

수중 가청음에 의한 볼락의 청각 능력

2. 청각 임계비

이창현 · 서두옥
제주대학교

The Hearing Ability of Black Rockfish *Sebastes inermis* to Underwater Audible Sound

2. The Auditory Critical Ratio

Chang-Heon LEE and Du-Ok SEO

Division of Marine Production Engineering, 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 black rockfish *Sebastes inermis* were measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of 73~83 dB (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) with a classical cardiac conditioning technique. Critical ratios were about 28~34 dB at 80~300 Hz and 47~52 dB at 500~800 Hz. The ratio increased almost linearly with increasing frequency to 500 Hz. The noise spectrum level at the start of masking was about 70 dB within the frequency range of 80~800 Hz excepting 65 dB at 300 Hz. It means that hearing of the black rockfish is masked in the natural environment with the noise spectrum level above 65 dB. The sound pressure level of 200~300 Hz recognized by black rockfish was above 96 dB under the ambient noise and the critical ratio of them was above 26 dB.

Key words: Hearing ability, Black rockfish, Underwater audible sound, Auditory critical ratio

서 론

수중 가청음은 어군의 행동 제어와 해양 목장에서 음향 순치 기술로 많이 응용되고 있으나, 수중 가청음에 의한 어군 행동 해석을 하기 위해서는 어류의 청각 능력을 정확히 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 오래 전부터 여러 어류의 청각 능력에 관련된 연구가 수행되었다 (Chapman and Hawkins, 1973; Ishioka et al., 1988). 이처럼 어류의 청각 능력을 파악하는 것은 음향 순치를 이용한 어군의 유집뿐만 아니라 어획의 과정에 있어서 대상 어류의 행동 반응을 추측할 수 있는 것 이외에 새로운 어구, 어법 개발과 조업중의 어구에 대한 어류의 행동 양상을 해결하는 데도 필요하다 (Lee et al., 1999).

따라서 해양 목장에 있어서 대상 어류의 음향 순치 뿐만 아니라 양식장 등에서의 음향을 이용한 자동 급이기 사용을 위해서는 어류에 대한 청각 능력을 파악하는 것이 대단히 중요하고, 수중 가청음을 이용한 어군 행동 제어를 하는 경우에도 어류의 청각 능력은 어종마다 다르기 때문에 대상 어류에 대한 기초적인 청각 능력을 명확히 하는 것이 필요하다 (Park et al., 1999).

어류는 바다에서 자연 발생적인 수중 잡음과 인위적으로 발생하는 수중 잡음이 존재하는 환경에서 서식하기 때문에 어류의 청각은 수중에서 발생하는 배경 잡음에 의해서 영향을 받으며, 잡음이 클 경우는 작은 음이 듣기 어렵게 되는 마스킹 현상이 발생한다. 따라서 수중에는 각각의 요인에 의해서 발생하는 배경 잡음들이 언제나 혼합되어 있고, 그 음압의 레벨도 변동하기 때문에 수중음을 이용하여 어류를 음향 순치시키고, 행동을 제어하기 위해

서는 대상 어류에 대한 청각 문턱치 뿐만 아니라 배경 잡음에 의한 마스킹 효과를 충분히 조사하는 것이 중요하다 (Hatakeyama, 1992).

이 연구에서는 제주 연안 해역에 있어서 해양 목장의 음향 순치 대상 어류로 이용할 수 있는 연안 정착성 어종인 볼락의 청각 문턱치 실험 결과를 기초로 수음을 마스킹하는 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 단계별로 변화시켜가면서 볼락의 청각 문턱치를 측정하여 청각 임계비를 계산함과 동시에 마스킹이 발생하는 백색 잡음의 스펙트럼 레벨에 관해서 조사 분석하였다.

재료 및 방법

실험어인 볼락 *Sebastes inermis*은 제주 연안에서 손줄 낚시로 어획하여 제주대학교 해양연구소 사육 수조로 옮겨 사육한 것으로 그 중 6미를 실험에 사용하였다. 전장은 15~30 cm로 실험 기간 중의 수온은 12~22°C였으며, 실험 수조로 이동한 다음 12시간이 경과한 후 실험을 실시하였다.

방성음의 수중 음압과 수조 내의 배경 잡음은 수중 청음기 (B&K, 8103)를 실험어의 머리 위치에 설치한 후 전치 증폭기 (B&K, 2635)와 휴대용 주파수 분석기 (B&K, 2143)를 이용하여 1/3 옥타브 분석으로 각각 측정하였다. 방성음의 음압과 잡음의 주파수 분석은 실험전에 실험 시간대에 있어서 반복 측정하였다.

실험어의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험 장치는 Lee and Seo (2000)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, 마취시킨 실험어의 위심강 부근에 심전도 도출용 낚시바늘의 끝 부분을 삽입한 후, 실험어의 심박 간격은 오실로스코프 (Tektronix, TDS-340)를 이용하여 측정하였다.

실험어의 음향 조건 학습 및 청각 임계비를 측정하기 위하여 사용한 음향 자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz의 순음을 이용하였으며, 주파수 300 Hz의 순음을 약 120 dB (0 dB re 1 μ Pa)의 음압과 함께 직류 전압 8V의 전기 자극을 실험어에게 주면서 음향 조건 학습을 시켰다.

실험어 음향 조건 학습의 음방성 방법은 실험어의 심박 간격이 안정 상태를 나타낼 때 Fig. 1의 (b)와 같이 지속 시간 5초간의 주파수 300 Hz의 순음을 방성하였으며, Fig. 1의 (c)와 같이 방성 개시 3초 후에 지속 시간 0.1초의 전기 자극 직류 전압 8V를 가하면서 음향 학습을 시켰고 음방성시 심박 간격의 변화가 3회 이상 연속적으로 반응이 나타나면 음향에 대한 학습이 완료된 것으로 간주하였다.

각각의 음향 학습 실험 모두 전기 자극 후 실험어의 심박이 정상적으로 될 수 있도록 3~5분 이상의 시간 간격을 두어 음향 학습을 시켰으며, 이와 같이 실험어에 대하여 음향 조건 학습을 완료시킨 후 3~5 dB씩 음압을 감소시켜 방성하면서 심박 간격을 관찰하였다. 이때 방성음에 대하여 실험어가 반응을 나타내었을 경우 학습 효과를 지속시키기 위하여 전기 자극을 주었으며, 이와 같은 방법으로 실험어의 청각 문턱치를 구한 후 순음 방성 1~2분전에 백색 잡음을 방성한 후 측정 주파수의 음압을 높이면서 청각 문턱치를 측정하였다.

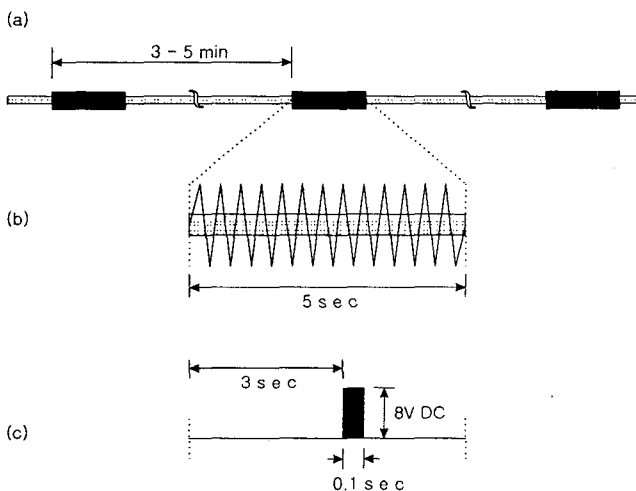


Fig. 1. The time sequences for sound emissions of white noise, pure sound and electric shocks.
 (a) Time sequence for the emission of pure sound stimulus under white noise.
 (b) Emission time and period of pure sound stimulus under white noise.
 (c) Pulse for electric shock stimulus.

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

이때 사용한 백색 잡음의 레벨은 참돔의 청각 문턱치 (Hatakeyama, 1989)에 영향을 미치는 배경 잡음의 스펙트럼 레벨을 약 70 dB 이상으로 보고한 것을 근거로 하여 이 실험에서는 백색 잡음의 스펙트럼 레벨 (S)을 음압 73, 78, 83 dB의 3단계로 설정하여 사용하였다. 볼락의 청각 임계비 (Critical Ratio : CR) 측정은 청각 문턱치에 사용한 신호음의 주파수 음압을 T, 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 S라 할 때 T-S로 나타내었다.

결과 및 고찰

실험시에 측정된 실험 수조 내의 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 평균치 및 그 때의 청각 문턱치 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 실

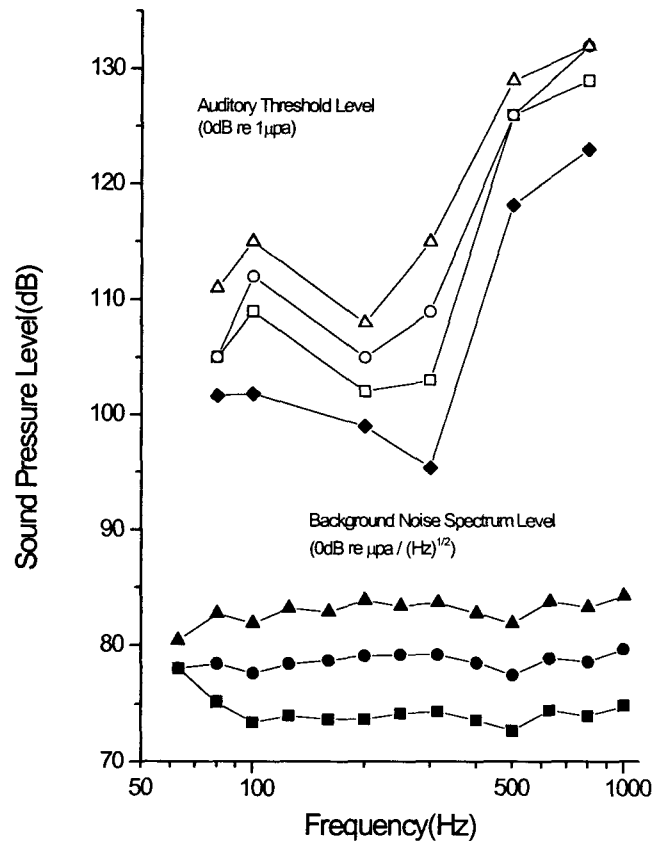


Fig. 2. Audiogram of black rockfish under white noise spectrum level (Δ , Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 83 dB; \circ , Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 78 dB; \square , Auditory threshold level under mean white noise spectrum level of 73 dB; \blacktriangle , Mean white noise spectrum level of 83 dB; \bullet , Mean white noise spectrum level of 78 dB; \blacksquare , Mean white noise spectrum level of 73 dB; \blacklozenge , Auditory threshold level under ambient noise.).

협어의 청각 임계비 측정에 사용한 백색 잡음의 스펙트럼 레벨은 전기 노이즈가 포함된 주파수 60 Hz를 제외하고 거의 일정하게 나타나고 있었고 편차는 적게 나타났다.

백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 73, 78, 83 dB로 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 주파수에 대해 백색 잡음 발생전 보다도 청각 문턱치가 증가하여 명확히 마스킹 현상이 일어나고 있었다. 특히, 주파수 300 Hz에서 마스킹 현상이 뚜렷이 나타나고 있었다.

Fig. 3은 각각의 백색 잡음 발생시에 측정한 청각 문턱치에서 각각의 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 뺀 청각 임계비를 평균으로 나타낸 것으로 볼락의 청각 임계비는 측정 주파수 80 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 500 Hz, 800 Hz에서 음압이 각각 28 dB, 34 dB, 26 dB, 30 dB, 47 dB, 52 dB로 되어 측정 주파수 300 Hz 이상부터 측정 주파수가 높을수록 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 차가 크게 나타나고 있었고, 볼락의 청각 문턱치가 백색 잡음에 의해서 마스킹된 상태에서는 각각의 백색 잡음 스펙트럼 레벨보다 약 26~52 dB 이상의 차이를 보였다.

청각 임계비는 청각 문턱치와 백색 잡음의 비를 의미하며, 백색

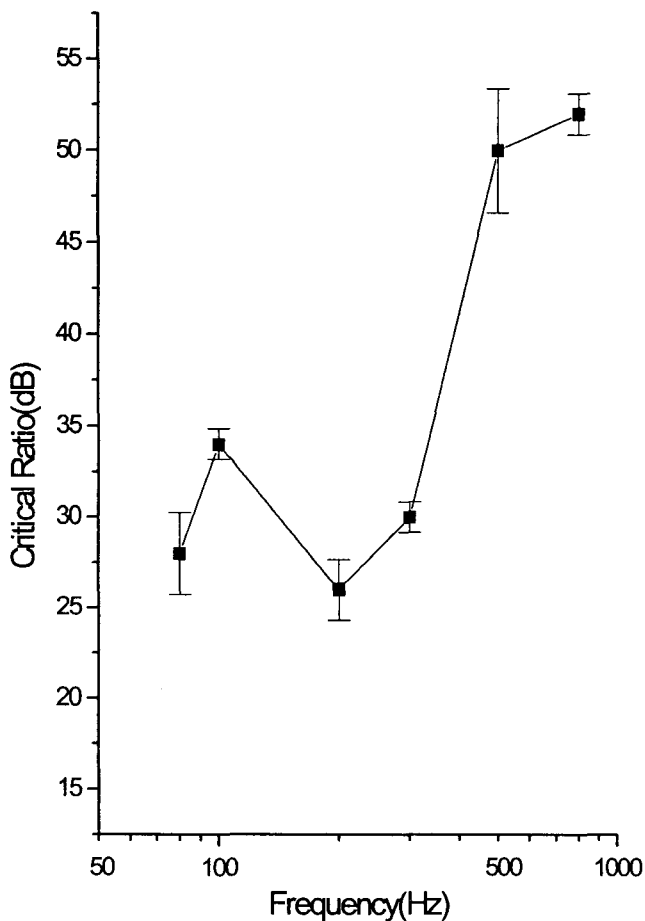


Fig. 3. The auditory critical ratio of black rockfish.

잡음이 청각에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료가 되는 것으로 볼락의 경우 측정 주파수의 음을 인식하기 위해서는 음압이 Fig. 3에서 처럼 각 백색 잡음 스펙트럼 레벨에서 청각 임계비 이상 높지 않으면 어려운 것으로 판단되며, 주파수가 높을수록 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 차가 크게 나타났다.

볼락의 청각 특성의 결과를 백색 잡음 스펙트럼 레벨과 청각 문턱치와의 관계에 관하여 측정 주파수마다 정리한 것이 Fig. 4이다. 백색 잡음이 발생되지 않을 때를 함께 포함하여 4단계의 잡음 레벨로 측정한 문턱치를 중축, 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 횡축으로 하여 각각의 관계를 기울기 1인 회귀 직선으로 측정 주파수의 일부를 나타내었을 때 볼락의 청각은 일부 측정 주파수에서의 청각 문턱치가 청각 임계비의 직선에서 이탈한 것이 보이지만 대략적으로 직선에 가까이 있으며 볼락은 청각 문턱치와 백색 잡음 스펙트럼 레벨의 관계에서는 어느 정도의 백색 잡음 레벨까지는 청각 문턱치가 변하지 않고 일정하게 되었고, 그 이상의 백색 잡음 레벨에서는 백색 잡음 증가분 만큼 청각 문턱치도 증가하였다. 이상의 결과 2개의 직선의 교점으로부터 볼락의 청각 문턱치에 영향을 미치기 시작하는 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 구하면 볼락의 경우는 측정 주파수 300 Hz를 제외한 측정 주파수에서 음압 약 70 dB 이상부터 백색 잡음에 의한 마스킹이 발생하였고, 300 Hz의 주파수에서는 약 65 dB 이상일 경우 백색 잡음에 의한 영향이 나타나 청각 문턱치가 증가하고 있었다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 구한 볼락의 측정 주파수마다 마스킹이 발생하는 시점의 백색 잡음 스펙트럼 레벨을 나타낸 것으로 볼락은 주파수 300 Hz에서 음압이 약 65 dB이고 그 외의 주파수대에서는 약 70 dB 이상에서 백색 잡음에 의한 마스킹 현상이 발생하였다.

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 볼락의 경우 임계비가 28 dB 이상이 되어 실험에 사용한 측정 주파수를 감지하고 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 청각 문턱치의 측정에 사용된 실험어는 공급 지역이 같고, 그 사육 장소에 있어서 음 환경도 전체적으로 같은 조건에서 서식하였던 것을 주로 사용하지만 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 17~30 dB 이상 높게 나타났다. 특히 실험어의 음 감지 능력이 높은 주파수 100~300 Hz에서는 사육 수조의 배경 잡음 레벨이 실험 수조의 배경 잡음 레벨보다 약 30 dB 이상 높게 나타나고 있었다. 또한 일반적인 바다에서의 수중 잡음과 비교하면 주파수 100 Hz에서 음압이 약 10 dB, 그리고 주파수 1,000 Hz에서 음압이 약 20 dB 정도 높은 상태이다. 이러한 배경 잡음 레벨의 측정은 일시적으로 이루어졌지만 사육 수조는 항상 비슷한 소음이 존재하고 있는 것으로 판단된다. Kojima (1997)는 주변 배경 잡음이 다른 장소에서 생활한 같은 크기의 참돔의 청각 문턱치가 서로 다르게 나타나 주변 배경 잡음에 따라 청각 문턱치가 다르다고

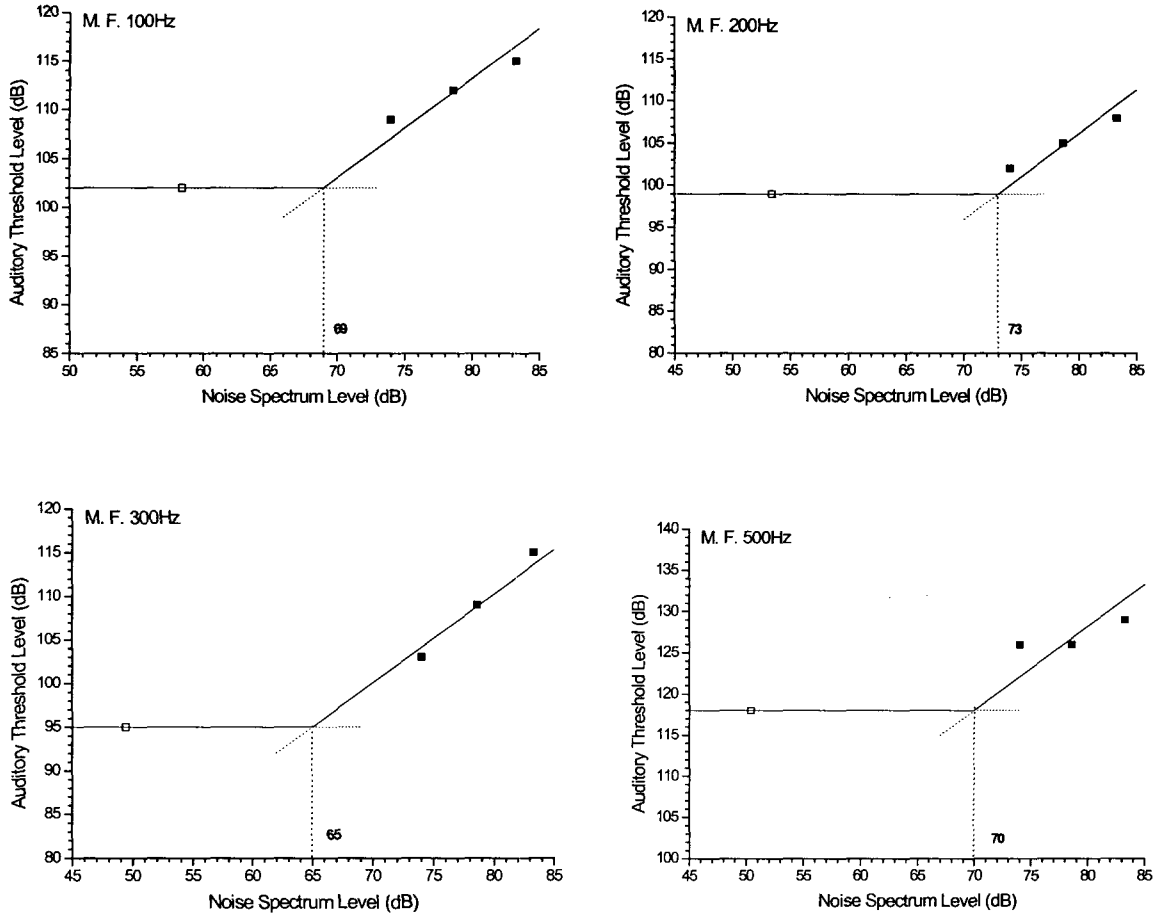


Fig. 4. Relation between noise spectrum level and auditory threshold level (M.F., Measurement frequency; □, Auditory threshold level under the quite condition; ■, Auditory threshold level under the white noise.).

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.

이상의 결과 청각 문턱치와 임계비를 기초로 하여 수중음을 불락에 이용할 수 있는 음을 주파수 200~300 Hz로 가정하면 이 주파수대의 수중음을 불락이 듣기 위해서는 적어도 96 dB 이상의 음압이 필요하며, 주파수에 따라 다소의 차이는 있지만 스펙트럼 레벨이 약 65 dB 이상의 잡음이 존재하는 환경에서는 불락의 청각 능력이 마스킹되기 때문에 실제 해역에 있어서 수중 음향을 이용하여 어군 행동을 제어할 경우에는 배경 잡음에 대한 측정도 중요하다. 이와 함께 방성음의 감쇠 등의 음향 특성뿐만 아니라 배경 잡음에 의한 청각의 영향이나 음원 정위 능력 등 대상 어류에 대한 청각 특성도 충분히 파악하는 것이 필요하고, 어류의 음향 학습 능력이나 기억 등 많은 요인에 관한 검토가 필요할 것이다.

요 약

해양 목장에서 음향 순차 대상 어종으로 사용할 수 있는 불락의 청각 문턱치를 기본으로 하여 음향 어법의 기초 자료를 제공할 목적으로 불락의 백색 잡음에 대한 청각 임계비와 학습 및 유집을 위한 방성 음압 강도를 조사한 결과는 다음과 같다.

음압 73, 78, 83 dB의 3단계 백색 잡음을 방성하였을 때 불락의 청각 문턱치는 백색 잡음이 없을 때보다 높게 나타나 마스킹 현상이 나타났고, 주파수 300 Hz에서 보다 높게 나타났다. 불락의 청각 임계비는 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz에서 음압이 대략 28, 34, 26, 30, 47, 52 dB이고 마스킹 현상은 주파수 300 Hz에서 음압 65 dB의 잡음 레벨에서 나타나기 시작하였고 그 외의 주파수에서는 음압 68 dB 이상에서 나타났으며, 불락이 주파수 200~300 Hz에서 신호음을 인식하기 위해서는 음압 96 dB 이상, 잡음 레벨보다 약 26 dB 이상의 높은 음압이 요구되었다.

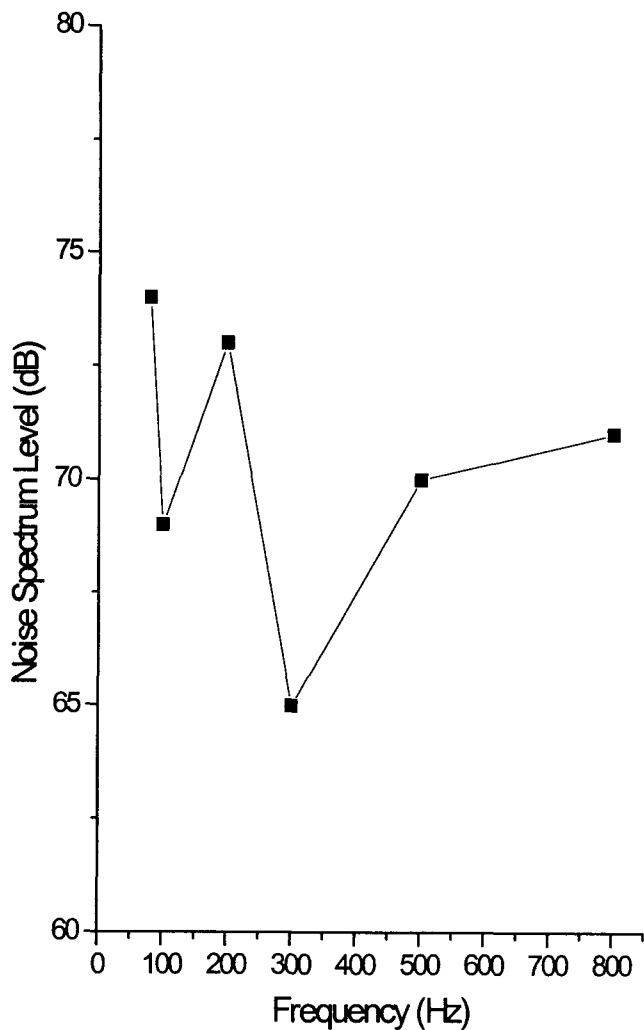


Fig. 5. Minimum noise spectrum level (0 dB re $1 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) of masking at frequencies of 80~800 Hz.

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.

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.

Park, Y.S., C.H. Lee, J.W. Moon, J.Y. Ahn and D.O. Seo. 1999. Auditory thresholds of black rock fish. J. Fish. Mar. Sci. Edu., 11, 88~97.

2001년 1월 31일 접수

2001년 3월 17일 수리