

# 제주 연안산 잭방어의 청각특성에 관한 기초적 연구\*

서익조 · 김성호 · 김병엽 · 이창현 · 서두옥<sup>†</sup>

제주대학교

## A Fundamental Study on the Auditory Characteristics of Amberjack *Seriola dumerili* in the Coast of Jeju Island

Yik-Jo SEO, Seong-Ho KIM, Byong-Yop KIM, Chang-Heon LEE and Du-Ok SEO  
Cheju National University

### Abstract

In this paper, We examined auditory threshold and critical ratio of amberjack *seriola dumerili*, in the Jeju Island coastal waters, to find out hearing ability of the fish. The auditory threshold level, critical ratio and hearing index of amberjack were determined by conditioning method using a sound coupled with electric shock in the condition of ambient noise or white noise in an experimental water tank. The audio-signals of pure tone and electric shock were from 80 Hz to 800 Hz and DC 7 V, respectively.

Values for the critical ratios were calculated in terms of the masked thresholds using the noise projected to stable spectrum levels at all measurement frequencies of background noise. Masking noises were in the spectrum level range of 65 dB ~ 75 dB(re 1  $\mu Pa\sqrt{Hz}$ ).

The auditory thresholds of amberjack within the test the frequencies were most sensitive at 300 Hz as 94.5 dB. The critical ratios of fishes ranged from 36.4 to 52.8dB. The noise spectrum level that started masking was about 58 ~ 72 dB within frequencies.

key words : auditory threshold(청각역치), critical ratio(임계비), conditioning(순치), amberjack(잭방어), noise spectrum level(잡음레벨)

### 서론

수산생물 자원감소와 해양오염 등으로 황폐화 된 연안어장을 살리고 매년 늘어나고 있는 수산물의 수요를 충족시키기 위해서는 새로운 어업자원 관리 방안이 모색되어지고 있으며, 그 대안으로서 어장환경개

선기술, 자원조성기술, 양식기술, 어로기술이 종합된 바다목장 조성 사업이 대두되고 있다.

바다목장은 일정한 범위의 수역에 자연해양 생태계의 조성을 포함하여 수산생물 종묘생산에서부터 어획에 이르기까지 인위적으로 통제 관리하는 과학적인 생산 관리 시스템이다. 수중 가청음파 기술은 어류의 유집,

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

<sup>†</sup>Corresponding author : seoduok4@cheju.cheju.ac.kr

위협 등에 이용되고 있으며, 길러서 잡는 어업인 바다목장 조성을 위한 어군행동 제어, 음향순치, 어군탐색 등 음향을 이용한 어군 관리, 사육, 어획기술에 활용되고 있다.

수중에서 음을 매개로 정보를 전달하는 수중음이 어류에 미치는 영향을 알아내기 위해서는 수중음에 대한 대상 어류의 청각 특성 파악이 중요하다. 또한 어류의 청각특성을 파악하는 것은 수중음에 의한 어류의 행동반응을 추측할 수 있을 뿐만 아니라 어류의 행동양상을 해결하는 데도 중요한 역할을 할 수 있다.

이 연구에서는 어류의 청각특성을 파악하여 수중음향이 어류에 미치는 영향 등 어군을 어획하기 위한 음향어법 연구개발사업에 기초자료를 제공할 목적으로 여름철 제주도 연안 정치망의 주 어획대상인 갯방어를 육상수조에서 수중 가청 저주파음과 전기충격을 이용하여 음향 학습시킨 후, 주파수와 음압을 변화시켜가면서 실험어의 심전도를 도출하여 심박간격의 변화로부터 청각문턱치를 측정하였으며, 순음을 마스킹하는 백색잡음 스펙트럼 음압레벨을 단계별로 변화시켜가면서 갯방어의 청각문턱치를 측정하여 청각임계비를 계산함과 동시에 마스킹이 발생하는 백색잡음 스펙트럼 음압레벨에 대하여 조사하였다.

## 재료 및 방법

청각문턱치 측정 실험에 사용된 실험어는 제주 연안 정치망에서 어획된 갯방어 *Seriola dumerili*를 제주대학교 해양과환경연구소 내에 있는 사육수조로 이송한 후 약 1개월간 넘치용 10호 사료로서 사육 순응시킨 것 중 14마리를 무작위 추출하여 실험에 사용하였다. 실험어의 전장은 평균 26.9 cm, 체중은 평균 211g이었다.

실험기간은 2002년 8월 11일부터 9월 6일까지 행하였고, 실험기간 중 실험수조의 수온은 21.2 ~ 27.8°C였으며, 청각문턱치 측정은 실험어를 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후 3 ~ 6시간 경과한 후에 실시하였다.

청각임계비 측정 실험에 사용된 갯방어 9마리의 전장은 평균 27.5cm, 체중은 평균 251g이었고, 실험기간은 2002년 9월 7일부터 9월 25일까지였다. 실험기간 중의 실험수조의 수온은 21.5 ~ 26.0°C이였으며, 실험어는 사육수조에서 실험수조로 옮긴 후부터 3 ~ 6시간 이상 경과한 후에 청각임계비 측정 실험에 사용하였다.

수중에서는 넓은 범위에 걸쳐 어군의 유집 및 제어

를 하려면 수중음이 먼 거리까지 전달되어야 하므로 원거리 음장 성분의 음압만 존재하고 입자변위에 의한 근거리 음장 성분의 음압은 무시할 수 있도록 수조내의 물입자의 이동에 의한 성분을 상쇄시켜야 한다. 따라서 신호발생기(NF, 1915)에서 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz의 7종류의 측정주파수의 순음을 발생시켜 증폭기(Inkel, PSR-2000, 0 w)로 증폭시킨 후 실험수조의 양 측면으로부터 각각 7cm 떨어진 위치에 설치한 두 대의 공중스피커(Promann, CB38, 8Ω)를 통하여 동진폭, 동위상으로 방성하였다.(Lee et al, 2001)

청각문턱치 측정을 위한 각 측정 주파수의 음압과 환경소음 음압레벨의 측정은 수중 청음기(B&K, 8104)를 실험수조내의 실험어의 머리부분의 위치에 설치한 후 진치증폭기(B&K, 2635)로 증폭하여 그 신호를 주파수 분석기(B&K, 2143)와 컴퓨터로 A/D 변환해서 해석하였으며, 이때 실험 수조의 환경소음 음압레벨은 주파수 분석기로 1/3옥타브 분석하여 실험 시간대에 반복 측정하여 평균하였다.

청각문턱치 측정 과정에서 실험어의 심박파형은 생체용 오실로스코프 겸 증폭기(NK, VC-11)를 통하여 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS-340)에 실험어의 심전도 파형 및 심박간격을 측정·저장하였으며, 저장된 자료는 GPIB 보드를 통하여 컴퓨터에 입력한 후 심박파형 해석에 이용하였다.

어류가 서식하고 있는 해양은 자연소음 및 인공소음이 혼재하는 환경이다. 어류의 청각은 이러한 환경소음의 영향을 받아서 작은 소리를 듣기 어렵게 되는 마스킹(Masking)현상이 발생하여 청각문턱치가 증가한다. 수중 환경소음 속에서 어류의 청각 능력, 주파수 분해능력 등 기본적인 청각특성을 파악하기 위해서는 마스킹에 의한 청각능력의 저하를 측정하는 것이 중요하다(Hatakeyama, 1989).

이 연구에서는 마스킹하는 음을 백색잡음(White noise)으로 하여 백색잡음 속에서 마스킹에 관여하는 부분의 파워는 청각문턱치가 되는 측정음의 파워와 같다고 하는 가정 하에 청각임계비(Auditory critical ratio, CR)를 계산하였다(Hatakeyama, 1992). 청각문턱치를  $T$  (dB re 1μPa), 백색잡음의 스펙트럼 음압 레벨을  $S$  (dB re 1μPa/√Hz)라 하면, 청각임계비(CR)는  $T - S$ 로 나타낼 수 있다.

백색잡음 발생시의 청각문턱치 측정은 신호 발생기(NF, 1915)의 신호음과 함께 백색 잡음 발생기(B&K, 1405)에서 백색 잡음을 발생시켜 혼합기(Inkel, MX-642)에서 혼합한 후 동시에 방성할 수 있도록

하였다. 또한, 백색 잡음은 수중에서 주파수가 높아짐에 따라 감쇄가 많아지므로 측정 주파수 범위의 백색 잡음 음압레벨이 일정하게 유지될 수 있도록 그래픽 이퀄라이저(Inkel, EQ-9231)를 거쳐 혼합기(Inkel, MX-642)에서 혼합하여 방성되도록 하였다.

실험어의 음향 학습에 있어서 학습음은 신호 발생기로부터 발생시킨 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz의 7종류의 순음을 사용하였으며, 마스킹 현상을 조사하기 위하여 배경 잡음이 약 70 dB 이상에서 청각문턱치(HataKeyama, 1989)에 영향을 미치므로 이를 기준으로 백색잡음 발생기로부터 음압 65, 70, 75 dB의 3단계로 변화시켜 발생시킨 백색잡음을 사용하였다.

음향 학습은 심전도 측정용 전극을 장착하여 실험어를 고정시킨후 약 3 ~ 6시간 이상 경과한 후에 측정 주파수 중에서 임의의 하나의 주파수 300 Hz, 음압 110 dB 음을 학습음으로 하여, 학습음 방성 3초 후에 직류 전원장치(Tektronix, PS 2520 G)를 이용하여 직류 전압 7V의 전기 충격을 약 0.1초간 부여하였으며, 학습음 방성 도중에 전기 충격을 올 것이라는 것을 학습시키기 위해 3분 간격으로 반복하여 실시했다. 이와 같이 각 실험어를 3분 간격으로 반복하여 음향학습을 실시하여, 명확하게 심박 간격이 연속해서 5회 이상 길어지면 음향 학습이 완료된 것으로 간주하였다.

청각특성 측정은 음향 학습을 완료하고 나서 약 10분간의 휴식을 취한 뒤 청각문턱치 측정을 시작하였다. 방어의 청각문턱치(Ahn et al, 1998) 연구결과를 토대로 각 측정주파수에서 최초의 방성음압을 결정하였으며, 방성음압을 3dB씩 감소 또는 증가시켰다. 청각문턱치 부근이라고 판단되는 곳에서 측정음을 인식하였을 때에는 음압을 약 3dB 내리고, 인식하지 않을 때에는 음압을 약 3dB 올리면서 계단법(Staircase method)으로 측정하였으며, 방성 중 실험어의 심박간격이 우연히 벌어지는 오차를 줄이기 위해서 연속해서 2번 이상 방성음을 인식하였을 때를 측정 주파수에 대한 실험어의 청각문턱치로 하였다.

청각임계비 측정실험은 환경소음시의 청각문턱치 측정방법에 사용된 실험방법에 마스킹을 일으키기 위해 백색잡음 방성을 첨가하여 실시된 실험이므로 실험 수조, 실험어의 설치방법, 음향학습방법, 실험수조 내의 방성음과 백색잡음의 해석 등 제반실험 방법은 환경소음시의 청각문턱치 측정실험과 동일하였다. 실험어의 청각임계비의 측정은 음향 학습을 완료시키고 약 10분 경과 후에 측정하기 시작하였다.

실험어의 심전도는 방성 개시 약 20초 전부터 디지털 오실로스코프에서 측정하였으며, GPBI 보드를

통하여 컴퓨터에 입력해서 데이터를 20초 동안 기록하였고, 방성 중 5초 동안의 심박간격이 방성 전 약 12 ~ 15초 동안의 심박 간격보다 길면 측정 주파수의 음을 인식하는 음향 반응으로 판정하였다.

## 결과 및 고찰

청각문턱치 측정은 실험시에 측정된 실험수조 내의 소음 스펙트럼레벨과 잭방어의 청각문턱치 곡선, 백색잡음을 음압 65, 70, 75 dB의 3단계의 스펙트럼레벨로 발생시켰을 때의 각각의 배경잡음 스펙트럼 레벨과 이때 측정된 잭방어의 청각문턱치 곡선을 Fig. 1.에 나타내었다.

주파수 분석기를 사용하여 1/3 Octave로 주파수 63 ~ 1,000 Hz까지의 스펙트럼 음압 레벨을 분석한 결과 실험수조의 환경 소음 스펙트럼 음압 레벨은 56.0 ~ 92.4 dB의 범위로, 낮은 주파수대에서 높은 주파수대로 갈수록 스펙트럼 음압레벨이 점차 낮아지는 경향을 나타냈으며, 청각문턱치의 평균은 각각 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz에서 음압 118.1, 116, 105.3, 94.5, 103.1, 104.5, 108.2 dB이었다. 측정주파수 300 ~ 500 Hz에서 청각 감도가 양호하였으며, 측정주파수 300 Hz에서 94.5 dB 가장 낮은 청각문턱치를 보였고, 측정 주파수 300 Hz를 중심으로 300 Hz이하 주파수와 300 Hz 이상의 주파수에서 주파수가 멀어짐에 따라 청각문턱치가 증가하여 청각감도가 떨어짐을 나타내고 있으며, 이때의 청각문턱치 곡선은 300 Hz를 중심으로 V자 모양을 하고 있다.

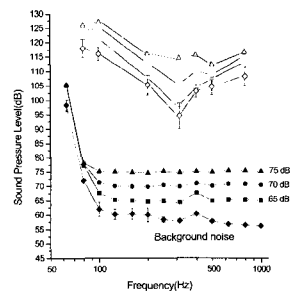


Fig. 1. Audiogram of amberjack under white noise and the background noise.

(Open mark : Auditory threshold level (dB re 1 $\mu$ Pa).

Close mark : Noise spectrum level (dB re 1  $\mu$ Pa /  $\sqrt{\text{Hz}}$ ).

제주 연안산 자리돔의 청각문턱치는 측정주파수 300 Hz에서 음압 88 dB(Lee et al, 2000), 방어는 측정 주파수 100 Hz에서 음압 95.1 dB(Ahn et al, 1998), 조피볼락은 측정 주파수 100 Hz에서 음압 90.5 dB(Park et al, 1999), 쏘뱅이는 측정 주파수 100 Hz에서 음압 90.4 dB(Lee et al, 1999)로 가장 민감한 주파수에서 각각 88 ~ 95.1 dB로 잿방어의 연구결과도 이와 비슷한 청각문턱치를 나타내었다.

청각임계비 측정은 백색잡음을 평균음압 65, 70, 75 dB로 방성시 측정된 실험어의 청각문턱치 곡선을 Fig. 1에 나타내었으며, 청각문턱치는 측정 주파수 80 Hz에서 음압 121, 124, 126 dB, 100 Hz에서 음압 121, 125, 127 dB, 200 Hz에서 음압 108, 113, 116 dB, 300 Hz에서 음압 98, 105, 114 dB, 400 Hz에서 음압 104, 110, 116 dB, 500 Hz에서 음압 107, 109, 112 dB, 800 Hz에서 음압 113, 115, 116 dB이었다. Fig. 1에 나타내는 바와 같이 백색잡음의 평균음압이 상승함에 따라 청각문턱치도 증가하여 마스킹 현상이 일어났다. 청각 감도가 양호한 측정주파수 300 ~ 400 Hz에서 백색잡음에 의한 영향이 크게 나타나고 있었지만, 그 외의 주파수대에서는 백색잡음에 의한 영향이 크게 나타나지 않았다.. 실험어의 청각임계비는 Fig. 2에 나타내는 바와 같이 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz에서 각각 음압이 45.9, 52.8, 42.5, 36.4, 38.6, 39.4, 44.4 dB이었고 측정 주파수 300 Hz, 400 Hz 그리고 500 Hz에서는 백색잡음 속에서 순음을 식별하는 능력이 다른 측정 주파수에 비하여 우수하였으며, 측정 주파수 300 Hz를 중심으로 300 Hz 이하 주파수와 300 Hz 이상의 주파수에서 주파수가 멀어짐에 따라 청각문턱치가 증가함과 동시에 청각임계비도 급격히 증가하고 있어 청각 감도가 떨어짐을 나타내고 있다.

잿방어의 청각문턱치 및 청각임계비 실험 결과에서, 측정 주파수 300 Hz의 청각감도가 다른 측정 주파수에서 보다 우수하게 나타나는데, 이는 음향학습 과정에 있어서도 측정 주파수 300 Hz에서 학습음과 전기충격에 대한 음향 학습이 쉽게 이루어진 반면 80 ~ 100 Hz와 500 Hz 이상의 측정 주파수대에서는 음향학습이 쉽게 이루어지지 않아, 잿방어의 청각 감도는 300 Hz에서 민감하다는 사실이 명확해졌다.

제주 연안에 서식하는 정착성 어종인 조피볼락, 쏘뱅이, 볼락, 자리돔과 이 연구에서 얻어진 잿방어의 청각임계비를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 잿방어는 측정 주파수 300 Hz에서 음압 36.4 dB로 가장 낮은 청각임계비를 보였는데, 볼락은 측정 주파수

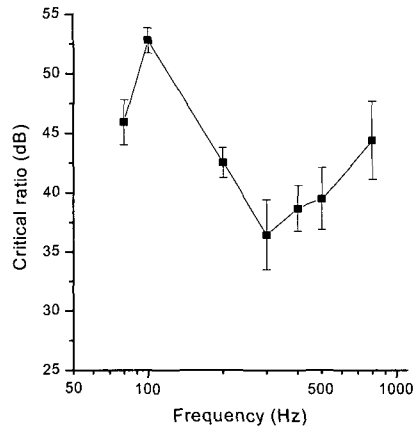


Fig. 2. Auditory critical ratio of amberjack.

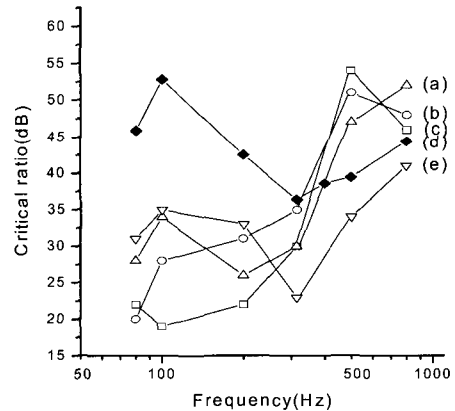


Fig. 3. Comparison of the critical ratios of amberjack and those of other species.

- (a)  $\Delta$  : black rockfish
- (b)  $\circ$  : scorpion fish
- (c)  $\square$  : jacobever
- (d)  $\blacksquare$  : amberjack
- (e)  $\nabla$  : coralfish

200 Hz에서 음압 26 dB, 자리돔은 측정 주파수 300 Hz에서 음압 23 dB, 조피볼락은 측정 주파수 100 Hz에서 음압 19 dB, 쏘뱅이는 측정 주파수 80 Hz에서 음압 20 dB로 각각 가장 낮은 청각임계비를 보여 대부분의 어종에서 측정 주파수 100 Hz ~ 300 Hz 부근의 수중 가청음에 대하여 가장 민감한 청각

제주 연안산 잿방어의 청각특성에 관한 기초적 연구

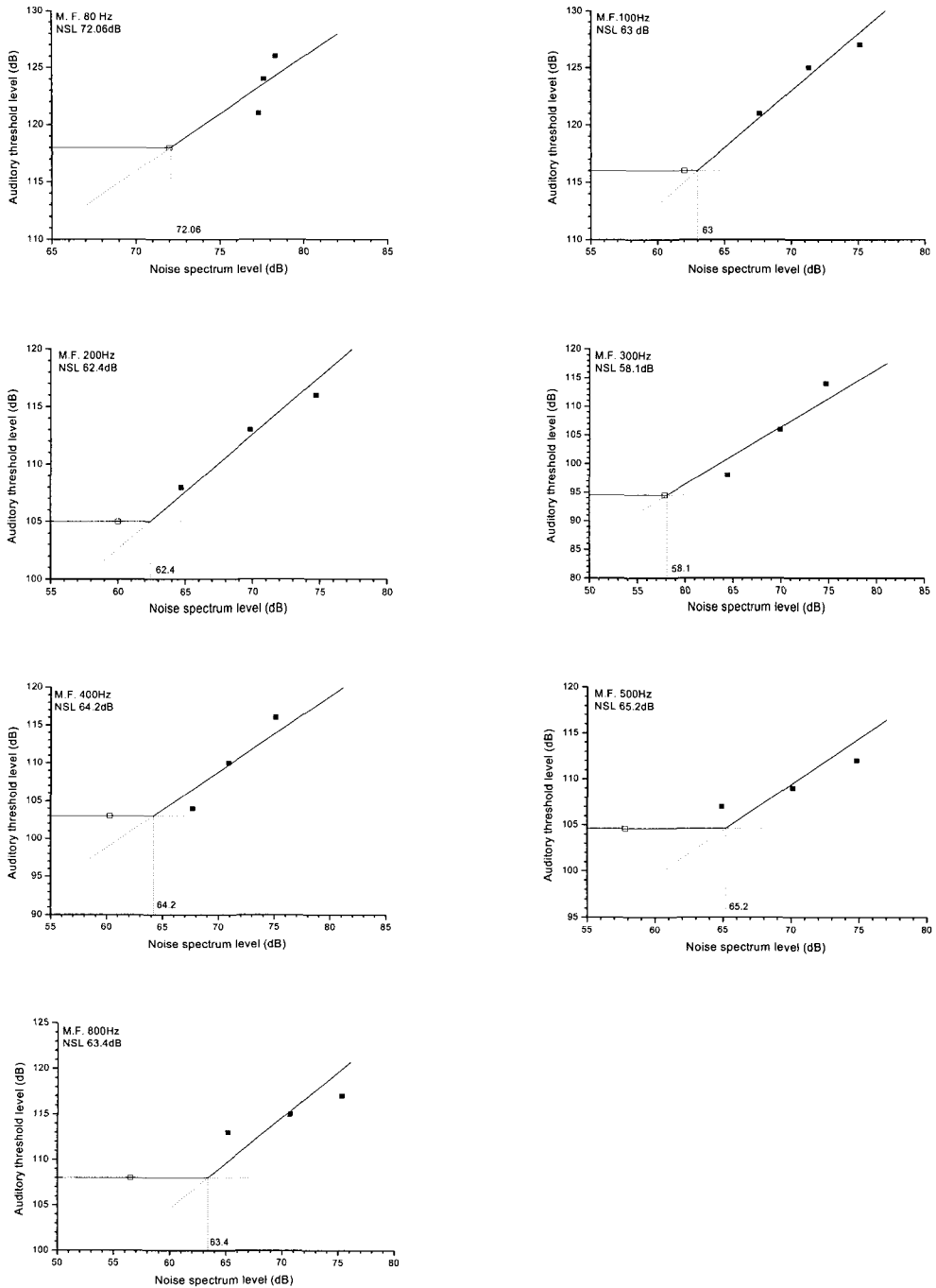


Fig. 4. Relation between auditory thresholds and noise spectrum levels at frequencies of 80Hz ~ 800 Hz.

Mean thresholds under a quiet condition(□) and the white noise condition(■).

반응을 나타내고 있다. 또한 연안 정착성어류에 비해 저주파음에서 다소 높은 청각임계비를 나타낸 반면, 고주파음에서는 비슷하거나 다소 낮은 청각임계비를 나타내었다. 이 연구에서 사용된 잭방어는 일정해역에 정착해 서식하는 어종이 아니고 또 생리적으로 성질이 급하여 제주 연안산 정착성어류와는 조금 다른 임계비 곡선모양을 보이고 있다. 연안 정착성 어류와 회유성 어류간의 청각능력에 관하여 비교한 연구 자료가 충분하지 못하여 단언하지는 못하지만 서식환경에 따른 생태적인 습성차에 의한 청각특성의 차이라 판단되지만, 앞으로 이 두 부류의 어류의 청각특성에 관한 비교 연구가 많이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

잭방어의 청각문턱치와 백색잡음 스펙트럼 레벨과의 관계를 측정 주파수마다 정리한 것이 Fig. 4이다. 잭방어는 전체 측정 주파수에 있어서 일정 음압레벨 이상에서는 백색잡음의 스펙트럼 레벨 상승에 따라 청각문턱치도 증가하는 모양을 나타내었다. 잭방어의 청각이 백색잡음에 마스킹 되는 경우 청각문턱치와 백색잡음 스펙트럼 레벨과의 변화량(dB)의 사이에는 비례관계가 되므로 dB로 표시한 양자의 관계는 회귀 직선으로 나타낼 수 있으며 이 직선의 기울기는 보통 1에 가깝다.

Fig. 4에 나타내는 바와 같이 청각문턱치가 증가하기 시작하는 소음스펙트럼 음압레벨은 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz에서 각각 72.06, 63.0, 62.4, 58.1, 64.2, 65.2, 63.4 dB이었다.

따라서, 어군의 유집을 위하여 수중 가청음을 사용할 경우에는 어류가 환경 소음에서 학습음을 충분히 식별해 낼 수 있도록 방성 음압 레벨을 설정할 필요가 있다. 이상으로부터 수중 가청음을 이용하여 잭방어의 유집을 시도한다면 이 실험을 통하여 알아낸 청각문턱치 및 청각임계비를 고려하여 주파수 300 ~ 400 Hz의 음을 선택하고, 이 주파수의 수중 가청음을 잭방어가 충분히 인식하기 위해서는 최저 100 dB 이상의 음압 강도가 필요하며 환경 소음이 존재하는 환경에서는 소음 스펙트럼 음압 레벨보다 약 35 dB 이상 크게 방성할 필요가 있는 것으로 여겨진다.

## 요 약

제주도 연안 정치망의 여름철 주 어획대상인 잭방어를 실험어로 하여, 음향을 이용한 어군행동 제어, 음향순치 등 바다목장 조성을 위한 어군의 관리, 사육, 어획기술에 이용할 기초자료를 제공할 목적으로

육상수조에서 수중 가청 저주파음과 전기충격을 이용하여 음향 학습 시킨 후, 주파수와 음압을 변화시켜 가면서 잭방어의 심전도를 도출 하여 심박간격의 변화로부터 청각문턱치, 청각임계비를 측정하였다.

자연환경소음에서 잭방어의 청각문턱치는 측정 주파수 80 ~ 800 Hz의 수중 가청음을 모두 인식하였고, 측정 주파수 200 ~ 500 Hz에서 청각 감도가 양호하였으며, 측정 주파수 300 Hz에서 평균 음압 94.5 dB, 표준편차 4.5 dB로 가장 낮은 청각문턱치를 보였다. 평균 음압을 65 dB, 70 dB, 75 dB의 3단계로 변화시킨 백색잡음 방성으로 측정된 잭방어의 청각임계비는 측정 주파수 80, 100, 200, 300, 400, 500, 800 Hz에서 각각 평균 음압 45.9, 52.8, 42.5, 36.4, 38.6, 39.4, 44.4 dB이었다. 측정 주파수 300 Hz, 400 Hz 그리고 500 Hz에서는 백색잡음 중에서 측정음을 식별하는 능력이 다른 측정 주파수에 비하여 우수했다. 잭방어가 주파수 300 Hz의 수중 가청음을 충분히 인식하기 위해서는 최저 100 dB 이상의 음압 강도가 필요하며 환경 소음이 존재하는 환경에서는 소음 스펙트럼 음압 레벨보다 약 35 dB 이상 크게 방성할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- Ahn, J.Y., C.H. Lee, Y.J. Kim and Y.S. Park. (1998); The auditory thresholds and fish behaviors to the under water sounds for luring of target species at the set-net in the coast of cheju(I) - The auditory threshold of the yellow tail (*Seriola quinqueradiata*), Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 34, 386~392(in Korean).
- 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.
- 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 *Sebastes marmoratus* to audible sound. 1. The auditory threshold, Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 35, 156~160(in Korean).
- Lee, C.H. and D.O. Seo. (2000); The hearing

제주 연안산 잿방어의 청각특성에 관한 기초적 연구

ability of the 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 the 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).

---

2003년 8월 1일 접수  
2003년 8월 1일 수리