

해양목장 대상 어류의 음향순치에 관한 기초적 연구

1. 돌돔의 청각 특성

김성호 · 이창헌 · 서두옥* · 김용주*
제주대학교 해양산업공학부, *여수대학교 실습선

A Basic Study on Acoustic Conditioning of Fish Suitable for a Marine Ranch

1. The Sound Sensitivity of Japanese Parrot Fish *Oplegnathus fasciatus*

Seong-Ho KIM, Chang-Heon LEE, Du-Ok SEO and Yong-Ju KIM*

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

*Training Ship, Yosu National University, Yosu 550-749, Korea

Developing base data on luring fish schools into netting position by the use of underwater audible sound on Japanese parrot fish *Oplegnathus fasciatus* found in the coastal waters of Jeju Island, S. Korea. Auditory threshold was determined by the heartbeat condition technique using pure tones coupled with a delayed electric shock. The audible range of Japanese parrot fish extended from 80 Hz to 500 Hz with a peak sensitivity at 200 Hz. The mean auditory thresholds at the frequencies of 80 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz and 500 Hz were 104 dB, 95 dB, 91 dB, 99 dB and 113 dB, respectively. As the frequency became higher than 200 Hz, the auditory threshold increased almost linearly with increasing frequency. Critical ratios of fishes measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of 69~78 dB (0 dB re 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$) ranged from 21 dB to 40 dB at test frequencies. The noise spectrum level at the start of masking was about 70 dB within the test frequency range. The sound pressure level of 100~200 Hz recognized by Japanese parrot fish under the ambient noise is above 91 dB and the critical ratio for them is above 21 dB.

Key words: Hearing ability, Japanese parrot fish, Underwater audible sound, Auditory threshold, Critical ratio

서 론

수중에서의 정보의 전달은 광파, 전자파, 음파가 사용될 수 있는데, 음파가 전달되는 과정에서 감쇠가 적어 전달 범위나 속도, 사용가능시간 등을 고려하면, 광파, 전자파보다도 효과적인 제어 수단이 될 수 있다. 이러한 수중 음향은 초음파를 이용한 어군탐지, 해양 관측뿐만 아니라 가청음을 이용한 어군의 행동 제어, 특히 해양 목장에서 음향 순치의 주요 수단으로서 활용된다. 어장에서 수중 음향을 이용하여 어군을 유집 및 수동식 어군탐지기를 개발하기 위해서는 대상 어종의 청각 능력을 정확히 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 Chapman and Hawkins (1973)의 대구, Ishioka et al. (1988)의 참돔, Park et al. (1999)의 조피볼락, Lee et al. (1999)의 쏨뱅이, Lee and Seo (2001)의 볼락 등 오래전부터 여러 어종의 청각 능력에 관련된 연구가 수행되었다.

이러한 연구들은 어류가 갖고 있는 청각 능력을 이용하여 행동 제어를 하는 것이므로, 수중 가청음을 이용하여 어군 행동 제어를 하는 경우에 있어서는 어류의 청각 능력이 어종마다 다르기 때문에 대상 어류에 대한 기초적인 청각 능력을 명확히 하는 것이 필요하다.

어류의 가청 주파수가 16~5,000 Hz 범위이나, 주파수 100~1,000 Hz의 범위에서 가장 민감한 반응을 나타내지만, 실제로 어류는 자연 발생적인 수중 잡음과 인위적으로 발생하는 수중 잡음이 존재하는 환경에서 서식하기 때문에 어류의 청각은 수중에서 발생하는 주위의 잡음에 의해서 영향을 받는다. 잡음이 클 경우는 작은 음을 듣기 어렵게 되는 마스킹 현상이 발생하는데, 수중음을 이용하여 어류를 순치시키고, 행동을 제어하기 위해서는 대상 어종에 대한 청각문턱치뿐만 아니라 배경 잡음에 의한 마스킹 효과를 충분히 조사하는 것이 중요하다 (Hatakeyama, 1992).

잡음에 의한 마스킹을 조사하는 방법으로 청각 임계비 (Critical ratio)가 많이 이용되어지고 있는데 이것은 백색잡음이 순음을 마스킹했을 때 청각 문턱치에서 스펙트럼레벨을 감한 것으로 간단히 측정할 수 있고 신호음을 들을 때의 잡음의 영향을 쉽게 평가할 수 있는 특징이 있다.

이 연구에서는 제주 연안해역에 있어서 바다목장의 음향순치 대상 어류로 이용할 수 있는 돌돔의 청각문턱치 및 잡음스펙트럼레벨을 단계별로 변화시켜 가면서 돌돔의 청각문턱치를 측정하여 임계비를 측정함과 동시에 마스킹이 발생하는 잡음의 스펙트럼레벨에 관해서 조사하였다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-00253)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding author: seoduok4@cheju.cheju.ac.kr

재료 및 방법

실험어

실험어인 돌돔 *Oplegnathus fasciatus*은 제주연안에서 정치망에서 어획하여 제주대학교 해양과 환경연구소의 사육수조로 옮겨 약 3~4개월 사육한 후 사육수조에서 실험수조로 옮겨 약 12시간 이상 지난 다음 청각능력 측정 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 실험어 8마리의 체장은 114~175 mm였으며, 이 때, 사육중의 수온은 13.5~28.0°C, 실험 기간 중의 수온은 20~24°C였다.

실험 장치 및 방법

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

돌돔의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험 장치 및 방법은 Lee and Seo (2000, 2001)와 같이 수조 벽면에서 5 cm 떨어진 지점에 양쪽에 공중 스피커 (Promana, CB38)를 설치하고 신호 발생기 (NF, 4500)의 신호음이 동위상으로 방성될 수 있도록 한 후 잡음 발생기 (B&K, 1405)와 함께 믹서 (INKEL, MX-642)에 연결하여 신호음과 백색 잡음을 동시에 방성할 수 있도록 하였다. 이때 백색 잡음은 수중에서 주파수가 높아짐에 따라 감쇠가 많아지므로 주파수 1 kHz까지 음압 분포가 일정하도록 이퀄라이저 (INKEL, EQ-9231)를 통하여 스피커에 연결하였으며, 심전도 도출용 낚시바늘로 마취시킨 돌돔의 아가미 아래 뒤쪽 부근에 낚시 끝 부분을 삽입한 후, 돌돔의 심박 간격은 오실로스코프 (Tektronix, TDS-340)를 이용하여 측정하였다.

음향 학습

어류의 음향 조건학습 및 청각 특성을 측정하기 위하여 사용한 음향자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz의 음을 이용하였으며, 측정주파수 중 임의의 하나의 순음을 약 120 dB (0 dB re 1 μ Pa) 이상의 음압과 함께 직류 전압 8 V의 전기 자극을 돌돔에게 주면서 조건 학습시켰다 (Lee and Seo, 2000).

어류 음향 조건학습의 음방성 방법은 돌돔의 심박간격이 안정 상태를 나타낼 때 지속시간 5초간의 순음을 임의의 순서로 방성하였으며, 방성개시 3초 후에 지속시간 0.1초의 전기 자극을 가하면서 학습을 시켰다. 이와 같은 조건학습에 대한 어류의 반응의 판정은 음자극을 주기 전보다 음자극을 주었을 때의 심박 간격이 넓었을 때를 반응이 있는 것으로 하였다.

실험 주파수중 임의의 한 주파수에 대해 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.

청각 특성 측정

음향 조건 학습을 완료시킨 후 약 30분 이상 경과한 후 조건학습에 사용한 순음을 포함한 측정주파수를 학습에 사용한 음압에 서부터 3~5 dB씩 음압을 감소시켜 방성하면서 심박 간격을 관찰하였다. 이때 방성음에 대하여 돌돔이 반응을 나타내었을 경우 학습 효과를 지속시키기 위하여 전기 자극을 주었으며, 이와 같은 방법으로 돌돔이 감지할 수 있는 가장 낮은 음압을 돌돔의 청각 문턱치로 취한 후 다시 순음 방성 1~2분 전에 백색 잡음을 방성하였다. 백색 잡음 방성중 측정 주파수의 음압을 높이면서 청각 임계비를 측정하기 위한 청각문턱치를 측정하였다. 이들 각각의 청각 문턱치는 우연 오차를 줄이기 위하여 같은 음압에서 2회 이상 반응이 나타났을 경우에 청각 문턱치로 하였으며, 측정 결과값 중 다소 외의 값은 청각 문턱치에서 제외시켰다.

배경 잡음이 어류의 청각능력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 사용한 백색 잡음의 레벨은, 참돔의 청각 문턱치 (Hatakeyama, 1989)에 영향을 미치는 배경 잡음의 스펙트럼 레벨을 약 70 dB 이상으로 보고한 것을 근거로 이 실험에서는 백색 잡음의 스펙트럼 레벨 (S)을 3단계로 설정하여 사용하였다. 돌돔의 청각 임계비 측정은 청각 문턱치에 사용한 신호음의 주파수 음압을 T, 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 S라 할 때 T-S로 나타내었다.

결과 및 고찰

실험시에 측정된 실험수조 안의 잡음 스펙트럼레벨과 돌돔의 청각문턱치 측정 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 잡음 스펙트럼레벨은 60 Hz에서 약 85 dB (0 dB re 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$)이었고 주파수가 높아질수록 감소하고 있었으며 청각 문턱치와 배경잡음 스펙트럼레벨과의 레벨차는 대략 최소 30 dB 정도이고 청각감도가 나빠지는 고주파대에서는 약 70 dB 이상이므로 청각문턱치 측정에는 영향이 없는 것으로 판단되고, 또 측정시각의 차이에 따른 배경잡음 스펙트럼레벨의 변동에 따른 편차는 적게 나타났다. 돌돔의 청각 임계비를 측정하기 위하여 사용한 백색 잡음 스펙트럼 레벨은 전기 노이즈가 포함된 주파수 60 Hz를 제외하고 거의 일정하게 나타나고 있었다. 또 백색잡음의 스펙트럼레벨을 약 69, 73, 78 dB 정도의 3단계의 스펙트럼레벨로 발생시켰을 때 각각의 배경잡음 스펙트럼레벨은 80, 100 Hz 등 일부 주파수에 대해서는 사용한 장치의 전기적 잡음이 다소 포함되어 단계별 레벨사이의 폭이 일정치 않은 것으로 판단되지만, 그 외는 대략적으로 일정한 간격을 나타내고 있었다.

돌돔은 측정 주파수 80~800 Hz까지의 학습음을 인식하고 있었는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이 돌돔의 평균 청각 문턱치는 측정 주파수가 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz일 때 음압이 각각 104, 95, 91, 99, 113, 123 dB이었다. 측정 주파수 200 Hz에서 음압 91 dB로 가장 낮았고 측정 주파수 800 Hz에서 음압 123 dB로 가장 높게 나타내고 있었고, 측정 주파수 300 Hz부터 주파수가 높을수록 청각 문턱치가 높아지고 있기 때문에 300 Hz 이상이 되면 청각 감도가 급격하게 나빠지고 있는 것으로 판단된다.

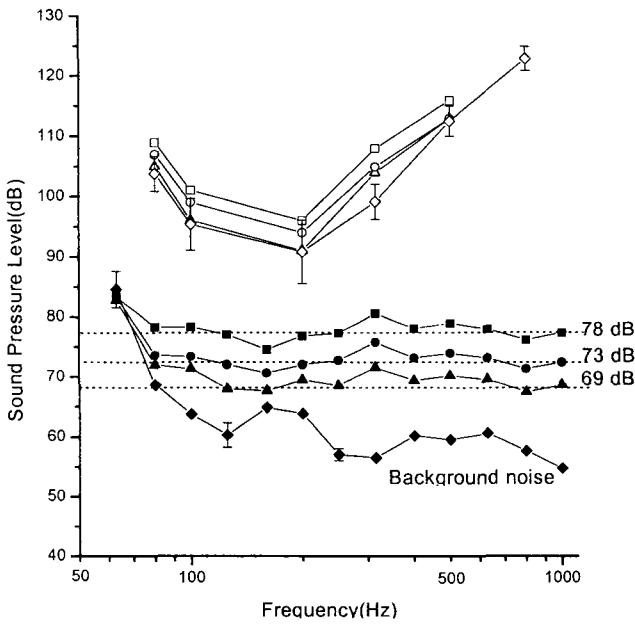


Fig. 1. Audiogram of Japanese parrot fish under white noise and the background noise.
Open mark: Auditory threshold (0 dB re 1 μ Pa).
Close mark: Noise spectrum level (0 dB re 1 μ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$).

Fig. 1에서처럼 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 각각의 단계적으로 변화시켰을 때 백색 잡음 발생전과 잡음 발생후의 청각 문턱치를 비교하면 백색 잡음의 상승에 따라 청각 문턱치의 값도 증가하는 경향이 보여 각각의 잡음 스펙트럼 레벨에서 모든 측정 주파수대에 대해 백색 잡음 발생전 보다도 청각 문턱치가 증가하여 명확히 마스킹 현상이 일어나고 있었으나 백색잡음 레벨이 가장 낮은 단계인 경우 백색 잡음 발생 전후의 청각 문턱치에는 차이가 뚜렷하지 않았다. 특히, 주파수 300 Hz에서의 백색잡음 레벨이 다른 주파수대의 백색잡음보다 높게 나타나고 있는 관계로 청각 문턱치도 높게 나타나고 있었을 뿐, 이 경우 백색 잡음에 의한 마스킹 현상은 거의 나타나지 않고 있었다.

돌돔의 청각 임계비를 구하기 위하여 Fig. 1에 보이듯이 각각의 백색 잡음 발생시에 측정된 청각 문턱치에서 백색잡음 레벨이 가장 낮은 경우의 청각 문턱치를 제외하여, 각각의 청각 문턱치에서 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 차를 평균한 결과, Fig. 2와 같이 돌돔의 청각 임계비는 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 500 Hz에서 음압이 각각 34, 26, 21, 33, 40 dB로 되어 측정 주파수 300 Hz 이상부터 측정 주파수가 높을수록 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 차가 크게 나타나고 있었고, 돌돔의 청각 임계비는 측정주파수 범위에서 각각의 백색 잡음 스펙트럼 레벨보다 약 21~40 dB 이상의 차이를 보였다.

청각 임계비는 청각 문턱치와 백색 잡음의 비를 의미하며, 백색 잡음이 청각에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료가 되는 것으로 돌돔의 경우 측정 주파수의 음을 인식하기 위해서는 음압이 잡음 스펙트럼 레벨에서 청각 임계비 이상 높지 않으면 인식하기 어려운 것으로 판단된다.

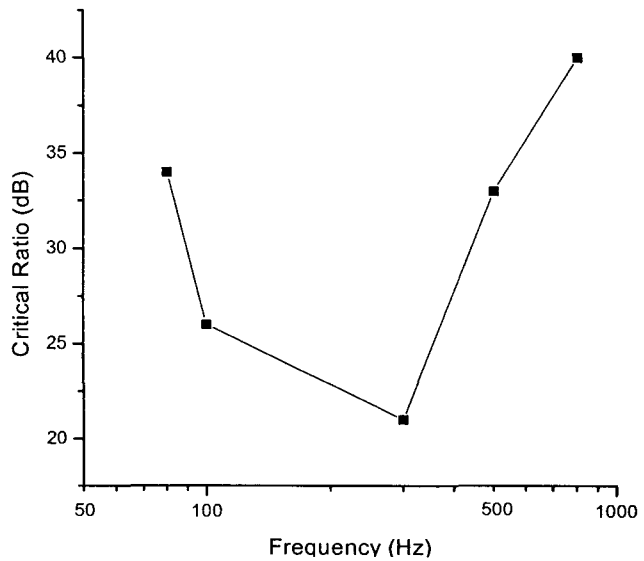


Fig. 2. Auditory critical ratio of Japanese parrot fish.

돌돔의 청각 특성의 결과를 백색 잡음 스펙트럼 레벨과 청각 문턱치와의 관계에 관하여 측정 주파수마다 정리한 것이 Fig. 2이다. 백색 잡음을 발생시키지 않았을 때의 청각 문턱치를 포함하여 3단계의 잡음 레벨로 측정된 청각 문턱치를 중축, 잡음의 스펙트럼 레벨을 횡축으로 하여 각각의 관계를 기울기 1인 회귀 직선으로 측정 주파수의 일부를 나타내었다. 측정 주파수에서의 청각 문턱치가 청각 임계비의 직선에서 일부 이탈한 것이 보이지만 대략적으로 직선에 가까이 있었다. 또, 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 관계에서 어느 정도의 백색 잡음 레벨까지는 청각 문턱치가 변하지 않고 일정하지만, 그 이상의 백색 잡음 레벨에서는 백색 잡음 증가분 만큼 청각 문턱치도 증가하였다. 이상의 결과에서 2개의 직선의 교점으로부터 돌돔의 청각 문턱치에 영향을 미치기 시작하는 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 구하면 돌돔의 경우 측정 주파수에서 백색 잡음이 대략 음압 70 dB 이상일 경우에 잡음에 대한 마스킹이 발생하여 청각 문턱치가 증가하고 있었다.

실험 결과 돌돔은 주파수 80~800 Hz의 순음을 지각하고 있었으나 각 주파수에 대한 청각 감도는 주파수 80~300 Hz에서 양호하고, 주파수 800 Hz 이상에서는 측정 개체중 음을 인식하지 못하는 개체도 다수 나타나고 있어 청각 문턱치로서의 사용이 어려웠다. 그 이상의 주파수에 대해서는 순음인식이 불량한 것으로 판단되었고, 주파수 200 Hz를 피크로 V자 형태를 하여 200 Hz와 같은 특정주파수 주변의 소리에 대하여 감지능력이 높다는 것이 나타나고 있었다.

어류의 경우 일반적으로는 청각 문턱치의 음압과 배경 잡음 스펙트럼 레벨과의 차이 즉 청각 임계비가 음압 15~25 dB 정도이면 어류는 배경 잡음과 구별하여 감지할 수 있다고 한다 (Hatakeyama, 1989). 이 실험 결과 돌돔의 경우 임계비가 음압 21 dB 이상이 되어 실험에 사용한 측정 주파수를 감지하고 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 청각 문턱치의 측정에 사용된 실험어는 동일 어류

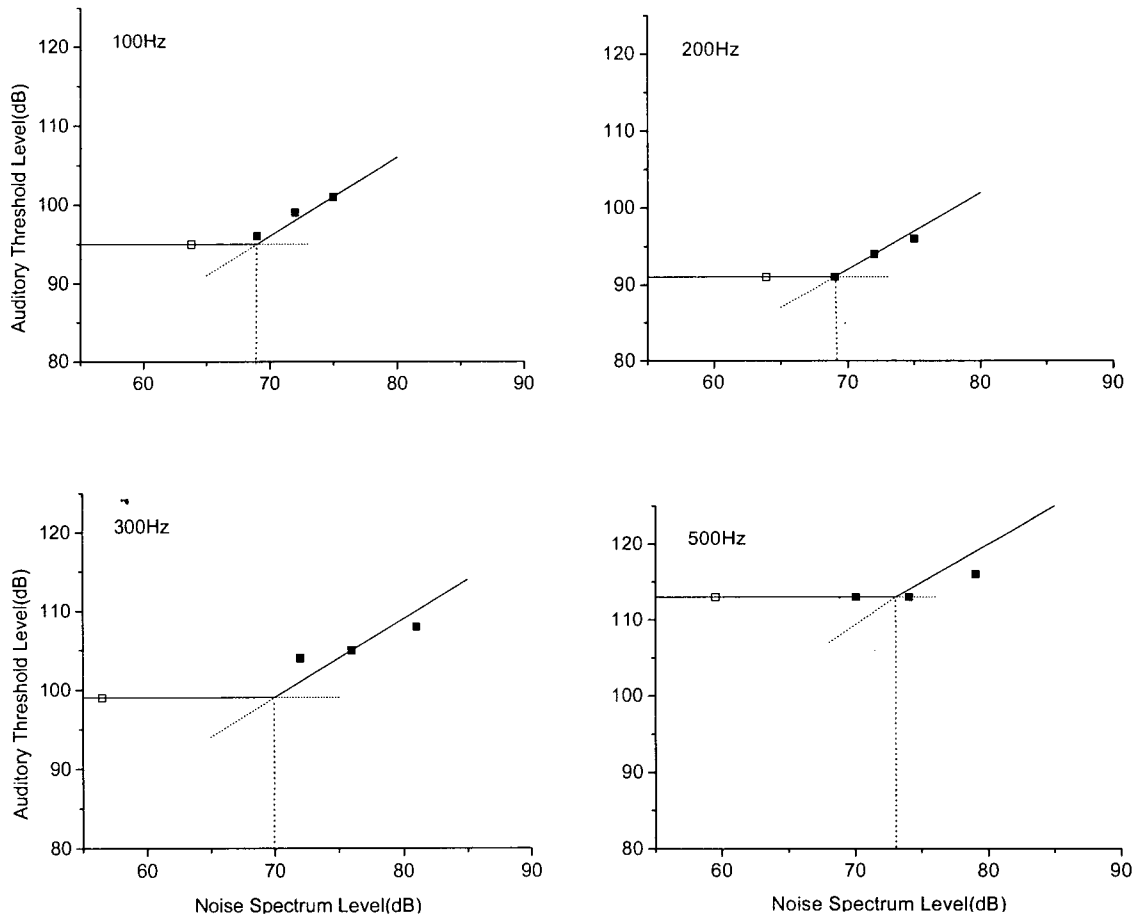


Fig. 3. Relation between noise spectrum levels and auditory thresholds at frequencies of 100~500 Hz. Mean thresholds under a quite condition (□) and the white noise condition (■).

라도 배경 잡음이 큰 환경하에서 장기간에 걸쳐 성장한 어류와 조용한 환경에서 성장한 어류에서는 소리에 대한 음감수성이 달라질 것이다. Kojima (1997)는 주변 배경 잡음이 다른 장소에서 생활한 같은 크기의 참돔의 청각 문턱치가 서로 다르게 나타나 주변 배경 잡음에 따라 청각 문턱치가 다르다고 보고하고 있다. 따라서 이 실험에서 사용한 각각의 실험어에 있어서 사육시의 음환경을 일반적인 바다에서의 수중 잡음과 비교하면 모든 측정주파수대에 있어서 높은 상태이다. 사육수조에서의 배경 잡음 레벨의 측정은 일시적으로 이루어졌지만 항상 비슷한 소음이 존재하고 있어, 청각 특성도 다소 다른 것으로 판단된다.

이상의 결과 청각 문턱치와 임계비를 기초로 하여 수중음을 돌돔에 이용할 수 있는 음을 주파수 100~200 Hz로 가정하면 이 주파수대의 수중음을 돌돔이 듣기 위해서는 적어도 91 dB 이상의 음압이 필요한 것으로 나타났다. 또한, 주파수에 따라 다소의 차이는 있지만, 잡음 스펙트럼 레벨이 약 70 dB 이상의 잡음이 존재하는 환경에서는 돌돔의 청각 능력이 마스킹되기 때문에 실제 해역에 있어서 수중 음향을 이용하여 어군 행동을 제어할 경우에는 배경 잡음 측정이 중요하며, 또 어류가 신호음을 식별할 수 있도록 방음시에 음압레벨을 충분히 배려할 필요가 있다.

요 약

제주 연안역에 서식하면서 바다목장에서 음향 순치 대상 어종으로 사용할 수 있는 돌돔의 청각 특성을 기본으로 하여 음향 어법의 기초 자료를 제공할 목적으로 측정주파수 80~800 Hz의 수중음과 8V의 직류 전압의 전기자극을 이용하여 음향 조건학습을 시킨 후 측정주파수와 음압을 임의로 변화시켜가면서 돌돔의 청각 문턱치 및 백색 잡음에 대한 청각 임계비를 조사하였다. 그 결과, 측정주파수 80~500 Hz의 음을 인식하고 있었고, 측정주파수에 대한 각각의 청각문턱치는 음압 104, 95, 91, 99, 113 dB이었으며, 측정 주파수 200 Hz에서 음압 91 dB로 가장 낮고 측정 주파수 500 Hz에서 음압 113 dB로 높게 나타내고 있었다.

백색잡음의 스펙트럼레벨을 69, 73, 79 dB 정도의 3단계 백색잡음을 방성하였을 때, 돌돔의 청각 문턱치는 백색 잡음이 없을 때보다 높게 나타났고, 스펙트럼레벨이 높을수록 청각 문턱치가 증가하는 마스킹 현상이 나타났다. 청각 임계비는 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 500 Hz에서 음압이 대략 34, 26, 21, 33, 40 dB이고 마스킹 현상은 각 측정 주파수에서 대략 음압 70 dB의 잡음 레벨에서 나타나기 시작하여, 돌돔이 주파수 100~200 Hz에서 신호음

을 인식하기 위해서는 음압 91 dB 이상, 잡음 레벨보다 약 21 dB 이상의 높은 음압이 요구되었다.

참 고 문 헌

- Chapman, C.J. and A.D. Hawkins. 1973. A field study of hearing in the cod, *Gadus morhua* L.J. Com. Phys., 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.
- Hatakeyama, Y. 1992. The hearing abilities of fish. Fisheries Engineering, 28, 111~119.
- Ishioka, H., Y. Hatakeyama and S. Sakaguchi. 1988. The hearing ability of the red sea bream *Pagrus major*. Nippon Suisan Gakkaishi, 54, 947~951.
- Kojima, T. 1997. Audiogram and directional hearing in red sea bream. Nippon Suisan Gakkaishi, 63, 112~113.
- 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, 156~160 (in Korean).
- Lee, C.H. and D.O. Seo. 2000. The hearing ability of black rockfish *Sebastes inermis* to underwater audible sound. 1. The auditory threshold. J. Korean Fish. Soc., 33, 581~584 (in Korean).
- Lee, C.H. and D.O. Seo. 2001. The hearing ability of black rockfish *Sebastes inermis* to underwater audible sound. 2. The auditory critical ratio. J. Korean Fish. Soc., 34, 151~155 (in Korean).
- Park, Y.S., C.H. Lee, J.W. Moon, J.Y. Ahn and D.O. Seo. 1999. Auditory thresholds of black rock fish. Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 11, 88~97 (in Korean).

2002년 3월 25일 접수
2002년 10월 30일 수리