

수중 저주파음에 의한 능성어 (*Epinephelus septem fasciatus*)의 행동제어에 관한 기초적 연구 I. 능성어의 청각문턱치

양용수 · 서두옥* · 이창현*
국립수산진흥원, *제주대학교
(1999년 9월 30일 접수)

A basic study for the behaviour control of sevenband grouper, *Epinephelus septem fasciatus*, to underwater low frequency sound I. The Auditory thresholds of sevenband grouper

Yong-Su YANG, Doo-Ok SEO* and Chang-Hun LEE*

National Fisheries Research & Development Institute, * Cheju National University

(Received August 30, 1999)

Abstract

It is well known that fish hear a wide frequency range of sound using both lateral line and inner ear, and the sound is probably the most effective channel for long-range communication underwater than any other stimulus.

The auditory threshold of sevenband grouper, *Epinephelus septem fasciatus* was determined by conditioning method using a sound coupled with electric shock in a tank. The audio-signals and electric shock used in the experiment were pure tones of 100 to 1000Hz and DC 6V.

The response of fish to the sound was observed by ECG intervals from precordial leads method ($V_1 \cdot V_2$ method). The auditory threshold curve for sevenband grouper was V-shaped, with most sensitive threshold at 350Hz in the range of 100~1000Hz. The Sevenband grouper were more sensitive to sounds of 200~400Hz than to adjacent frequencies.

서 론

현재 세계각국은 어업 자원의 남획과 연안역의 환경오염 등 여러 가지 원인에 의해 어업자원이 감소됨에 따라 동물성 단백질의 주 공급원인 수산 자원을 보다 적극적으로 보호하려는 움직임이 범세계적으로 활발하게 전개되고 있다.

이러한 상황에서 수산 자원관리를 위한 여러 가

지 대안 중 인공어초 어장 조성, TAC 제도의 도입 등과 함께 해양환경의 제어까지 포함하여, 해양생물의 산란, 생육, 성장, 대상물의 이용 등은 물론 해양환경 제어까지 포함하여 해양에서 이루어지는 생산에서 소비까지의 모든 과정에 인공적인 요소를 가미하는 해양목장화 사업이 최근에 각광을 받고있다.

그러나, 이들 해양목장화 사업을 성공적으로 수

행하기 위해서는 어군의 산란에서부터 생산까지의 모든 생육과정에서 어군행동을 제어할 수 있는 방안이 강구되어야 하며, 어군행동 제어방법으로서 연구자에 따라 빛, 소리, 전기, 냄새 등 매우 다양한 방법을 사용하는 시도가 행해져 왔다. 그러나 적용대상이 해양이라는 장소의 특수성과 여러 가지 자극원이 갖는 물리적 특성으로 인하여 적용에 많은 어려움을 겪고있는 실정이다. 이들 자극원 가운데 소리는 다른 자극원에 비하여 수중에서 감쇠가 작아 어군탐색 등 각종 수중정보의 전달과 해석에 아주 유용하게 이용되어 왔다. 최근에는 소리를 어업에 적극적으로 적용하여 어군의 유집 및 위집에 이용하려는 여러 가지 시도가 행해지고 있으며, 이와함께 해양목장에서 어군의 행동을 제어할 목적으로 수중음향을 이용하는 음향순치 어장의 도입이 적극 시도되고 있다.

이에 따라 세계적으로는 30여종의 어류에 대한 청각특성이 여러 가지 방법 및 목적에 따라 측정되어 왔지만, 연안정착성 어류이면서 그 생산량은 많지 않으나 고가여서 해양목장 대상 어종으로의 가능성이 높은 능성어의 청각특성을 측정할 예는 없다.

따라서, 본 논문에서는 심전도계를 이용하여 전기자극과 함께 순음을 극한법에 의한 자극 투여방법 중 상승 계열법에 의한 방식에 의해 능성어의 청각문턱치를 구해봄으로써 능성어를 음향순치 어장에 적용시킬 때 음의 유효범위를 정량적으로 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

실험에 사용된 어류는 부산연안에서 말취치 통발어구에 어획된 능성어 200마리를 사육수조로 이송한 후 약 1개월간 사육순치 시키고, 그 가운데 전장 범위가 14.6~19.0cm로 평균 16.4cm, 체중 범위가 63~140g로 평균체중이 96.25g인 20마리를 실험에 사용했다.

실험에 사용된 수조는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 규모가 850(L)×450(B)×450(H)mm인 아크릴제 수조를 사용하였고, 수조내의 해수는 자연해수를 사용하였으며, 하루에 한번씩 모터를 이용하여

해수를 교환해 주었다.

실험중 환경변화에 대해 능성어가 받는 영향을 최대한 억제하기 위하여 수조 주위를 차광막으로 가려 수조내의 조도를 최소화하고, 주위 물체의 움직임은 감지하지 못하도록 하였다.

실험기간 중 수조내의 수온은 18.3~25.4°C로 능성어 사육에 최적인 조건이었으며, 수조의 하면에는 진동으로부터의 영향을 억제하기 위해 두께 2cm의 고무판을 설치하였다.

청각문턱치 실험을 실시하기 하루전에 능성어를 사육수조로 부터 꺼내 0.025%의 어류 마취제(MS-222)로 희석된 해수통에 넣어 마취시켰으며, 마취가 되고난 후 심박 간격을 측정하기 위한 두 개의 lead선을 흉부유도법 중 $V_1 \cdot V_2$ 유도법에 의한 심전도 측정법에 따라 위심장 부위에 삽입하고, 실험 중 어체 내에 삽입된 Lead선이 이탈되는 것을 최소화 하기위해 수조내에 플라스틱망 가두리를 설치하여 능성어의 행동을 완전 억제하여 수용하였고, 가두리내에 수용 후 마취로 부터의 회복과 환경순응을 위해 하루간 방치했다.

심전도는 생체용 증폭기겸 오실로스코프(NIHON KOHDEN Co. Type VC-11)에 의해 심전도 파형 및 심장박동 간격이 얻어지고, 그 결과는 GPIB 보드를 통해 컴퓨터에 저장한 후 분석하였다.

실험에는 주파수 100~1000Hz 사이의 100Hz 간격인 10종과 250Hz, 350Hz의 2종 등 총 12종의 정현파 순음을 Sine random generator(B&K, Type 1027)로 발생시켜 증폭기(INKEL, PA-2500RD)에서 단계적으로 증폭한 후 공중스피커를 통하여 방성하였다.

수중음은 압력변동에 의한 성분과 입자의 이동에 의한 성분, 즉 2개의 성분에 의해 구성되어 있다. 압력변동 성분은 내이에 의해 감지되고, 수립자의 이동에 의한 성분은 측선에 의해 감지된다. 또 음원으로부터 파장의 1/2 μ m 이상 떨어져 있는 위치에서는 압력변동에 의한 성분은 수립자의 이동에 의한 성분보다 크다. 따라서 어류를 해양에서 음향순치 할 때 필요한 것은 2개의 수중음 성분 가운데 압력변동 성분이기 때문에 이것에 대한 청각문턱치를 구하기 위해서는 수립자의 이동에 의

한 성분을 억제할 필요가 있다. 본 연구에서는 동형의 스피커를 마주보게 하여 동 위상의 신호를 입력하고, 수조의 중앙부에서 수립자의 이동에 의한 성분이 감소하는 것과 같이 하여, 될 수 있는 한 측선에 의한 감지가 적게 되도록 하였다.

실험에 사용한 방성장치를 Fig 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 자극음에는 Signal generator에서 발생된 정현파를 사용하였고, 음의 방성은 수조의 외측양단에 설치한 스피커로부터 방성하였다.

음 방성은 수조내의 어류가 수립자의 이동에 따른 측선으로의 감지를 억제하고, 수중음의 음압변동 성분만을 감지하도록 하기 위하여 수조의 양면 중앙에 수조 벽면으로부터 1cm 떨어진 곳에 위치하도록 설치된 공중 스피커를 통하여 실시하였다.

이때 방성한 각 주파수의 음압과 주위 환경잡음의 음압은 수조내에 설치한 Hydrophone(OKI, ST8004)으로 수신하여 음압계(OKI SW 1020)를 거쳐 FFT 분석기(B&K 2032)로 측정 분석하였다.

음의 방성은 해당 주파수별로 능성어가 충분히 감지 가능하다고 판단되는 120dB~130dB의 음압인 음을 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 5초간 방성

하였으며, 방성 개시부터 5초 후 방성이 종료되는 시점에 플라스틱 망 가두리 외측에 코일형으로 감긴 전선을 통해 DC 6V, 펄스간격 0.5초의 전기자극을 투여하였다.

순음과 전기자극의 투여는 조건에 따라 15~30분 간격으로 반복하고, 방성 후 전기자극을 받기 전에 심전도의 변화가 5회이상 생길때까지 반복하였으며, 전기자극을 받기 전에 심전도가 연속해서 5회이상 변화를 보일때 능성어가 음에 반응하는 조건을 완성한 것으로 판단하여 청각문턱치 실험을 실시하였다.

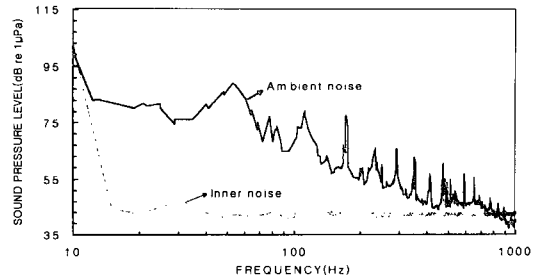


Fig. 2. Ambient noise and inner noise spectrum in the experimental tank.

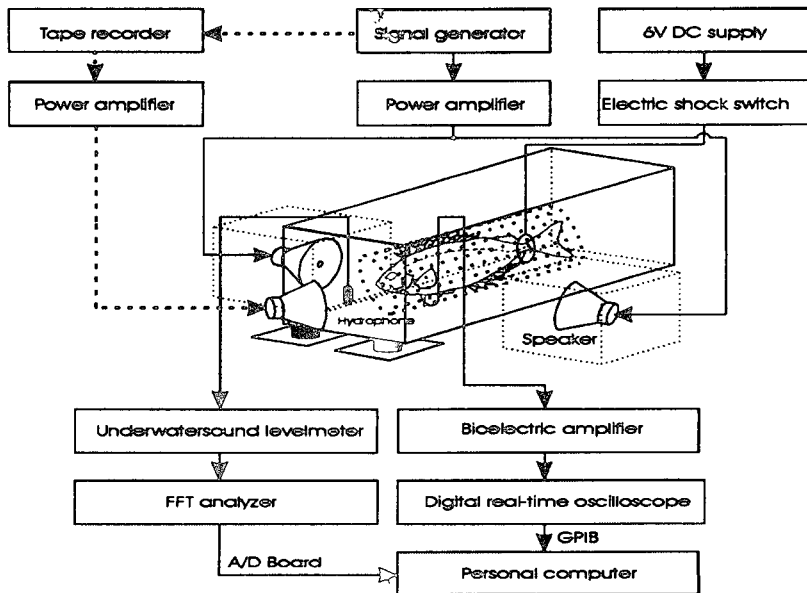


Fig. 1. Block diagram of the apparatus for determining auditory thresholds of the sevenband grouper (unit in mm).

청각문턱치를 결정하기 위한 음 방사에 앞서 Fig. 3의 (a)에 나타낸 것과 같이 음방사 및 전기자극을 투여하기전 안정상태에서 능성어의 분당 심장 박동 주기의 값을 측정하였으며, 음 방사 후 심



Fig. 3 Electrocardiogram(ECG) of the sevenband grouper by precordial leads from chest cavity. ECG is composed of P, Q, R, S and T wave.

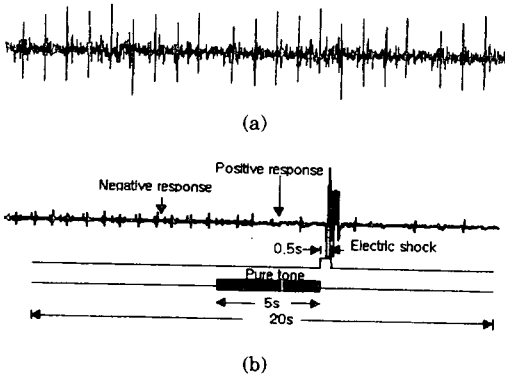


Fig. 4. Oscillographic recordings showing the negative response(a) and the positive response(b).

- (a) The trace shows oscillograms of electrocardiograms showing negative response .
- (b) Upper trace shows oscillograms of electrocardiograms showing positive response. Middle and lower trace shows the 6V DC electric shock lasting for 5 s delayed after the start of the pure tone production and sound stimuli.

전도에 반응을 나타내는 값도 Fig. 4의 (b)와 같이 안정시의 심장박동주기와 비교하기 위해 측정되었다. 본 연구에서는 안정시의 심장박동주기보다 양의 응답으로 해석하였다.

청각문턱치 실험은 주위가 정온한 20시 이후 야간에 실시하였으며, 각 주파수별로 환경을 보다 2dB씩 누진적으로 증가시키면서 방성하기 시작하였으며, 방성 시작 후 2dB씩 누진적으로 증가시키면서 어류의 심전도 변화를 관찰을 통해 어류의 응답을 관찰하였으며, 응답은 평균 심장 박동주기를 기준으로 평균 심장 박동주기보다 긴 것은 양, 짧은 것은 음의 반응으로 판단하고, 일정 음압에서 연속해서 3회 이상 양반응이 나타나는 최소 음압을 청각문턱치라 정의하여 각 주파수의 순음에 대한 청각문턱치를 조사하였다.

결과 및 고찰

1. 수조내의 음환경

청각문턱치 실험에 사용된 각종 계측장비의 내부소음과 실험수조 내의 배경잡음은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전 실험 주파수 범위에서 92~45dB(re 1μPa)로 나타났으며, 47Hz 에서 정점을 형성한 후 47Hz의 배수가 되는 주파수를 정점으로 증가와 감소를 반복하는 산맥상을 형성하고 있었으며, 이것은 측정시스템의 전원에서 발생하는 소음원의 영향인 것으로 판단된다.

2. 능성어의 심전도

어류의 심전도 파형도 사람의 심전도와 유사한

Table 1. Heart rate of each species by electrocardiogram

Species	Weight (g)	Heart rate	P	PQ	QRS	QT	Situation
Sevenband grouper	95.5	95	0.03	0.18	0.14	0.42	Stability
		51	0.06	0.32	0.16	0.78	Stimulus
Sweet fish*	75.1	94	0.063	0.06	0.058	0.415	-
Rainbow trout*	328	100	0.06	0.14	0.08	0.40	-
Carp*	805	105	0.05	0.10	0.08	0.42	-
Tilapia*	212	55	0.05	0.25	0.10	0.79	-
Red seabream*	112	146	0.03	0.07	0.03	0.31	-
Horse markerel*	359	113	0.03	0.12	0.05	0.38	-

*Nanba et. al

형태를 가지므로, 사람의 심전도 파형의 명명법을 그대로 인용하여, Fig 3 에서와 같이 심방의 흥분 파를 P, 심방의 흥분이 시작되고 이 흥분이 심실에 도달할 때까지의 전달시간, 즉 흥분의 방실 전도 시간을 PR 간격 혹은 PQ 간격, 심실에 흥분이 도착한 시간을 QRS, 심실의 탈분극과 재분극 두가지를 모두 포함한 시간을 QT로 표시하여, 難波 등에 의해 연구된 6종의 어류와 능성어의 평상시 및 자극시 심전도 파형을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다.

능성어의 심전도 파형은 평상시에는 심박수가 분당 95회, RR간격은 0.63초로 연어, 송어의 심박수 및 RR 간격과 비슷한 경향을 나타내고 있었으나, 참돔이나 전갱이보다는 낮은 수치를 나타내고 있었으며, PQ, QRS, QT 값도 각각 0.18초, 0.14초, 0.42초로 연어, 송어와 유사한 형태로 나타났다. 그러나 전기 자극 및 음향신호에 의해 자극을 투여한 경우 능성어의 심박수는 분당 51회로 급격하게 감소하고 있으며, RR 간격도 1.18초로 나타나, 틸라피아의 심박수 분당 55회 및 RR 간격 1.09초와 비슷한 값을 나타내었다. 이와 동시에 심전도 파형도 PQ, QRS, QT의 값들도 0.32초, 0.16초, 0.78초로, 틸라피아의 0.25초, 0.1초, 0.79초와 유사한 진폭을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 QRS 간격은 안정시와 자극시의 간격의 차이가 거의 없으나 P, PQ, QT 간격은 각각 0.03, 0.18, 0.42초에서 0.06, 0.32, 0.78초로 약 2배가량 증가하는 것으로 나타났다.

3. 배경잡음에 대한 능성어의 청각문턱치

이들 각 실험 주파수에서 배경잡음에 대한 능성어의 청각문턱치는 Fig. 5, Fig. 6 및 Table. 2에 나타낸 바와 같이 주파수가 100Hz, 200Hz, 350Hz, 400Hz, 500Hz, 700Hz, 1000Hz로 증가할수록 각각 102.1dB, 97.5dB, 94.8dB, 97.2dB, 100.2dB, 107.8dB, 116.8dB(re 1μPa)로 나타났다. 이들 청각문턱치 값은 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 청각감도가 특정 주파수에서 극도로 나빠지는 시마연어를 제외하고, 송어류, 방어, 참돔, 흑송쟁이 등 대다수 어류의 청각 역치값과 거의 비슷하게 80~120dB(re 1μPa)의 범위에 포함되고 있다. 또한,

능성어의 주파수별 청각문턱치 값의 변동 추이도 대부분의 어류와 유사한 형태로 변동하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 능성어의 주파수별 청각문턱치는 일반적인 어류의 범주에 속한다고 판단되며, Kojima 등에 의해 연구된 시마연어의 청각문턱치가 200Hz와 700Hz에서 청각감도가 좋은 W자형의 청각문턱치를 나타내는 것과는 대조적으로 능성어의 주파수 변화에 따른 청각문턱치는 350Hz 일 때 94.8dB을 기준으로 하여 그보다 주파수가 작아지거나 커질 때 청각 감도가 나빠지는 v자형의 청각문턱치를 나타내었다.

금번 실험에는 방성에 의한 조건학습 완료 후 순음의 방성을 극한법에 의한 자극 투여방법 중 상승계열법에 의해 방성하고, 그때의 심전도 변화에 따른 청각문턱치 만을 측정하였으나, 학습 후 방

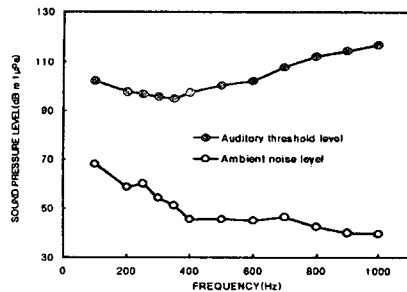


Fig. 5. Auditory threshold level of the sevenband grouper and spectrum level of ambient at frequency between 100 and 1,000Hz.

between 100 and 1,000Hz.

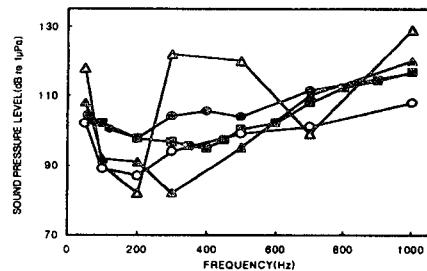


Fig. 6. Comparison of the auditory threshold level of the sevenband grouper(■) with that of masu salmon (△ : T. Kojima et al, 1992), brown trout (▲ : Y. Hatakeyama, 1989), red seabream (○ : H. Ishioka et al, 1988) and walleye pollock (● : Park, 1995).

Table 2. Auditory thresholds and critical ratios under background noise in sevenband grouper, *Epinephelus septem fasciatus*

Frequency (Hz)	Number of determinations	thresholds (dB re 1μPa)	
		Mean	S.D.*
100	20	102.1	1.7
200	20	97.5	1.9
250	10	96.6	1.9
300	20	95.5	1.4
350	10	94.8	0.8
400	20	97.2	1.8
500	20	100.2	1.3
600	20	102.1	1.4
700	20	107.8	1.3
800	20	112.2	1.8
900	20	114.4	1.4
1000	20	116.8	2.2

* S.D. : Standard deviation

성은 상승계열법 보다는 하강계열법에 의한 측정법이 청각문턱치가 낮고 표준편차가 적게 나타난다는 안 등이 방어를 대한 청각문턱치 측정결과에 따라 금후 하강계열법에 의한 능성어의 청각문턱치의 산출도 필요한 것으로 사료된다.

요 약

어류가 광대역의 음을 축선과 내이를 통하여 듣는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 따라서, 연안 정착성 어류로서 그 생산량은 많지 않으나 최근 양식기술 개발 등을 통하여 대량 생산 가능성이 높은 능성어를 대상으로 극한법에 의한 자극 투여방법 중 상승계열법에 의한 순음의 방성과 전기자극을 투여하는 방법에 의해 학습시킨 후 심전도 변화에 따른 청각문턱치를 측정 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 능성어는 안정시 심박수가 분당 95회로 나타났고, 자극시에는 분당 51회 였으며, 심박 간격은 자극을 받을 경우 넓어지는 것으로 나타났습니다.
- 2) 능성어의 심박간격은 안정시에 연어, 송어와 자극시에 틸라피아와 유사한 것으로 나타났습니다.
- 3) 배경잡음에 대한 능성어의 청각문턱치는

94.8~116.8dB(re 1μPa)로 나타났으며, 주파수 350Hz에서 94.8dB(re 1μPa)로 가장 민감한 청각 감도를 나타내었다.

- 4) 능성어의 주파수별 청각문턱치는 대부분의 어류와 유사한 변동추이를 나타내었으며 300~350Hz에서 청각 감도가 가장 좋은 v형의 청각문턱치를 나타내었다.

참고문헌

- Hatakeyama, Y.(1989) : Masking effect on the hearing of red sea bream, *Pagrus major*, by ambient noise, J. Aq. Fish. Technol., 1, 271~277
- Hawkins, A. D. (1981) : Hearing and sound communication in fishes, new york, heidelberg, Berlin, 109~133.
- Ishioka, H., Hatakeyama, Y. and Sakaguchi, S. (1988) : The hearing ability of the red sea bream, *Pagrus major* Nippon suisan Gakkaishi, 54, 947~951.
- Sawa, M. (1976) : The audiogram of gold fish determined by a heart rate conditioned method, Bull. Fac. Fish. Hokkaido Univ., 27, 129~136.
- Tabolga, W. N.(1974) : Signal/noise ratio and the critical band in fishes, J. Acoust. Soc. Amer., 55 1323~1333
- 有元貴文·難波憲二(1996) : 魚の行動心理學と漁法, 恒星社厚生閣, 74~106.
- 難波憲二·村地四郎·河本眞二·中野義久(1973) : 魚類の心電圖に關する研究-I, 心電圖導出方法の檢討, J. Fac. Fish. Anim. Husb, Hiroshima Univ., 12, 147~154.
- 金炯默(1993) : 심전도 판독법, 고려의학, 1~42.
- 朴容石(1995) : 音響によるスケトウダラの行動制御に關する基礎的研究, 博士學位論文, 55~90.
- 안장영·이창현·김용주·박용석(1998) : 연안 정착망 주요 대상어종의 유집방음에 대한 행동반응(I)-방어의 청각역치-한국어업기술학회지, 34(4), 386~392.