoi@neoenbiz.com

간과되어 왔으나, 총량과 빈도가 증가하면서 생태계 피해를 줄 수 있는 주요 원인으로 부각되고 있다. 특히 대규모 준설공사는 하천 퇴적물을 재부유시켜 주변 수계의 수산자원 및 자연환경에 심각한 영향을 미칠 수 있으나 적절한 관리기준이 없고, 수계에서 부유토사의 부유로 인한 탁도의 증가와 지속에 따른 생태계 영향 자료는 매우 부족하다.

부유토사 관련 국내 연구현황을 보면 해양 생물인 참전복의 폐사에 미치는 영향(Lee, 2008) 연구 이외에 담수 생태계 관련 연구는 매우 부족하다. 반면 탁도가 생태계에 미치는 영향에 대한 연구는 어류상 및 어류군집(Choi, 2005; Lee *et al.*, 2006a, b; Han *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007a, b; Shin *et al.*, 2007, 2008, 2009; Lee *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2009; Moon *et al.*, 2012)과 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향(Park *et al.*, 2005; Park and Kang, 2006; Park *et al.*, 2008), 저서성대형무척추동물의 군집구조에 미치는 영향(Han, 2008), 동물플랑크톤 동태에 미치는 영향(Shin, 2005) 등 다양하다. 어류의 경우 부유토사에 포함된 다량의 유기물질이 분해되면서 산소를 소비하고, 이로 인해 어류폐사가 발생하기도 하며(Hellawell, 1986), 산소부족으로 집단 폐사의 가능성 그리고 아가미의 여러 가지 기형이 보고되었다(Lee *et al.*, 2006b).

외국의 경우 부유토사 문제는 수질의 오염원으로서 뿐만 아니라 수생태계를 파괴하는 요인으로서 어류 및 저서생물을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있다(Gradall and Swenson, 1982; Gregory, 1993; Abrahams and Kattenfeld, 1997; Utne-Palm, 1999). 특히 부유토사에 민감한 송어와 연어를 대상으로 생리·생태학적 측면과 서식지 파괴에 따른 군집의 변화상 등에 관한 연구를 통해 탁도에 대한 수질기준을 설정하는 근거 자료로 활용하고 있다. 미국의 경우 부유토사가 포함된 탁수에 대해서 어류에게 미치는 생화학적 영향(세포수준부터 단백질, 형태 변이까지), 수생태 어류에 대한 수질기준 설정, 하천생태계에 미치는 영향, 무척추동물 및 수생생물에 미치는 영향, 대형무척추동물의 군집에 미치는 영향, 연어 서식지 기준, 산림 및 양식업, 폐류에 미치는 영향 그리고 총설에 이르기까지 종합적인 관리방안을 제시하고, 이를 저감하기 위해 노력하고 있다(Newcombe and Jensen, 1996; Bash *et al.*, 2001; Wilber and Clarke, 2001; Berry *et al.*, 2003).

강우에 의해 하천이나 호소에서 발생하는 부유토사를 포함하는 탁수는 주변 토양과 비점오염원에 따라 탁도와 생태계에 미치는 영향이 다르고, 퇴적물 또는 토사가

부유하면서 발생하는 부유토사는 그 자체에 대한 영향과 더불어 영양염류나 유기화합물 및 중금속 등이 용출되어 수질악화와 독성을 유발하는 경우가 있다(Banasiak and Verhoenen, 2006). 본 연구에서는 강 또는 호소에서 준설과 같은 공사 시에 발생하는 부유토사가 어류에게 미칠 수 있는 잠재적인 영향을 알아보고자 하였다. 부유토사에 의한 잠재적인 영향을 관찰하기 위하여 이용한 어류는 정수성 담수 생태계에 주로 서식하는 붕어(*Carrasius auratus*), 잉어(*Cyprinus carpio*), 송사리(*Oryzias latipes*)이었으며, 각 어종별 수정란 부화율 평가, 치어 생존율 및 성장 평가를 수행하였다. 부유토사가 수서생물 또는 수생태계에 미치는 영향은 매우 다양하여 종합적으로 연구한다는 것은 매우 어렵다. 하지만 본 연구의 결과는 정량적 생태위해성평가를 통해 부유토사에 대한 생태계 보호목적의 기준 도출을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 재료 및 방법

### 1. 퇴적물 특성

부유토사의 농도 구배를 만들기 위하여 대구광역시 달성군 구지면 도동리 낙동강 본류(N 35°42'0.96", E 128°23'8.28")에서 하천퇴적물을 채취하였다. 채취 도구는 Ponar grab sampler(3.2L)를 이용하였으며, 퇴적물 시료는 고무보트를 이용하여 강의 중심에서 채취되었고, 4°C 이하의 조건을 유지하여 실험실로 운반하였다.

본 연구는 하천 퇴적물 또는 토사 부유로 인한 어류의 생태 영향평가가 목적이기 때문에 인위적 오염이 적은 깨끗한 지역의 퇴적물을 채취하고자 하였다. 채취된 퇴적물의 오염여부는 금속원소를 분석하여 판단하였다. 퇴적물의 금속원소 분석은 전함량법(USEPA, 1996)으로 하였고, 분석기기는 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer)가 이용되었다. 분석 결과는 국외의 여러 가지 환경기준을 고려한 TEC(Threshold effect concentration) 기준(MacDonald *et al.*, 2000)과 국내 담수퇴적물 배경농도(NIER, 2011)와 비교하였다.

### 2. 부유토사 농도 구배의 설정 및 노출 범위

부유토사를 이용한 농도 구배를 만들기 위하여 먼저 채취된 퇴적물을 63- $\mu$ m 표준체를 통과시켜 굵은 입자와 내서생물을 제거하였다. 부유토사를 이용한 농도 구배의 확인은 부유토사의 농도로 하기 보다는 실험의 편의성을

위해 탁도를 측정하였다. 탁도 측정은 탁도계(HORIBA, U-53 BHF7WY1R)를 이용하였다. 사전에 부유토사의 농도 구배를 만들기 위하여 부유토사의 농도와 탁도와 의 관계를 측정하였으며, 선형회귀분석을 통해 목적하는 탁도 범위를 제조하였다(Fig. 1).

붕어, 잉어, 송사리 수정란 부화율 평가에 이용된 탁도 범위는 10단계(0.2(대조구), 33, 65, 127, 254, 508, 1,010, 2,020, 4,040, 8,080 NTU)로 하였고, 치어 생존율 평가는 8단계(0.1(대조구), 134, 261, 516, 1,040, 2,070, 4,130, 8,260 NTU)로 하였다. 치어 성장 평가는 6단계(0.7(대조구), 141, 268, 532, 1,010, 2,030 NTU) 실험구를 설정하였다. 각 탁도 범위는 실측된 값을 이용하였고, 수정란 부화율 평가와 치어 생존율 평가는 평균 탁도를 결과에 반영하였다. 치어 성장 평가는 각 어종별 실측된 탁도를 결과에 반영하였다. 수정란 부화율 및 치어 생존율 평가의 최고 농도인 약 8,000 NTU를 조제하기 위해 사용된 퇴적물 양은  $17.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , dry weight이었고, 성장 평가의 최고 농도인 약 2,000 NTU에서는  $4.35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , dry weight의 퇴적물이 이용되었다.

### 3. 어류를 이용한 생태영향평가

일반적으로 어류는 발생단계에 따라 먹이섭취 방법이나 성장, 행동양상이 다르고 오염물질 또는 환경요인에

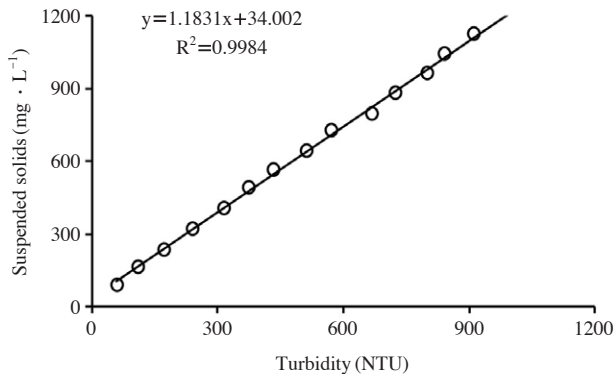


Fig. 1. The relationship between turbidity and suspended solids by linear regression analysis.

대한 면역성이 다르다(Bentivegna and Piatkowski, 1998; Anadu *et al.*, 1999). 본 연구에서는 어류 생애초기단계영향시험(Early-life Stage Effect Test)을 통해 부유토사 농도별 어류 수정란 부화율 평가와 치어 생존 및 성장 평가를 수행하였다. 어류 수정란 부화율 평가는 수정란을 부유토사 농도 구배에 노출시킨 후, 대조구에서의 부화율이 80% 이상이 될 때 노출을 종료하고 대조구와 실험구의 부화율을 비교하여 영향 여부를 확인하는 것으로 수행하였다(OECD, 1998; U.S. EPA, 2002a, b). 붕어, 잉어의 수정란은 경기도 가평에 위치한 국립수산물학원 중앙내수면연구소에서 분양받아 실험실로 옮긴 후 미수정란을 제거하고 즉시 시험하였으며, 송사리 수정란은 (주)네오엔비즈에서 계대배양 중인 송사리 성어로부터 생산된 수정란을 이용하여 시험하였다.

어류 수정란의 노출은 80 mL 용량의 뚜껑이 있는 폴리에틸렌 재질의 용기를 이용하였다. 각 용기에 부유토사 농도를 조절된 시험수 70 mL를 채우고 수정란을 10개씩 투입하였다. 시험의 반복수는 3개로 하였으며, 노출기간 동안 온도와 광주기는  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , 16:8 (light: dark)이었고, 노출 초기와 노출이 종료되는 시점에 온도, pH, 전기전도도, 용존산소, 총용존고형물(TDS, total dissolved solids)을 각각 측정하였다(Table 1). 부유토사 농도는

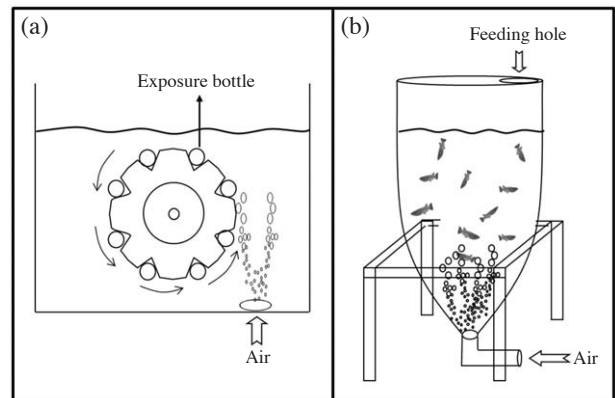


Fig. 2. Schematic diagram of experimental devices. (a) experimental device for hatchability test, and (b) experimental device for survival and growth test on fish.

Table 1. Variation of water quality during period of exposure test.

End-point	Parameters				
	Water temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH	Conductivity ( $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	DO ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	TDS ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )
Hatching rate	22.6 ~ 23.9	6.9 ~ 7.8	148 ~ 317	7.8 ~ 9.9	0.09 ~ 0.21
Survival	23.1 ~ 23.7	7.4 ~ 7.7	178 ~ 205	8.8 ~ 9.5	0.12 ~ 0.14
Growth	23.0 ~ 23.8	7.5 ~ 7.7	177 ~ 256	8.8 ~ 9.8	0.08 ~ 0.13

노출 초기와 물교환 시 그리고 노출 종료시점에 각각 측정하였다. 부유토사 침전으로 인한 탁도 저해를 최소화하기 위해 연속적으로 회전하는 수조에 노출시켜 토사가 침전되지 않도록 하였다(Fig. 2a). 각 어종별 수정란 부화율 평가의 노출기간은 잉어 3일, 붕어 5일 그리고 송사리 9일이었다. 어종별 노출기간이 다른 이유는 시험 중 간 부화율의 차이를 고려하여 대조구의 부화율이 80% 이상인 시점에 노출을 종료하였기 때문이다.

치어 생존율 평가는 부유토사 농도 구배에 치어를 4일간 노출하여 생존율을 관찰하고 대조구와 비교하여 영향여부를 판단하였다(OECD, 1992a, b). 생존율 평가에 사용된 치어는 수정란에서 부화한 지 3일 미만의 개체가 이용되었다. 노출용기는 밀이 뽀족한 5L 폴리에틸렌 재질의 용기를 이용하였고, 시험수는 3L를 넣어주었다. 시험의 반복수는 3개로 하였다. 붕어, 잉어는 각 용기에 치어 10마리씩 노출하여 실험구 당 30마리가 노출되었고, 송사리는 각 용기에 5마리씩 노출하여 실험구 당 15마리가 노출되었다. 시험수 교환은 노출 2일째 전량 환수하였다. 노출기간 중 시험생물에 대한 먹이급이는 부화한 지 24시간 미만의 알테미아를 매일 2회 공급하였다. 시험 온도와 광주기는  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , 16:8 (light:dark)이었고, 노출 초기와 노출이 종료되는 시점에 각각 수질을 측정하였다(Table 1). 부유토사 침전으로 인한 탁도 변화를 최소화하기 위해 밀이 뽀족한 용기에 공기를 불어넣어 부유토사의 침전을 최소화하였다(Fig. 2b).

치어 성장에 대한 평가는 대상 시료에 치어를 21일간 노출하여 대조구와 실험구의 치어 체장(body length) 비교를 통해 영향여부를 판단하였다(OECD, 2000). 시험 조건은 치어 생존율 평가와 동일하다. 단, 시험수 교환은 1주일에 3회 90% 이상 환수하였고, 물 교환 시마다 수질을 측정하였다(Table 1). 치어 성장 평가의 탁도 변화는 목적하는 범위의 최고 16% 미만이었다. 각 어종별 치어 성장 평가를 위한 체장의 측정은 4, 7, 14, 21일에 생물을 수거하여 사진을 찍고 이미지 프로그램 UTHSCSA Image Tool(버전 2.0)을 이용하여 체장을 측정하였다. 치어의 체장(mm)은 머리부터 꼬리까지 길이를 기준으로 하였다. 체장 측정을 위한 생물수거의 스트레스를 최소화하기 위해 생물은 공기 중에 노출시키지 않았고, 사진촬영 후 생물은 즉시 노출 실험조에 넣어주었다. 노출 초기 시점에서 모든 실험구의 생체크기가 통계적으로 유의한 수준의 차이를 보이지 않아( $p > 0.05$ ) 노출 용기별 체장 길이를 통합하여 성장의 정도를 비교하였다. 수정란 부화율 평가와 치어 생존 및 성장 평가에서 노출 초기시점의 탁도와 노출 종료시점의 탁도를 측정하여

결과에 반영하였다. 수정란 부화율 평가와 치어 생존 및 성장 평가에서 측정된 수질 범위는 온도  $22.6 \sim 23.6^{\circ}\text{C}$  범위였고, pH는 6.9~7.8, 전기전도도  $148 \sim 317 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$  범위를 보였다. 용존산소는  $7.8 \sim 9.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  그리고 총 용존고형물은  $0.08 \sim 0.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위를 보였다.

#### 4. 통계처리

부유토사의 농도 구배에 따른 어류 수정란 부화율 평가와 생존율 평가 결과는 통계프로그램 SPSS(ver. 18.0)을 이용하여 일원배치분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였고, 치어 성장 평가는 이원배치분산분석(two-way ANOVA), 유의수준 0.05로 검증하였다(Zar, 1984). 유의한 수준의 차이를 보일 경우 Tukey's HSD의 사후검증을 실시하였다. 또한 수정란 부화율 평가의 반수영향농도(EC<sub>50</sub>, Median Effective Concentration)는 통계프로그램 ToxCalc 5.0(Tidepool Scientific Software, USA)의 Probit 방법으로 산출하였다(Finney, 1978).

## 결 과

### 1. 퇴적물 특성 분석결과

부유토사 농도 구배를 만들기 위하여 낙동강 수계에서 채취된 퇴적물에 대해 중금속 농도분포를 분석하였으며, 개별 중금속 농도 값은 국외 환경기준인 TEC(Threshold effect concentration, MacDonald *et al.*, 2000)와 비교하였다(Table 2). 국외 환경기준인 TEC는 담수 퇴적물의 중금속 농도에 대한 기준으로 기준에 발표된 다수의 환경기준을 함께 고려한(consensus-based) 담수퇴적물 환경기준으로 널리 활용되고 있다(MacDonald *et al.*, 2000). 일반적으로 담수퇴적물의 중금속 농도가 TEC를 초과할 경우 생물영향이 나타날 수 있는 개연성이 있음을 의미한다. 본 연구를 위하여 채취된 담수퇴적물에서 중금속 농도분포는 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 납의 경우

**Table 2.** Comparison of metals concentration ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) in sediments, used preparation of suspended solids, (TEC, Threshold effect concentration) is compared as sediment quality guidelines for metal in U.S.A.

	Metals concentration ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) in sediment						
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
This study	1.19	0.158	59.1	19.7	0.020	26.8	125
TEC*	9.79	0.99	43.4	31.6	0.18	35.8	121

\*TEC: (Threshold effect concentration, MacDonald *et al.*, 2000)

TEC를 초과하지 않았으며, 아연의 경우  $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 으로 TEC 기준인  $121 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 을 약간 상회하였다(Table 2). 따라서 본 연구에서 분석한 퇴적물의 7가지 금속원소 중 아연을 제외한 나머지 원소들에 의한 생물영향은 매우 낮은 것으로 예측되었다. 아연에 의한 생물영향이 발현될 수 있지만, 하천퇴적물 배경농도(NIER, 2011)에서 제시된 한국지질자원연구원 자료(Zn,  $143 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )보다 낮기 때문에 중금속에 의한 생물영향 발현 가능성은 매우 낮은 것으로 판단하였다.

2. 수정란 부화율

붕어, 잉어, 송사리의 수정란을 서로 다른 조건의 부유토사 농도 구배에 노출시킨 후 부화율을 관찰한 결과 붕어는 4,040 NTU 범위까지 영향이 없었으나 8,080 NTU에서 부화율이 저해되었다(Fig. 3). 잉어는 모든 실험구간(0.2~8,080 NTU)에서 부화저해영향이 나타나지 않

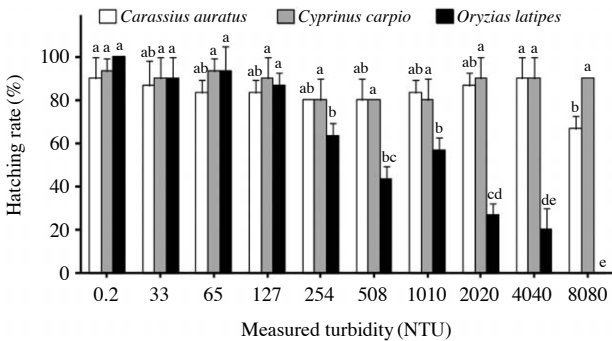


Fig. 3. Comparison of hatching rate among *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Oryzias latipes* with a range of concentration of suspended solids. Vertical bar represents SD (n=3). Values with the same character showed no statistical significance ( $p > 0.05$ ).

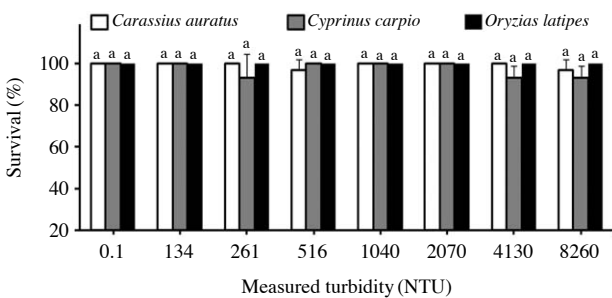


Fig. 4. Comparison of survival rate of newly hatched larval stage *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Oryzias latipes* with a range of concentrations of suspended solids. Vertical bar represents SD (n=3). Values with the same character showed no statistical significance ( $p > 0.05$ ).

았다( $p > 0.05$ ). 송사리는 0.2~127 NTU 범위까지 부화저해 영향이 없었으나, 254 NTU 구간에서 부화율이 감소하기 시작하여( $p < 0.001$ ) 최고 농도인 8,080 NTU에서는 모든 수정란이 부화에 성공하지 못하였다. 508 NTU에서의 부화율보다 1,010 NTU에서의 부화율이 일부 높은 것을 볼 수 있는데 이는 개체 간 차이로 판단된다. 전체적으로 대조구와 비교하였을 때 부유토사 농도가 증가할수록 부화율이 감소하는 경향을 보였다.

3. 치어 생존율

붕어, 잉어, 송사리 치어를 서로 다른 조건의 부유토사 농도 구배에 4일간 노출 후 생존율을 관찰한 결과 모든

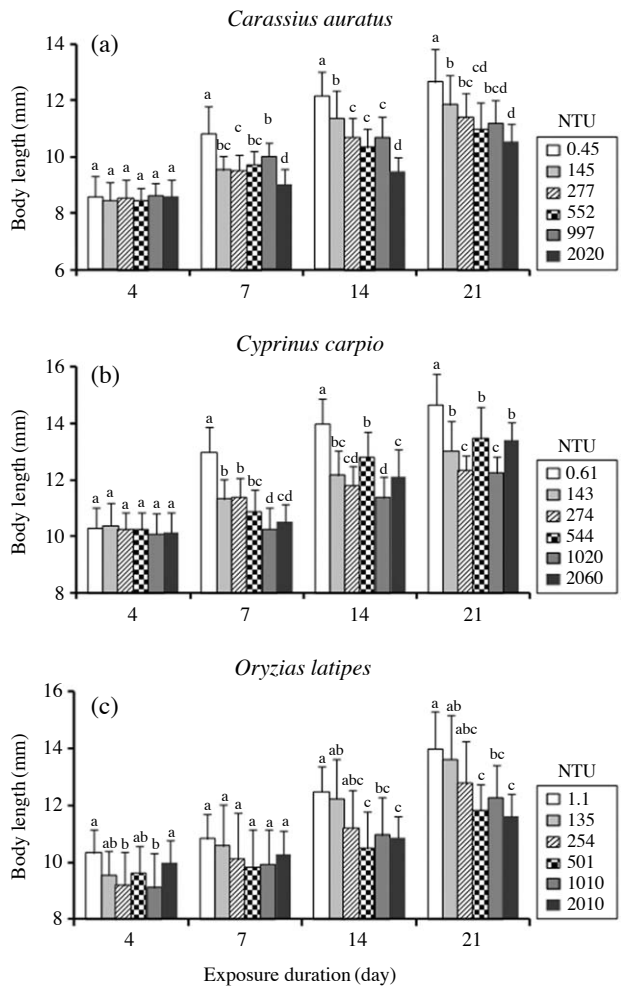


Fig. 5. Comparison of the body length of *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Oryzias latipes* exposed to a range of suspended solids. Error bars indicate standard deviations n=30 individuals for (a) and (b), and n=15 individuals for (c). Values with the same character showed no statistical significance ( $p > 0.05$ ).

**Table 3.** Results of two-way ANOVA on effects of exposure days and turbidity with the body length of *Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Oryzias latipes*.

Species	Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F value	p value
<i>Carassius auratus</i>	Exposure days (A)	9.44	3	3.15	352	<0.001***
	Turbidity (B)	1.44	5	0.288	32.2	<0.001***
	Interaction (A × B)	0.667	15	0.0445	4.97	<0.001***
	Error	5.99	669	0.00895		
	Sum	17.5	692			
<i>Cyprinus carpio</i>	Exposure days (A)	8.55	3	2.85	443	<0.001***
	Turbidity (B)	2.65	5	0.529	82.2	<0.001***
	Interaction (A × B)	1.14	15	0.0760	11.8	<0.001***
	Error	4.23	658	0.00643		
	Sum	16.6	681			
<i>Oryzias latipes</i>	Exposure days (A)	4.01	3	1.34	98.4	<0.001***
	Turbidity (B)	0.917	5	0.183	13.5	<0.001***
	Interaction (A × B)	0.367	15	0.0245	1.80	0.0341*
	Error	4.02	296	0.0136		
	Sum	9.32	319			

\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*:  $p < 0.05$ 

생물에서 유의한 수준 ( $p > 0.05$ )의 생존율 저해는 관찰되지 않았다(Fig. 4). 대조구에서 각 어종별 생존율은 모두 100%로 나타났고, 최고 농도인 8,260 NTU에서  $93.3 \pm 5.8\%$  생존율을 보였다.

#### 4. 치어 성장

붕어, 잉어, 송사리 치어를 서로 다른 부유토사 농도 구배에 4, 7, 14, 21일 노출 후 체장(mm)을 측정한 결과 부유토사 농도가 증가함에 따라 성장이 저해되는 영향을 보였다. 붕어와 잉어는 서로 다른 부유토사 농도조건에 4일간 노출 후 체장을 측정하였을 때, 대조구와 차이가 없었다. 하지만 노출기간이 길어짐에 따라 성장이 저해되어 7, 14, 21일 모든 실험구에서 대조구와 비교하였을 때 유의한 수준 ( $p < 0.05$ )의 성장저해를 보였다(Fig. 5a와 b). 대조구에서 붕어와 잉어의 21일 노출 후 생존 개체는 각각 29, 30개체였고, 생존율은 97%, 100%로 나타났다.

송사리는 4일 노출 후 254, 1,010 NTU에서 대조구와 통계적인 유의성 ( $p < 0.01$ )을 보였으나, 가장 높은 농도인 2,010 NTU 구간에서는 대조구와 차이가 없었다(Fig. 5c). 7일 노출 후에는 모든 실험구에서 대조구와 유의한 수준의 차이를 보이지 않았다. 노출 초기(4일 노출)에는 개체 간 차이로 인해 체장이 실험구별로 다르게 나타났지만, 노출 7일 후에는 135~2,010 NTU 범위까지 성장저해 요인을 보이지 않아 전체적으로 초기 성장에 미치는 영향은 매우 낮은 것으로 사료되었다. 14일 노출

후에는 254 NTU 구간부터 대조구와 차이를 보였고 21일 후에는 501 NTU 구간부터 대조구와 차이 ( $p < 0.01$ )를 보였다. 대조구에서 송사리 21일 노출 후 생존개체는 13개체였고, 생존율은 87%로 나타났다. 각 어종별 노출기간과 부유토사 농도에 따른 이원배치분산분석결과와 노출기간, 부유토사의 농도 그리고 교호작용(interaction) 모두 통계적으로 유의한 수준의 ( $p < 0.05$ ) 차이를 보였다(Table 3).

## 고 찰

부유토사로 인한 수계 내 탁도의 증가가 어류 초기 생활사에 미치는 영향을 평가하기 위해 낙동강 본류의 퇴적물을 이용하여 부유토사 농도 구배를 만들고 수정란 부화, 치어 생존과 성장을 평가하였다. 대규모 준설로 인한 하천 퇴적물의 부유가 실제 현장에 서식하는 어류에게 미치는 영향을 평가하고자 한다면 회유성 어류의 이동차단 및 단위 면적당 수정란의 개수 등 정량적 생태영향 평가에 여러 가지 한계가 있을 수 있다. 반면 실험실 내에서 모의실험을 통한 어류 초기생활사 평가는 부유토사의 농도가 낮은 대조구 수조와 농도가 높은 실험구 수조 간 비교를 통해 정량적 생태영향평가가 가능하다. 하지만 실제 자연환경에서 일어나는 복잡한 물리·화학적 요인과 먹이생물 간 상호관계가 있음을 가정할 때, 실험실 모의실험의 재현성이 한계가 있을 것으로 판단된다.

낙동강 수계에서 채취된 담수퇴적물의 오염여부를 평가하기 위해 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 납, 아연 등 중금속을 분석하였고, 국외 환경기준인 TEC와 국내 하천 퇴적물 배경농도와 비교하여 생물영향 가능성을 평가하였다. 본 연구에서 이용된 퇴적물의 중금속 농도는 앞에서 제시된 환경기준보다 낮기 때문에 적어도 중금속에 의한 생물영향 가능성은 낮은 것으로 볼 수 있지만, 다른 오염물질(예를 들면 유기화합물)에 의한 영향을 배제하기는 어렵다. 인위적인 오염을 완벽하게 배제할 수 있는 인공토양을 이용한다면 이러한 문제점은 해결될 수 있지만, 실제 하천 퇴적물과 성상이 다르기 때문에 현실적이지 않다는 문제점도 있다.

붕어, 잉어, 송사리 수정란을 이용한 부화율 평가에서 대조구의 부화율은 잉어  $93.3 \pm 5.8\%$ , 붕어  $90.0 \pm 10.0\%$  그리고 송사리  $100 \pm 0\%$ 로 나타났다. 이는 부화의 최적 조건을 맞추었기 때문이며, 충분한 용존산소 공급이 뒷받침되었기 때문이다. 부유토사를 넣은 실험구에서도 토사 침전 방지를 위한 공기주입이 부화율에 긍정적인 영향을 주었을 것으로 사료된다. 실제 자연환경에서는 부유토사 침전으로 인해 용존산소 결핍, 빛 차단, 서식지 매몰 등에 의한 추가적인 영향(Hunter, 1973; Burton *et al.*, 1990)이 있을 것으로 예상되지만 실험실 모의실험은 이러한 영향을 모두 배제한 후 평가하였기 때문에 과소 평가되었을 것으로 추정된다. 붕어, 잉어, 송사리 수정란을 이용한 부화율 평가결과 잉어는 부화율에 미치는 영향이 없었고, 붕어는 8,080 NTU에서 부화 저해가 나타났다. 송사리는 254 NTU부터 8,080 NTU까지 대조구와 비교하였을 때 유의한 수준( $p < 0.001$ )의 부화율 저해를 보였다. 각 어종별 내성도 차이로 인해 부화율의 차이가 나타난 것으로 판단된다.

2003년 태풍 ‘매미’에 의한 영향으로 임하댐의 최고 탁도는 1,221 NTU를 기록하였다(Park *et al.*, 2005). 자연적 영향으로 하천 및 호수의 탁도가 2,000 NTU 이상 발생할 수 있는 확률은 낮지만, 대규모 하천공사 또는 준설 현장에서는 충분한 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 자연환경에서 관찰될 수 있는 수준을 벗어난 최고 탁도인 8,080 NTU 범위까지 노출을 하였고, 극한 조건에서의 생물의 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다. 어류 수정란 부화율 평가에서 잉어는 모든 실험구에서 부화에 미치는 영향이 없었으나 붕어, 송사리는 부유토사의 농도 증가에 따른 부화 저해 영향이 있었다. 수정란 부화율에 대한 반수영향농도를 산출한 결과 송사리는 799 (95% 신뢰구간 471~1,884) NTU로 산출되었다. 붕어는 최고 탁도인 8,080 NTU에서 부화율 저해를

보였지만 반수 이상 영향을 보이지 않아 반수영향농도를 산출할 수 없었다.

붕어, 잉어, 송사리 치어를 서로 다른 부유토사 농도 구배에 4일간 노출 후 생존율을 관찰한 결과 모든 실험구에서 생존율 감소가 나타나지 않았다. 4일 노출 성장을 평가에서는 붕어, 잉어의 영향이 없었고, 송사리는 일부 농도 구간에서 영향을 보였다. 하지만 부유토사 농도 증가에 따른 개체의 성장에서 역전현상을 보여 농도 증가에 따른 성장저해 영향으로 보기 어렵다. 어류에 대한 성장평가는 단기간 노출보다 장기적인 노출로 인한 성장을 평가하는 것이 바람직할 것이다(Sigler *et al.*, 1984). 붕어, 잉어는 143 NTU 이상의 부유토사 농도에 7일 이상 노출될 경우 성장이 저해되었다. 이는 농도 증가로 인한 스트레스와 먹이를 감지할 수 있는 가시거리의 감소가 주된 원인으로 판단된다. 송사리는 노출 14일째 254 NTU, 21일째 501 NTU 이상의 부유토사 농도 구간에서 성장저해 영향을 보였다.

붕어, 잉어, 송사리 수정란 부화율 평가에서 송사리가 가장 민감한 반응을 보였고, 그 다음으로 붕어, 잉어 순으로 감소하는 경향을 보였다. 반면 성장을 평가에서는 붕어와 잉어가 가장 민감하였고, 그 다음으로 송사리 순으로 감소하는 영향을 보여 수정란 부화율에서의 민감도와 상반되는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 생물의 성장 단계(life stage)별 민감도 또는 내성도가 다르기 때문인 것으로 판단된다(Bentivegna and Piatkowski, 1998; Anadu *et al.*, 1999). Moon *et al.* (2012)에서는 저, 중, 고 3개의 부유토사 농도 구배에 따른 피라미 치자어 단계 생존율 평가와 성체 전 단계 생존율 평가결과를 보고하였다. 각 결과를 보면 치자어를 이용한 중간농도 그룹(20~150 NTU)에서 13일까지 높은 생존율을 보이다가 14일째부터 생존율이 급감하였고, 고농도 그룹(400~1,000 NTU)의 경우 6일 이후부터 생존율이 감소하여 14일 이후 모든 개체가 사망한 것으로 보고되었다. 본 연구에서 이용된 어류는 약 2,000 NTU 수준까지 생존에 미치는 영향은 없었지만 143 NTU 이상의 부유토사 농도에서 붕어와 잉어의 성장이 저해되는 것을 볼 수 있었다. 따라서 140 NTU 이상의 부유토사 농도가 1주일간 지속될 경우 어류 성장저해 및 우수역에 서식하는 피라미 치자어의 경우 치사 영향(Moon *et al.*, 2012)이 있을 것으로 판단된다.

선진국에서는 하천 생물보호를 위한 부유토사 농도 또는 탁도(turbidity) 기준을 설정하여 관리하고 있다. 미국의 경우 탁도는 총량규제(TMDL)의 주요한 항목으로 일반지역과 송어가 서식하는 지역을 구분하여 탁도 기

준을 다르게 적용하고 있다. 캐나다에서는 탁도에 대한 지역별 배경농도를 선정하여 관리하고 있고, 호주와 뉴질랜드에서는 상·하류 수역의 호수나 저수지를 구분하여 관리하고 있다. 국내의 경우 하천 및 호소에서 부유토사의 농도 또는 탁도 규제가 시행되지 않고 있으며 수질 기준도 없는 실정이다. 선진국의 탁도 기준 도출은 수서생물영향을 바탕으로 도출한 사례를 볼 때, 국내에서도 수서생물에 대한 탁도 영향을 정량적으로 평가하고, 많은 생물에 대한 영향 자료를 축적할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 적 요

본 연구에서는 부유토사로 인한 탁도 증가가 어류에게 미치는 영향에 대해 실험실 모의실험을 수행하였다. 국내 강 또는 호소에서 출현 비율이 높은 붕어, 잉어, 송사리를 대상으로 수정란 부화율 평가를 수행한 결과 붕어, 잉어는 4,040 NTU 수준까지 수정란 부화에 미치는 영향이 없었지만, 송사리는 254 NTU 이상의 구간에서 부화율이 저해되는 영향을 보였다. 붕어, 잉어, 송사리 치어의 4일간 노출 결과 생존에 미치는 영향은 없었다. 반면 성장률 결과에서 잉어와 붕어는 7일, 14일, 21일 모두 143 NTU 구간부터 성장저해 영향을 보였다. 송사리는 14일 노출 시 254 NTU, 21일간 노출 시 501 NTU 구간부터 성장저해 영향을 보였다. 따라서 강 또는 호소에서 143 NTU 이상의 탁도가 발생할 경우 붕어, 잉어의 성장을 저해시킬 수 있고, 250 NTU 이상의 탁도는 송사리와 같이 민감 어종의 부화율이 저해될 수 있을 것으로 사료된다.

## REFERENCES

- Abraham, M. and M. Kattenfeld. 1997. The role of turbidity as a constraint on predator-prey interactions in aquatic environments. *Behavioral Ecology and Sociobiology* **40**: 169-174.
- Anadu, D.I., G.I. Scott and M.H. Fulton. 1999. Toxicity of DDT to the different life stages of the mummichog *Fundulus heteroclitus* (Wabum). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **63**: 181-187.
- Banasiak, R. and R. Verhoeven. 2006. Quantification of the erosion resistance of undisturbed and remoulded cohesive sediments. *Water, Air, and Soil Pollution* **6**: 17-27.
- Bash, J., C. Berman and S. Bolton. 2001. Effects of turbidity and suspended solids on Salmonids. University of Washington Water Center.
- Bentivegna, C.S. and T. Piatkowski. 1998. Effects of tributyltin on medaka (*Oryzias latipes*) embryos at different stages of development. *Aquatic Toxicology* **44**: 117-128.
- Berry, W., N. Rubenstein, B. Melzian and B. Hill. 2003. The biological effects of suspended and bedded sediments (SABS) in aquatic systems: A review. Internal report to US EPA, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Laboratory, Narragansett, RI.
- Burton, T.A., G.W. Harbey and M.L. McHenry. 1990. Protocols for assessment of dissolved oxygen, fine sediment and salmonid embryo survival in an artificial redd. Idaho Department of Health and Welfare, Division of Environmental Quality, Water Quality Monitoring Protocols Report 1, Boise.
- Choi, J.S. 2005. Fish fauna and community in Cheongpyeong reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 63-72.
- Finney, D.J. 1978. Statistical Method in Biological Assay, 3rd edition. Griffin, London.
- Gradall, K.S. and W.A. Swenson. 1982. Response of brook trout and creek chubs to turbidity. *Transactions of American Fisheries Society* **111**: 392-395.
- Gregory, R.S. 1993. Effects of turbidity on the predator avoidance behavior of juvenile chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **50**: 241-264.
- Han, S.C. 2008. The Influence of Muddy Water on the Community of Benthic Macroinvertebrates and Ichthyofauna. Department of Biology Graduate School Andong National University, p. 80.
- Han, S.C., H.Y. Lee, E.W. Seo, J.H. Shim and J.E. Lee. 2007. The influence of muddy water in Imha Reservoir on the ichthyofauna and fish growth. *Journal of Life Science* **17**(8): 1104-1110.
- Hellawell, J.M. 1986. Biological Indicator of Freshwater Pollution and Environmental Management. Elsevier Applied Science Publishers, New York, p. 546.
- Hunter, J.W. 1973. A Discussion of Game Fish in the State of Washington as Related to Water Requirements. Washington State Department of Ecology. Olympia, Wa.
- Kim, J.H., J.W. Seo, Y.E. Na and K.G. An. 2007a. Ecological health assessments on turbidwater in the downstream after a construction of Yongdam Dam. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 130-142.
- Kim, J.K., J.S. Choi, Y.S. Jang, G.Y. Lee and B.C. Kim. 2007b. Effect of turbid water on fish community: case studies of the Daegi stream and the Bongsan Stream. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 459-467.
- Lee, C., M.J. Shin, J.E. Lee and E.W. Seo. 2006b. Tissues and plasma proteins of *Hemiculter eigenmanni* in muddy water of Imha reservoir. *Korean Journal of Environmental Biology* **24**(3): 213-220.



- Lee, J.Y., J.S. Choi, J.K. Kim, Y.S. Jang, K.Y. Lee and B.C. Kim. 2008. Ecological effects of Kumgang fat minnow (*Rhynchocypris kumgangensis*) on turbid water. *Korean Journal of Environment and Ecology* **22**(2): 184-191.
- Lee, K.S. 2008. The effects of suspended solids on the mortality and the glycogen content of abalone, *Haliotis discus hannai*. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* **14**(3): 183-187.
- Lee, S.H., J.S. Choi, K.Y. Lee, Y.S. Jang, I.S. Lim, W.M. Heo, J.K. Kim and B.C. Kim. 2006a. A study of water quality and fish community in lake Doam. *Korean Journal of Limnology* **49**(2): 167-177.
- McDonald, D.D., C.G. Ingersoll and T.A. Berger. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **39**(1): 20-31.
- Moon, W.K., D.Y. Bae, M.S. Jung, S.D. Lee and J.K. Kim. 2012. Comparison of larval fish survival of pale chub (*Zacco platypus*) exposed to different levels turbidity. *Korean Journal of Limnology* **45**(3): 314-321.
- 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.
- Newcombe, C.P. and D.D. MacDonald. 1991. Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management* **11**: 72-82.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2011. Baseline Concentrations of Heavy Metals in River Sediments in Korea. p. 107.
- OECD. 1992a. Test Guideline 203 Fish, acute toxicity test.
- OECD. 1992b. Test Guideline 210 Fish, early-life stage toxicity test.
- OECD. 1998. Test Guideline 212 Fish, short-term toxicity test on embryo and sac-fry stages.
- OECD. 2000. Test Guideline 215 Fish, juvenile growth test.
- Park, C.G. and M.A. Kang. 2006. Impact assessment of turbidity water caused clays on algae growth. *The Journal of Engineering Geology* **16**(4): 403-409.
- 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.
- Park, J.W., S.H. Yu, S.Y. Kim, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008. Effect of turbid water on the phytoplankton community in Imha Reservoir. *Journal of Life Science* **18**(12): 1671-1678.
- Shin, M.J., J.E. Lee and E.W. Seo. 2007. The tissues and blood components of *Opsariichthys uncirostris amurensis* in the muddy water area. *Journal of Life Science* **17**(1): 97-104.
- Shin, M.J., J.E. Lee and E.W. Seo. 2009. Effect of muddy water on the fishes in Imha reservoir. *Journal of Life Science* **19**(8): 1112-1118.
- 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.
- Shin, U.G. 2005. Influence of turbidity on zooplankton dynamics in the Nakdong River. Pusan University, p. 114.
- Sigler, J.W., T.C. Bjornn and F.H. Everest. 1984. Effects of chronic turbidity on density and growth of steelheads and coho salmon. *Transactions of the American Fisheries Society* **113**: 142-150.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Method 3052, Office of Solid Waste and Emergency Response, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2002a. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to freshwater organisms. Fourth Edition.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2002b. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms. Fifth Edition.
- Utne-Palm, A.C. 1999. The effect of prey mobility, prey contrast, turbidity and spectral composition on the reaction distance of *Gobiusculus flavescens* to its planktonic prey. *Journal of Fish Biology* **54**: 1244-1258.
- Wilber, D.H. and D.G. Clarke. 2001. Biological effects of suspended sediments: A review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* **21**(4): 855-875.
- Yu, S.H., J.S. Kim, M.J. Shin, J.E. Lee and E.W. Seo. 2009. Effect of turbid water on fishes in the streams of Imha reservoir. *Journal of Life Science* **19**(10): 1410-1416.
- Zar, J.H. 1984. Biostatistical Analysis 3rd ed. Prentice-Hall, New Jersey, p. 718.