

자리돔과 볼락의 청각능력지수

이 창 현 · 김 고 환 · 서 두 옥
제주대학교 해양산업공학부

The Hearing Index of Coralfish *Chromis notatus* and Black Rockfish *Sebastes inermis*

Chang-Heon Lee, Ko-Hwan Kim and Du-Ok Seo

Division of Marine Production Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea

In order to obtain the fundamental data on behavioral hearing capabilities, the hearing indices of coralfish *chromis notatus* and black rockfish *sebastes inermis* which were caught around Cheju island was calculated by their auditory thresholds. The hearing indices of coralfish and black rockfish were 29.1 and 81 on the condition of ambient noise, 10.0 and 19.3 on the condition of white noise respectively.

Key words : auditory ability, hearing index, coralfish, black rockfish

서 론

수중음은 해양에서 감쇠가 적고 또한 전달속도가 빨라 자극 정보의 수단으로 많이 이용되고 있으며, 어류는 그 생식환경인 수중에서 각종 자극 정보를 감지해서, 동족의 생존과 번영을 위하여 최적의 행동을 선택하고 있다 (박 등, 1999).

최근 우리 나라에서도 길러서 잡는 어업인 해양 목장화에서 음향순치의 주요 수단으로 수중가청음을 많이 응용하고 있다. 그러나, 어장에서의 음향을 이용한 어군의 유집과 해양목장 등에서 수중가청음으로 어군의 행동을 제어하기 위해서는 대상어종의 청각 특성을 정확히 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 오래 전부터 참돔과 대구류 등 여러 어류의 청각능력에 관련된 연구가 수행되었다. 어류의 청각특성에는 청각 문턱치, 청각 능력 지수, 청각 임계비, 주파수 변별 능력, 음원 위치 확인, 음압 강도 변별 능력 등이 있는데 이러한 일련의 연구 과정을 통하여 연안해역에

있어서 자원관리형 어업을 추진하면서 어업생산력을 향상시키기 위한 기술개발도 진행되고 있다. 이러한 연구들은 어류가 갖고 있는 청각 특성을 이용하여 행동제어를 하는 것이고, 이와 같이 수중 가청음을 이용한 어군 행동 제어를 하는 경우에도 어류의 청각특성은 어류마다 다르기 때문에 대상 어류에 대한 기초적인 청각특성을 명확히 하는 것이 필요하다. (이 등, 1999a, b)

이 연구에서는 어종간의 청각능력을 비교할 수 있는 청각능력지수에 관한 기초자료를 구하고자 제주 연안해역에 서식하고 있는 볼락과 자리돔의 청각 능력 지수를 육상수조 실험에서 구한 청각 문턱치에서 계산식을 이용하여 구하였다.

재료 및 방법

실험어

자리돔은 제주도 연안에서 들망으로 어획한 것을

제주대학교 해양연구소의 사육 수조로 50미 옮겨 약 3~4개월 사육하였다. 실험 종료 후에 측정된 실험어의 전장은 8~11 cm로 실험에는 9미를 사용하였다. 실험 기간 중의 실험수조의 수온은 7~14°C 였다. 불락은 제주도 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°C 였으며, 이들 실험어는 실험 수조로 이동한 다음 12시간이 경과한 후 실험을 실시하였다.

방성음의 수중음압과 수조내의 배경잡음은 수중청음기 (B&K, 8104)를 어류의 머리위치에 설치한 후 전력 증폭기 (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.

실험장치

어류의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험장치는 이 등 (1999a, 1999b)과 같이 수조 벽면에서 5 cm 떨어진 지점 양쪽에 공중 스피커 (Promana, CB38)와 전력 증폭기 (Inkel, PSR - 2000)를 설치하여 신호 발생기 (NF, 1915)의 신호음이 동위상으로 방성될 수 있도록 설치하였으며, 실험어의 심박간격 측정은 오실로스코프 (Tektronix, TDS - 340)를 이용하였다.

실험방법

어류의 음향 조건학습 및 청각 문턱치를 측정하기 위하여 사용한 음향자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz 음을 이용하였으며, 측정주파수 중 임의의 하나의 순음을 약 120 dB (0 dB re 1 μ Pa) 이상의 음압과 함께 직류 전압 7V의 전기 자극을 실험어에게 주면서 조건 학습시켰다.

어류 음향 조건학습의 음방성은 실험어의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 순음을 5초동안 방성하였으며, 방성개시 3초 후에 지속시간 0.1초의 전기 자극을 가하면서 학습을 시켰다. 이와 같은 조건학습에 대한 어류의 반응 유무의 판정은 음자극을 주기 전보다 음자

극을 주었을 때의 심박 간격이 넓었을 때를 반응이 있는 것으로 하였다.

측정 주파수중 임의의 한 주파수에 대해 방성하였을 때 3회 이상 연속적으로 심박간격에 변화가 있으면 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.

이와 같이 실험어에 대하여 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 청각 문턱치를 측정하였고 참됨에 영향을 주는 70 dB의 백색소음 (Hatakeyama, 1989)을 근거로 하여 73 dB의 백색소음 방성시에도 같은 방법을 이용하였다. 또한 실험어가 방성음압에 반응을 나타낼 경우 음향 조건학습을 유지시키기 위하여 전기자극을 주었다.

실험어의 청각문턱치는 심박간격으로 관찰하여 실험어가 감지할 수 있는 가장 작은 음압으로 취하였으며, 실험 자료의 우연오차를 줄이기 위하여 연속적으로 2회 이상 양의 반응을 보인 최소 음압을 청각 문턱치로 결정하였다. 이와 같이 구한 청각문턱치는 다른 어종간의 청각 능력 비교를 쉽게 할 수 있도록 Schellart and Popper (1992)가 제안한 방법으로 자리돔과 불락에 대하여 청각 능력지수를 산출하였다. 청각능력지수의 산출은 이미 구해진 실험어의 배경잡음시의 청각문턱치 값을 기준으로 하여 구하였다. 또한 청각문턱치 값에서 구할 수 없는 계수는 각 측정 주파수에서의 청각문턱치 값을 기준으로 최소자승법에 의해 청각문턱치의 곡선식을 구한 후, 그 식에 대입하여 각 계수 값을 추정하였으며, 이렇게 구해진 계수로 Schellart and Popper에 의해 제안된 다음 식에 대입하여 실험어의 청각능력지수를 구하였다.

$$HI = \left(\frac{f_b}{Q_{10dB}} \right)^{0.5} \times 10^{\left(\frac{-S_A}{20} \right)} \quad (1)$$

여기서 f_b 는 청각 문턱치가 가장 낮은 주파수.

$Q_{10dB} = \frac{f_b}{f_1 - f_2}$ 으로 $f_1 - f_2$ 는 가장 낮은 청각문턱치를 나타내는 주파수보다 10 dB 더 높은 청

각문턱치 값을 나타내는 전 (f_1) · 후 (f_2) 주파수의 차를 나타낸다.

또한 S_{θ} 는 가장 낮은 청각문턱치 값을 갖는 주파수에서의 음압을 CGS 단위로 나타낸 청각문턱치 값을 나타낸다. 이상에서와 같이 (1) 식에서 전항 $(\frac{f_b}{Q_{10dB}})^{0.5}$ 은 해당어류의 가청 주파수 범위를, 뒤 쪽 항 $10^{(-\frac{S_{\theta}}{20})}$ 은 청각 감도를 표현하는 무차원 함수이다.

결과 및 고찰

배경 잡음 및 백색소음시의 자리돔의 평균 청각 문턱치의 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

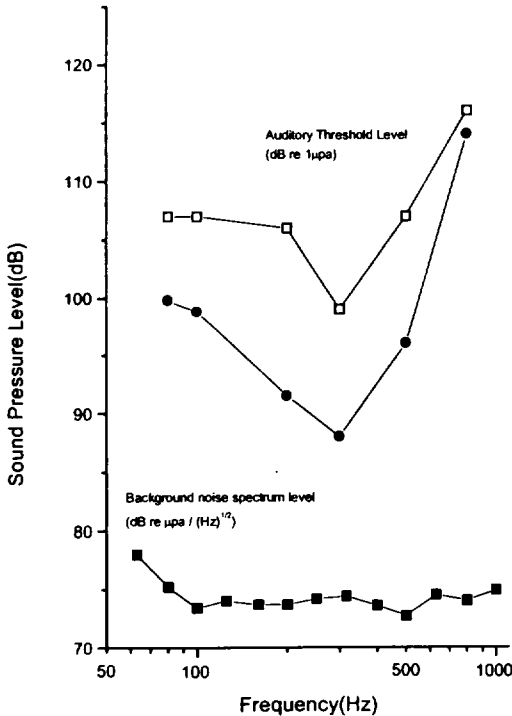


Fig. 1. Audiogram of coralfish.

- a) Auditory threshold(□) with white noise.
- b) Auditory threshold(●) without white noise.
- c) White noise spectrum level(■) of 73 dB.

자리돔은 측정 주파수 80~800 Hz까지의 학습음을 인식하고 있었는데, 평균 청각 문턱치는 측정 주파수가 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz일 때 음압이 각각 100 dB, 99 dB, 91 dB, 88 dB, 96 dB, 114 dB이었으며, 측정 주파수 300 Hz에서 음압 88 dB로 가장 낮고 측정 주파수 800 Hz에서 음압 114 dB로 가장 높게 나타나고 있었다. 측정 주파수 300 Hz를 피크로 하여 양측의 측정 주파수에서 청각 문턱치가 높아지는 청각 문턱치의 모양은 V자 모양을 나타내고 있으며 측정 주파수가 300 Hz에서 500 Hz로 변화할 때 급격하게 나빠지고 있었다.

백색소음시에 자리돔의 청각 문턱치를 측정한 결과 백색소음 발생전과 백색소음 발생후의 청각 문턱치를 비교하면 백색소음 발생전보다도 청각 문턱치가 증가하여 명확히 마스크가 일어나고 있었다. 특히 자리돔은 측정 주파수 200 Hz에서 마스크 현상이 뚜렷이 나타나며 측정 주파수 800 Hz에서는 그 차이가 크지는 않았다.

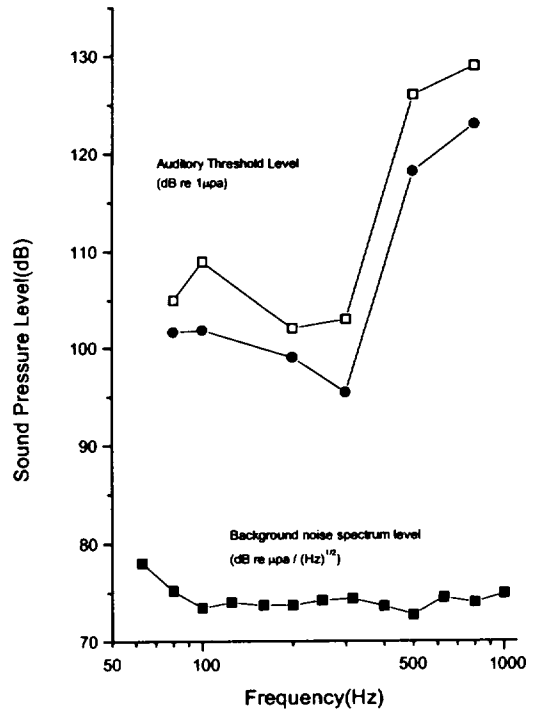


Fig. 2. Audiogram of black rockfish.

- a) Auditory threshold(□) with white noise.
- b) Auditory threshold(●) without white noise.
- c) White noise spectrum level(■) of 73 dB.

블락은 측정 주파수 80~800 Hz까지의 학습음을 인식하고 있었는데, Fig. 2에서 보는 바와 같이 평균 청각 문턱치는 측정 주파수가 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz일 때 음압이 각각 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 있었으며, 측정 주파수 300 Hz를 피크로 하여 양측의 청각 문턱치의 모양은 V자 모양을 나타내고 있었다. 측정 주파수 300 Hz에서 500 Hz로 변화할 때 급격하게 나빠지고 있었고 측정 주파수 500 Hz에서의 문턱치와 800 Hz의 문턱치가 비슷한 경향을 나타냈다. 백색소음 73 dB를 방성하면서 블락의 청각 문턱치를 측정한 결과 백색소음 발생 전과 발생후의 청각 문턱치를 비교하면 백색소음을 방성할 때의 청각 문턱치가 증가하는 경향이 보여 마스킹이 일어나고 있었다. 특히, 측정 주파수 100 Hz, 300 Hz에서 마스킹 현상이 뚜렷이 나타나며 측정 주파수 80 Hz, 200 Hz에서는 상대적으로 적게 나타났다.

이들 실험어는 측정 주파수 200~300 Hz의 순음과 전기 충격에 대한 음향 학습으로부터 학습음을 인식하면 학습음 방성과 동시에 심박 간격이 현저하게 벌어지는 현상이 나타난 반면에, 그 외의 학습음에서는 여러 번의 방성과 전기 충격에 의한 음향 학습도 쉽게 이루어지지 않았다.

측정주파수 범위내에서 자리돔은 대략 200~300 Hz의 저주파수의 순음에 민감하였다. 특히 300 Hz에서 청각 문턱치가 가장 낮았으나 500 Hz 이상이 되면 청각 문턱치가 증가하였고 같은 농어목인 참돔의 청각 문턱치 (Ishioaka, 1988)와 비교하면, 감도가 좋은 주파수가 다소 다르게 나타났으나 곡선의 모양은 V자 형태를 하고 있어, 특정 주파수 주변의 음에 대하여 감지능력이 높다는 것이 나타나고 있다. 블락은 같은 양블락과인 조피블락, 썸뱅이의 청각문턱치 (Park et al, 1999 ; Lee et al, 1999a, b)와 비교하면, 감도가 좋은 주파수가 다소 다르게 나타났으나 청각 문턱치의 곡선 모양은 V자 형태를 하고 있어, 블락도 특정 주파수 주변의 음에 대하여 감지능력이 높다는 것을 알 수 있었다. 이 실험 결과에서 실험어들을 유집하기 위한 음향어법개발 등 음향을 이용한 어군 행동제어는 200~300 Hz의 수중음, 특히 300 Hz의 수중음을 사용하는 것이 적당하리라고 생각된다. 이들 청각문턱치를 기초로 어종간의 비교를 쉽게 하기위한 청각 능력 지수를 산출하기 위해 이들을 (1)식에 대입하여 구한 청각 능력 지수는 Table 1과 같다.

자리돔은 배경 잡음시에 f_1 은 주파수 300Hz, f_2 는 주파수 105 Hz로 나타나므로 가청 범위를 나타내는 $(\frac{f_b}{Q_{10dB}})$ 은 주파수 415 Hz가 된다. 또한 자리돔은 배경 잡음시 f_b 는 주파수 300 Hz에서 음압 88dB

Table 1. The hearing index of experimental fishes

Species	Condition	f_b	f_1	f_2	$\frac{f_b}{Q_{10dB}}$	S_{fb}	Q_{10dB}	HI
black rockfish	Ambient noise	300	390	50	340	-4	0.88	29.1
	White noise	300	380	60	320	5	0.93	10.0
coralfish	Ambient noise	300	510	105	415	-12	0.72	81.0
	White noise	300	530	60	470	1	0.63	19.3

f_b : Frequency correspond to the most sensitive auditory threshold (Hz)

f_1 : Higher frequency correspond to the point of higher 10 dB than most sensitive auditory threshold (Hz)

f_2 : Lower frequency correspond to the point of higher 10 dB than most sensitive auditory threshold (Hz)

$\frac{f_b}{Q_{10dB}}$ = Frequency range on hearing (Hz), $f_1 - f_2$

S_{fb} : Sound pressure level at most sensitive auditory threshold (dB re 1μ bar)

$$Q_{10dB} = \frac{f_b}{f_1 - f_2}$$

HI : Hearing index

일 때 가장 낮은 청각 문턱치를 나타내고 있으므로, S_{θ} 는 음압 -12 dB(re 1 μ bar)가 된다. 따라서 배경 잡음시 자리돔의 청각 능력 지수는 81로 나타났고, 같은 방법으로 백색잡음 발생시는 10으로 나타났다.

볼락은 배경 잡음시에 f_1 은 주파수 390 Hz, f_2 는 주파수 50 Hz로 추정되므로 가청 범위를 나타내는

$$\left(\frac{f_b}{Q_{10dB}}\right)$$

은 주파수 340 Hz가 된다. 또한 볼락은 배

경 잡음 발생시 f_b 는 주파수 300 Hz에서 음압 96 dB일 때 가장 낮은 청각 문턱치를 나타내고 있으므로, S_{θ} 는 음압 -4 dB (re 1 μ bar)가 되어 배경 잡음시 볼락의 청각 능력 지수는 29.1로 나타났으며, 백색잡음 발생시는 19.3으로 추정되었다.

어류의 청각 능력 지수에 관하여 Hatakeyama (1992)는 다음의 5가지 이론을 제기했다. 즉, 부레를 가지고 있는 어류의 최대 청각 감도와 그 주파수의 관계에 관해서 1) f_b 가 높으면 S_{θ} 가 적고, 2) 당연히 청각 문턱치가 특출한 것은 청각 문턱치가 특출하지 않은 것보다 f_b 가 높고 S_{θ} 가 적으며, 3) 부레가 없는 어류는 청각 감도가 나쁘고, 4) 데이터가 적기는 하지만 해산어 중 청각 문턱치가 특출하지 않은 어류가 담수어 중 청각 문턱치가 특출하지 않은 어류보다 높은 f_b 와 낮은 S_{θ} 를 나타내는 경우가 많고, 5) 저층어는 표층어에 비해 f_b 가 낮은 경향이 있다고 정의했으며, 어류의 청각 문턱치는 각각의 실험방법에 따라 달라질 수 있으므로 어류의 청각 능력 지수 (HI)는 큰 범위내의 순서로밖에 논할 수 없으며, 일부를 제외하곤 대체적으로 청각 능력 지수가 10이하인 경우 음을 이용하지 않는다고 한다. 또 골표류와 비Specialist는 각기 청각 능력 지수가 비슷한 범위의 분포를 나타내지만 골표류 이외의 Specialist의 청각 능력 지수는 그 분포가 크게 나타나고 있다. 같은 과에 속하는 어류의 청각 능력 지수는 대체적으로 유사한 범위에 있으며, 같은 과의 어류의 일치성은 해산어보다 담수어에서 나타나고 있다고 한다.

Schellart and Popper (1992)에 의하면 Table 2와 같이 양볼락과의 어류는 청각 능력 지수가 15이상, 농어목은 68정도로 표시하고 있다. 이 실험에서 사용한 양볼락과인 볼락의 청각 능력 지수를 구해본 결과

Table 2. The hearing index of each species in the ambient noise

Species	f_b	HI
Black rockfish	300	29.1
Coralfish	300	81.0
Sevenband grouper ¹⁾	350	52.7
	300	15.6
Prionotus scitulus ²⁾	400	15
Epinephelus guttatus ²⁾	200	68

1) Yang (1999)

2) W.N. Tavolga and J. Wodinsky. (1963)

f_b : Frequency correspond to the most sensitive auditory threshold (Hz)

HI : Hearing index

Table 1에서와 같이 배경 잡음시에 대한 볼락의 청각 능력 지수는 29.1로 나타나고 농어목인 자리돔은 81 정도로 나타나 각 어류가 속한 양볼락목 및 농어목의 청각 능력 지수와 큰 차이가 없이 나타나고 있었다.

요 약

어종간의 청각능력을 비교할 수 있는 청각능력지수에 관한 기초자료를 구하고자 제주 연안해역에 서식하고 있는 볼락과 자리돔의 청각 능력 지수를 각 실험어의 청각문턱치 중 가장 낮은 문턱치를 나타내는 30 Hz를 기준으로 하여 구한 결과 자리돔과 볼락의 청각능력지수는 각각 29.1 과 81로 나타났으며 백색소음시는 각각 10.0과 19.3이었다.

참고문헌

- 박용석 · 이창현 · 문종욱 · 안장영 · 서두욱. 1999. 조피볼락의 청각문턱치. 수산해양교육연구, 11: 88-97.
- 양용수. 1999. 수중저주파음에 의한 농성어의 행동제어에 관한 기초적연구. 박사학위 논문, 제주대학교, pp. 43-46.
- 이창현 · 박용석 · 안장영 · 문종욱 · 서두욱. 1999a. 수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각능력 1. 청각 문턱치. 한국어업기술학회지, 35: 156-160.

- 이창현·박용석·문종욱·강창익·김고환·서두옥.
1999b. 수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각능력 2.
청각 임계비. 제주대학교 해양연구소 연구보고.
23: 73-79.
- Hatakeyama. Y. 1989. Masking effect on the hearing
of red sea bream. *Pagrus major*, by ambient
noise. Int. J. Aq. Fish. Technol., 1: 271-277.
- Ishioka. H., Y. Hatakeyama and S. Sakaguchi. 1988.
The hearing ability of the red sea bream *Pagrus
major*. Nippon Suisan Gakkaishi, 54: 947-951.
- Schellart. N.A.M. and A.N. Popper. 1992. The
Evolutionary Biology of Hearing. Functional
Aspects of the Evolution of the Auditory System
of Actinopterygian Fish. Springer Verlag. New
York. pp. 295-322.
- Schuijf. A and R.J.A. Buwalda. 1975. On the
mechanism of directional hearing in cod(*Gadus
morhua*). J. Comp. Physiol., 122: 1-8.
- Tavolga. W.N. and J. Wodinsky. 1963. Auditory
Capacities in Fishes. Pure Tone Thresholds in
Nine Species of Marine Teleosts. Bull. Am. Mus.
Nat. Hist., 126: 177-240.
- 畠山良己. 1992. 水中音に對する魚の聽覺能力. Fisheries
engineering. 28: 111-119.