

## 수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각 능력

### 2. 청각 임계비

이창현 · 박용석\* · 문종욱 · 강창익 · 김고환 · 서두옥

제주대학교 · 제주도 해양수산자원연구소\*

## The Hearing Ability of the Scorpion Fish *Sebastes marmoratus* to Audible Sound

### 2. The Auditory Critical Ratio

Chang-Heon Lee, Yong-Seok Park\*, Jong-Wook Moon, Chang-Ik Kang,  
Ko-Hwan Kim and Du-Ok Seo

\*Cheju Province Fisheries Resources Research Institute, Cheju-do 690-810, Korea  
Dept. of Fishery, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea

In order to obtain the fundamental data on the auditory thresholds of fishes for Marine ranching, the auditory thresholds of Scorpion Fish *Sebastes marmoratus* were measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of 75 - 83dB re  $1 \mu Pa/\sqrt{Hz}$  with a classical cardiac conditioning technique. Critical ratios were about 27 - 35dB at 100 - 300Hz and 47 - 50dB at 500 - 800Hz including 19dB at 80Hz. The ratio increased almost linearly with increasing frequency to 500Hz. The noise spectrum level at the start of masking was about 60 - 65dB within the frequency range of 80 - 300Hz and 70 - 75dB at 80, 500 and 800Hz. This suggests that hearing of the Scorpion Fish is masked in the natural environment with the noise spectrum level above 65dB. The sound pressure level of which the signal sound of 100 - 200Hz is recognized by Scorpion Fish under the ambient noise is above 90dB and the critical ratio of them is above 30dB.

**Key words** : critical ratios, scorpion fish, auditory thresholds

### 서 론

수중 가청음은 어군의 행동 제어와 해양목장화에서 음향 순치에 많이 이용되고 있다. 수중 가청음에 의한 어류반응 해석을 하기 위해서는 물고기의 청각능력을 정확히 파악할 필요가 있으며, 오래 전부터 여러 물고

기의 청각 능력에 관련된 연구가 수행되었다(Chapman · Hawkins, 1973 ; Ishioka et al., 1998). 이처럼 물고기의 청각 능력을 파악하는 것은 음향순치를 이용한 어군의 유집뿐만 아니라 어획의 과정에 있어서 대상 물고기의 행동반응을 추측할 수 있는 것 이외에 새로운 어구, 어법 개발과 조업중의 어구에 대한 물고기의 행동 양상을 해결하는 데도 필요하다.

따라서 해양목장에 있어서 대상 물고기의 음향 순치뿐만 아니라 양식장 등에서의 음향을 이용한 자동급이

\* 이 논문은 1997-1998년 제주대학교 발전기금 학술연구에 의한 연구의 일부임.

기 사용을 위해서는 물고기에 대한 청각 능력을 파악하는 것이 대단히 중요하고, 수중 가청음을 이용한 어군 행동 제어를 하는 경우에도 물고기의 청각 능력은 어종마다 다르기 때문에 대상 물고기에 대한 기초적인 청각 능력을 명확히 하는 것이 필요하다.

실제로 어류는 자연 발생적인 잡음과 인위적 잡음이 혼재하는 환경에서 서식하기 때문에 어류의 청각은 수중에서 발생하는 주위의 잡음에 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 어종에 대한 청각문턱치뿐만 아니라 배경 잡음에 의한 마스킹 효과를 충분히 조사하는 것이 중요하다.

잡음에 의한 마스킹을 조사하는 방법으로 청각임계비가 많이 이용되어지고 있는데 이것은 백색잡음이 순음을 마스킹했을 때 청각문턱치에서 스펙트럼레벨을 감한 것으로 간단히 측정할 수 있고 신호음을 들을 때의 잡음의 영향을 쉽게 평가할 수 있는 특징이 있다.

이 연구에서는 제주 연안해역에 있어서 해양목장의 음향순치 대상 물고기로 이용할 수 있는 연안 정착성 어종인 썸뱅이의 청각문턱치 실험결과를 기본으로 순음을 마스킹하는 잡음스펙트럼레벨을 단계별로 변화시켜가면서 썸뱅이의 역치를 측정하여 임계비를 측정함과 동시에 마스킹이 발생하는 잡음의 스펙트럼레벨에 관해서 조사하였다.

### 재료 및 방법

실험어인 썸뱅이의 전장은 175~240mm였으며, 낚시로 어획하여 사육중인 6마리를 실험에 사용하였다. 실험 기간 중의 수온은 13.0~16.5°C였으며, 실험 수조에 설치하여 12시간이 경과한 후 실험을 실시하였다.

방성음의 수중음압과 수조내의 배경잡음은 Hydrophone (B&K, 8103)을 어류의 머리위치에 설치한 후 전치증폭기(B&K, 2635)와 휴대용 주파수 분석기(B&K, 2143)를 이용하여 1/3 옥타브 분석으로 각각 측정하였다.

어류의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험장

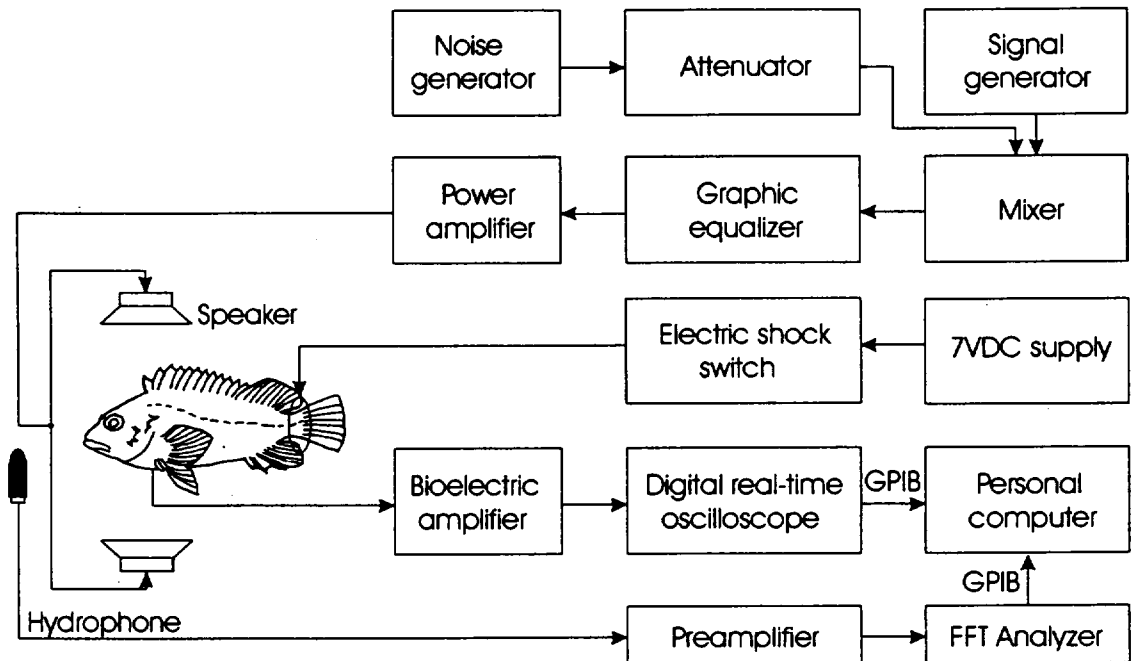


Fig. 1. Block diagram of the instruments for measuring of auditory thresholds of the Scorpion Fish.

수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각 능력

치는 이 등(1998), 박 등(1998)과 같이 수조 벽면에서 5cm 떨어진 지점에 양쪽에 공중 스피커(Promana, CB38)를 설치하여 Fig. 1과 같이 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 감쇄가 많아지므로 1KHz까지 음압분포가 일정하도록 이퀄라이저(INKEL, EQ-9231)를 통하여 스피커에 연결한 후, 박 등(1997)과 같이 심전도 도출용 낚시바늘로 마취시킨 물고기의 위심장 부근에 낚시 끝 부분을 삽입한 후, 실험어의 심전도를 관찰하였다.

어류의 음향 조건 학습 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 $\mu$  Pa)의 음압과 함께 직류 전압 7V의 전기 자극을 실험어에게 주면서 음향 조건 학습시켰다.

물고기 음향 조건학습을 위한 음방성 방법은 물고기의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 지속시간 5초간의 순음을 임의의 순서로 방성하였으며, 방성개시 3초 후에 지속시간 0.1초의 전기 자극을 가하면서 학습을 시켰다. 이와 같은 음향 조건학습에 대한 물고기의 반응의 판정은 음자극을 주기전 및 준 후의 심박간격을 관찰하여 음자극을 주기 전보다 준 후의 심박 간격이 넓었을 때를 실험어가 학습음을 인식한 것으로 하였다.

실험 주파수중 임의의 한 주파수에 대해 방성하였을 때 3회 이상 연속반응이 나타나면 음에 대한 학습이 완

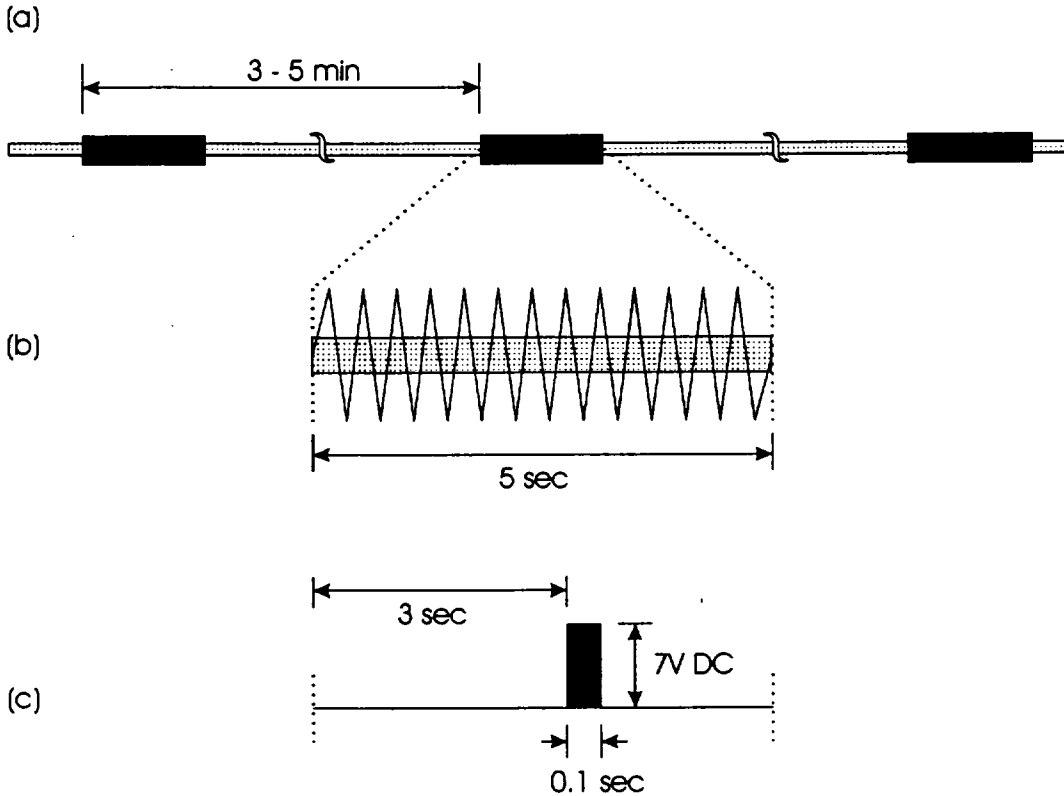


Fig. 2. The time sequences for sound emissions of white noise, pure sound and electric shocks.  
 (a) Time sequence for the emission of pure sound stimulus under white noise.  
 (b) Emission time and period of pure sound stimulus under white noise.  
 (c) Pulse for electric shock stimulus.

료된 것으로 간주하였고, 각각의 학습 실험 모두 전기 자극 후 물고기의 심박이 정상적으로 될 수 있도록 3 ~ 5분 이상 기다렸다가 반복 학습을 시켰다.

이와같이 실험어에 대하여 음향 조건학습을 완료시킨 후 30분 이상 경과한 후에 백색잡음에 대한 썸뱃이의 청각 임계비를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 순음 방식 1 - 2분전부터 백색잡음을 방성하면서 측정주파수의 학습음을 방성하였다.

임계비 측정을 위한 백색잡음의 방성은, 측정주파수대에서 잡음레벨의 차이에 의한 영향이 청각문턱치에 미치지 않도록 피크치를 보이는 환경소음의 60Hz의 레벨을 기준으로 일정한 레벨을 유지하였으며, 잡음의 변화에 따른 청각 특성을 조사하기 위하여 감쇄기(KENWOOD, RA-920)를 이용하여 5dB 간격씩 배경잡음을 줄여가면서 3단계로 설정하여 백색잡음을 방성하였다. 이때 실험어의 청각 문턱치 측정은 순음에 대한 조건학습이 완료된 실험어를 대상으로 음향 조건학습에 사용한 음을 포함한 측정 주파수를 임의의 순서로 선택하여 청각 문턱치 이상이라고 판단되는 높은 음압에서부터 순음의 방성음압을 3 ~ 5dB씩 감소시켜 가면서 방성하였다. 순음에 대한 물고기의 반응 유무는 심박간격으로 관찰하여 실험어가 감지할 수 있는 가장 작은 음압을 청각 문턱치로 취하였으며, 물고기가 방성음압에 반응을 나타낼 경우 조건학습을 유지시키기 위하여 전기자극을 주었다. 실험 자료의 우연오차를 줄이기 위하여 연속적으로 2회 이상 양의 반응을 보인 최소 음압을 청각 문턱치로 결정하였으며, 측정 결과값중 다소 의외의 값은 청각문턱치에서 제외시켰다. 청각 임계비(Critical Ratio)측정은 청각문턱치에 사용한 신호음의 음압을  $T(0dB \text{ re } 1\mu Pa)$ , 백색잡음의 스펙트럼의 레벨을  $S(0dB \text{ re } 1\mu Pa/\sqrt{Hz})$ 라 할 때 T-S로 나타내었다.

### 결과 및 고찰

실험시에 측정된 실험수조 안의 정속시와 백색 잡음 발생시의 잡음스펙트럼 레벨의 평균치를 작성한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

정속시의 배경잡음 평균 스펙트럼레벨은 전원의 영향을 많이 받는 60Hz에 피크를 보였으나 주파수가 높

아질수록 급격히 감소하고 있었다. 물고기의 청각 임계비 측정에 사용한 백색잡음을 감쇄기를 이용하여 5dB씩 감소시켜 측정한 결과 평균 73, 78, 83dB의 스펙트럼레벨로 발생되고 있었으며 이때의 백색잡음 스펙트럼레벨은 전기 노이즈가 포함된 60Hz를 제외하고 거의 일정한 간격을 유지하고 있었다.

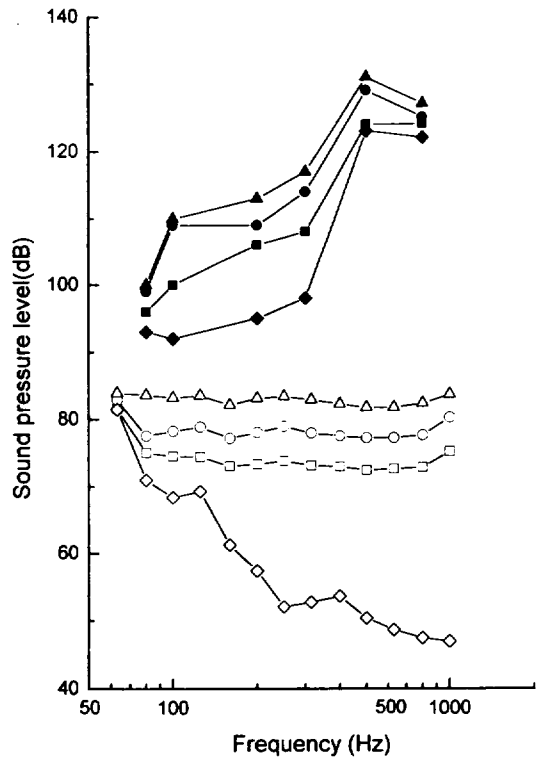


Fig. 3. Audiogram of the Scorpion Fish under white noise spectrum level.

(▲ : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 83dB, ● : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 78dB, ■ : Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 73dB, ○ : Mean white noise spectrum level of 83dB, △ : Mean white noise spectrum level of 78dB, □ : Mean white noise spectrum level of 73dB.)

또한 백색잡음의 스펙트럼레벨을 단계적으로 변화시켰을 때의 청각문턱치를 정리한 결과, 백색잡음 발생전과 각각의 백색잡음 발생후의 청각문턱치를 비교하면

백색잡음의 상승에 따라 문턱치의 값도 증가하는 경향이 보여, 각각의 백색잡음스펙트럼레벨에서 모든 측정 주파수에 대해 명확한 마스킹현상이 일어나고 있었다. 특히, 주파수 100, 200, 300Hz에서 마스킹 현상이 뚜렷이 나타나고 있었으나 주파수 80Hz에서는 상대적으로 잡음발생에 의한 청각문턱치 증가 비율이 적게 나타나고 있어 백색잡음발생전의 청각문턱치곡선과 다른 모양을 나타내고 있었다.

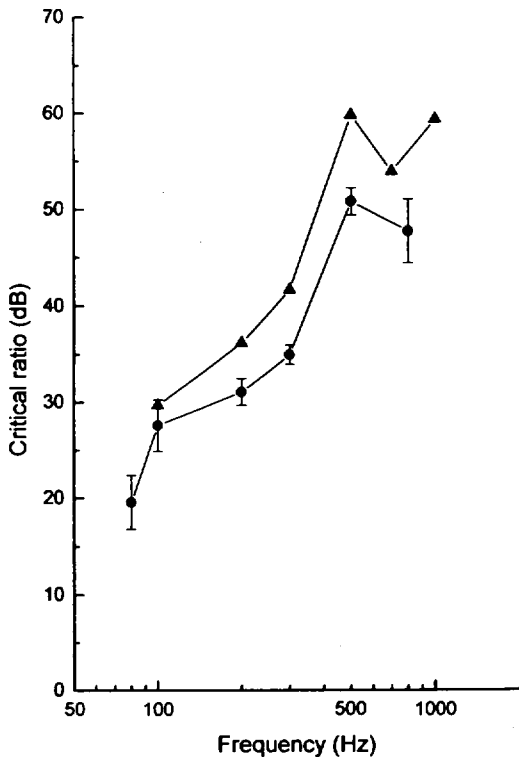


Fig. 4. Comparison of the Auditory critical ratio of the Scorpion Fish(●) with the Black rack fish(▲).

이 등(1998)이 구한 썸뱅이의 청각문턱치와 이 실험에서 구한 청각문턱치의 오디오 그래프는 비슷한 양상을 나타내고 있었으나 이미 구한 청각문턱치와 비교했을 경우 각 주파수에 대한 편차뿐 아니라 주파수가 높을수록 다소 차이가 나타나고 있었다.

이것은 어류 개체의 청각능력에 대한 차이를 일부 생각할 수도 있지만, 심박측정시에 바늘 삽입 위치가 정

확하지 않을 경우 심전도의 심박간격이 일정함에도 불구하고 음방성에 대한 자극의 효과가 민감하게 나타나지 않은 것으로 추론되었다. 따라서 어류의 심박간격을 이용한 청각특성을 측정하기 위해서는 무엇보다도 심전도 도출을 위한 바늘을 정확한 위치에 삽입하는 것이 대단히 중요하다. 또한 주파수 500 - 800Hz 사이의 음압에 대한 어류의 반응은 주파수 100 - 300Hz의 음압에 대한 학습 반응의 효과보다 다소 낮게 나타나는 경향이 있어 이로 인한 차이가 다소 포함된 것으로 판단된다. 청각특성실험에서 잡음스펙트럼을 60Hz 기준으로 3단계로 나누어 측정한 결과 80Hz 주파수대에서 문턱치가 낮게 나타나는 것은 실험에 사용한 스피커의 저주파수 음이 어류의 내이로 전달되기 보다는 우선 측선으로 음이 인식되는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 각각의 백색잡음 발생시에 측정된 청각문턱치에서 각각의 잡음 스펙트럼레벨을 뺀 임계비를 평균하여 나타낸 것으로 썸뱅이의 청각 임계비는 주파수 80Hz에서 음압이 약 19dB, 주파수 500Hz에서 음압 50dB까지 나타나고 있었다.

주파수 특성이 평탄한 백색잡음으로 마스킹된 청각문턱치와 잡음의 스펙트럼레벨로부터 구한 청각 임계비는 문턱치와 잡음의 비율 의미하며, 잡음이 청각에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료가 되는 것으로 썸뱅이의 경우 측정주파수의 음을 인식하기 위해서는 음압이 Fig. 4에서 처럼 각 잡음레벨에서 임계비 이상 높지 않으면 어려운 것으로 판단되며, 주파수가 높을수록 청각문턱치와 잡음스펙트럼레벨의 차가 크게 나타났다. Fig. 4에서 本松 등(1996)이 구한 양볼락과인 조피볼락의 청각 임계비와 비교하였을 때 측정범위가 같은 주파수 100 - 500Hz까지의 측정주파수에 대해서는 전체적으로 청각 임계비는 썸뱅이가 낮게 나타나고 있었으나 유사한 곡선 형태를 나타내고 있었다. 썸뱅이의 청각특성의 결과를 잡음스펙트럼레벨과 청각문턱치와의 관계에 관하여 측정주파수마다 정리한 것이 Fig. 5이다.

잡음이 발생되지 않을때를 포함하여 4단계의 잡음레벨로 측정된 문턱치를 종축, 배경잡음의 스펙트럼레벨을 횡축으로 하여 각각의 관계를 회귀직선으로 나타내었을 때 썸뱅이의 청각은 측정주파수에 있어서는 대략 60dB이하일 경우에는 잡음에 의한 영향이 보이지 않았지만 잡음레벨이 75 - 83dB로 높아지면 확실히 잡음에

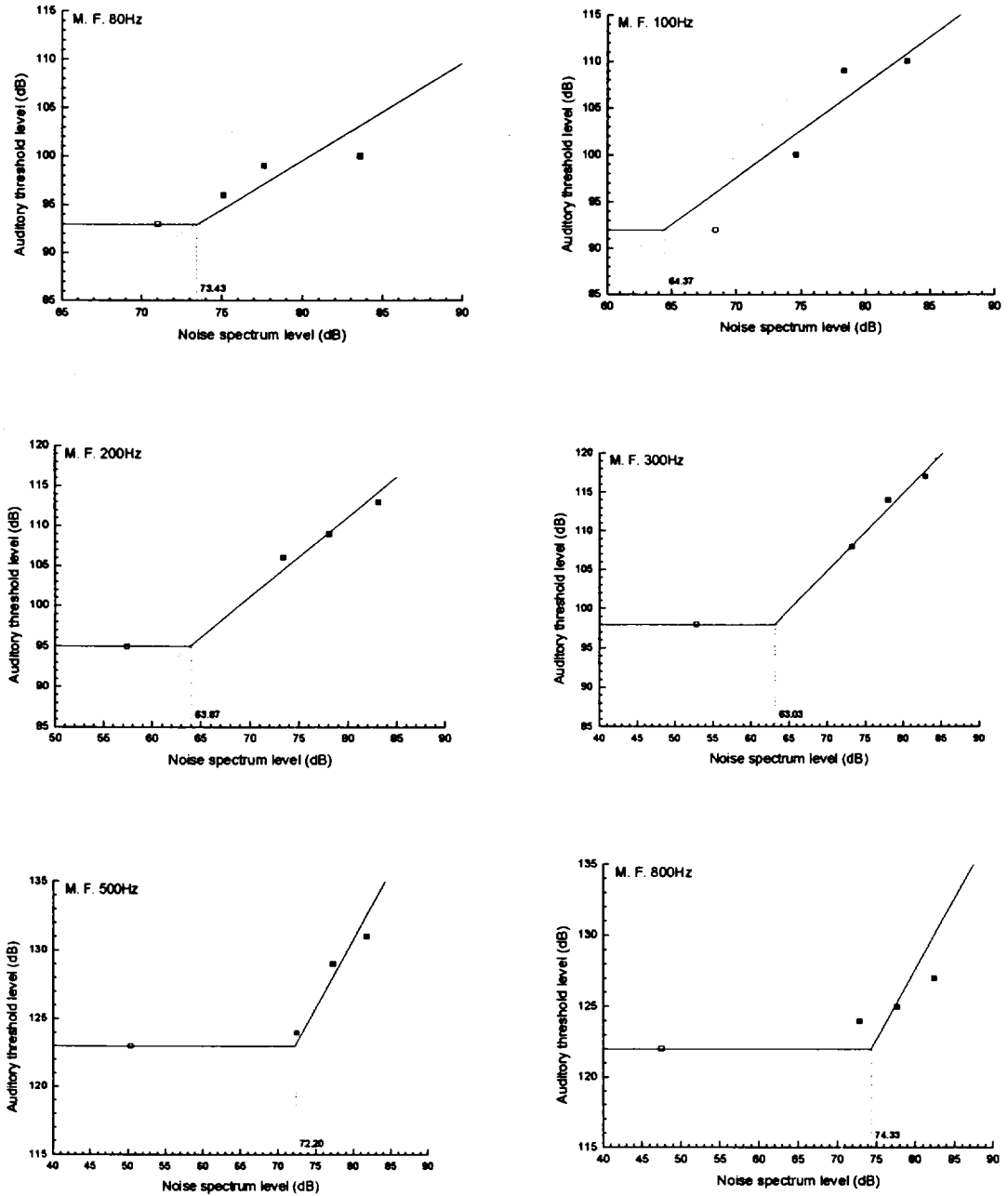


Fig. 5. Relation between noise spectrum level and auditory threshold level (M.F. : Measurement frequency, □ : Auditory threshold level under quite condition, ■ : Auditory threshold level under white noise.).

의한 마스크가 발생하여 청각문턱치가 증가하고 있었다. Fig. 6은 Fig. 5에서 구한 주파수마다 마스크가 발생하는 시점의 잡음스펙트럼을 나타낸 것이다. 마스크 발생시의

잡음스펙트럼 레벨은 100 - 300Hz의 주파수대에서는 약 음압 65dB, 그리고 측정주파수 80, 500, 800Hz에서는 음압 72dB이상의 잡음스펙트럼레벨에서 솜뎡이의 잡음에

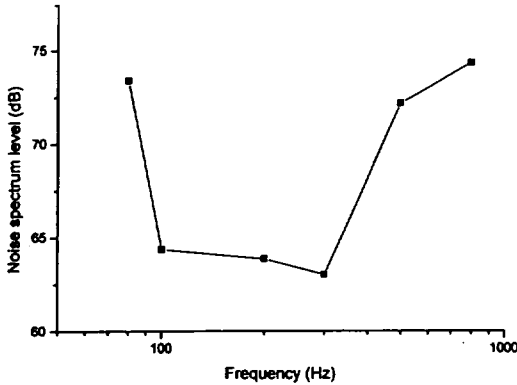


Fig. 6. Minimum noise spectrum levels(0dB re 1  $\mu Pa/\sqrt{Hz}$ ) of masking at frequencies of 80 - 800Hz

의한 마스킹 현상이 나타나기 시작했다.

물고기의 청각특성은 가청주파수 16 ~ 5,000Hz 정도로 100 ~ 1,000Hz의 범위에서 해산어는 대략 음압 90 ~ 110dB의 청각 문턱치를 나타내고 있다고 보고하고 있다(Hatakeyama, 1992). 이상의 실험 결과에서 청각 문턱치와 임계비에서 썸뱅이에 사용하는 음의 주파수를 청각감도가 좋은 100 - 200Hz로 가정하면 이 주파수대의 수중음을 썸뱅이가 듣기 위해서는 적어도 90dB 이상의 음압이 필요하며, 주파수에 따라 다소의 차이는 있지만 스펙트럼레벨이 약 65dB이상의 잡음이 존재하는 환경에서는 썸뱅이의 청각능력이 마스킹되기 때문에 실제 해역에 있어서 수중음향을 이용하여 어군 행동을 제어할 경우에는 배경 잡음의 특성을 파악하여 신호음을 식별할 수 있도록 방음시에 음압을 충분히 고려하여 청각 문턱치가 잡음보다도 약 27dB이상의 높은 음을 사용하지 않으면 안될 것으로 판단된다.

### 요 약

해양목장에서 음향순치 대상 어종으로 사용할 수 있는 썸뱅이의 청각능력을 파악하여 해양목장화의 기초자료를 제공할 목적으로 썸뱅이의 환경잡음에 대한

임계비와 학습 및 유집을 위한 방성음압 강도를 조사하였다.

73, 78, 83의 3단계 백색잡음을 방성하였을 때 썸뱅이의 청각문턱치는 백색잡음이 없을 때보다 높게 나타나 마스킹 효과가 나타났고, 100, 200, 300Hz에서 보다 뚜렷하게 나타났다. 썸뱅이의 임계비는 측정주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800Hz에서 대략 19, 27, 31, 35, 50, 47dB이고 마스킹 현상은 약 60 - 65dB의 잡음레벨에서 나타나기 시작하였으나, 80, 500, 800Hz에서는 70dB이상에서 나타났으며 100 - 200Hz에서 신호음을 인식하기 위해서는 대략 90dB이상, 잡음레벨보다 약 30dB이상의 높은 음압이 요구되었다.

### 참고문헌

- 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.
- Hatakeyama, Y., 1992. The Hearing Abilities of Fish. Fisheries Engineering, 28(2), 111~119.
- Ishioka, H., Y. Hatakeyama and S. Sakaguchi, 1988. The hearing ability of the red sea bream *Pagrus major*. 日水誌, 54, 947~951.
- 박용석 · 이창현 · 이유철 · 서두옥, 1997. 명태의 행동 제어용 심전도 도출에 관한 연구. 제주대학교 해양연구소 연구논문집, 21, 175~179.
- 박용석 · 이창현 · 문종욱 · 안장영 · 서두옥, 1999. 조피볼락의 청각문턱치. 수산해양교육연구, 11(1), 88~97.
- 本松敬一郎 · 平石智徳 · 山本勝太郎 · 梨本勝昭, 1996. クロソイ聴覚閾値と臨界比. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 62(5), 785~853.
- 이창현 · 박용석 · 문종욱 · 김석종 · 안장영 · 서두옥, 1999. 수중 가청음에 의한 썸뱅이의 청각능력 - 1. 청각 문턱치 -. 한국어업기술학회지, 35(2), 156~160.