

가청음에 의한 독가시치의 청각 능력

2. 청각 임계비

이창현 · 문종욱 · 서두옥

(제주대학교)

1. 서론

수중 가청음은 어군의 행동을 제어하는 방법과 해양목장화에서 음향순치 기술로 많이 응용되고 있는데, 수중 가청음에 의한 어류 반응 해석을 하기 위해서는 어류의 청각 능력을 정확히 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 오래 전부터 여러 어류의 청각 능력에 관련된 연구가 수행되었다(Chapman 등, 1973). 이처럼 어류의 청각 능력을 파악하는 것은 음향순치를 이용한 어군의 유집뿐만 아니라 어획의 과정에 있어서 대상 어류의 행동반응을 추측할 수 있는 것 이외에 새로운 어구, 어법 개발과 조업중의 어구에 대한 어류의 행동 양상을 해결하는 데도 필요하다.

따라서 해양목장에 있어서 대상 어류의 음향순치 뿐만 아니라 수중음향을 이용한 어군의 유집을 위해서는 어류에 대한 청각 능력을 파악하는 것이 대단히 중요하고, 수중 가청음을 이용한 어군 행동 제어를 하는 경우에도 어류의 청각 능력은 어류마다 다르기 때문에 대상 어류에 대한 기초적인 청각 능력을 명확히 하는 것이 필요하다.

실제로 어류는 자연 발생적인 수중 잡음과 인위적으로 발생하는 수중 잡음이 존재하는 환경에서 서식하기 때문에 어류의 청각은 수중에서 발생하는 배경잡음에 의해서 영향을 받으며, 잡음이 클 경우는 작은 음이 듣기 어렵게 되는 마스킹 현상이 발생한다. 따라서 수중에는 각각의 요인에 의해서 발생하는 잡음들이 항상 혼합되어 있고, 그 음압의 레벨도 변동하기 때문에 수중음을 이용하여 어류를 순치시키고, 행동을 제어하기 위해서는 대상 어류에 대한 청각 문턱치뿐만 아니라 배경잡음에 의한 마스킹 효과를 충분히 조사하는 것이 중요하다.

배경잡음에 의한 마스킹을 조사하는 방법으로 청각 임계비가 많이 이용되어지고 있는데 이것은 백색잡음이 순음을 마스킹했을 때 청각 문턱치에서 스펙트럼레벨을 감한 것으로 간단히 측정할 수 있고 신호음을 들을 때의 배경잡음의 영향을 쉽게 평가할 수 있는

특징이 있다.

이 연구는 제주도 연안에 설치되어 있는 정치망 어구에서 수중음향을 이용한 어군 유집에 대한 기초 자료를 제공할 목적으로, 정치망의 주요 어획 대상 어류인 독가시치를 선택하여, 독가시치의 청각문턱치 실험결과를 기본으로 순음을 마스킹하는 배경잡음 스펙트럼레벨을 단계별로 변화시켜가면서 독가시치의 청각 문턱치를 측정하여 청각 임계비를 계산함과 동시에 마스킹이 발생하는 배경잡음의 스펙트럼레벨에 관해서 조사하였다.

II. 재료 및 방법

실험에 사용된 독가시치 6마리의 전장은 $24.3\text{cm} \pm 1.2\text{cm}$ (평균 \pm 표준편차)이었고, 평균 체중은 160g이었다. 실험기간은 1999년 9월 27일부터 10월 14일까지 행하였고, 실험기간 중의 실험수조의 수온은 23 - 25℃이었으며, 독가시치는 제주대학교 해양연구소 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후부터 12시간 이상 경과한 후에 청각 임계비 측정 실험에 이용하였다.

방성음의 수중음압과 수조내의 배경잡음은 수중청음기(B&K, 8103)를 어류의 머리 위치에 설치한 후 전치중폭기(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.

독가시치의 청각 임계비를 조사하기 위하여 사용한 실험장치는 박 등(2000)과 같이 수조 벽면에서 5cm 떨어진 지점에 양쪽에 공중 스피커(Promana, CB38)를 설치하여 신호 발생기(NF, 4500)의 신호음이 동위상으로 방성될 수 있도록 한 후 잡음발생기(B&K, 1405)와 함께 믹서(INKEL, MX-642)에 연결하여 신호음과 백색잡음을 동시에 방성할 수 있도록 하였으며, 이때 백색잡음은 수중에서 주파수가 높아짐에 따라 감쇠가 많아지므로 1kHz까지 음압분포가 일정하도록 이퀄라이저(INKEL, EQ-9231)를 통하여 스피커에 연결하였으며, 심전도 도출용 낚시바늘로 마취시킨 독가시치의 위심강 부근에 낚시 끝 부분을 삽입한 후, 오실로스코프(Tektronix, TDS-340)를 이용하여 실험어의 심전도를 관찰하였다.

독가시치의 음향 조건학습 및 청각 임계비를 측정하기 위하여 사용한 음향자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800Hz의 순음을 이용하였으며, 주파수 200Hz의 순음을 약 120dB(0 dB re $1\mu\text{Pa}$)의 음압과 함께 직류 전압 7V의 전기 자극을 가하면서 음향 조건학습시켰다.

어류의 음향 조건학습의 음방성 방법은 실험어의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 Fig. 1과 같이 지속시간 5초간 측정주파수의 순음을 방성하면서, 방성 개시 3초 후에 지속시간 0.1초의 직류 전압 7V의 전기자극을 가하였다. 음방성시 심박간격에 변화가 연속적으로 3회 이상 나타나도록 학습을 완료한 후 학습음보다 3 - 5dB씩 음압을 감소시켜 방성하면서 심박간격을 관찰하였다. 이때 방성음에 대하여 독가시치가 반응을 나타내었을 경우 학습효과를 지속시키기 위하여 전기자극을 주었다. 이와 같은 방법으로 독

가시치의 청각 문턱치를 구한 후 백색잡음을 방성하면서 청각 문턱치를 측정하였다. 각각의 학습 및 측정실험 모두 전기 자극 후 독가시치의 심박이 정상적으로 될 수 있도록 3분 이상의 시간 간격을 두어 행하였고, 청각 문턱치의 우연오차를 줄이기 위하여 같은 음압에서 2회 이상 반응이 나타났을 경우에 청각 문턱치로 하였으며, 측정 결과 값 중 다소 의외의 값은 청각 문턱치에서 제외시켰다(이 등, 1999).

배경잡음의 변화에 따른 독가시치의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 백색잡음의 레벨은 참돔의 청각 문턱치(Hatakeyama, 1989)에 영향을 미치는 배경잡음의 스펙트럼 레벨이 약 70dB 이상으로 보고한 것을 근거로 이 실험에서는 감쇠기(KENWOOD, RA-920)를 이용하여 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 음압 73, 78, 83dB의 3단계로 설정하여 사용하였다. 독가시치의 청각 임계비(critical ratio : CR) 측정은 청각 문턱치에 사용한 신호음의 주파수 음압을 T(dB re 1 μ Pa), 백색잡음의 스펙트럼의 레벨을 S(dB re 1 μ Pa/ \sqrt{Hz})라 할 때, T-S로 나타내었다.

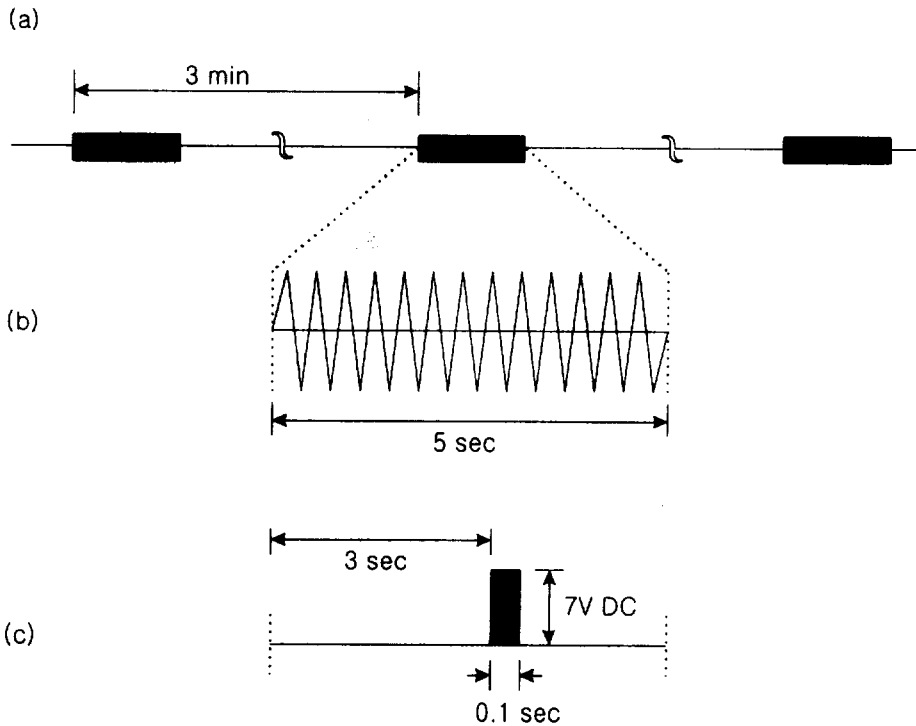


Fig. 1. The time sequences for sound emissions of white noise, pure sound and electric shocks.

- (a) Time sequence for the emission of pure sound stimulus under white noise.
- (b) Emission time and period of pure sound stimulus under white noise.
- (c) Pulse for electric shock stimulus.

III. 결과 및 고찰

실험시에 측정된 실험수조 안의 정숙시와 백색 잡음 발생시에 측정된 실험수조내의 잠음스펙트럼 레벨의 평균치 및 청각 문턱치를 작성한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

정숙시의 배경잡음 평균 스펙트럼레벨은 전원의 영향을 많이 받는 60Hz에 피크를 보였으나 주파수가 높아질수록 완만하게 감소하고 있었고, 독가시치의 청각 임계비 측정에 사용한 백색잡음 스펙트럼레벨은 전기 노이즈가 포함된 60Hz를 제외하고 거의 일정하게 나타나고 있었다.

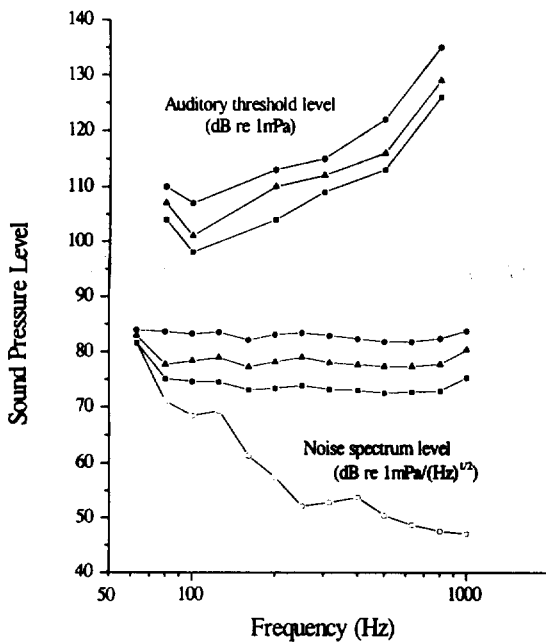


Fig. 2. Audiogram of Dusky spinefoots under white noise spectrum level.

- (▲ : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 83dB,
- : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 79dB,
- : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 74dB,
- : Mean white noise spectrum level of 83dB,
- △ : Mean white noise spectrum level of 79dB,
- : Mean white noise spectrum level of 74dB.).

측정 결과 독가시치는 주파수 80 - 800Hz의 수중 가청음을 지각하였고, 배경잡음의 상승에 따라 청각 문턱치도 증가하는 경향이 보여, 명확하게 마스킹이 일어나고 있음을 알 수 있다. 각 주파수에 대한 3단계의 백색잡음 방성하의 청각 문턱치는 주파수 100Hz에서 음압이 각각 98dB, 101dB, 107dB로 가장 낮은 문턱치들을 보이고, 그 다음으로 주파수 80Hz에서 104dB, 107dB, 110dB, 200Hz에서 104dB, 110dB, 113dB, 300Hz에서 109dB, 112dB, 115dB, 500Hz에서 113dB, 116dB, 122dB, 800Hz에서 126dB, 129dB, 135dB의 순으로 나타났다. 즉, 주파수 80 - 200Hz에서 청각 감도가 양호하였고, 300Hz보다 주파수가 높아질수록 청각 문턱치가 급격히 상승하는 경향을 보여, 높은 주파수에서는 청각 능력이 떨어짐을 나타내고 있다.

Fig. 3은 백색잡음 방성시의 배경잡음과 청각 문턱치와의 관계인 청각 임계비(CR)를 나타내고 있다. 청각 임계비의 평균값은 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz에서 음압이 각각 28dB, 23dB, 31dB, 34dB, 40dB, 52dB을 나타내었으며, 주파수 100Hz에서 가장 낮았다. 또한, 각 주파수에 대한 표준편차는 1.6, 0.6, 1.0, 1.9, 1.0, 0.9dB을 나타내었으며, 주파수 100Hz에서 가장 낮았다. 즉, 주파수 80Hz, 100Hz 그리고, 200Hz에서는 백색잡음 방성 중 신호음을 식별하는 능력이 다른 주파수에 비하여 우수하였지만, 측정 주파수가 높아질수록 청각 문턱치가 증가함과 동시에 청각 임계비도 급격히 증가하고 있어 높은 주파수에서는 청각 능력이 아주 떨어짐을 나타내고 있다.

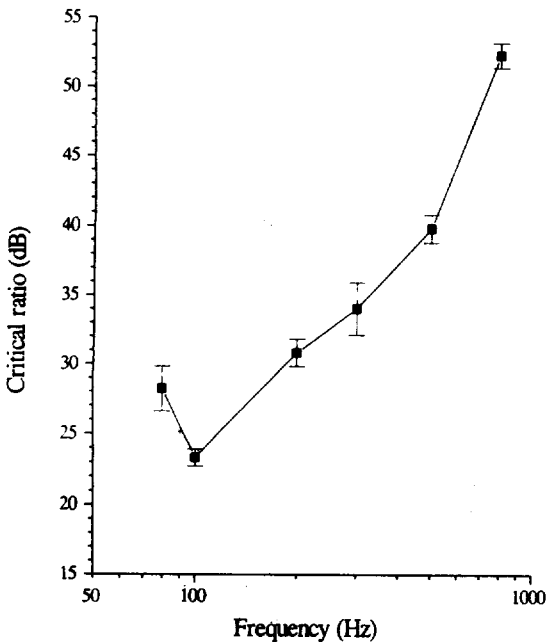


Fig. 3. The auditory critical ratios of dusky spinefoots.

결과, 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz에서 각각 73dB, 73dB, 61dB, 61dB, 65dB, 68dB로 각각의 주파수에서 70dB 전후에서 잡음에 의한 마스킹현상이 나타나기 시작하여 청각 문턱치가 증가하였다.

독가시치는 백색잡음의 상승에 따라 청각 문턱치의 값도 증가하는 경향이 나타났고, 각각의 백색잡음 스펙트럼레벨에서 모든 측정주파수대에 대해 백색잡음 발생전(이 등, 2000). 보다도 청각 문턱치가 증가하여 명확히 마스킹현상이 일어나고 있었다. 특히, 주파수 200, 300Hz에서 마스킹 현상이 뚜렷이 나타나고 있고, 주파수 80 - 100Hz에서는 상대적으로 잡음발생에 의한 청각 문턱치 증가 비율이 적게 나타나고 있어 백색잡음 발생전의 청각 문턱치 곡선과 다른 모양을 나타내고 있었다.

Fig. 3의 결과를 잡음 스펙트럼레벨과 청각 문턱치의 관계에 대하여 측정 주파수마다 정리한 것을 Fig. 4에 일부 나타내었다. 백색잡음이 없는 경우를 포함하여 4단계의 잡음 스펙트럼에서 측정한 문턱치를 세로축에, 그 배경잡음의 스펙트럼레벨을 가로축에 나타내었다.

일반적으로 마스킹이 발생하고 있는 상태에서는 잡음 스펙트럼레벨과 청각 문턱치 사이에 상관 관계가 보여, 양자의 관계는 회귀 직선에 의해서 나타내어진다. Fig. 3의 3단계의 백색잡음 스펙트럼레벨에서 측정한 청각 문턱치와 백색잡음 스펙트럼레벨과의 차, 즉 임계비가 일정하게 되게 하는 기울기 1의 직선을 적용시켜, 독가시치의 청각 문턱치가 증가하기 시작하는 백색잡음 스펙트럼레벨을 나타낸

주파수 특성이 평탄한 백색잡음으로 마스킹된 청각 문턱치와 백색잡음의 스펙트럼레벨로부터 구한 청각 임계비는 청각 문턱치와 백색잡음의 비율 의미하며, 배경잡음이 청각에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료가 되는 것으로 독가시치의 경우 측정주파수의 음을 인식하기 위해서는 음압이 Fig. 3에서처럼 각 백색잡음 레벨에서 청각 임계비 이상 높지 않으면 어려운 것으로 판단되며, 주파수가 높을수록 청각 문턱치와 백색잡음 스펙트럼레벨의 차가 크게 나타났다.

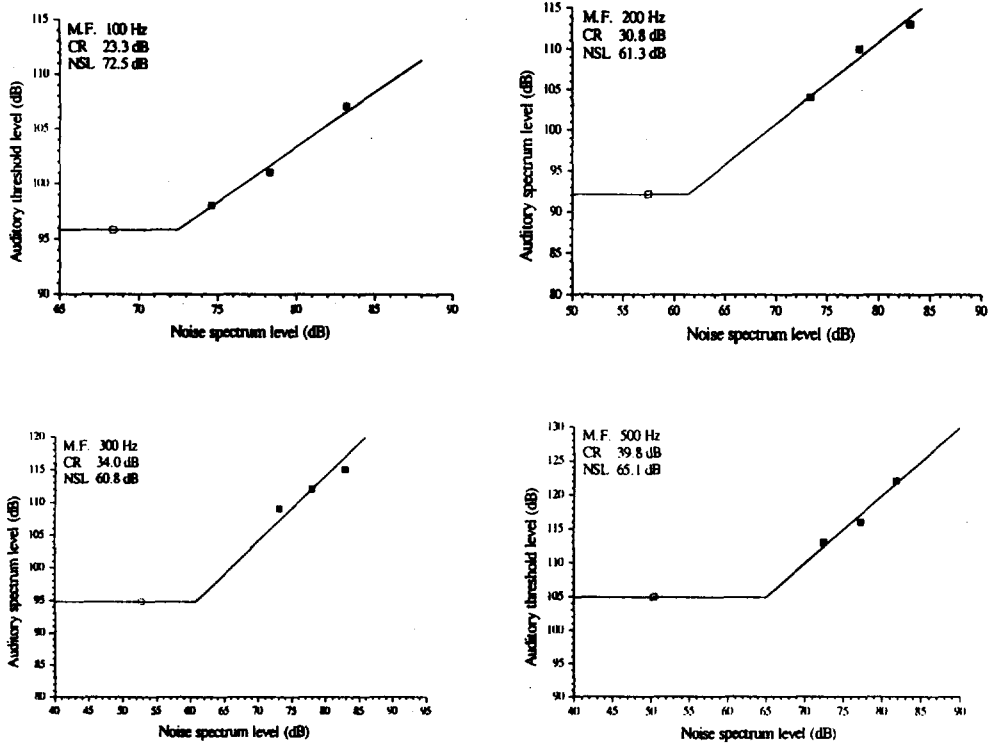


Fig. 4. Relation between noise spectrum level and auditory threshold level (M.F. : Measurement frequency, □ : Auditory threshold level under the quite condition, ■ : Auditory threshold level under the white noise.).

어류는 파랑, 강우, 지각변동 등 자연 발생적인 수중 소음과 항공기, 선박 등의 인위적인 수중 소음이 동시에 존재하는 환경에서 서식하므로, 어류의 서식지에 산재하는 이러한 주변 환경잡음의 영향을 받아서 섭이행동 등의 생물학적 의미를 갖는 중요한 음 정보를 취할 때에 장애가 된다. 즉, 주변 환경잡음의 영향을 받아서 작은 소리가 들리기 어렵게 되어, 청각 문턱치가 증가하는 마스킹 현상이 발생하는 데, 해상에서는 주로 바람이 배경잡음을 발생시켜 마스킹이 일어나고, 이때 어류는 약한 생물학적 음정보를 감지

하기 어렵게 된다. 이렇듯 어류의 청각 능력은 음압의 강도와 마스킹 현상에 따라 달라질 수 있는데, 일반적으로 어류는 청각 문턱치 음압과 배경잡음의 스펙트럼레벨과의 차 즉, 청각 임계비가 거의 음압 15 - 25dB 이상이면 잡음과 구별하여 감지하는 것이 가능하다고 한다(Hatakeyama, 1989).

이 실험에서 사용한 독가시치의 청각 문턱치가 백색잡음이 없는 정온시에는 음압 92 - 121dB 이었고(이등, 2000), 3단계로 변화시킨 백색잡음 방성 하에서의 청각 문턱치는 평균 레벨이 74dB, 79dB, 83dB인 백색잡음 방성 하에서 음압이 각각 98 - 126dB, 101 - 129dB, 107 - 135dB로 나타나 백색잡음이 방성될 때 실험에 사용된 측정 주파수가 마스킹되고 있는 것으로 나타났으며, 이때의 청각 임계비의 평균값은 측정 주파수 80Hz, 100Hz, 200Hz, 300Hz, 500Hz, 800Hz에서 음압이 각각 28dB, 23dB, 31dB, 34dB, 40dB, 52dB로 나타나 신호음과 잡음을 잘 구별하고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 어군의 유집을 위하여 수중음을 사용할 경우에는 어류가 주위 배경잡음에서 자극음을 충분히 구별해 낼 수 있도록 방성 음압 레벨을 설정할 필요가 있다.

이상으로부터 수중 음향을 이용한 독가시치의 유집을 하려면 이 실험을 통하여 알아낸 청각 능력을 고려하여 주파수 100 - 200Hz의 음을 선택하고, 이 주파수의 음을 독가시치가 충분히 인식하기 위해서는 최저 92dB 이상의 음압 강도가 필요하며 주파수에 따라 다소의 차이는 있지만 스펙트럼레벨이 약 70dB이상의 배경잡음이 존재하는 해역에서는 독가시치의 청각능력이 마스킹되기 때문에 실제 해역에 있어서 수중음향을 이용하여 어군 행동을 제어할 경우에는 배경잡음의 특성을 파악하여 신호음을 식별할 수 있도록 방음시에 음압을 충분히 고려하여 청각 문턱치가 배경잡음보다도 음압이 약 23dB이상의 높은 음을 사용하지 않으면 안될 것으로 판단된다.

IV. 요약

이 연구는 제주도 연안에 분포되어 있는 정치망에서 음향 집어기에 의한 어류의 유집에 대한 기초 자료를 제공할 목적으로, 정치망의 주요 어획 대상 어류인 독가시치를 선택하여, 가청 수중음과 전기 자극을 이용하여 음향 조건학습시켰으며, 주파수와 음압을 변화시켜가면서 심전도를 도출하여 심박 간격의 변화로부터 청각 능력을 알아내는 방법을 이용하여, 독가시치의 청각 문턱치 및 청각 임계비를 측정·조사 한 결과 75, 79, 83의 3단계 백색잡음을 방성하였을 때 독가시치의 청각 문턱치는 백색잡음이 없을 때보다 높게 나타나 마스킹 효과가 나타났고, 측정주파수 200Hz, 300Hz에서 보다 뚜렷하게 나타났다. 독가시치의 청각 임계비는 측정주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800Hz에서 대략 28, 23, 31, 34, 40, 52dB이고 마스킹 현상은 음압이 약 70dB 이상의 잡음레벨에서 나타나기 시작하였고 측정주파수 100 - 200Hz에서 신호음을 인식하기 위해서는 음압이 대략 98dB이상, 배경잡음레벨보다 약 23dB이상의 높은 음압이 요구되었다.

참고문헌

- 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.
- 박용석 · 이창현 · 김고환 · 서두옥(2000) : 조피볼락의 청각 임계비. *한국수산해양교육학회*, 12(1), 1~10.
- 이창현 · 박용석 · 문종욱 · 강창익 · 김고환 · 서두옥(1999) : 수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각능력 - 2. 청각 임계비-. *제주대학교 해양연구소 연구논문*, 23, 73-79.
- Hatakeyama. Y.(1989) : Masking effect on the hearing of red sea bream, *Pagrus major*, by ambient noise. *Int. J. Aq. Fish. Tecno.*, 1, 271~277.
- 이창현 · 문종욱 · 서두옥(2000) : 가청음에 의한 독가시치의 청각 능력 - 1. 청각 문턱치 -. *한국어업기술학회지*, 투고중.

The Hearing Ability of the Dusky spinefoot *Siganus fuscescens*(Houttuyn) to Audible Sound.

2. The Auditory Critical Ratio

Chang-Heon LEE · Jong-Wook MOON · Du-Ok SEO

(Cheju National University)

Abstract

An experiment was carried out to obtain the fundamental data on the auditory thresholds of fishes for catching method using audible frequency sound, the auditory thresholds of dusky spinefoot *Siganus fuscescens*(Houttuyn) were measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of 74 - 83dB re $1 \mu Pa/\sqrt{Hz}$ by heartbeat conditioning technique using pure tones coupled with a delayed electric shock. The auditory critical ratios were about 23 - 34dB at measurement frequency range.

The ratio increased almost linearly with increasing frequency from 200 to 500Hz. The noise spectrum level at the start of masking was about 61 - 73dB within the measurement frequency range. This suggests that hearing of dusky spinefoot is masked in the natural environment with the noise spectrum level above 70dB. The sound pressure level of which the signal sound of 100Hz is recognized by dusky spinefoot under the white noise of 70dB is above 98dB and the critical ratio of them is above 23dB.