

저주파음에 의한 자리돔의 청각 능력
2. 청각 임계비 및 청각능력지수

이 창 현·서 두 옥
제주대학교
(2000년 11월 3일 접수)

**The Hearing Ability of Coralfish *Chromis notatus*
to Low Frequency Sound**
2. The Auditory Critical Ratio and Hearing Index

Chang-Heon LEE and Du-Ok SEO

Cheju National University

(Received November 3, 2000)

Abstract

In order to obtain the fundamental data on the auditory thresholds of fishes for catching method using low frequency sound, the auditory thresholds of coralfish *Chromis notatus* were measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of 73~83dB re 1μPa/√Hz by heartbeat conditioning technique using pure tones coupled with a delayed electric shock. Critical ratios were about 23~41dB at measurement frequency. The critical ratio increased almost linearly with increasing frequency from 500Hz. The noise spectrum level at the start of masking was about 60~65dB. This suggests that hearing of coralfish is masked in the natural environment with the noise spectrum level above 60dB. The sound pressure level of which the signal sound of 300Hz is recognized by coralfish under the ambient noise is above 88dB and the critical ratio of them is above 23dB. The hearing index of coralfish with ambient noise was 81.

서 론

수중에서의 정보 전달 신호로서는 음파가 다른 매체보다 그 이용 범위가 넓다는 장점을 갖고 있어 음파의 전달 범위나 속도, 사용 가능 시간 등을 고려하면 빛, 전자파보다도 효과적인 제어 수단이 될 수도 있다. 그러나, 바다 속에는 선박, 항공기 등의 인공소음과 그곳에 서식하는 생물 자신이 내

는 소리, 파랑, 강우 등 다중 다양한 소리가 포함되어 있기 때문에 실제의 어류는 자연 발생적인 수중 소음과 인위적으로 발생하는 수중 소음 둘다 존재하는 서식 환경에서 생활하고 있다.

따라서 어류의 청각은 이들 배경 잡음의 영향을 받아서 작은 음은 듣기 어려운 상태가 되어 청각 문턱치가 증가하게 된다. 이와 같이 수중에는 여러 요인에 의해서 발생하는 배경 잡음이 항상 존

재하고, 그 레벨도 변동하기 때문에 수중음을 이용하여 어류를 유집하기 위한 음향어법을 개발하기 위해서는 대상 어류의 청각 특성을 정확히 파악할 필요가 있는데, 이와 관련하여 어류의 마스킹 현상 측정이 중요하며, 붕어류 (Tavolga, 1974), 대서양 연어 (Hawkins *et al.*, 1978), 대구 (Chapman *et al.*, 1973), 방어 (안 등, 1999), 조피볼락 (박 등, 2000) 등 많은 연구자들에 의해 오래 전부터 다각적인 연구가 수행되고 있다.

이 연구에서는 제주 연안해역에 있어서 수중 음향을 이용하여 어구어법 개발에 관한 기초자료를 제공할 목적으로 연안 가까이에서 군을 이루어 서식하는 어종인 자리돔의 청각 문턱치 실험결과를 기본으로 하였다. 순음을 마스킹하는 백색잡음 스펙트럼레벨을 단계별로 변화시켜가면서 자리돔의 청각 문턱치를 측정하여 청각 임계비 및 청각능력지수를 계산함과 동시에 마스킹이 발생하는 백색잡음의 스펙트럼레벨에 관해서 조사·분석하였다.

재료 및 방법

1. 실험어 및 실험장치

실험어인 자리돔 *Chromis notatus*의 전장은 80~110mm였으며, 들망으로 어획한 것을 연구소 수조로 옮겨 일정기간 이상 사육중인 것을 9마리 사용하여 실험하였고, 실험 기간은 1~2월에 실시하였으며, 실험중의 수온은 7~14°C였다. 실험 수조에 설치후 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 배경잡음 및 백색잡음의 주파수분석은 실험전에 실험시간대에 있어서 반복 측정하였다.

어류의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 박 등(2000)과 같이 수조벽면에서 5cm 떨어진 지점 양쪽에 공중스피커(Promana, CB38)와 전력증폭기(Inkel, PSR-2000)를 설치하여 신호 발생기(NF, 1595)

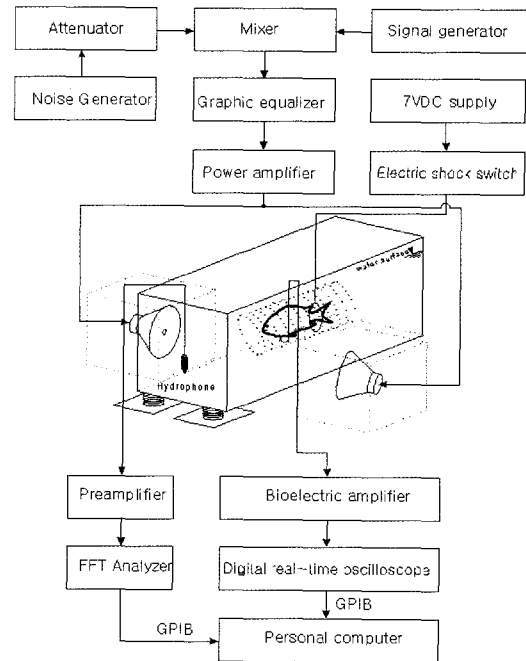


Fig. 1. Block diagram of the instruments for measuring auditory threshold of coralfish.

의 신호음이 동위상으로 방성될 수 있도록 설치한 후 잡음발생기(B&K, 1405)와 함께 믹서(Inkel, MX-642)에 연결하여 신호음과 백색잡음을 동시에 방성할 수 있도록 하였다. 이때 백색잡음은 수중에서 주파수가 높아짐에 따라 감쇄가 많아지므로 1kHz까지 음압분포가 일정하도록 이퀄라이저(Inkel, EQ-9231)를 통하여 스피커에 연결하였고, 심전도 도출용 낚시바늘로 마취시킨 자리돔의 위심강 부근에 낚시 끝 부분을 삽입하였으며, 실험어의 심박간격은 오실로스코프(Tektronix, TDS-340)를 사용하여 측정하였다.

2. 실험방법

어류의 음향 조건 학습 및 청각 임계비를 측정하기 위한 음향자극원으로는 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800Hz의 순음을 이용하였으며, 주파수 300Hz의 순음을 약 120dB(0 dB re 1μPa)의 음압과 함께 직류 전압 7V의 전기 자극을 실험어에게 주면서 음향 조건 학습을 시켰다.

실험어 음향 조건학습의 음방성 방법은 실험어

Table 1. Specifications of instruments used for measurement and analysis of auditory thresholds

Equipment	Specification
Hydrophone (B&K, 8104)	Voltage sensitivity : $-205dB$ re $1V/\mu Pa$ Frequency range : $0.1Hz$ to $120kHz$ Horizontal directivity $100kHz$: $\pm 2dB$
Preamplifier (B&K, 2635)	Amplifier sensitivity : $0.01mV$ to $10V/pC$ corresponding to -40 to $+80dB$ Frequency range : $2Hz$ to $100kHz$
FFT analyzer (B&K, 2143)	Frequency range : $0.7Hz$ to $22.4kHz$ Averaging time : $1ms$ to $1hours$ with a resolution of $1ms$ Maximum rating : $7.5V$ peak, $50V$ DC
Bioelectric amplifier (NK, VC - 11)	Sensitivity : AC $10\mu V$ to $20mV/DIV$, DC $2mV$ to $5V/DIV$ Internal noise level : $5\mu Vpp$ or less
Digital real-time oscilloscope (Tektronix, TDS - 340)	Resolution : $8bit$ Maximum sampling velocity : $500m$ samples/s Analog bandwidth : $100MHz$
Power supply (Tektronix, PS2520G)	Output rating : $0V$ to $72V$, $0A$ to $1.5A$ Resolution : Voltage $10mV$, Current $1mA$
Signal generator (NF, 1915)	Frequency range : $1\mu Hz$ to $2MHz$ Output range : $2V$ or $20V$ switchable Resolution : $2V$ range AC $0.01mVpp$, $20V$ range AC $0.1mVpp$
Power amplifier (Inkel, PSR - 2000)	Frequency range : $20Hz$ to $20kHz$, $\pm 0.5dB$ Output rating : $500W$ per channel with 8Ω
White noise generator (B&K, 1405)	Frequency range : White noise $20Hz$ to $100kHz$, Pink noise (White noise decreasing $3dB/Octave$) $20Hz$ to $50kHz$ Output load impedance : $\geq 5K\Omega$
Attenuator (Kenwood, RA - 920)	Frequency range : DC to $1MHz$ Attenuation range : 0 to $121dB$, $0.1dB$ step Maximum input level : $17Vrms$
Mixer (Inkel, MX - 642)	Frequency range : $20Hz$ to $20kHz$ Maximum output level : $+20dB$ Maximum voltage gain : $84dB$
Graphic equalizer (Inkel, EQ - 9231)	Frequency range : $20Hz$ to $20kHz$ Equalizer level : $\pm 12dB$ S/N ratio : upper $80dB$

의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 이 등(1999)과 같이 지속시간 5초간의 $300Hz$ 순음을 방성하면서, 방성 개시 3초 후에 지속시간 0.1초의 직류 전압 $7V$ 의 전기자극을 가하였고 음방성시 심박간격의 변화가 연속적으로 3회 이상 나타나도록 학습을 완료하였다. 학습완료후 학습음보다 $3\sim 5dB$ 씩 음압을 감소시켜 방성하면서 심박간격을 관찰하였는데 이때 방성음에 어류가 반응을 나타내었을 경우 학습효과를 지속시키기 위하여 전기자극을 주었으며, 이와 같은 방법으로 자리돔의 청각 문턱치를 구한 후 백색잡음을 방성하면서 백색잡음 방성시의 청각 문턱치를 측정하였다. 청각 문

턱치의 우연오차를 줄이기 위하여 같은 음압에서 2회 이상 반응이 나타났을 경우에 청각 문턱치로 하였으며, 측정 결과값 중 다소 의외의 값은 청각 문턱치에서 제외시켰다.

이때 사용한 백색잡음의 레벨은 참돔의 청각 문턱치(Hatakeyama, 1989)에 영향을 미치는 배경잡음의 스펙트럼 레벨을 약 $70dB$ 이상으로 보고한 것을 근거로 하여 이 실험에서는 백색잡음의 스펙트럼 레벨(S)을 음압 $73, 78, 83dB$ 의 3단계로 설정하여 사용하였다. 자리돔의 청각 임계비(Critical Ratio : CR) 측정은 청각 문턱치에 사용한 신호음의 주파수 음압을 T, 백색잡음의 스펙트

럼 레벨을 S라 할 때 T-S로 나타내었다.

또한 어류의 상호간 청각 능력을 쉽게 비교하기 위한 Schellart *et al.*(1992)의 청각 능력 지수 (hearing index, HI)를 산출하는 방법 (1)을 이용하여 자리돔에 대하여도 청각 능력 지수를 산출하였다. 청각 능력 지수의 산출은 이미 구해진 실험어의 배경 잡음의 청각 문턱치를 기준으로 하여 구하였다.

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

여기서 f_b 는 청각 문턱치가 가장 낮은 주파수, $Q_{10dB} = \frac{f_b}{f_1 - f_2}$ 으로 $f_1 - f_2$ 은 가장 낮은 청각문턱치를 나타내는 주파수보다 10dB 더 높은 청각문턱치를 나타내는 전 (f_1)· 후(f_2)주파수의 차를 나타낸다. 또한 S_b 는 가장 낮은 청각문턱치 값을 갖는 주파수에서의 음압을 CGS 단위로 나타낸 청각문턱치 값을 나타낸다. 이상에서와 같이 (1)식에서 전항 $\left(\frac{f_b}{Q_{10dB}}\right)^{0.5}$ 은 해당 어류의 가청 주파수 범위를, 뒤쪽 항 $10^{\left(\frac{-S_b}{20}\right)}$ 은 청각 감도를 표현하는 무차원 함수이다.

결과 및 고찰

1. 백색잡음 및 청각문턱치

청각 임계비 측정을 위해 백색 잡음 발생시에 측정된 실험 수조내의 백색 잡음 레벨 및 청각 문턱치를 측정된 결과는 Fig. 2와 같다. 배경 잡음 레벨은 전원의 영향을 많이 받는 주파수 60Hz에 피크를 보였으나 주파수가 높아질수록 감소하고 있었다. 백색 잡음 레벨의 변화에 따른 실험어의 청각 문턱치를 측정하기 위하여 감쇠기를 이용한 백색 잡음 레벨은 전기 잡음이 포함된 주파수 60Hz를 제외하고 거의 평평한 주파수 특성을 나타내고 있었다.

백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 음압 73dB, 78dB, 83dB로 단계적으로 변화시켰을 때 자리돔

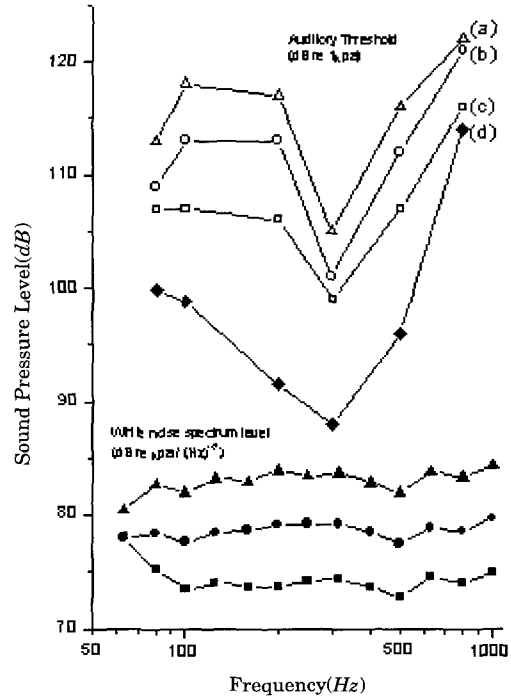


Fig. 2. Audiogram of coralfish with white noise spectrum level.

- a) Auditory threshold (Δ) with white noise spectrum level of 83dB(\blacktriangle).
- b) Auditory threshold (\circ) with white noise spectrum level of 78dB(\bullet).
- c) Auditory threshold (\square) with white noise spectrum level of 73dB(\blacksquare).
- d) Auditory threshold (\blacklozenge) with ambient noise.

의 청각 문턱치는 백색 잡음 발생전과 백색 잡음 발생후의 청각 문턱치를 비교하면 백색 잡음의 음압 상승에 따라 청각 문턱치도 증가하는 경향이 보여 각각의 백색 잡음스펙트럼 레벨에서 모든 측정 주파수대에 대해 백색 잡음 발생전보다도 청각 문턱치가 증가하여 명확히 마스킹이 일어나고 있었다. 특히 자리돔은 측정 주파수 200Hz에서 마스킹 현상이 뚜렷이 나타나며 백색 잡음을 음압 83dB로 방성하였을 때 정숙시에 비하여 음압이 최저 9~27dB 정도 증가하여 전체 측정 주파수에서 백색 잡음에 의한 영향이 현저하였다. 음압 레벨이 가장 적은 음압 73dB의 백색 잡음 발생시에도 차이를 보이고 있었으나 측정 주파수 800Hz에서는 그 차이가 크지는 않았다.

2. 청각 임계비

Fig. 3은 백색 잡음으로 신호음을 마스킹하였을 때의 청각 임계비이다. 자리돔의 청각 임계비는 측정 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz에서 각각 음압이 31dB, 35dB, 33dB, 23dB, 34dB, 41dB로 되어 측정 주파수 300Hz, 음압 23dB를 제외하고는 측정 주파수에 따른 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨과의 차는 크게 나타나지 않았고, 자리돔의 청각이 백색 잡음에 의해서 마스킹된 상태에서는 각각의 백색 잡음 스펙트럼 레벨보다 음압 23~41dB 정도로 나타나고 있어 측정 주파수의 소리를 인식하기 위해서는 음압이 백색 잡음 레벨보다 청각 임계비 이상 높지 않으면 어려운 것으로 판단되며, 이들 실험어의 청각 임계비는 측정 주파수가 높을수록 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 차가 크게 나타났다.

3. 청각문턱치와 백색잡음 스펙트럼레벨과의 관계

자리돔의 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨과의 관계를 측정 주파수마다 정리한 것이 Fig.

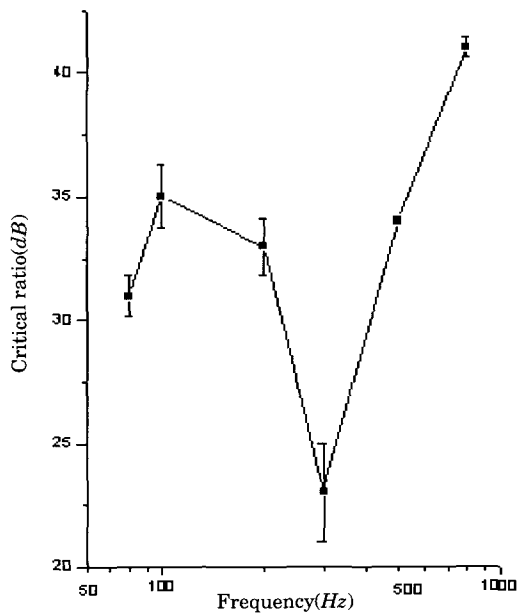


Fig. 3. Critical ratio of coral fish.

4이다. 자리돔은 전체 측정 주파수에 있어서 일정 레벨 이상에서는 백색 잡음의 스펙트럼 레벨 상승에 따라 청각 문턱치도 증가하는 모양을 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 백색 잡음을 발생하지 않을 때의 청각 문턱치와 측정 주파수의 청각 임계비를 함께 포함할 수 있도록 측정주파수의 일부를 그래프상에 2개의 직선으로 표시할 경우 청각 문턱치를 종축, 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 횡축으로 하여 각각의 관계를 기울기 1인 회귀직선으로 나타낸 결과 측정 주파수 100Hz와 같은 일부 측정 주파수에서의 청각 문턱치가 청각 임계비의 직선에서 이탈한 것이 보이지만 대략적으로 직선에 가까이 있었다. 자리돔은 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 관계에서는 어느 정도의 백색 잡음 레벨까지는 청각 문턱치가 변하지 않고 일정하게 되지만 그 이상의 백색 잡음 레벨에서는 백색 잡음 증가분 만큼 청각 문턱치도 증가하였다. 2개의 직선의 교점에서 자리돔의 청각에 영향을 미치기 시작하는 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 구하면 Fig. 5와 같이 자리돔의 경우는 측정 주파수 200 Hz, 음압 57dB 이상일 경우 백색 잡음에 의한 영향이 나타났고 그 외 측정 주파수에 있어서는 62~73dB 이상에서 백색 잡음에 의한 마스킹이 발생하여 청각 문턱치가 증가하고 있었다. 어류의 경우 일반적으로는 청각 문턱치의 음압과 배경 잡음 스펙트럼 레벨과의 차이 즉 청각 임계비가 음압 15~25dB 정도이면 어류는 배경 잡음과 구별하여 감지할 수 있다(Hatakeyama, 1989)고 한다.

또 일반적으로 청각 문턱치의 측정에 사용된 실험어는 공급지역이 같고, 그 사육 장소에 있어서 음 환경도 전체적으로 같은 조건에서 서식하였던 것을 주로 사용한다. 그러나 동일 어류라도 배경 잡음이 큰 환경하에서 장기간에 걸쳐 성장한 어류와 조용한 환경에서 성장한 어류에서는 음감수성이 달라질 것이다. 이 실험에서 사용한 실험 수조와 사육 수조의 배경 잡음 레벨을 비교하면, 모든 주파수대에서 사육 수조의 배경 잡음 레벨이 실험 수조의 배경 잡음 레벨보다 음압 17~30dB 이상 높게 나타났다. 특히 실험어의 음 감지 능력이 높은 주파수 100~300Hz에서는 사육 수조의 배경 잡음 레벨이 실험 수조의 배경 잡음 레벨보다 약

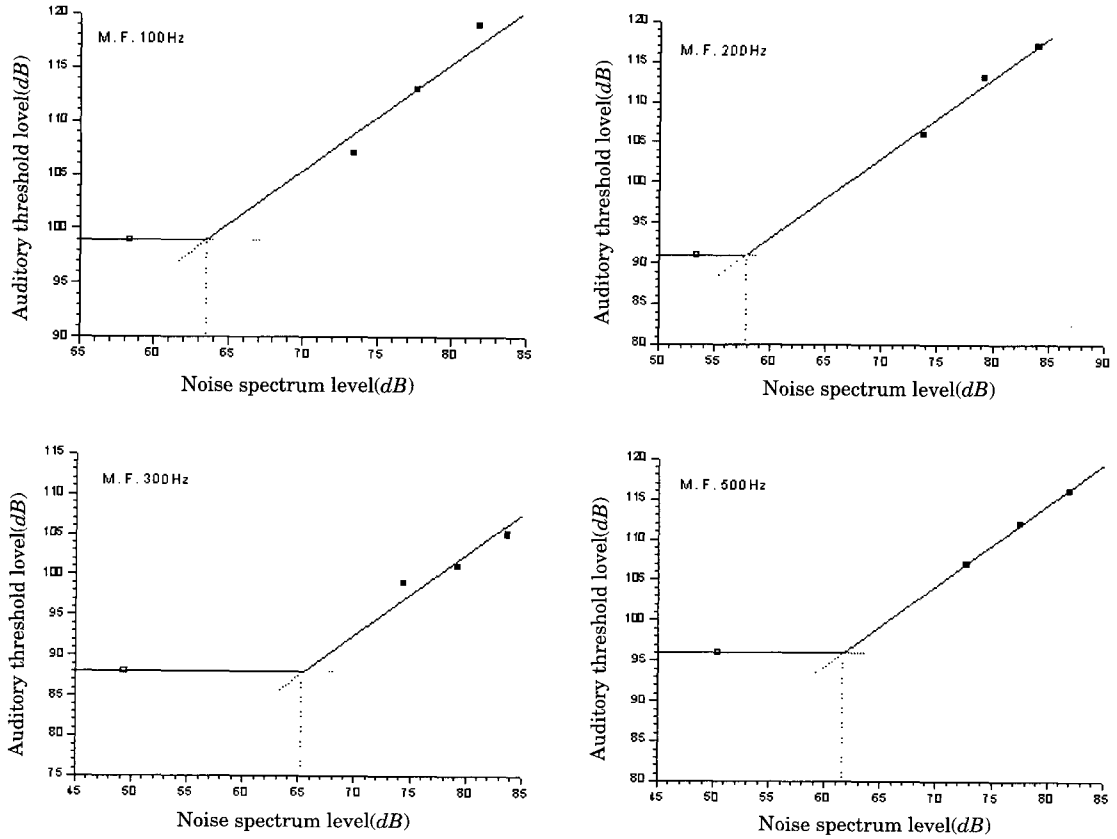


Fig. 4. Relation between auditory thresholds and noise spectrum levels of corafish at measurement frequencies of 100Hz - 500Hz.

□ : Without white noise, ■ : With white noise.

30dB 이상 높게 나타나고 있었다. 또한 일반적인 바다에서의 수중 잡음과 비교하면 주파수 100Hz에서 음압이 약 10dB, 그리고 주파수 1,000Hz에서 음압이 약 20dB 정도 높은 상태이다. 이러한 배경 잡음 레벨의 측정은 일시적으로 이루어졌지만 사육 수조는 항상 비슷한 소음이 존재하고 있는 것으로 판단된다. 小島(1997)는 주변 환경 소음이 다른 장소에서 생활한 같은 크기의 참돔의 청각 문턱치가 서로 다르게 나타나 주변 환경 소음에 따라 청각 문턱치가 다르다고 보고하고 있다. 따라서 이 실험에서 사용한 각각의 실험어에 있어서 사육시의 음 환경이 청각 능력에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되지만 이 실험에서는 그에 따른 측정 결과가 없어 이후 연구 필요성이 요구된다. 실험에서 사용한 자리돔의 경우도 수온이

낮은 9°C때의 청각 문턱치는 수온 14°C에서 측정된 청각 문턱치보다 다소 높게 나타나는 경향이 있어 실험어는 수온에 의한 영향이 있을 것으로 판단된다. 또한 체장의 크기에 따라 청각 문턱치가 다를 수가 있으므로 이후 이들 각 개체의 체장과 수온과의 관계를 명확히 하는 것이 필요하다.

실험어의 청각 특성을 파악하기 위하여 이들의 청각 문턱치를 기초로 하여 청각 능력 지수를 산출한 결과 자리돔은 배경 잡음시의 자리돔의 청각 능력 지수는 81로 나타났다. 어류의 청각 문턱치는 각각의 실험방법에 따라 달라질 수 있으므로 어류의 청각 능력 지수(HI)는 큰 범위내의 순서로 밖에 논할 수 없다. 일부를 제외하곤 대체적으로 청각 능력 지수가 10이하인 경우 음을 이용하지 않는다고 한다. 또 골표류와 비 Specialist는 각기

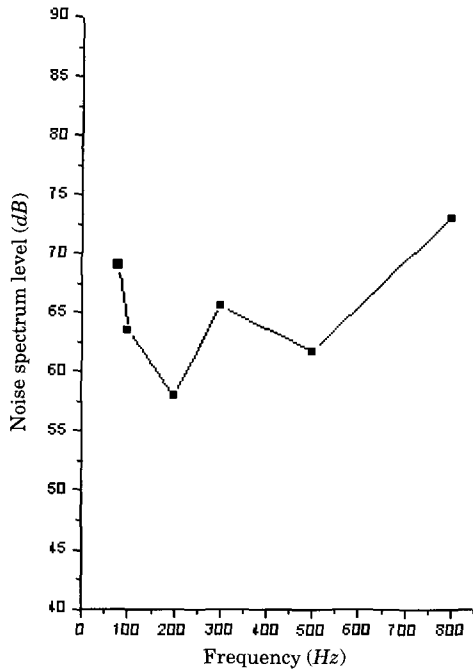


Fig. 5. Minimum noise spectrum levels(0dB re $1\mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) of masking of coralfish at frequencies of 80Hz~800Hz.

청각 능력 지수가 비슷한 범위의 분포를 나타내지만 골표류 이외의 Specialist의 청각 능력 지수는 그 분포가 크게 나타나고 있고 같은 과에 속하는 어류의 청각 능력 지수는 대체적으로 유사한 범위에 있으며, 같은 과의 어류의 일치성은 해산어보다 담수어에서 나타나고 있다고 한다.

Schellart *et al.*(1992)에 의하면 농어목은 청각 능력지수가 68정도로 표시하고 있다. 이 실험에서 사용한 자리돔은 대략 81정도로 나타나 실험이 가속한 농어목의 청각 능력 지수와 큰 차이가 없이 나타나고 있었다.

요 약

제주 연안역에 있어서 수중 가청 저주파수음을 이용한 자원관리형 어업, 또한 어장에서 음향을 이용하여 어류를 유집할 수 있는 음향 어법 개발의 기초 자료를 얻기 위해 자리돔을 대상으로 측정 주파수 80~800Hz의 수중음과 7V의 직류 전원의 전기 자극을 이용하여 육상 수조에서 조건

학습을 시킨 후 측정 주파수와 음압을 임의로 변화시켜 가면서 실험어 심전도를 도출하여 심박 간격의 변화로부터 청각 문턱치 곡선과 함께 백색 잡음에 의한 청각 임계비 및 청각 능력 지수를 조사한 결과는 다음과 같다.

자리돔의 청각 임계비는 측정 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz에서 음압이 각각 31dB, 35dB, 33dB, 23dB, 34dB, 41dB 이고, 음압 73dB, 78dB, 83dB의 3단계 백색 잡음을 방성하였을 때 청각 문턱치는 백색 잡음이 없을 때보다 높게 나타나며 마스킹 효과가 측정 주파수 100Hz, 200Hz, 300Hz에서 보다 뚜렷하게 나타났다. 마스킹 현상은 약 음압 60~65dB의 백색 잡음 레벨에서 나타나기 시작하였으나, 측정 주파수 200Hz에서는 음압 57dB 이상에서, 측정 주파수 800Hz에서는 73dB 이상의 백색 잡음 레벨에서 나타났으며 주파수 측정 주파수 300Hz에서 신호음을 인식하기 위해서는 대략 음압 88dB 이상과 함께 백색 잡음 레벨보다 음압 23dB 이상 높은 신호음이 요구되었으며 배경 잡음시 자리돔의 청각능력지수는 81로 나타났다.

참고문헌

- 안장영 · 이창현 · 김용주 · 박용석(1999) : 연안정치망 주요대상어종의 청각 역치와 유집방음에 대한 행동 반응(II) -방어의 임계비-, 한국어업기술학회지, 35(1), 19~24.
- Chapman, C. J. and Hawkins, A.D.(1973) : A field study of hearing in the cod, *Gadus morhua L.*, *J. Com. Physiol.*, 85, 147~167.
- 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.
- Hawkins, A. D. and Johnstone, A. D. F.(1978) : The hearing of the Atlantic salmon, *Salmo salar*, *J. Fish. Biol.*, 13, 655~673.
- 小島隆人(1997) : マダイの周波数別および方向別聴覚値, *日水誌*, 63, 112~113.
- 박용석 · 이창현 · 김고환 · 서두옥(2000) : 조피볼락의 청각 임계비, 한국수산해양교육학회, 12(1), 1~10.

Schellart, N. A. M. and Popper, A. N.(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.

Tavolga, W. N.(1974) : Signal/noise ratio and the critical band in fishes, J. Acoust. Soc. Am., 55, 1323~1333.