

수중 가청음에 의한 솜뱅이의 청각 능력 1. 청각 문턱치

이창현 · 박용석* · 문종욱 · 김석중 · 안장영 · 서두옥
제주대학교 · 제주도청*
(1999년 2월 19일 접수)

The Hearing Ability of the Scorpion Fish *Sebastes marmoratus* to Audible Sound 1. The Auditory Threshold

Chang-Heon LEE, Yong-Seok PARK*, Jong-Wook MOON,
Jang-Young AHN, Suk-Jong KIM and Du-Ok SEO

Cheju National University, *Cheju Provincial Government

(Received February 19, 1999)

Abstract

This experiment was carried out to investigate the auditory threshold of the scorpion fish *Sebastes marmoratus* which was suitable for Marine ranching by a classical respiratory conditioning technique using a sound coupled with a delayed electric shock. The thresholds were determined by analyzing the electrocardiogram. The auditory thresholds were observed among the 12 fish with much difference from 100Hz to 300Hz. The audible range of the scorpion fish extended from 80 to 800Hz with a peak sensitivity of 90dB(OdB = 1μPa) at 100Hz. As the frequency became higher than 300Hz, the auditory threshold increased rapidly. The scorpion fish was least sensitive to sound of 500Hz among 6 frequency points and the value was about 127dB.

서 론

수중음향 기술의 발전으로 수중음향은 초음파를 이용한 해양관측 뿐만 아니라 수중 가청음을 이용한 어군의 행동제어, 특히 해양 목장화에서 음향순치의 주요 수단으로 활용되고 있다. 그러나, 어장에서의 음향어법과 해양목장 등에서 수중 가청음으로 어군의 행동을 제어하기 위해서는 대상 어종의 청각 능력을 정확히 파악할 필요가 있

으며, 이와 관련하여 오래 전부터 참돔과 대구류 등 여러 어종의 청각 능력에 관련된 연구가 수행되었다^{1), 2)}. 물고기의 청각 능력에는 청각 문턱치, 청각 능력 지수, 임계비, 주파수 변별능력, 음원위치 확인, 강도변별능력 등이 있으며, 주로 전극투입에 의한 심장의 심박수 변화 등을 표시하는 고전적인 조건반응 수법이외에도 물고기의 호흡에 의한 측정방법 등이 있다³⁾. 일반적으로 물고기의 가청주파수는 16~5,000Hz 정도로 100~1,000Hz의 범

* 이 논문은 1997~8년 제주대학교 발전기금 학술연구에 의한 연구임.

위에서 가장 민감한 반응을 나타내어⁴⁾ 골표류는 60~80dB, 비골표류는 90~110dB의 청각 문턱치를 나타내고 있다고 보고하고 있다⁵⁾.

이처럼 물고기의 청각 능력을 파악하는 것은 어획의 과정에 있어서 대상 물고기의 행동반응을 추측할 수 있는 것 이외에 새로운 어구, 어법을 개발하는 과정에 있어서도 중요할 뿐 아니라 조업중의 어구에 대한 물고기의 행동 양상을 해결하는 데도 필요하다.

특히, 해양목장화에 있어서 대상 어종의 음향 순치 뿐만 아니라 양식장 등에서의 음향을 이용한 자동급이기 사용을 위해서는 물고기에 대한 청각 능력을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 이러한 일련의 연구 과정을 통하여 연안역에 있어서 자원 관리형 어업을 추진하면서 어업생산력을 향상시키기 위한 방안의 하나로 물고기를 방류후 수중 가청음을 이용하여 어군을 일정해역으로 유도 또는 제어하기 위한 기술개발도 진행되고 있다⁶⁾. 이러한 연구들은 물고기가 갖고 있는 청각 능력을 이용하여 행동제어를 하는 것이고, 이와 같이 수중 가청음을 이용한 어군행동제어를 하는 경우에도 물고기의 청각 능력은 어종마다 다르기 때문에 대상물고기에 대한 기초적인 청각 능력을 명확히 하는 것이 필요하다.

따라서, 이 연구에서는 제주 연안역에 있어서 해양목장의 음향순치 대상 어종으로 선정할 수 있는 연안 정착성 어종인 썸뱅이의 청각 능력의 하나인 청각 문턱치를 파악하여 해양목장화 및 자원 관리 어업의 기초자료를 제공할 목적으로, 썸뱅이를 음향과 전기자극으로 조건학습하였으며, 주파수와 음압을 변화시켜가면서 심전도를 도출하여 썸뱅이의 심박간격의 변화로부터 청각 문턱치를 측정·분석하였다.

재료 및 방법

실험어인 썸뱅이 *Sebastiscus marmoratus*은 제주 연안어장에서 낚시로 어획한 후 제주대학교 해양연구소의 사육수조로 옮겨 약 3~4개월 사육하였다. 진장은 210~280mm사이였으며, 그 중 12마리를 실험에 사용하였다. 사육 중의 수온은

13.5~28.0℃, 실험 기간 중의 수온은 16.0~16.5℃였고, 실험어는 연구소의 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후 약 12시간 이상 지난 후 청각능력측정 실험에 사용하였다.

실험은 주위 잡음을 줄이기 위해 3(L)×2.5(W)×2.5(H)m인 컨테이너 속에서 실시하였으며, 이 실내에 실험용 수조로서 118(L)×48(W)×62(H)cm의 직육면체형 수조를 사용하였다. 수조 밑바닥에는 주변 진동에 의한 영향을 줄이도록 방진 고무 및 방진 스프링을 수조의 네 모퉁이에 설치하였다. 실험 수조의 해수는 실험 수조의 밑에서 위쪽으로 흐르도록 하여 위쪽으로 배출하였으며, 박 등(1995)과 같이 실험장치를 설치하였다⁷⁾.

실험어는 200ppm의 MS-222 용액에 넣어 마취시킨 후 낚시 바늘로 만든 전극침을 실험어의 위

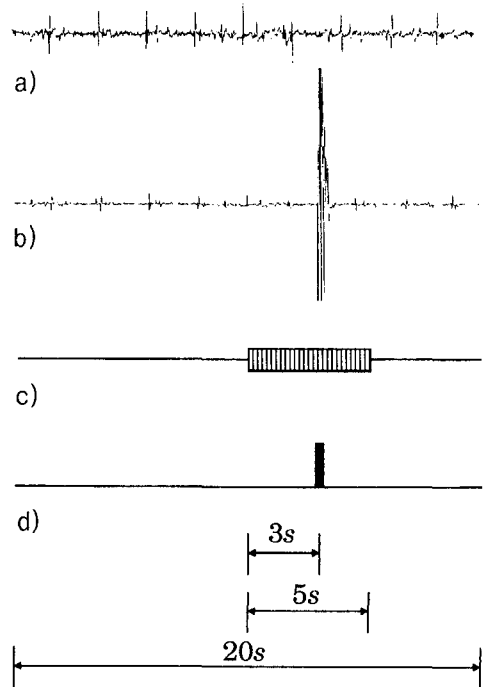


Fig. 1. Time sequence of sound stimulus and electric shock condition.

- a) Oscillograms of electrocardiograms showing negative response in no stimulus.
- b) Oscillograms of electrocardiograms showing positive response in sound and electric shock.
- c) Pure tone sound.
- d) 9V DC electric shock lasting for 0.1s.

심강에 꽂고 물고기를 움직일 수 없도록 그물과 프라스틱 망사로 만든 원통형 상자에 고정시켰다⁸⁾. 직류 전원장치(PS 2520G)를 이용하여 물고기의 꼬리부분에 전기 자극을 가할 수 있도록 상자 뒤쪽에 전선을 감아 실험개시 1일전에 실험수조로 옮긴 후 수조에 순음시켰다. 물고기의 위심강에 꽂은 전극침으로부터 생체용 오실로스코프(NK, AVB-11A)를 통하여 FFT(AND, AD-3525)에서 물고기의 심전도 파형 및 심박 간격을 측정하였으며, GPIB 보드를 통하여 컴퓨터에 입력한 후 해석에 이용하였다.

물고기의 학습 방법은 물고기의 청각 문턱치 실험에 사용한 음은 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz의 순음을 이용하였으며 조건자극에 대한 학습은 임의의 주파수 하나를 음압 125~130dB의 순음으로 방성하면서 학습을 실시하였다.

물고기 학습의 음방성 방법은 물고기의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 Fig.1 (c)와 같이 지속 시간 5초간의 순음을 임의의 순서로 방성하였으며, 방성개시 3초 후에 지속시간 0.1초, 전압 DC 9V의 전기 자극을 가하면서 조건 학습을 시켰다. 이와 같은 조건학습에 대한 물고기의 반응의 판정은 음자극을 주기전 및 주었을 때의 심박간격을 측정하여 Fig. 1(a)와 (b)와 같이 음자극을 주기전보다 주었을 때의 심박 간격이 넓었을 때를 반응이 있는 것으로 하였다.

실험 주파수중 임의의 한 주파수에 대해 음압 125~130dB의 순음을 방성하여 5회 이상 연속반응이 나타나면 음에 대한 학습이 완료된 것으로

간주하였다. 각각의 학습 실험 모두 전기 자극 후 물고기의 심박이 정상적으로 될 수 있도록 3~5분 이상의 시간 간격을 두어 학습을 시켰다.

실험어의 청각 문턱치 측정은 순음에 대한 조건 학습이 완료된 실험어를 대상으로 조건학습에 사용한 음을 포함한 측정 주파수를 임의의 순서로 선택하여 청각 문턱치 이하라고 판단되는 낮은 음압에서부터 순음의 방성음압을 3~5dB씩 증가시켜 가면서 방성하였다. 순음에 대한 물고기의 반응 유무를 Fig. 1(b)와 같이 심박간격으로 관찰하여 실험어가 감지할 수 있는 가장 작은 음압을 청각 문턱치로 취하였다. 실험 자료의 우연오차를 줄이기 위하여 연속적으로 2회 이상 양의 반응을 보인 최소 음압을 청각 문턱치로 결정하였다.

결과 및 고찰

임의의 한 개 주파수로 조건 학습을 완료한 후 학습 주파수 및 각 측정 주파수에 대한 각 개체 실험어의 청각문턱치 측정 결과를 Table 1에 나타내었다.

측정 결과 각 주파수에 대한 문턱치의 차이는 주파수 100Hz와 200Hz에서 최대 19.8dB, 19.5dB로 다른 주파수에 비하여 음압차가 크게 나타났다. 이것은 주파수 100Hz~200Hz사이에서 약 14dB/oct ~24dB/oct의 비율로 문턱치가 급격히 증가하는 개체(a, b)와 주파수 200Hz~300Hz사이에서 약 23dB/oct~24dB/oct의 비율로 청각 문턱치가 변하는 개체(c, d)가 존재하기 때문이다. 실험시에 측정된 실험수조 안의 배경잡음의 평균 스펙트럼레

Table 1. Auditory thresholds for scorpion fish obtained by classical conditioning of heartbeat. Values are mean of 12 fish in dB(0dB=1μPa)

Frequency	Conditioned sound												Mean	S.D	Disparity	
	80Hz	100Hz	100Hz	100Hz	200Hz (c)	200Hz (d)	300Hz	300Hz	500Hz (a)	500Hz	800Hz (b)	800Hz				
Projected sound	80Hz	92.7	87.8	87.8	97.0	92.7	92.7	92.7	87.8	87.8	104.5	92.7	97.0	92.8	5.0	16.6
	100Hz	92.8	83.0	92.8	92.8	97.9	83.0	92.8	87.9	78.1	97.9	87.9	97.9	90.4	6.5	19.8
	200Hz	97.6	88.1	88.1	102.5	88.1	83.1	92.7	92.7	102.5	97.6	102.6	102.5	94.8	7.0	19.5
	300Hz	97.0	92.7	87.7	101.8	101.8	97.0	92.7	92.7	101.8	92.7	101.8	101.8	96.8	5.0	14.2
	500Hz	128.3	125.8	131	130.7	128.3	128.3	121.1	123.2	128.3	125.8	123.2	125.8	126.7	3.1	9.9
	800Hz	129.2	119.5	119	120.8	119.5	128.7	123.9	119.5	120.7	119.5	120.8	126.7	122.3	3.8	10.2

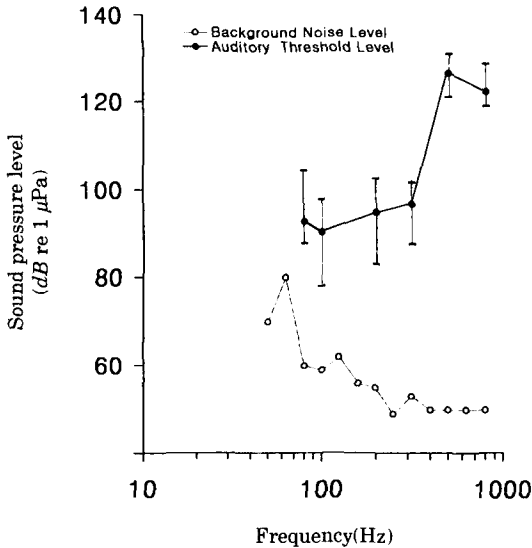


Fig. 2. Audiogram of scorpion fish and spectrum level of background noise.

벨과 각 주파수에 있어서 측정 결과의 평균값을 이용하여 썸뱅이의 청각 문턱치곡선을 작성한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 보인 청각 문턱치곡선은 수조내의 배경잡음만 있을 때 썸뱅이가 어느 정도의 음압에 반응을 보이는 가를 나타낸 것이다. 배경잡음의 평균 스펙트럼레벨은 주파수 50~60Hz에서는 70~80dB(0dB re 1μPa/√Hz)의 음압이 나타났으나, 이것은 기기의 잡음의 영향에 의한 것으로 물고기 청각에는 영향이 없는 것으로 판단되었으며, 다른 주파수대에서 스펙트럼레벨은 비슷한 레벨 경향을 보였다. 실험어의 청각 능력은 환경잡음보다도 약 30dB 이상 높은 음압 레벨을 나타내었다. 실험 결과 썸뱅이는 실험에서 사용한 측정 주파수 80Hz~800Hz의 순음을 지각하고 있었다. 각 주파수에 대한 청각 감도는 주파수 80Hz~200Hz에서는 양호하게 나타났으나, 주파수 500Hz 이상에서는 감도가 급격히 나빠지고 있었다. 청각 문턱치는 주파수 100Hz에서 약 90dB의 음압으로 최소였으며, 주파수 300Hz 이상에서 급격하게 상승하는 경향을 보였고 주파수 500Hz에서 약 126dB의 음압으로 최고치를 나타내었다.

물고기의 청각 능력은 물고기의 부레의 존재에 따라 측정치가 크게 달라진다. 일반적으로 부레가

없는 물고기는 넙치와 같이 측정 주파수 400Hz 미만 정도의 수중음을 인식하고 있으나 해양 목장의 대상물고기로 많이 사용되고 있는 어종인 참돔과 내수면 양식 물고기인 테일라피아의 경우 감도가 좋은 주파수는 대략 주파수 200Hz~300Hz 부근이며 주파수 500Hz이상에서 감도가 낮아지고 있으나 측정 주파수 1,000Hz~1,500Hz까지 수중음을 인식하고 있었다^{21,10)}. 반면 넙치의 경우 주파수 100Hz에서 감도가 높지만 수중음의 인식폭은 주파수 400Hz 미만으로 보고되고 있어 부레가 있는 물고기보다 수중음의 인식폭이 상당히 좁게 나타났다. 이 실험에서 사용한 썸뱅이는 실험 결과 측정 주파수 모두 잘 인식하고 있는 것으로 사료되었다.

썸뱅이를 이용한 청각 능력 실험 결과에서 주파수 300Hz처럼 청각 능력이 급격히 저하하는 주파수에서는 개체에 의한 차가 크게 발생하는 것으로 사료되며, 주파수 80Hz~200Hz에서 개체의 차가 크게 나타나는 것은 조건 학습시 음과 전기자극을 이용한 학습의 효과가 실험종료때까지의 시간동안 많이 상쇄된 것으로 보인다. 따라서 실험어에 대한 조건 학습시 학습효과가 실험 종료시까지 이어질 수 있도록 실험방법에 유의를 할 필요가 있는 것으로 판단된다. 실험에서 사용한 썸뱅이와 같은 양볼락과에 속하는 조피볼락의 청각 능력은 주파수 100Hz~800Hz의 측정 주파수 범위에서 주파수 100Hz~200Hz사이의 감도가 가장 민감한 반면 주파수 500Hz에서 가장 낮게 나타났다¹¹⁾. 본 실험결과 청각 문턱치의 곡선은 조피볼락의 청각 문턱치 곡선과 흡사한 양상을 보이고 있었다. 따라서 실험에 사용된 썸뱅이를 포함한 양볼락과 물고기의 청각 능력은 대략 주파수 500Hz의 순음에서 감도가 가장 낮게 나타날 것으로 추론된다. 실제로 물고기는 자연 발생적인 수중 잡음과 인위적으로 발생하는 수중잡음이 존재하는 환경에서 서식한다. 따라서 수중에는 각각의 요인에 의해서 발생하는 잡음들이 항상 혼합되어 있고, 그 음압의 레벨도 변동하기 때문에 잡음 레벨이 변화하면 그에 따른 청각 능력도 변할 것으로 보인다.

요 약

제주 연안역에 있어서 해양목장의 음향순치 대상 어종으로 선정할 수 있는 연안 정착성 어류인 썸뱅이의 청각 능력을 파악할 목적으로, 임의의 순음과 전기자극을 이용하여 육상수조에서 조건 학습시킨 후, 주파수와 음압을 임의로 변화시켜가면서 썸뱅이의 심전도를 도출하여 심박간격의 변화로부터 청각 문턱치 곡선을 구한 결과, 썸뱅이는 실험에서 사용한 측정 주파수 80Hz~800Hz의 순음을 인식하고 있었다. 각 주파수에 대한 청각 감도는 주파수 80Hz~200Hz에서는 민감하게 나타났으나, 주파수 500Hz 이상에서는 감도가 급격히 나빠지고 있었다. 청각 문턱치는 주파수 100 Hz에서 약 90dB의 음압으로 최소였으며, 주파수 300Hz 이상에서 급격하게 상승하는 경향을 보이면서 주파수 500Hz에서 약 127dB의 음압으로 최고치를 나타내었다.

참고문헌

1) Chapman, C. J. and A. D. Hawkins(1973) : A filed study of hearing in the cod, *Gadus morhua* L., *J. com. Phys.*, 85, 147~167.

2) Ishioka, H., Y. Hatakeyama, and S. Sakaguchi (1988) : The hearing ability of the red sea bream *Pagrus major*, *日水誌*, 54, 947~951.

3) 藤枝 繁, 森 隆, 山中有一, 松野保久(1996) : 壓電センサーを利用した聴覚値測定, *日水誌*, 62, 40~45.

4) 古河太郎(1970) : 魚類生理 - 聴覺 -, 恒星社厚生閣, 東京, 462~481.

5) Hatakeyama, Y. (1992) : The Hearing Abilities of Fish, *Fisheries Engineering*, 28(2), 111~119.

6) 福井縣農林水産部水産果(1991) : マダイの音響馴致による海洋牧場, *水産の研究*, 10(1), 108~114.

7) 朴 容石, 飯田浩二, 梨本勝昭(1995) : スケトウダラの聴覚値と雑音スペクトラムレベル比, *日水誌*, 61, 847~853.

8) 박용석, 이창현, 이유철, 서두옥(1997) : 명태의 행동제어용 심전도 도출에 관한 연구, *제주대학교 해양연구소 연구논문집*, 21, 175~179.

9) 藤枝 繁, 松野保久, 山中有一(1996) : ヒラメの聴覚値, *日水誌*, 62, 201~204.

10) 藤枝 繁, 石野 貴, 新名 肇, 松野保久, 山中有一, 鄭龍晋(1995) : テイラピアの聴覚値測定, *日水誌*, 61, 320~325.

11) 石崎宗周, 平石智徳, 山本勝太郎, 梨本勝昭(1992) : クロソイの聴覚値について, *日水誌*, 58, 55~61.