

## 초음파가 잉어 *Cyprinus carpio*의 성장 및 단기적 행동에 미치는 영향

윤성진 · 염동혁\* · 김우근 · 윤홍길 · 이성규

(한국화학연구원 부설 안전성평가연구소)

**Effect of Ultrasound on the Growth and Short-term Behaviour of the Carp, *Cyprinus carpio*. Yoon, Sung-Jin, Dong-Hyuk Yeom\*, Woo-Keun Kim, Hong-Gil Yun and Sung-Kyu Lee (Ecotoxicology Research Team, Korea Institute of Toxicology, Korea Research Institute of Chemical Technology, 100 Jangdong, Yuseong-gu Daejeon 305-343, Korea)**

In this study, mortality, body wet weight, health assessment, and short-term behavioral mode were observed to determine the effects of ultrasound on the ecological response of the carp *Cyprinus carpio*. Mortality in the treatments was less than 5% during ultrasound exposure (31 dB re 1  $\mu$ Pa, 14~15 kHz) and there were no significant differences among the replicates ( $P>0.05$ ). The treatments, based on mean wet weight, exhibited greater effect than the controls, but the magnitude of the differences was not large. Skins and tail fins of some test animals exposed to the controls and intensive treatment groups had light injury such as hemorrhaging, whereas, damages in other organs such as eyes, other fins, parasites, thymus, and gills were not observed ( $P>0.05$ ). Sudden stimuli in low intensity at a short distance caused a directional avoidance of the fish from the sound. However, the carp exposed to ultrasound at the large scale field was not observed clear behavior changes. Overall results suggest that fish exposed to the low-intensity ultrasound had no serious stress during the tests.

**Key words :** ultrasound, behavioral mode, ecological response, carp

### 서 론

수서환경에서 고래와 같은 먹이사슬의 상위 수준에 있는 포식자는 생존수단의 일부로써 상대적으로 생태적 지위가 낮은 먹이생물을 찾기 위하여 초음파를 사용하는 것으로 알려져 있다. 또한 초음파는 상업적으로 유용한 어종을 포획하기 위한 주요 어업활동에도 사용되고 있으며, 소형 동물플랑크톤에서부터 어류에 이르기까지 다양한 생물군집을 파악하기 위한 연구 수단으로써 널리 이용되었다(Ghaedian *et al.*, 1998; Dagorn *et al.*, 2000; Jadot *et al.*, 2002; Egli and Babcock, 2004).

최근 들어 초음파의 사용범위는 널리 확대되어 생물군집에 대한 연구뿐만 아니라 왕복성 어류인 송어(*Liza ramada*)의 등지느러미에 소형 초음파 송신기를 부착하여 이동경로를 파악하였고(Almeida, 1996), 어류 체내에 기생하는 유해 미생물이나 병원균을 초음파를 이용하여 제거하기 위한 연구를 수행하였으며(Zhou *et al.*, 2002), 포식자의 먹이가 되는 일부 청어목 어류나 저서어류인 대구류를 대상으로 초음파에 대한 행동반응을 관찰하였다(Mann *et al.*, 1997; Astrup and Møhl, 1998; Navot *et al.*, 2004). 이와 같이 초음파와 관련된 연구는 다양한 측면에서 이루어졌다. 그러나 초음파가 수서생물의 대사활동이나 행동을 저해할 수 있음에도 불구하고 이와 관련

\* Corresponding author: Tel: 042) 860-7347, Fax: 042) 860-7399, E-mail: dhyeom@kitox.re.kr

된 연구는 어류의 수중 소음에 의한 피해 영향범위를 결정하기 위한 연구를 시도한 것 이외에는 거의 수행되지 않았다(윤 등, 2006).

일반적으로 어류는 서식처 주변의 이화학적 환경이 변할 경우, 내성한계 이하의 환경에서는 체내 적응과정을 거치면서 변화된 환경에 순화되기 때문에 외부의 환경 자극에 대한 생리, 생태적 영향은 거의 받지 않는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2002; Yoon *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006). 그러나 급작스런 수질악화나 주변의 심각한 소음 또는 진동이 발생하면 자극에 의한 스트레스를 받게 되어 일시적으로 이를 회피하는 행동을 하거나 일부 종들은 본래의 서식처를 떠나 다른 곳으로 이동한다(Astrup, 1999; Popper *et al.*, 2004). 이러한 현상은 실제로 현장에서 어류가 선호하지 않는 음파의 강도나 주파수 영역에 해당하는 초음파에 노출되었을 경우에도 예외는 아닐 것이다. 그러나 실제로 수서환경에서 인위적으로 초음파를 발생시킬 경우, 초음파가 주변에 서식하는 생물들에게 생리, 생태적으로 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다. 특히 초음파 발생 시 야기되는 소음 및 주파수는 전파과정을 거치면서 주파수별로 서로 다른 감쇄를 가지며 주변의 배경 소음과 합쳐져 어류의 청각기관 또는 기타 조직에 도달되어 수신되는데, 이때 초음파의 강도나 주파수 영역에서 나타나는 생물 반응에 대한 연구는 해양생태계의 일부 상업성 어류를 대상으로 수행되었을 뿐 담수생태계에서는 거의 적용되지 않았다.

이에 따라 본 연구에서는 초음파가 담수생태계에 미치는 영향을 평가하기 위한 방법의 일환으로써 먹이단계의 상위수준에 위치한 담수어류를 대상으로 초음파 노출에 따른 치사어의 발생유무, 체중변화, 외형의 비정형 평가 방법을 이용한 건강상태 및 어류의 행동변화를 관찰하여 초음파가 어류의 생태에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험생물 순화 및 사육

실험생물은 정체수역에 주로 서식하며, 독성시험 어종으로 많이 사용되는 잉어(*Cyprinus carpio*)를 선정하였다. 실험어류는 충청남도 내수면 개발시험장에서 부화시킨 후 사육된 소형(치어) 및 중형 개체들을 구입하여 사용하였으며, 어류는 구입 후 6시간 이내에 실험실로 옮긴 후 500 L 사각수조에 사육수를 채워 4주 동안 실험실 환

경에서 순화 및 사육하였다. 순화기간 중 주야 광주기는 각각 16시간과 8시간으로 조절하였으며, 사육수의 수온, 수소이온농도(pH) 및 경도는 각각  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $7.7 \pm 0.3$ ,  $62.7 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ 를 유지하였다. 어류의 먹이는 넙치 치어용 인공사료(ZEUS, Woosung co.)를 어체중의 1~2% 비율로 1일 2회 공급하였다.

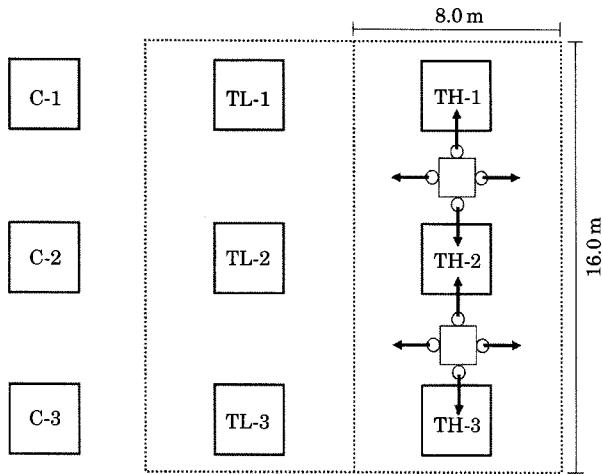
### 2. 어류 초음파 노출실험

실험어류에 대한 초음파 노출실험은 2006년 10월 중순부터 11월 중순까지 충청남도 옥천군에 위치한 대청댐 상류에서 수행하였다. 실험기간 동안 현장수온은  $12 \sim 20^\circ\text{C}$ , pH 7.4~9.0 범위였으며, 용존산소는 실험초기  $14.0 \text{ mg L}^{-1}$ 로 높았으나 시간이 경과함에 따라 비교적 일정 수준의 농도가 유지되었다. 본 연구에 사용된 초음파 발생기는 담수조류를 제거하기 위해 개발된 것으로써 실험실에서 수행한 실험결과에 의하면 초음파 강도 31 dB re  $1 \mu\text{Pa}$ , 주파수 14~15 kHz 범위에서 조류제거에 효과적인 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 담수조류제거를 위해 개발된 초음파 발생기와 동일한 강도 및 주파수에 실험생물을 노출시켰다.

#### 1) 초음파 노출에 따른 치사율, 성장 및 외형의 비정형 평가

어류의 생태적 특성 변화 관찰 실험에 필요한 어망(cage)은  $1 \text{ W} \times 1 \text{ L} \times 1 \text{ H m}$  크기로 제작한 후 대조군(control), 저처리군(low treatment) 및 고처리군(high treatment)으로 나누어 현장에 설치하였다. 각각의 실험구는 3개의 반복구를 두어 실험하였다(Fig. 1). 또한 실험기간 중 어망 외부로 이탈하는 어류를 방지하고 조류의 공격을 피하기 위하여 어망 사면은 망목 4mm의 그물로 감싸주었다.

실험은 각각 실험구에 잉어 치어 20개체를 넣고 29일 동안 실시하였다. 실험개시 후 2주까지는 1~3일 간격으로 치사어 발생 유무를 관찰하여 기록하였다. 현장의 수질은 주 1회 간격으로 측정하였다. 또한 실험기간 중 어류의 체중변화와 외형의 비정형 유무를 관찰하여 건강상태를 평가하였는데, 체중변화는 초음파에 노출되기 전과 후 각각의 실험 개체에 대한 체중을 잰 후 비교하였으며, 건강성 평가(health assessment)는 Adams *et al.* (1993)이 사용한 방법에 따라 실험개체의 외형을 관찰한 후 기록하여 평가하였다. 건강성 평가는 어류의 외형을 육안으로 관찰하는 방법으로써 생물의 눈(eye), 표피(skin), 지느러미(fin), 기생충(parasite) 감염여부, 흉선(thymus)의 출혈여부 및 아가미(gill) 손상여부를 관찰하



**Fig. 1.** Position of experimental fish cage. C: Control, TL: Low treatment, TH: High treatment. Arrow indicate direction of ultrasound delivery.

는 방법이다. 실험어류는 관찰항목별로 이상여부가 심한 정도에 따라 0, 10, 20, 30점을 부여하였다(Table 1).

각각의 처리군 별 치사율, 성장률 및 건강성 평가 자료는 SPSS 프로그램 (SPSS 10, SPSS Inc., USA)을 이용한 분산분석(ANOVA)을 통해 유의성 검증을 실시하였다.

**2) 초음파 노출에 따른 행동변화**

실험어류의 행동변화는 최근에 생물의 행동 반응 분석을 위해 국내에서 개발하여 사용 중인 생물경보장치 (ProtoType-III system)를 개조하여 관찰하였다. 본 기기는 CCTV 카메라(XC-55, SONY, Japan)로 촬영된 생물의 행동을 B-Vision 소프트웨어(B-Vision, 부산대학교)를 통해 실시간으로 관찰 및 저장이 가능하며, 실내·외 어느 장소에서도 간단히 설치하여 생물의 행동을 추적할 수 있는 장점이 있다. 실험생물의 행동은 CCTV 카메라를 통해 위에서 수면 아래로 촬영한 후 수집된 정보를 메인 컴퓨터에서 실시간으로 추적하며, 실험결과는 추적과 동시에 모니터 상에서 직접 확인할 수 있다. 또한 추적된 자료는 분석을 위하여 데이터 파일로 컴퓨터에 자동 저장된다. 행동 반응 분석에 관한 수리생물학적인 기본 이론 및 방법은 다양한 연구자들에 의해 보고되고 있다(Park *et al.*, 2001; Kwak *et al.*, 2002; 김 등, 2003; Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006).

**(1) 실험실 모니터링**

실험실에서 어류의 행동 관찰 실험은 10 L 용량의 사각 유리 수조(150 W×50 L×50 H cm)에 사육수(수온: 15°C, pH: 7.8)를 넣고 수행하였다. 실험생물은 체장이 유

**Table 1.** Factors of fish health assessment (Adams *et al.*, 1993).

| Items     | Variables condition   | Score |
|-----------|---|-------|
| Eyes      | No aberrations; good “clear” eye  | 0     |
|           | Generally, an opaque eye (one or both)                                    | 30    |
|           | Swollen, protruding eye (one or both)                                     | 30    |
|           | Hemorrhaging or bleeding in the eye (one or both)                         | 30    |
|           | Missing one or both eyes  | 30    |
|           | Other: any manifestation not fitting the above                            | 30    |
| Skins     | Normal: no aberrations  | 0     |
|           | Mild skin aberrations   | 10    |
|           | Moderate skin aberrations   | 20    |
|           | Severe skin aberrations   | 30    |
| Fins      | No active erosion   | 0     |
|           | Light active erosion (no evidence of hemorrhage or secondary infection)   | 10    |
|           | Moderate active erosion with some hemorrhaging                            | 20    |
|           | Severe active erosion with hemorrhaging                                   | 30    |
| Parasites | No observed parasites   | 0     |
|           | Few observed parasites  | 10    |
|           | Moderate parasite infestation   | 20    |
|           | Numerous parasite   | 30    |
| Thymus    | No hemorrhage   | 0     |
|           | Mild hemorrhage   | 10    |
|           | Moderate hemorrhage   | 20    |
|           | Severe hemorrhage   | 30    |
| Gills     | Normal: no apparent aberrations   | 0     |
|           | Frayed: erosion of tips of gill lamellae resulting in “ragged” gills      | 30    |
|           | Clubbed: swelling of the tips of the gill lamellae                        | 30    |
|           | Marginate: gills with light, discolored margin along tips of the lamellae | 30    |
|           | Pale: very light in color   | 30    |
|           | Other: any observation not fitting above                                  | 30    |

사한 개체를 선별하였으며, 실험시기 마다 실험용수 및 생물을 교환하여 사용하였다. 실험기간 동안 수조 내에 산소는 공급하지 않았다.

실험은 각 실험 용기에 두 그룹(Group-I: 체장 3.5±1.0 cm, Group-II: 10.0±1.0 cm)의 어류를 각각 4개체씩 넣고 수면 25 W×30 L cm 범위를 CCTV 카메라로 2회 반복 관찰하였다(Table 2). 행동관찰용기는 어류의 이탈을 방지하기 위하여 반투명 망(망목 1 cm)으로 25 W×30 L×50 H cm 부피의 관찰용기를 제작하여 사용하였으며, 어류의 행동은 관찰용기를 사각 유리 수조에 넣은 후 실험생물 4개체를 넣고 측면 1.0 m 거리에서 관찰하였다(Fig. 2). 실험어류의 행동은 어류를 관찰 용기에 넣고 1

시간 동안 안정시킨 후 5분 간격으로 행동궤적을 추적하여 총 20분 동안 생물의 행동을 관찰하였으며, 이 후 1.0 m 거리에서 초음파를 발생시킨 후 동일한 방법으로 초음파 노출에 따른 어류의 행동변화를 관찰하였다.

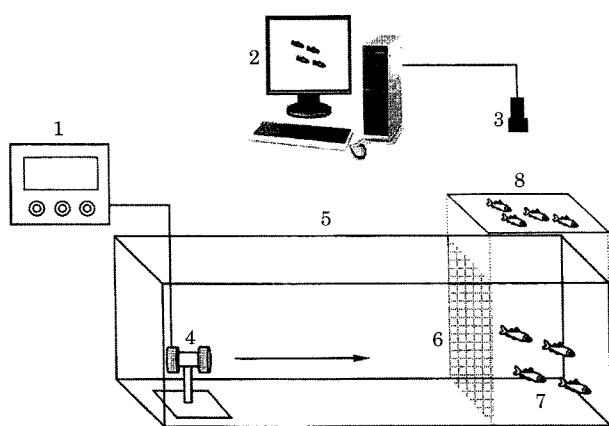
본 연구에서는 용기 내에서 관찰되는 실험어류의 행동패턴을 모니터를 통해 확인한 후 모니터 상에 나타난 각각의 행동궤적을 직접 스캔하여 5분 동안 움직인 실험어류의 행동궤적을 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 자료는 실험종료 후 초음파 노출 전과 후의 행동패턴의 변화를 분석하기 위한 자료로 활용하였다.

(2) 현장 모니터링

현장에서 어류 행동관찰은 자연 상태(수온: 18°C, pH: 7.2) 하에서 3.8±1.5 cm 체장의 잉어 치어를 사용하여 2

**Table 2.** Experimental conditions of fish behavior observation. Standard deviation (±SD) is given in parentheses.

|                                    | Group-1    | Group-2    |
|------------------------------------|------------|------------|
| Temperature (°C)                   | 15.3 (0.5) | 15.1 (0.7) |
| pH                                 | 7.8        | 7.8        |
| Photo intensity                    | nature     | nature     |
| Mean total length (cm)             | 3.5 (1.0)  | 10.0 (1.0) |
| Experimental water                 | tap water  | tap water  |
| Volume of experimental chamber (L) | 80         | 80         |
| Number of fish per experiment      | 4          | 4          |
| Number of experiments              | 2          | 2          |



**Fig. 2.** Schematic (not to scale) of apparatus used to observe behavior response in test animal. 1: Ultrasonic controller. 2: computer for display and data storage. 3: CCTV camera 4: ultrasonic transducer. 5: observation chamber. 6: screen for fish escape prevention. 7: experimental fish. 8: two dimension area recorded by CCTV camera. Arrow indicate direction of ultrasound delivery.

회 수행하였다. 어류의 행동은 실험실에서 사용한 행동관찰용기와 동일한 부피로 제작하여 관찰하였다. 실험은 관찰용기 주변의 인위적인 소음이나 진동이 없는 상태에서 5분 동안, CCTV 카메라를 이용하여 수면 위에서 어류의 행동을 관찰하였으며, 이 후 초음파를 발생시켜 5분씩 총 20분 동안 생물의 행동궤적을 추적하였다. 실험결과는 실험실에서 수행한 실험과 동일한 방법으로 분석하였다.

결 과

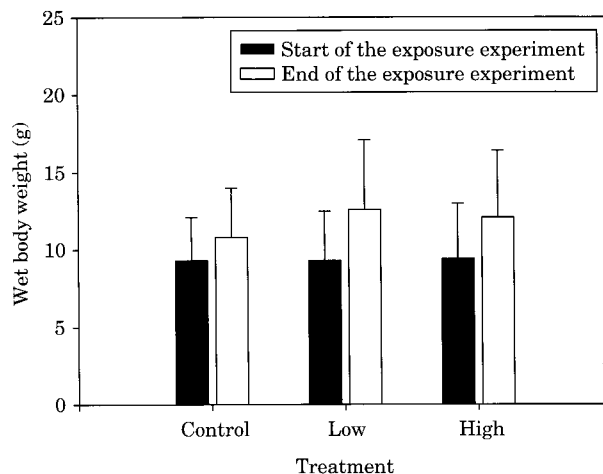
1. 초음파 노출에 의한 생태적 특성변화

1) 치사율

노출실험기간 동안 사망한 실험어류의 개체수는 대조군과 초음파 처리군에 관계없이 1~2마리로 나타났으며, 치사율은 모두 5% 미만이었다. 각각의 처리군 별로 살펴보면, 대조군의 평균 치사율은 1.7%이었으며, 저처리군에서는 평균 1.7%, 고처리군에서는 평균 3.3%로서 처리군

**Table 3.** Cumulative mortality observed each treatment cage during experiment. Standard deviation (±SD) is given in parentheses.

|                               | Control   | Low treatment | High treatment |
|-------------------------------|-----------|---------------|----------------|
| Mean mortality (%)            | 1.7 (2.9) | 1.7 (2.9)     | 3.3 (2.9)      |
| Number of fish per experiment | 20        | 20            | 20             |
| Total number of fish          | 60        | 60            | 60             |



**Fig. 3.** Variation of wet body weight (g) in each treatment during the experiment.

별 치사율의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다(Table 3).

### 2) 체중변화

실험어류의 체중변화는 실험 전과 후 각각의 실험구에서 생존한 잉어의 체중을 측정하여 성장률로 환산하여 비교하였다. 시험시작 시 각각의 처리군 내 잉어의 평균 체중은 대조군과 저처리군 모두 9.3 g이었으며, 고처리군은 9.4 g으로 뚜렷한 차이가 없었다. 그러나 실험종료 후 대조군에서 성장한 잉어의 체중은 10.8 g이었으며, 저처리군의 체중은 12.6 g, 고처리군에서는 12.1 g으로 측정되어 실험기간 동안 잉어의 체중 성장률은 대조군보다 저처리군과 고처리군에서 성장한 어류가 다소 높은 것으로 나타났다(Fig. 3).

### 3) 외형의 비정성 평가

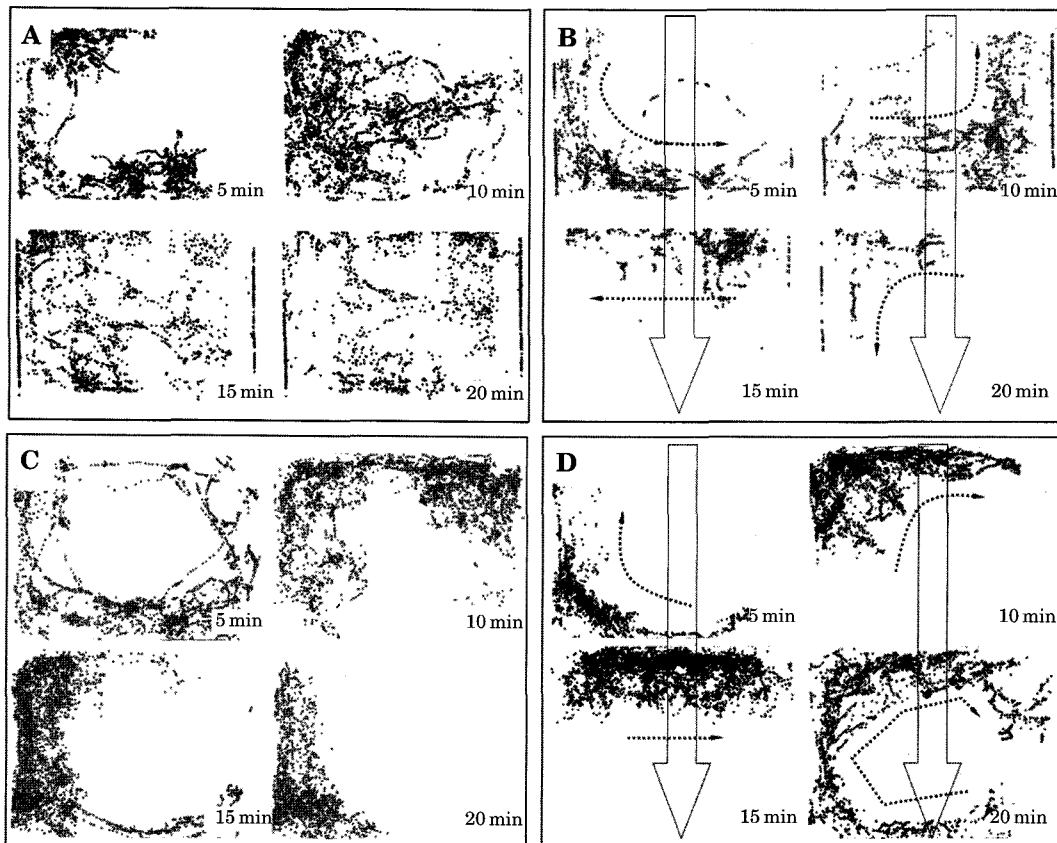
대조군 및 초음파 처리군의 실험어류에 대한 건강성 평가 결과, 대조군과 고처리군의 일부 개체들은 이동 중

케이지의 망에 걸린 흔적으로 예상되는 표피의 손상 및 꼬리지느러미에서 출혈흔적이 관찰되었다. 각 처리군에 노출된 어류의 건강성 평가결과를 종합한 결과, 대조군은 평균 0.5점, 저처리군에서는 0.0점, 고처리군은 평균 1.3

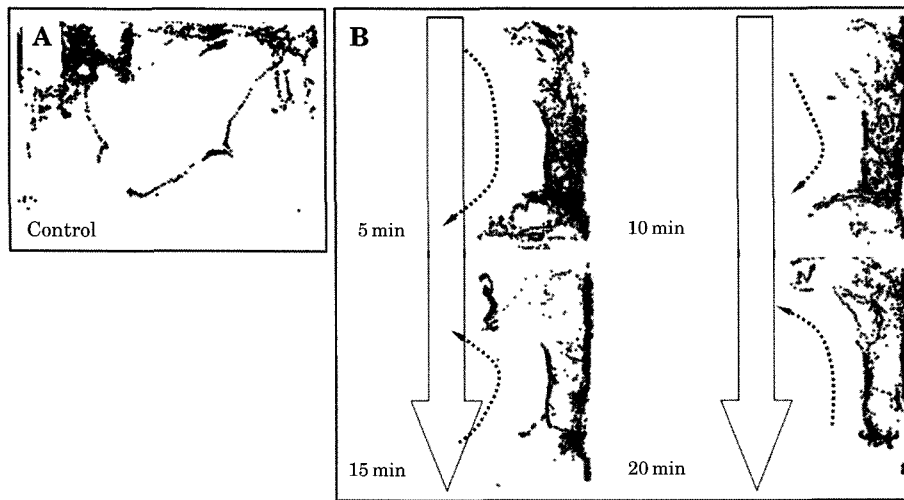
**Table 4.** Health assessment exposed to the ultrasound during the experiment. Standard deviation ( $\pm$  SD) is given in parentheses.

|            | Control   | Low treatment | High treatment |
|------------|-----------|---------------|----------------|
| Eyes       | 0         | 0             | 0              |
| Skins      | 0.5 (2.2) | 0             | 1.0 (3.1)      |
| Fins       | 0.5 (2.2) | 0             | 1.5 (4.9)      |
| Parasites  | 0         | 0             | 0              |
| Thymus     | 0         | 0             | 0              |
| Gills      | 0         | 0             | 0              |
| Mean score | 0.5 (2.2) | 0             | 1.3 (4.3)      |
| CV         | 4.4       | 0             | 3.3            |

CV: Coefficient of variation



**Fig. 4.** Behavior response of 4 carp *Cyprinus carpio* before and after ultrasound exposure (1.0 m distance) at the laboratory. A: behavior patterns of experimental fish (Group-I) in stable condition. B: behavior response of fish (Group-I) after ultrasound exposure (1.0 m distance). C: behavior patterns under stable condition (Group-II) D: behavior response of fish (Group-II) after ultrasound exposure (1.0 m distance). White and black arrows indicate directions of ultrasound and fish movement tracks, respectively.



**Fig. 5.** Behavior response of 4 carp *Cyprinus carpio* before (A) and after (B) ultrasound exposure (1.0 m distance) at the study area. White and black arrows indicate directions of ultrasound and fish movement tracks, respectively.

점으로 산출되었으나 ANOVA 분석결과 (Table 4), 각 처리군 사이의 유의한 차이점은 보이지 않았다 ( $P > 0.05$ ).

## 2. 초음파 발생에 따른 어류의 행동변화

### 1) 실험실 모니터링

실험실 내에서의 행동관찰은 초음파에 노출되기 전과 후 약 20분 동안 5분 간격으로 소형 어류와 중형 어류의 행동을 관찰하였다 (Fig. 4). 초음파에 노출되기 전 소형 어류의 행동패턴은 측정 용기 내의 모든 지역에서 관찰되었다 (Fig. 4A). 그러나 초음파에 노출된 후 어류의 행동은 다소 변화된 패턴이 관찰되었는데, 실험어류의 행동패턴은 초음파가 진행되는 방향의 오른쪽 측면을 따라 계속 이동하여 관찰시간 동안 용기를 한 바퀴 순회하는 행동패턴을 보였다 (Fig. 4B).

실험초기 안정된 상태에서 중형어류의 행동패턴은 다소 활발한 궤적을 보였다. 그러나 이들의 행동패턴은 시간이 지남에 따라 한쪽 방향으로 모이기 시작하였으며, 관찰을 시작한지 20분이 경과한 후에는 관찰용기 왼쪽 하단으로 모이는 개체들이 증가하였다 (Fig. 4C). 초음파에 노출된 후 실험어류의 이동방향은 소형 어류와 반대 방향으로 진행하였으며, 관찰시간 동안 무리를 지어 관찰용기를 순회하였다 (Fig. 4D).

### 2) 현장 모니터링

초음파 발생장치와 설치되어있는 현장에서 발생장치로부터 2.5 m와 1.0 m 떨어진 거리에서 초음파 노출에 따른 어류의 행동변화를 관찰한 결과, 초음파 센서를 2.5 m

거리를 두고 작동시킨 경우, 어류의 행동은 초음파를 발생시키기 전과 뚜렷한 변화를 관찰할 수 없었다. 그러나 초음파 센서와 관찰용기의 거리를 1.0 m로 설정한 경우, 어류의 행동은 발생 전과 뚜렷이 구분되었다 (Fig. 5). 실험초기 초음파에 노출되기 전 실험어류는 관찰용기의 상하좌우 방향으로 움직이는 행동패턴을 보였다 (Fig. 5A). 그러나 초음파에 노출된 후 5~10분 동안 실험어류는 초음파의 진행방향을 피해 행동관찰용기의 한쪽 방향으로 모이는 경향을 보였으며, 이 후 시간이 경과함에 따라 서서히 관찰용기의 측면을 따라 초음파의 진행방향으로 이동하는 패턴을 보였다 (Fig. 5B).

## 고 찰

### 1. 초음파 노출에 의한 생태적 특성변화

본 연구에서 강도 31 dB re 1  $\mu$ Pa, 주파수 14~15 kHz 범위의 초음파에 노출시킨 잉어 *Cyprinus carpio*의 치사율은 대조군을 포함하여 저처리군과 고처리군 모두 5% 이하였으며, 각각의 실험군 별 치사율은 뚜렷한 차이를 보이지 않았다 ( $P > 0.05$ ). 일반적으로 어류에 대한 급성 및 만성독성실험에서는 대조군의 유효 치사율을 10% 미만으로 허용하며, 실험 후 대조군에서 사망한 개체들의 치사율이 기준값(endpoint) 이하인 경우에는 해당 시험에 문제가 없는 것으로 판단하고 있다 (OECD, 1993; NIWA, 1998; US EPA, 2002). 이러한 기준값은 주로 실험생물의 자연 치사율에 근거를 두는데, 본 연구에서 장

**Table 5.** Behavioral response of fish exposed to different ultrasound intensity.

| Species   | Frequency (kHz)          | Approximate threshold (dB re 1 $\mu$ Pa)    | Behavioral response (unconditioned)                                      |
|---|--------------------------|---|--|
| *Carp<br><i>Cyprinus carpio</i>                   | 14~15                    | 31  | Avoidance, school formatio   |
| Goldfish <sup>1</sup><br><i>Carassius auratus</i> | 50                       | Unknown                                     | Unknown  |
| American shad <sup>2</sup><br><i>Alosa sp.</i>    | 25~130                   | 145   | Directional avoidance, tight school formation                            |
| Herring <sup>3</sup><br><i>Clupea harengus</i>    | 10, but sometimes higher | Unknown, transducer source level was 132 dB | Avoidance, probably directional  |
| Cod <sup>4</sup><br><i>Gadus morhua</i>           | 38                       | 195   | Avoidance (unpublished), also to short-duration pulses (100~200 $\mu$ s) |
|   | 50                       | 203   |  |

\*This study, <sup>1</sup>Offutt (1968), <sup>2</sup>Dunning *et al.* (1992), <sup>3</sup>Kraus *et al.* (1997), <sup>4</sup>Astrup and Møhl (1993)

기간 동안 초음파에 노출된 잉어의 치사율이 5% 이하로 산출되었다는 것은 실험생물의 사망원인이 초음파 발생에 따른 피해로 해석하기에는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

각각의 실험군에서 계측한 실험어류의 평균 체중은 실험종료 시 대조군에 비해 처리군에서 약간 증가하는 경향을 보였으나 실험군 간의 뚜렷한 차이는 보이지 않았다 ( $P > 0.05$ ). 본 연구지역의 수질환경요인 변화가 동일하다고 가정하면 실험어류의 체중 차이는 주로 먹이의 양에 의해 결정될 것이다. 그러나 본 연구에서는 실험지역에서 잉어의 주요 먹이가 되는 동물플랑크톤이나 기타 수생생물의 생물량을 산출하지 못하였다. 따라서 실험군 간의 체중 차이에 대한 명확한 원인은 판단할 수 없었다. 단지, 실험기간동안 각 실험군에서 성장한 잉어의 평균 체중 차이가 뚜렷하지 않은 것으로 보아 초음파는 잉어의 성장에 치명적인 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

본 연구에서 어류의 외형을 육안으로 관찰한 결과에 따르면, 대조군과 고처리군의 일부 개체들은 약간의 포피손상과 꼬리지느러미의 출혈 흔적이 관찰되어 초음파 노출에 따른 외형상 영향이 있는 것으로 사료되었다. 그러나 대부분의 실험생물은 눈, 지느러미, 기생충 감염여부, 흉선의 출혈여부 및 아가미의 이상이 전혀 관찰되지 않아 일부 개체에서 관찰된 증상이 초음파의 영향으로 인해 나타난 결과인 것으로 판단하기에는 미흡하였다. 따라서 본 연구결과는 실험어류가 이동 중에 어망에 걸렸거나 아니면 실험종료 시 어류를 관찰하기 위해 어망 밖으로 꺼내는 과정에서 발생한 현상으로 판단된다. 이는 각 처리군에 노출된 어류의 건강성 평가결과를 종합하여

ANOVA 분석결과, 각 처리군 사이의 유의한 차이점을 발견할 수 없었다는 결과로 추정할 수 있다 ( $P > 0.05$ ).

## 2. 초음파 발생에 따른 어류의 행동변화

근거리에서 초음파에 노출된 어류의 행동은 실험어류의 체장과 상관없이 뚜렷한 행동체적의 변화가 관찰되었다. 초음파에 노출되기 전 실험어류는 실험용기의 모든 지역을 유영하는 행동을 보였으나 초음파에 노출된 후에는 두 실험생물 그룹 모두 무리를 지어 초음파의 진행방향을 피해 한쪽 방향으로 선회하는 행동이 관찰되었다. 초음파와 관련된 어류의 행동을 연구한 결과에 의하면, 초음파에 대한 어류의 반응은 주파수의 강도에 따라 다소 차이는 있으나 주로 음파에 대한 회피행동이 관찰되었다 (Popper *et al.*, 2004). 예를 들어 (Table 5), 청어목 어류인 *Alosa sp.*는 25~130 kHz (Dunning *et al.*, 1992), *Clupea harengus*는 10 kHz의 주파수 범위에 회피행동을 보이며 무리를 형성하는 것으로 관찰되었으며 (Kraus *et al.*, 1997), 대구목 어류인 *Gadus morhua*는 38~50 kHz 주파수 범위에 노출되었을 경우에도 회피행동이 관찰되었다 (Astrup and Møhl, 1993). 이러한 어류의 회피반응은 본 연구에서 사용된 14~15 kHz의 낮은 주파수 범위에서도 관찰되었는데, 이는 어류의 경우, 미세한 소음이나 진동을 감지할 수 있는 기관이 발달하였기 때문에 비록 낮은 강도의 주파수도 쉽게 감지할 수 있는 능력을 갖춘 것으로 해석할 수 있다. 실제로 자연환경에서는 고래와 같이 음파를 이용하여 먹이를 찾는 포식자들에 대한 자기방어의 수단으로써 어류는 뛰어난 음파 감지능력을 이용하여 포식자가 도달하기 전에 미리 무리를 짓거

나 다른 지역으로 회피하는 행동을 보인 것으로 보고되었다(Kraus *et al.*, 1997; Mann *et al.*, 1997).

현장실험에서 초음파 센서와 실험어류의 거리가 2.5 m를 넘는 경우, 초음파는 어류의 행동에 뚜렷한 영향을 주지 않았다. 이러한 결과는 원거리에서 초음파를 발생시켰을 때 음파는 초음파 발생장치로부터 거리가 멀어질수록 수중으로 흡수되거나 손실되는 양이 증가하기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 또한 어류는 감쇄된 소음과 주변의 배경소음이 합쳐진 소음을 수신하여 감각기관에서 인식되어 행동반응을 일으키는 것으로 보고되었는데(McCauley *et al.*, 2003), 본 연구에서 사용한 초음파는 원거리에서 어류의 이상행동반응(abnormal behavior response)을 유발시킬 수 있을 정도의 강도나 주파수는 아닌 것으로 판단된다. 그러나 근거리에서 초음파에 노출된 어류는 10여분이 지난 후 행동관찰용기를 측면을 선회하는 행동체적을 보였는데, 이는 초음파의 강도 및 주파수에 의해 파생된 미세한 소음과 진동이 주변의 배경소음과 합쳐져서 일시적으로 초음파 강도가 증폭된 결과로 인해 야기된 어류의 회피반응인 것으로 예측된다.

수중에서 발생하는 음파는 전파과정을 거치면서 주파수별로 서로 다른 감쇄를 가지며 배경소음과 합쳐서 어류의 청각기관 혹은 기타 조직에 도달되어 수신된다(Popper *et al.*, 2003). 경골어류의 경우, 음파를 감지하는 방식은 포유류의 귀에 대응하는 어류의 측선이나 달팽이관의 신경구조를 사용하며, 부레와 같은 독특한 고유의 기관을 이용하기도 한다(Popper *et al.*, 2004). 또한 저서어류(benthic fish)는 부레를 갖고 있지 않기 때문에 등에 있는 섬모를 이용하며, 이들 섬모는 대부분의 어류에서 측선의 형태로 집중되어 있고 인간의 달팽이관과 비교하면 측선은 주위의 입자운동(진동)의 주파수를 분별하는 기능을 하는 것으로 보고되었다(Astrup, 1999). 일부 청어목 어류는 자극을 유발시키는 주파수 또는 음파의 강도에 따라 행동패턴이 구별되는 것으로 보고되었는데(Popper *et al.*, 2004), 이는 음파를 수신하는 청각기관의 손상 정도에 따라 평형감각이 상실되어 나타나는 현상인 것으로 예측된다. 본 연구에서 실험생물로 사용된 잉어의 경우, 초음파를 인지하는 기관에 대해서는 명확히 밝혀지지 않았다. 단지 일부 연구자들은 잉어를 포함한 일부 어류들은 눈과 귀와 같은 1차 감각기관을 제외한 신체 감각기관 중 부레(swim bladder)의 자율신경계 끝부분에서 초음파를 인지할 수 있는 것으로 예측하고 있다(Astrup, 1999).

많은 연구자들은 초음파에 대한 어류의 행동반응을 규명하기 위해서 음파의 강도와 관련된 어류의 청각 및 반

응특성을 관찰하는 방법을 제시하고 있다(Astrup, 1999; McCauley *et al.*, 2003; Popper *et al.*, 2004). 이와 연관된 예로, 포식자가 발생시키는 초음파의 강도나 주파수에 노출된 대구류인 *Gadus morhua*의 경우, 음원으로부터 회피하는 행동을 보였는데, 이러한 회피행동은 생존전략의 일부로 해석되었다(Astrup, 1999). 초음파에 대한 행동반응으로써 청어목 어류는 초음파에 노출되었을 때 무리(shoal/school)를 짓는 행동을 보였는데, 이러한 행동은 실험실과 현장실험에서 동일하게 관찰되었다(Wilson and Dill, 2002; Popper *et al.*, 2004). 비록 행동관찰용기의 좁은 면적에서 관찰하였지만 본 연구에서 근거리에서 급작스럽게 초음파에 노출된 어류는 일시적인 스트레스를 받고 회피행동을 보였으나 사망한 개체는 관찰되지 않았다. 이는 본 연구에서 사용한 초음파가 일시적으로 어류의 행동에 영향을 줄 수는 있으나 장기적으로는 극심한 생태적 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

본 연구에서 잉어는 낮은 초음파의 자극에 장기간 노출되었을 때 치사율, 체중 변화 및 건강성과 같은 생태적 특성에 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. 그러나 근거리에서 일시적으로 초음파를 발생시켰을 때 어류는 무리를 지어 회피하는 방향성 움직임을 보였다. 일반적으로 어류는 한계수준 이하의 외부 자극에 대하여 대사적응이나 회피행동을 통하여 본래의 내재적 습성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 근거리에서 초음파 노출된 어류의 행동변화가 뚜렷이 관찰되었다. 그러나 원거리에 위치한 어류들은 초음파에 대한 뚜렷한 행동반응이 나타나지 않았는데, 이러한 결과는 실제로 넓은 지역에서 초음파를 발생시킬 경우, 원거리에 위치한 생물들은 초음파에 의한 영향을 전혀 받지 않지만 초음파 센서와 근접한 곳에 위치한 어류는 일시적으로 초음파의 소음이나 진동에 대한 회피현상을 보일 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 이전 연구자들이 관찰한 초음파에 대한 어류의 행동반응을 고려해 볼 때, 본 연구에 사용된 초음파의 강도 및 주파수 범위는 어류의 치사를 유발할 수 있는 한계수준 이하인 것으로 해석할 수 있다. 결론적으로 장기간 동안 낮은 강도의 초음파에 노출된 어류는 노출시간이 경과함에 따라 점차적으로 초음파의 자극에 적응하기 때문에 초음파 발생에 따른 심각한 스트레스는 받지 않을 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구에서는 잉어의 생태 반응에 미치는 초음파(강



도 31 dB re 1  $\mu$ Pa, 주파수 14~15 kHz)의 영향을 구명하기 위하여 치사율, 체중변화, 건강성 평가 및 행동패턴을 관찰하였다. 실험기간 동안 초음파에 노출된 잉어 *Cyprinus carpio*의 치사율은 대조군을 포함하여 처리군 모두 5% 이하로 실험구 사이의 치사율은 뚜렷하게 구별되지 않았다( $P>0.05$ ). 각각의 실험구에서 측정된 실험어류의 평균 체중은 실험종료 시 대조군에 비해 처리군에서 약간 증가하는 경향을 보였으나 실험구간의 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 대조군과 고처리군의 일부 개체들은 가벼운 표피손상과 꼬리지느러미의 출혈 흔적이 관찰되었으나 눈, 지느러미, 기생충 감염, 홍선의 출혈 및 아가미에서는 이상증상이 전혀 관찰되지 않았다( $P>0.05$ ). 근거리에서 일시적으로 초음파를 발생시켰을 때 어류는 음원으로부터 회피하는 방향성 움직임을 보였으나 원거리에서 초음파에 노출된 잉어는 뚜렷한 행동변화를 보이지 않았다.

결론적으로 낮은 강도의 초음파에 노출된 어류는 초음파 발생에 따른 심각한 스트레스는 받지 않을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심기술개발사업의 “생물학적 통합형수질 독성 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

## 인 용 문 헌

- 김철기, 김광백, 차의영. 2003. 다층 펄스 트론을 이용한 유해물질 유입에 따른 송사리의 행동 반응 분석 및 인식. *멀티미디어학회지* **6**(6): 1062-1070.
- 윤종락, 이성욱, 안수용, 박지현, 배종우, 안명석. 2006. 수중소음이 어류에 미치는 영향. 2006년도 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집 p. 1-8.
- Adams, S.M., A.M. Brown and R.W. Goede. 1993. A quantitative health assessment index for rapid evaluation of fish condition in the field. *Transactions of American Fisheries Society* **122**: 63-73.
- Almeida, P.R. 1996. Estuarine movement patterns of adult tin-lipped grey mullet, *Liza ramada* (Risso) (Pisces, Mutilidae), observed by ultrasonic tracking. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **202**: 137-150.
- Astrup, J. 1999. Ultrasound detection in fish-a parallel to the sonar-mediated detection of bats by ultrasound-sensitive insects?. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* **124**: 19-27.
- Astrup, J. and B. Møhl. 1993. Detection of intense ultrasound by the cod *Gadus morhua*. *Journal of Experimental Biology* **182**: 71-80.
- Astrup, J. and B. Møhl. 1998. Discrimination between high and low repetition rates of ultrasonic pulses by the cod. *Journal of Fish Biology* **52**: 205-208.
- Dagorn, L., E. Josse and P. Bach. 2000. Individual differences in horizontal movements of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in nearshore areas in French Polynesia, determined using ultrasonic telemetry. *Aquatic Living Resources* **13**(4): 193-202.
- Dunning, D.J., Q.E. Ross, P. Geoghegan, J.J. Reichle, J.K. Menezes and J.K. Watson. 1992. Alewives avoid high-frequency sound. *North American Journal of Fisheries Management* **12**: 407-416.
- Egli, D.P. and R.C. Babcock. 2004. Ultrasonic tracking reveals multiple behavioural modes of snapper (*Pagrus auratus*) in a temperate no-take marine reserve. *ICES Journal of Marine Science* **61**: 1137-1143.
- Ghaedian, R., J.N. Coupland, E.A. Decker and D.J. McClements. 1998. Ultrasonic determination of fish composition. *Journal of Food Engineering* **35**: 323-337.
- Jadot, C., M. Ovidio and J. Voss. 2002. Diel activity of *Sarpa salpa* (Sparidae) by ultrasonic telemetry in a *Posidonia Oceanica* meadow of Corsica (Mediterranean Sea). *Aquatic Living Resources* **15**(6): 343-350.
- Kim, W.S., S.J. Yoon, H.T. Moon and T.W. Lee. 2002. Effects of water temperature changes on the endogenous and exogenous rhythms of oxygen consumption in glass eels *Anguilla japonica*. *Marine Ecology Progress Series* **243**: 209-216.
- Kim, W.S., S.J. Yoon, J.W. Kim, J.A. Lee and T.W. Lee. 2006. Metabolic response under different salinity and temperature conditions for glass eel *Anguilla japonica*. *Marine Biology* **149**: 1209-1215.
- Kraus, S.D., A.J. Read, A. Solow, K. Baldwin, T. Spradlin, E. Anderson and J. Williamson. 1997. Acoustic alarms reduce propoise mortality. *Nature* **388**: 525.
- Kwak, I.S., T.S. Chon, H.M. Kang, N.I. Chung, J.S. S.C. Kim, S.K. Lee and Y.S. Kim. 2002. Pattern recognition of the movement tracks of medaka (*Oryzias latipes*) in response to sub-lethal treatments of an insecticide by using artificial neural networks. *Environmental Pollution* **120**: 671-681.
- Lee, S.H., H.K. Pak and T.S. Chon. 2006. Dynamics of prey-flock escaping behavior in response to predator's attack.

- Journal of Theoretical Biology* **240**: 250-259.
- Lee, S.H., H.K. Pak, H.S. Wi, T.S. Chon and T. Matsumoto. 2004. Growth dynamics of domain pattern in a three-trophic population model. *Physica* **334A**: 233-242.
- Mann, D.A., Z. Lu and A.N. Popper. 1997. A clupeid fish can detect ultrasound. *Nature* 389-341.
- McCauley, R.D., J. Fewtrell and A.N. Popper. 2003. High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *Journal of the Acoustical Society of America* **113**(1): 638-642.
- Navot, N., E. Kimmel and R.R. Avtalion. 2004. Enhancement of antigen uptake and antibody production in goldfish (*Carassius auratus*) following bath immunization and ultrasound treatment. *Vaccine* **22**: 2660-2666.
- NIWA, 1998. Marine fish (*Rhombosolea plebeia*). Acute toxicity test protocol. National Institute of Water and Atmospheric Research 1-29.
- OECD. 1993. OECD Guidelines for Testing of Chemicals, 203 "Fish, Acute Toxicity Test (Adopted: July 17, 1992)".
- Offutt, G.C. 1968. Auditory response in the goldfish. *Journal of Auditory Research* **8**: 391-400.
- Park, Y.S., I.S. Kwak, T.S. Chon, J.K. Kim and S.E. Jørgensen. 2001. Implementation of artificial neural networks in patterning and prediction of exergy in response to temporal dynamics of benthic macroinvertebrate communities in streams. *Ecological Modelling* **146**: 143-157.
- Popper, A.N., R.R. Fay, C. Platt and O. Sand. 2003. Sound detection mechanisms and capabilities of teleost, p. 3-38. *In: Sensory Processing in Aquatic Environments* (S.P. Collin and N.J. Marshall, eds). Springer-Verlag, New York.
- Popper, A.N., D.T.T. Plachta, D.A. Mann and D. Higgs. 2004. Response of clupeid fish to ultrasound: a review. *ICES Journal of Marine Science* **61**: 1057-1061.
- US EPA. 2002. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving water to freshwater and marine organisms. United States Environment Protection Agency 1-122.
- Wilson, B. and L.M. Dill. 2002. Pacific herring respond to simulated odontocete echolocation sounds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **59**: 542-553.
- Yoon, S.J., C.K. Kim, J.G. Myoung and W.S. Kim. 2003. Comparison of oxygen consumption patterns between wild and cultured black rockfish *Sebastes schlegeli*. *Fisheries Science* **69**: 43-49.
- Zhou, Y.C., H. Huang, J. Wang, B. Zhang and Y.Q. Su. 2002. Vaccination of the grouper, *Epinephelus awoara*, against vibriosis using the ultrasonic technique. *Aquaculture* **203**: 229-238.

(Manuscript received 27 March 2007,  
Revision accepted 17 May 2007)