

수중 가청음에 의한 볼락의 청각 능력

1. 청각 문턱치

이창현 · 서두옥
제주대학교

The Hearing Ability of Black Rockfish *Sebastes inermis* to Underwater Audible Sound

1. The Auditory Threshold

Chang-Heon LEE and Du-Ok SEO
Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

In order to obtain the fundamental data about method of luring fish schools by underwater audible sound, the auditory threshold of black rockfish *Sebastes inermis* on the coast of Cheju Island was investigated by heartbeat conditioning technique using pure tones coupled with a delayed electric shock. The audible range of black rockfish extended from 80 Hz to 800 Hz with a peak sensitivity at 300 Hz. The mean auditory thresholds of black rockfish at the frequencies of 80 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 500 Hz and 800 Hz were 102 dB, 103 dB, 99 dB, 96 dB, 116 dB and 122 dB, respectively. As the frequency became higher than 300 Hz, the auditory threshold increased rapidly.

Key words: Hearing ability, Black rockfish, Underwater audible sound, Auditory thresholds

서 론

최근 해양목장 사업에 관심이 높아지면서 수중 가청음을 이용한 어류의 음향순치 및 방음시 어류의 행동반응에 관한 연구가 성행하고 있다. 이러한 노력들은 어류의 청각 문턱치 실험을 통하여 가장 예민하게 반응하는 음의 주파수를 찾아내고, 또한 이렇게 구하여진 주파수의 음으로 육상수조에서 치어들을 음향 학습 순치시킨 후 일정 해역내에 방류하여 충분히 성숙된 성어가 될 때까지 어장관리를 하면서 필요시 순치에 사용한 음을 방성하여 방류한 어류를 재포획하는 등 연안해역에서 수중 가청음을 이용하여 어군을 일정 해역으로 유도 또는 제어하는 자원관리형 어업의 연구가 진행되고 있다 (上城, 1991). 이러한 연구들은 어류가 갖고 있는 청각능력을 이용하여 어군의 행동을 제어하는 경우, 어류의 청각능력은 어종마다 다르기 때문에 대상 어류에 대한 기초적인 청각능력을 명확히 하는 것이 필요하다 (Enger, 1967; Hatakeyama, 1992). 이러한 청각능력에는 청각 문턱치, 청각입계비, 주파수변별능력, 음원위치확인 등 여러 가지 있으며, 청각문턱치를 측정하는 방법에는 어류의 심장부근에 전극을 투입하여 심장의 심박수 변화등을 표시하는 조건반응 수법 이외에 어류의 호흡에 의한 측정방법, 뇌파 측정에 의한 방법등에 의해서 이루어지며, 일반적으로 어류는 주파수 100~1000 Hz의 범위에서 가장 민감한 반응을 나타낸다고 한다 (古河, 1970).

이 연구에서는 제주 연안역에 있어서 연안 정착성 어종인 볼락의 청각 문턱치를 구하여 볼락의 어획 과정에 수중 저주파 음향을 이용하여 어군유집을 이룰수 있는 새로운 음향어법 개발에 관한 기초자료를 제공할 목적으로 수중음과 전기자극으로 조건학습한 볼락의 심박 간격 변화로부터 볼락이 인식할 수 있는 최소 음압인

청각 문턱치를 구하였다.

재료 및 방법

볼락은 제주 연안에서 손줄 낚시로 어획하여 제주대학교 해양연구소 사육수조로 옮겨 사육한 것으로 그 중 6미를 실험에 사용하였다. 전장은 15~30 cm로 실험 기간 중의 수온은 12~22°C였으며, 실험 수조로 이동한 다음 12시간이 경과한 후 실험을 실시하였다.

방성음의 수중음압과 수조내의 배경잡음은 수중청음기 (B&K, 8103)를 어류의 머리위치에 설치한 후 전치증폭기 (B&K, 2635)와 휴대용 주파수 분석기 (B&K, 2143)를 이용하여 1/3 옥타브 분석으로 각각 측정하였다. 방성음의 음압과 배경잡음의 주파수분석은 실험전에 실험시간대에 있어서 반복 측정하였다.

어류의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 Fig. 1의 실험장치는 Lee et al. (1999)과 같이 수조 벽면에서 5 cm 떨어진 지점에 양쪽에 공중 스피커 (Promana, CB38)와 전력 증폭기 (Inkel, PSR-2000)를 설치하여 신호 발생기 (NF, 4500)의 신호음이 동위상으로 방성될 수 있도록 설치하였으며, 실험어의 심박간격 측정은 오실로스코프 (Tektronix, TDS-340)을 이용하였다.

어류의 음향 조건학습 및 청각 문턱치를 측정하기 위하여 사용한 음향자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz의 순음을 이용하였으며, 이들 측정주파수 중 임의의 하나의 순음을 약 120 dB (0 dB re 1 μPa) 이상의 음압과 함께 직류 전압 8 V의 전기 자극을 실험어에게 주면서 조건 학습시켰다.

어류 음향 조건학습의 음방성 방법은 실험어의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 지속시간 5초의 순음을 방성하였으며, 방성개

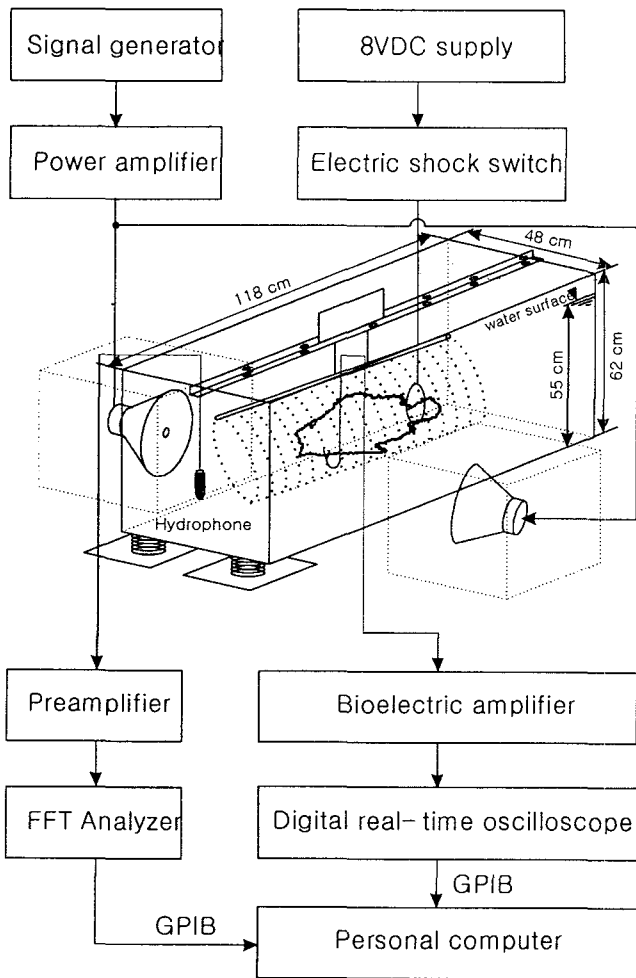


Fig. 1. Block diagram of the instruments for measuring auditory threshold of black rockfish.

시 3초 후에 지속시간 0.1초의 전기 자극을 가하면서 학습을 시켰다. 이와 같은 음향 조건학습에 대한 어류 반응의 판정은 Fig. 2의 (a)와 같이 음자극을 주기 전보다 Fig. 2(b)와 같이 음자극을 주었을 때의 심박 간격이 넓었을 때를 반응이 있는 것으로 하였다.

이와 같이 임의의 한 주파수를 방성하였을 때 3회 이상 연속으로 심박간격에 변화가 있는 반응이 나타나면 음에 대한 학습이 완료된 것으로 간주하였고, 각각의 학습 실험 모두 전기 자극 후 어류의 심박이 정상적으로 될 수 있도록 3~5분 이상의 시간 간격을 두어 음향 학습을 시켰다.

어류의 청각 문턱치는 Fig. 2의 (b)처럼 120 dB 이상의 순음을 방성하였을 때 심박간격이 넓어지는 반응이 나타나도록 음향 조건학습을 완료시킨 후 30분 이상 경과한 후에 조건 학습에 사용한 순음을 포함한 측정주파수를 임의의 순서로 선택하여 학습에 사용한 음압에서부터 3~5 dB씩 감소시켜 가면서 방성하여 실험어가 감지할 수 있는 가장 낮은 음압을 청각 문턱치로 취하였으며, 실험어가 방성음압에 반응을 나타낼 경우 음향 조건학습을 유지시키기 위하여 전기자극을 주었다. 실험 자료의 우연오차를 줄이기

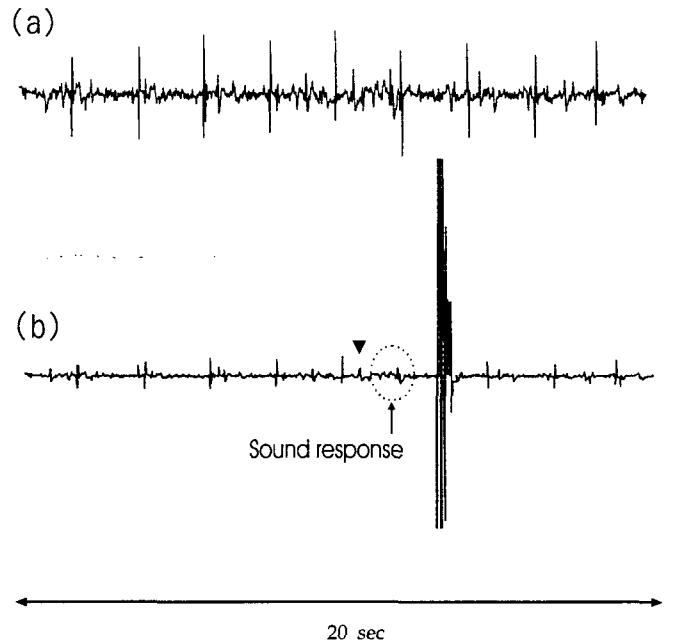


Fig. 2. Electrocardiograms showing typical cardiac responses to a pure sound stimulus.

- (a) Before conditioned with a pure sound stimulus.
- (b) After conditioned with a pure sound stimulus. (▼ Speaker on).

위하여 연속적으로 2회 이상 양의 반응을 보인 최소 방성 음압을 청각 문턱치로 결정하였다.

결과 및 고찰

실험어의 청각 문턱치 측정시 주파수분석기를 이용하여 측정한 실험수조의 배경 잡음은 60 Hz에서 최대 약 70~80 dB의 레벨을 나타내어 비교적 강한 성분을 갖는 전기 잡음과 교류기기에서 발생하는 진동음이 있었으나 어류의 청각 문턱치에는 영향이 없는 것으로 판단되며, 주파수가 높을수록 감소하여 특히 고주파수대에서는 50 dB 이하의 낮은 잡음스펙트럼레벨을 나타내었다. 또 측정 시각의 차이에 따른 배경잡음 스펙트럼레벨의 편차는 적게 나타났다.

각 측정주파수를 각각 학습에 사용한 음압 이하로 감소시키면서 불락의 청각 문턱치를 측정한 결과는 Table 1 및 Fig. 3과 같고, 각 측정 주파수마다의 청각 문턱치 평균 및 표준편차도 함께 나타났다. 불락은 측정 주파수 80~800 Hz까지의 학습음을 인식하고 있었는데, Fig. 3에서 보는 바와 같이 불락의 평균 청각 문턱치는 측정 주파수가 80 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 800 Hz일 때 음압이 각각 102 dB, 103 dB, 99 dB, 96 dB, 116 dB, 122 dB로 측정 주파수 300 Hz에서 음압 96 dB로 가장 낮고 측정 주파수 800 Hz에서 음압 122 dB로 가장 높게 나타내고 있었으며, 측정 주파수 300 Hz를 피크로 하여 양측의 청각 문턱치의 모양은 V자 모양을 나타내고 있었다. 측정 주파수 300 Hz에서 500 Hz로

Table 1. Each measuring and mean value of auditory threshold of black rockfish.

Frequency (Hz)	Auditory threshold (dB)						Mean value	Standard deviation
80	106	103	103	93	105	103	102	4.67
100	103	98	98	101	106	109	103	4.24
200	95	98	98	102	96	102	99	3.00
300	94	95	97	97	94	94	96	2.27
500	118	121	112	123	108	.	116	6.27
800	118	124	124	126	117	123	122	3.63

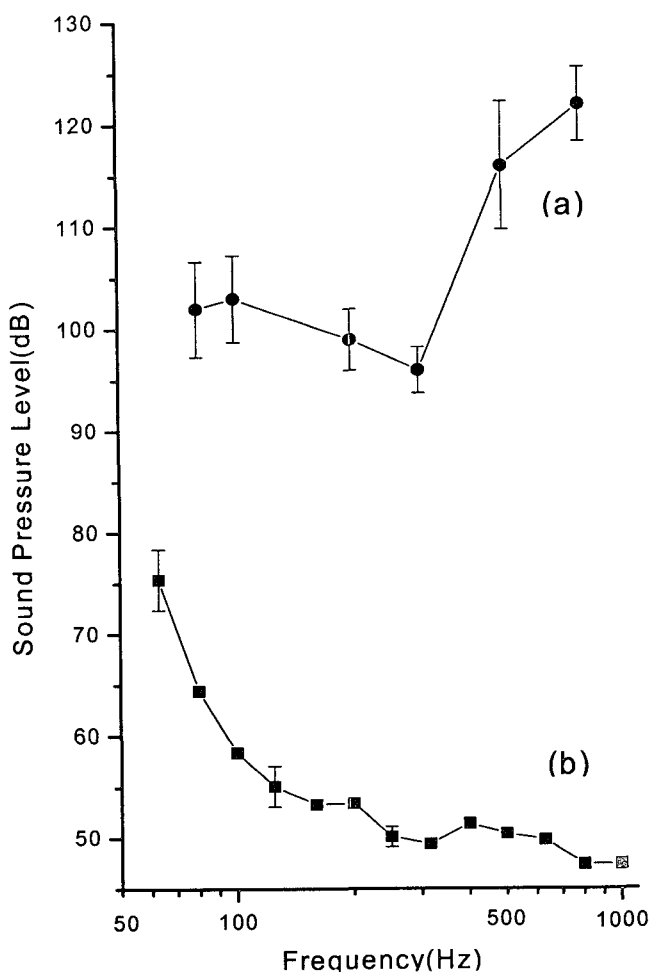


Fig. 3. Audiogram of black rockfish and spectrum level of the background noise.

- a) Auditory threshold (dB re $1 \mu\text{Pa}$).
 b) Background noise spectrum level (dB re $1 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$).

변화할 때 급격하게 나빠지고 있었고 측정 주파수 500 Hz에서의 문턱치가 800 Hz보다 감소하는 경향을 나타냈다. 볼락은 200~300 Hz의 순음과 전기충격을 이용한 음향 조건학습에서 120 dB 이상 순음을 7~8회 정도 방성하면 순음 방성과 동시에 심박간격이 현저하게 벌어지는 현상이 나타난 반면, 300 Hz 이상의 순음에서는

대략 10회 이상 실시하여도 쉽게 이뤄지지 않았다.

같은 양볼락과인 조피볼락, 솜뱅이의 청각문턱치 (Park et al., 1999; Lee et al., 1999)와 비교하면, 감도가 좋은 주파수가 다소 다르게 나타났으나 청각문턱치의 곡선 모양은 V자 형태를 하고 있어, 특정 주파수 주변의 음에 대하여 감지능력이 높다는 것을 알 수 있었다. Corwin (1983)은 붕어류에 있어서 그 청각 기관에 속한 유모세포, 신경집중도, 생리학적 감도가 연령의 증가에 의한 성장에 따라 증가하면 그에 따라 청각 문턱치는 더 낮아진다고 보고하고 있고, Kenyon (1996)은 점자돔과의 어류도 성장함에 따라 청각 감도가 급격히 민감해진다고 보고하고 있다. Fay 등 (1992)은 금붕어의 청각 능력 측정에 있어서 또 山川 (1998)은 무지개 송어의 청각 문턱치 측정에 있어서 온도의 변화에 따라 청각 문턱치에 영향이 있다고 보고하고 있다. 이러한 관점에서 실험어의 청각 문턱치 측정시 실험 기간중의 수온의 범위가 다소 넓게 분포하고 있어 차후 체장 및 온도에 따른 청각문턱치의 변화도 조사할 필요가 있는 것으로 판단된다.

이 실험 결과 어군을 유집하기 위한 음향어법개발 등 음향을 이용한 어군 행동제어에서 볼락의 행동제어는 200~300 Hz의 수중음, 특히 300 Hz의 수중음을 사용하는 것이 적당하리라고 생각된다.

그러나, 바다 안에서는 선박 등의 인공소음과 그곳에 서식하는 생물 자신이 내는 소리 등 다종 다양한 소리가 포함되어 있기 때문에 실제의 어류는 자연발생적인 수중소음과 인위적으로 발생하는 수중소음 둘다 존재하는 서식환경에 생활하고 있다. 어류의 청각은 이들 주변잡음의 영향을 받아서 적은 음이 듣기 어려운 상태가 되어 청각 문턱치가 증가하게 된다. 이와 같이 수중에는 여러 요인에 의해서 발생하는 잡음이 항상 존재하고, 그 레벨도 변동하기 때문에 수중음을 이용하여 어군을 유집하기 위해서는 마스킹 측정이 중요하다.

요 약

제주 연안역에 서식하고 있는 볼락의 수중음에 대한 청각 특성을 파악하여 수중음에 대한 어군의 행동양상을 파악할 수 있는 기초자료를 제공할 목적으로 측정주파수 80~800 Hz의 수중음과 8 V의 직류 전압의 전기자극을 이용하여 음향 조건학습을 시킨 후 측정주파수와 음압을 임의로 변화시켜가면서 청각문턱치를 구한 결과 볼락은 측정주파수 80~800 Hz의 음을 인식하고 있었고, 측정주파수에 대한 각각의 청각문턱치는 102 dB, 103 dB, 99 dB, 96 dB, 116 dB, 122 dB이었으며, 측정 주파수 300 Hz에서 음압 96 dB로 가장 낮고 측정 주파수 800 Hz에서 음압 122 dB로 가장 높게 나타내고 있었다. 그러나 수중에 존재하는 소음의 주파수대역이 저주파에서 높게 나타나고 대역폭도 넓으므로 이들 자극이 어류 행동에 어떻게 미치는지 규명할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

Corwin, J.T. 1983. Postembryonic growth of the macula neglecta auditory

- detector in the ray, *Raja clavata* – continual increase in hair cell number, neural convergence and physiological sensitivity –. *J. Comp. Neurol.*, 217, 345~356.
- Enger, P.S. 1967. Hearing in herring. *Comp. Biochem. Physiol.*, 22, 527~538.
- Fay, R.R. and T.J. Ream. 1992. The effects of temperature change and transient hypoxia on auditory nerve fiber response in the goldfish (*Carassius auratus*). *Hear. Res.*, 58, 9~18.
- Hatakeyama, Y. 1992. The hearing abilities of fish. *Fisheries Engineering*, 28(2), 111~119.
- Kenyon, T.N. 1996. Ontogenetic changes in the auditory sensitivity of the bicolor damselfish, *Pomacentrus partitus* (Poey). *J. Comp. Physiol. A.*, 179, 553~561.
- Lee, C.H., Y.S. Park, J.W. Moon, S.J. Kim, J.Y. Ahn and D.O. Seo. 1999. The hearing ability of the scorpion fish *Sebastiscus marmoratus* to audible sound. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 35 (2), 156~160.
- Park, Y.S., C.H. Lee, J.W. Moon, J.Y. Ahn and D.O. Seo. 1999. Auditory thresholds of black rock fish. *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 11(1), 88~97.
- 山川正巳. 1998. 魚類の聴覚生理 – ニジマス –. 恒星社厚生閣, 東京, 155~169.
- 上城 義信. 1991. 音響馴致システムによる魚群制御. *水産工学*, 28(1), 65~70.
- 古河 太郎. 1970. 魚類生理 – 聴覚 –. 恒星社厚生閣, 東京, 462~481.

2000년 9월 23일 접수

2000년 11월 24일 수리