

제주 연안에서 어획된 두툽상어의 청각 특성

안장영 · 최찬문 · 이창헌*

제주대학교 해양과학대학 해양산업경찰학과

Auditory Characteristics of Tiger shark *Scyliorhinus torazame* caught in the Coast of Jeju Island

Jang-Young AHN, Chan-Moon CHOI and Chang-Heon LEE*

*Dept of Marine Industrial and Maritime Police, College of ocean science, Jeju national university,
Jeju 690-756, Korea*

In order to obtain the fundamental data about the behavior of sharks by underwater audible sound, this experiment was carried out to investigate the auditory characteristics of tiger shark *Scyliorhinus torazame* which was caught in the coast of Jeju Island by heart rate conditioning method using pure tones coupled with a delayed electric shock. The audible range of tiger shark extended from 80Hz to 300Hz with a peak sensitivity at 80Hz including less sensitivity at 300Hz. The mean auditory thresholds of tiger shark at the frequencies of 80Hz, 100Hz, 200Hz and 300Hz were 90dB, 103dB, 94dB and 115dB, respectively. The positive response of tiger shark was not evident after the sound projection of over 300Hz. At the results, the sensitive frequency range of tiger shark is narrower than that of fish that has swim bladder. In addition, it is assumed that the most sensitive frequency in auditory thresholds of Chondrichthyes is lower than that of Osteichthyes. Critical ratios of tiger shark measured in the presence of masking noise in the spectrum level range of about 60–70dB (0dB re $1\mu Pa/\sqrt{Hz}$) increased from minimum 27dB to maximum 39dB at test frequencies of 80–200Hz. The noise spectrum level at the start of masking was distributed at the range of about 65dB within 80–200Hz.

Keywords: Hearing ability, Tiger shark, Underwater audible sound, Auditory threshold, Critical ratio

서론
수중에서의 정보는 전달되는 과정에서 감쇠

가 적은 음파를 이용하면, 광파, 전자파보다도
효과적인 제어수단이 될 수 있는데, 이러한 수중

*Corresponding author: leech@cheju.ac.kr, Tel: 82-64-754-3491, Fax: 82-64-756-3483

음향은 초음파를 이용한 어군탐지, 해양 관측뿐만 아니라 가청음을 이용한 어군의 행동 제어의 주요 수단으로서 활용된다. 해상에서 수중 음향을 이용하여 어군을 제어하기 위해서는 대상 어종의 청각 능력을 정확히 파악할 필요가 있으며, 이와 관련하여 Ishioka et al. (1988)의 참돔, Park et al. (1999)의 조피볼락, Lee and Seo (2000)의 볼락, Lee et al. (1999)의 솜뱅이 등의 여러 어업자원에 대하여 오래전부터 청각 능력에 관련된 연구가 수행되어 주파수 100–1,000 Hz의 범위에서 가장 민감한 반응을 나타낸다고 알려져 있다. 특히, 어업자원에 있어서의 어류의 청각능력 측정은 주로 음향을 이용한 어군의 유집뿐만 아니라 어획의 과정에 있어서 대상 어류의 행동반응을 추측할 수 있는 등 새로운 어구어법의 개발과 조업중의 어구에 대한 어류의 행동 양상을 해결하는 데 많이 이용되어 왔다.

연골어류인 두툽상어는 우리나라 제주도를 포함한 서해 남부와 남해, 호가이도 남부의 일본해역, 필리핀 등의 수심 100m 이천의 해저면 바닥에 서식하는 저서성 상어로 전장은 41–48cm의 크기이며, 상어류 중에서도 타 상어류에 비해 몸체가 작고 공격성이 없으며, 위협적이지 않아 온순한 편이다 (FAO, 1984; Kim et al., 2005). 제주연안에서는 주낙 또는 들망에 의해 어획된 후 활어로 공급되고 있어 어민의 또 하나의 소득원이 될 잠재성이 높다.

이 연구에서는 이들 상어류에 대하여 수중음에 대한 행동 특성을 파악할 목적으로, 제주 연안해역에서 어획되는 두툽상어를 대상으로 하여 잡음스펙트럼레벨을 단계별로 변화시켜 가면서 음특성에 대한 기초자료를 얻고자 두툽상어의 청각문턱치와 임계비를 측정함과 동시에 마스킹이 발생하는 잡음의 스펙트럼레벨에 관해서 조사하였다.

재료 및 방법

실험어인 두툽상어 *Scyliorhinus torazame*은 제

주연안에서 들망으로 어획한 후 제주대학교 해양과환경연구소의 사육수조로 옮겨 약 3–4개월 사육하였다. 실험에 사용된 두툽상어의 체장은 380–410mm, 체중은 300g 내외였다. 사육 실험어 중 26마에 대하여 청각문턱치 결과를 얻었으며, 그중 6마에 대하여 청각임계비를 구하였다. 사육중의 수온은 11.0°C–14.0°C의 분포를 나타내었고, 실험시 실험수조의 수온은 사육수조와 같은 수온을 유지하도록 항온계를 이용하였다. 두툽상어는 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후 Lee (2009)와 같이 실험수조에 순응되도록 최소 약 4시간 이상 지난 후 청각능력 측정 실험에 사용하였다.

방성음의 수중음압과 수조내의 배경잡음은 수중청음기 (B&K, 8103)를 두툽상어의 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 실험이 끝난 후 즉시 측정하였다.

두툽상어의 청각 특성을 조사하기 위하여 사용한 실험 장치 및 방법은 Lee and Seo (2000) 및 Park et al. (1995)와 같이 물입자의 움직임을 상쇄하기 위하여 수조 벽면에서 약 5cm 떨어진 지점 양쪽에 공중 스피커 (Promana, CB38)를 설치하였다. 또한, 신호 발생기 (B&K, 1400)와 잡음 발생기 (B&K, 1405)를 믹서 (INKEL, MX-642)에 연결하여 신호음과 백색 잡음을 동시에 방성할 수 있도록 하였으며, 이때 백색 잡음은 수중에서 주파수가 높아짐에 따라 감쇠가 많아지므로 음압 분포가 일정하도록 이퀄라이저 (INKEL, EQ-9231)를 통하여 스피커에 연결하였으며, 심전도 도출은 낚시바늘을 이용하였으며, 두툽상어를 마취시킨 후, Fig. 1과 같이 아가미 아래 뒤쪽 부근에 낚시 끝 부분을 삽입한 후, 오실로스코프 (Tektronix, TDS-340)를 이용하여 실험어의 심박간격을 측정하였다.

어류의 음향 조건학습 및 청각 특성을 측정하

기 위하여 사용한 음향자극은 주파수 80, 100, 200, 300, 500, 800 Hz의 6종류의 순음을 이용하였으며, Fig. 2와 같이 측정주파수 중 임의의 하나의 순음을 약 120 dB (0 dB re $1\mu Pa$) 이상의 음압과 함께 직류 전압 10 V의 전기 자극을 실험어

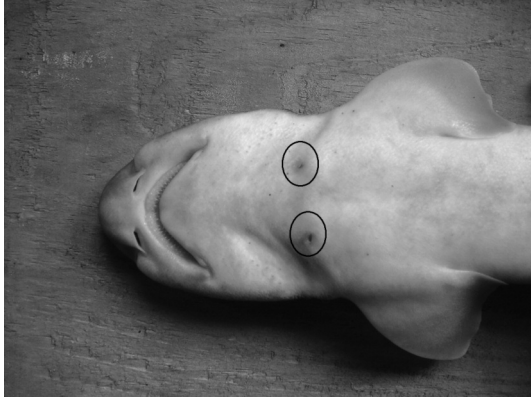


Fig. 1. Insertion of electrodes.

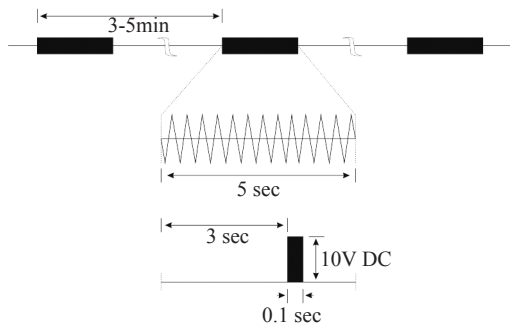


Fig. 2. Conditioning method for determining the auditory characteristics.

에 주면서 조건 학습시켰다.

어류 음향 조건학습은 실험어의 심박간격이 안정상태를 나타낼 때 지속시간 5초간의 순음을 임의의 순서로 방성하였으며, 방성개시 약 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 하였으며, 음자극에 대한 반응이 방성 후 2-3초 이내에 나타나지 않고 늦게 나타났을 경우, 우연오차로 간주하여 청각문턱치에서 제외하였다.

Fig. 3 (b)와 같이 측정 주파수중 임의의 한 주파수에 대해 방성하였을 때 3회 이상 연속으로 심박간격에 변화가 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. 이와 같이 실험어에 대하여 음향 조건 학습을 완료시킨 후 음압을 약 5dB씩 감소시켜 방성하면서 심박 간격을 관찰하였다. 이때 방성음에 대하여 실험어가 반응을 나타내었을 경우 학습 효과를 지속시키기 위하여 전기 자극을 주었으며, 이와 같은 방법으로 실험어가 감지할 수 있는 가장 낮은 음압을 실험어의 청각 문턱치로 취하였다. 청각 문턱치를 구한 후, 백색 잡음을 방성하면서 청각문턱치를 측정하여 청

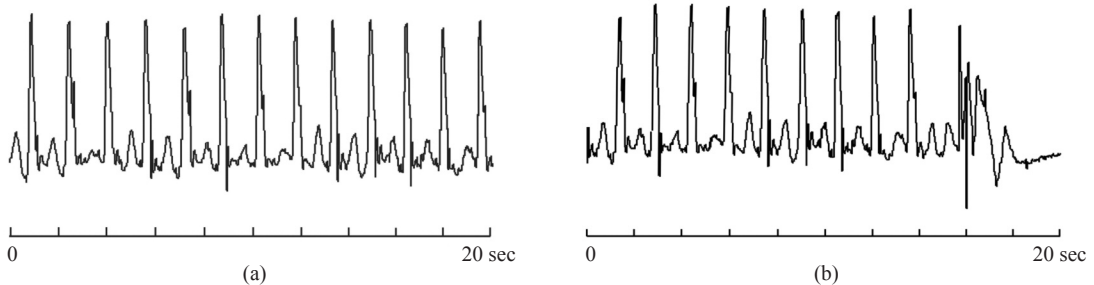


Fig. 3. Electrocardiograms showing typical cardiac responses to a pure tone stimulus: (a) Before a pure tone stimulus, (b) Positive response to pure tone stimulus and electric shock.

각임계비를 구하였다. 이들 각각의 청각 문턱치는 우연 오차를 줄이기 위하여 같은 음압에서 2회 이상 반응이 나타났을 경우에 청각 문턱치로 하였다.

배경 잡음이 어류의 청각능력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 이때 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. 실험어의 청각 임계비 측정은 청각 문턱치에 사용한 신호음의 주파수 음압을 T, 백색 잡음의 스펙트럼 레벨을 S라 할 때 T-S로 나타내었다.

결과 및 고찰

연골어인 두툽상어에 대한 측정주파수의 청각 문턱치를 평균치와 표준편차로 Fig. 4에 1/3 Octave의 배경잡음과 함께 나타내었다. 실험수조에서의 잡음은 60Hz에서 전원에 의한 영향으로 높게 나타나고 있으나 실험어의 청각문턱치에는 영향이 없는 것으로 판단된다. 측정주파수에 대한 각각의 청각문턱치는 80Hz에서 90dB, 100Hz에서 104dB, 200Hz에서 96dB, 300Hz에서 116dB로 주파수가 높을수록 청각문턱치가 높았다.

특히, 두툽상어는 80Hz-800Hz의 측정주파수에 대하여 300Hz까지는 인식하고 있는 것으로 판단되었으나, 500Hz 이상의 측정주파수에서는 인식이 어려운 것으로 사료되며, 80Hz의 저주파음에서 평균 약 90dB의 청각문턱치를 나타내 다른 측정주파수보다 감도가 가장 민감한 것으로 나타났다. Matomatsu et al. (1996)의 Black rockfish, kojima et al. (1992)의 Masu salmon 등 여러 연구자의 실험결과 대부분의 어종에 있어서 100Hz-200Hz의 주파수에서 청각감도가 낮게 나타나고 80Hz에서 상대적으로 높은 청각문턱치를 나타내었으나, 연골어인 두툽상어인 경우 이들과 달리 측정주파수 80Hz의 낮은 주파수에

서 민감한 반응을 나타내어 이들 경골어류의 청각특성과 차이를 보였다. 지금까지 어류의 청각 문턱치 측정에 관한 보고에서 어류의 청각문턱치에 영향을 미치는 가장 큰 것으로 어류의 부레의 역할이 높게 나타나고 있다. 부레는 본래 어체의 비중을 조절하여 부력조정을 담당하고, 이와 함께 weber 소골을 경유하여 내이와 연결되어 음파를 증폭하고, 공명을 일으켜 청각에 어떤 역할을 하는 것이 오래전부터 보고되었다 (Anraku, 1997). 또한, 어류의 복강내의 위치나 밀도의 차이등에 의해 음을 탐지하거나 음을 발생하는 데 관여하는 것으로 보고되고 있고, 청각 문턱치를 작게 하며, 어류가 들을 수 있는 가청범위를 넓게 하는 기능이 있어 (Hatakeyama, 1996) 일반적으로 부레가 없는 어종은 부레가 있는 어종에 비해 가청주파수 범위가 좁다. 부레와 내이가 연결되지 않은 참돔이나 텔라피아 등은 그 가청범위가 1500Hz 이하에 분포하고 있는 반면, 부레와 내이가 연결되어 있는 골피어 *Carassius auratus* 는 가청범위가 50-5000Hz까

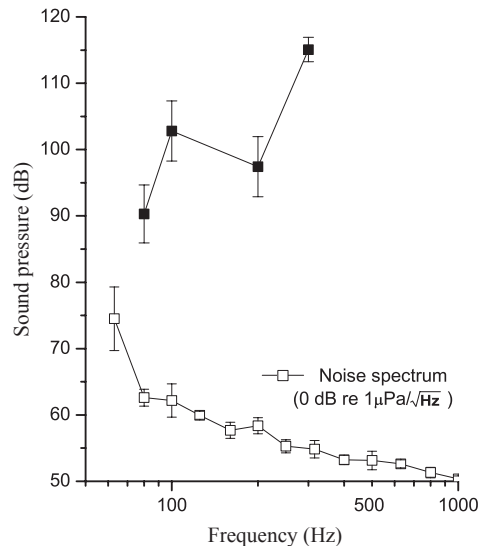


Fig. 4. Audiogram of tiger shark (■) and spectrum level of background noise (□) with the mean values and deviations.

지 넓게 분포하고 있으며, 최소 청각문턱치도 낮아 청각능력이 우수한 어류로 보고되어 있다. Chapman and Sand (1974)에 의하면 부레가 없는 *Pleuronectes platessa*와 *Limanda limanda*는 입자의 영향이 없을 경우 30–250Hz의 음중 110–160Hz에서 가장 높은 감도를 나타내고 있었고, 입자 변위의 영향을 받을 경우 160Hz이하의 주파수에서 감도가 약 10dB 이상 상승하고 있다고 보고하였다. 또한 Fujieda et al. (1995) 등은 넙치의 경우, 측정주파수 70–500Hz까지 인식하고 있으며, 일부 측정주파수에서 개체에 따른 차이가 보인다고 보고하였다. 이 실험에서 사용한 두툽상어는 이석과 부레가 없는 어류로서, 높은 주파수보다는 낮은 주파수에서 반응이 민감하여 측정주파수 80–800Hz에서 청각문턱치는 80–300Hz까지 인식하고 있는 것으로 조사되어, 가청주파수의 범위가 좁은 것으로 판단된다. Fig. 5는 청각문턱치 측정 실험에서 일부 개체의 심박간격을 나타낸 것으로, 20초의 시간내에 심박횟수가 13–15회 나타나는 경우, 청각문턱치 측정이 용이하였으나, 심박횟수가 높아질수록 학습효과가 떨어져 청각문턱치 측정이 어려웠다.

청각 임계비는 청각문턱치와 청각에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료로 측정 주파수의 음을 인식하기 위해서는 음압이 잡음스펙트럼 레벨에서 청각 임계비 이상 높아야 한다. Fig. 6은 실험에 6미에 대해 각 레벨의 잡음을 발생시켰을 때의 측정주파수 80–200Hz 범위에 대한 청각문턱치를 나타내었다. 300Hz 이상에서는 청각문턱치 측정이 어려워 제외하였으며, 잡음의 레

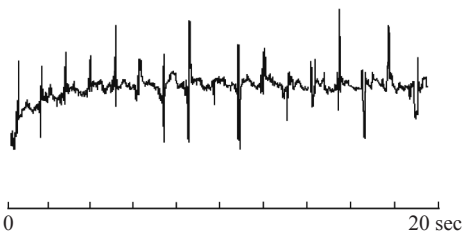


Fig. 5. Electrocardiograms showing the narrow interval of heartbeat according to test individual.

벨이 높아지면 청각문턱치도 높게 나타나 잡음에 의한 마스킹현상이 나타났다.

두툽상어의 잡음에 대한 청각 특성을 나타내기 위하여 Kim et al. (2002)와 같이 3단계의 백색잡음 스펙트럼레벨로 측정한 청각 문턱치를 종축, 잡음의 스펙트럼 레벨을 횡축으로 하여 각각의 dB 관계를 기울기 1인 회귀 직선으로 Fig. 7에 나타내었다. 측정주파수에서의 청각문턱치가 청각 임계비의 직선에서 약간의 이탈이 보이고 있지만 대략 직선에 가까이 있다. 청각 문턱치와 백색잡음 레벨의 관계에서 어느 정도의 백색잡음레벨까지 청각 문턱치가 변화되지 않았으나, 그 이상의 잡음 레벨에서는 백색잡음 증가분만큼 청각 문턱치도 증가하였다. 이상의 결과에서 2개의 직선 교점으로부터 두툽상어의 청각 문턱치에 영향을 미치기 시작하는 백색잡음의 스펙트럼 레벨은 측정주파수에 따라 다소의 차이는 있지만, 측정주파수에서 대략 음압 65dB 이상일 경우에 잡음에 대한 마스킹이 발생하여 청각 문턱치가 증가하는 것으로 판단된다.

실험 결과 두툽상어는 측정주파수 80–800Hz의 순음 중 80–300Hz의 순음을 지각하고 있는

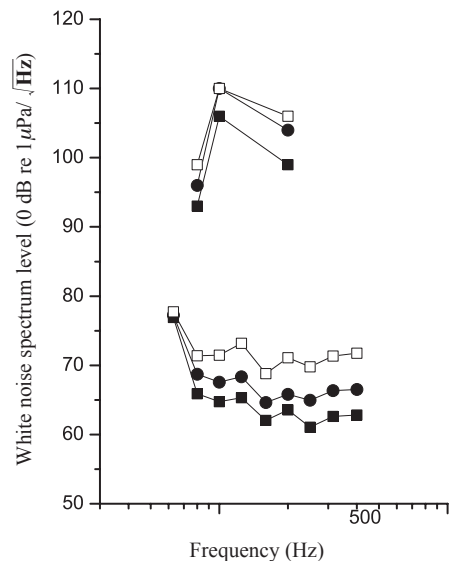


Fig. 6. Audiogram of tiger shark under white noise spectrum level.

것으로 판단되며, 이들 측정주파수에 대한 청각 감도는 80Hz에서 가장 민감하였고, 300Hz에서는 측정 주파수에 순음 인식이 심박간격의 변화로 곧 나타나지 않아, 청각 감도가 현저히 저하되는 것으로 판단되었다. 500Hz 이상의 주파수에 대해서는 자극에 대한 심박간격의 변화가 5초동안의 방성시간보다도 늦게 나타나 우연오차와 구별이 어려워 청각문턱치를 제외하였다. 특히 연골어인 두툽상어에서는 Hatakeyama (1989)의 보고에 의한 청각문턱치에 영향을 주는 배경 잡음의 스펙트럼 레벨 70dB과 비교하여 잡음레벨의 크기가 낮게 나타났고, 또한 측정주파수가 높을수록 청각에 영향을 미치는 잡음의 크기가 낮아지는 경향을 보여 차후 이들에 대한 세심한 측정이 필요하다.

어류의 경우 일반적으로 청각 문턱치의 음압과 배경 잡음 스펙트럼 레벨과의 차이는 음압 15-20dB 정도이면 어류는 배경잡음과 구별하여 감지할 수 있다고 보고하고 있다. 이 실험결과 두툽상어의 경우 임계비가 Fig. 7에서와 같이 80Hz에서 27dB, 100Hz에서 39dB 그리고 200Hz에서 35dB정도로 나타나 측정주파수를 감지하고 있는 것으로 판단되며, 측정주파수가 높을수록 잡음에 의한 마스킹 영향이 큰 것으로 추정된다.

결론

국내 해안에 출현하는 상어류에 대한 수중음의 청각 특성을 조사하기 위하여, 제주 연안에서 어획된 두툽상어를 대상으로 측정주파수 80-800Hz의 순음과 10V의 직류전압의 전기자극을 이용하여 음향조건학습을 시킨 후, 측정주파수와 음압을 임의로 변화시켜가면서 두툽상어의 청각문턱치 및 백색잡음에 대한 청각임계비를 조사하였다. 그 결과 측정주파수 80-800Hz중에서 80-300Hz의 음을 인식하고 있었고, 측정주파수에 대한 각각의 청각문턱치는 90dB, 104dB, 96dB, 116dB로 80Hz의 낮은 주파수에서 가장 민감한 반응을 나타내었다. 백색잡음의 레

벨을 3단계로 백색잡음을 방성하였을 때, 두툽상어의 청각문턱치는 잡음레벨이 높을수록 청각문턱치가 증가하는 마스킹 현상이 나타났다. 청각임계비는 청각문턱치가 가장 적은 측정주파수 80Hz에서 약 27dB이고, 측정주파수가 높아짐에 따라 임계비가 높았다. 잡음에 의한 마스킹현상은 각 측정주파수에서 대략 음압 65dB의 잡음레벨 이상에서 나타나기 시작하였다.

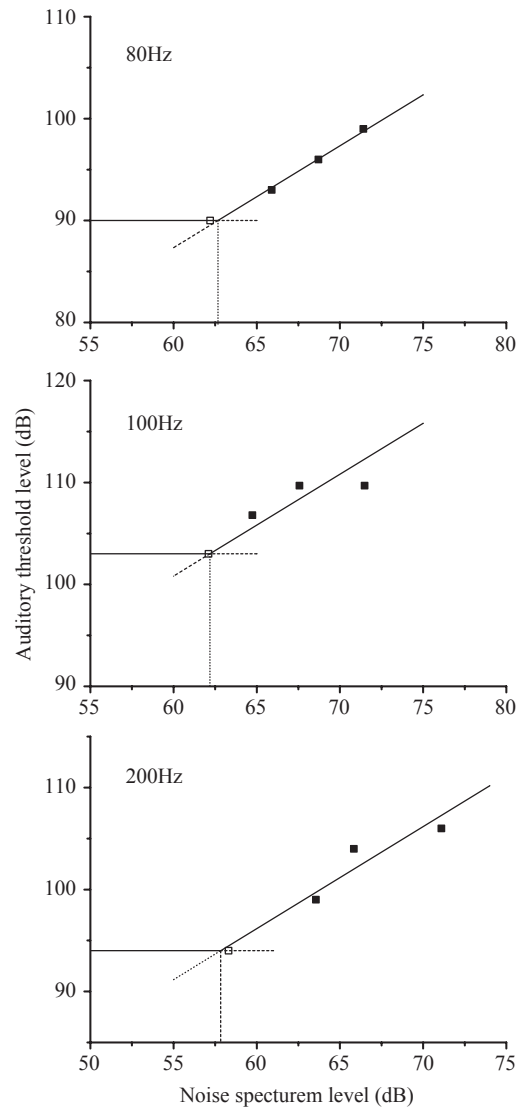


Fig. 7. Relation between auditory thresholds and noise spectrum levels at frequencies of 80-200Hz.

참고문헌

- Anraku, K., 1997. Auditory response in teleost midbrain and relationships between hearing and startle reflex. Nippon Suisan Gakkaishi, 63 (1), 114 – 115.
- Chapman, C.J. and O. sand, 1974. A field study of hearing in two species of flatfish, *Pleuronectes platessa* (L) and *Limanda limanda* (L). Comp. Biochem. Physiol., 47, 371 – 385.
- FAO, 1984. FAO Species catalogue Vol. 4. Part 1. sharks of the world, pp. 367 – 368.
- Fujieda, S., Y. Matsuno and Y. Yamanaka, 1996. The auditory threshold of the bastard haitbut *Paralichthys olivaceus*. Nippon Suisan Gakkaishi, 62 (2), 201 – 204.
- 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., 1996. Fish ' s hearing abilities and responses to underwater sound (I). J. Marine Acoust. Soc. Jpn., 23, 9 – 16.
- Park, J.M., Park, S.C. Park, J.H. Kim and G.W. Baeck, 2010. Feeding habits of 6 shark species in the southern sea of korea. Kor. J. Fish Aquat. Soc., 43 (3), 254 – 261.
- Ishioka, H., Y. Hatakeyama and S. Sakaguchi, 1988. The hearing ability of the red sea beam *Pagrus major*. Nippon Suisan Gakkaishi, 54, 947 – 951.
- Kim, I.S., Y. Choi, C.L. Lee, Y.I. Lee, B.J. Kim and I.H. Kim, 2005. Illustrated book of korean fishes. Koyhak publishing. co. ltd. Seoul, pp. 51.
- Kim, S.H., C.H. Lee, D.O. Seo and Y.J. Kim, 2002. A basic study on acoustic conditioning of fish suitable for a marine ranch, 1. The sound sensitivity of of japanese parrot fish *Oplegnathus fasciatus*. J. Korean Fish. Soc., 35 (6), 563 – 567.
- Kojima, T., T. Shimamura, K. Yoza, N. okumoto, Y. Hatakeyama and H. Soeda, 1992. W-shaped auditory threshold curves of masu salmon *Oncorhynchus masou*. Nippon Suisan Gakkaishi, 58 (8), 1447 – 1452.
- Lee, C.H., Y.S. Park, J.W. Moon, J.Y. Ahn, S.J. Kim and D.O. Seo, 1999. The hearing ability of the scorpion fish *sebastiscus marmoratus* to audible sound, 1. The auditory threshold. Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 35 (2), 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 (6), 581 – 584.
- Lee, C.H., 2009. Stress response of black rock fish according to adapted time in measurement of auditory threshold. J. Kor. Soc. Fish. Tech., 45 (4), 260 – 266.
- Motomatsu, K., T. Hiraishi, K. Yamamoto and K. Nashimoto, 1996. Auditory threhold and critical ratio of black rockfish *Sebastes schlegeli*. Nippon Suisan Gakkaishi, 62 (5), 785 – 790.
- Park, Y. S., K. Iida and K. Nashimoto, 1995. Ratio of auditory threshold levels to artificial background noise spectrum levels in walleye pollock *Theragra chalcogramma*. Nippon Suisan Gakkaishi, 61 (6), 847 – 853.
- Park, Y.S., C.H. Lee, J.W. Moon, J.Y. Ahn and D.O. Seo, 1997. Auditory thresholds of black rock fish. Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 11 (1), 88 – 97.

2011년 6월 14일 접수

2011년 8월 2일 1차 수정

2011년 8월 4일 수리