한국음향학회지 제20권 제5호 pp. 100~109 (2001)

부레를 가진 어류의 음향산란 강도에 관한 연구: 참돔의 길이 및 행동에 따른 산란강도

Study on the Backscattered Signal of Swimbladdred Fish: Target Strength due to Length and Behavior of Red Seabream (*Pagrus Major*)

강 돈 혁*, 황 두 진**, 나 정 열*, 김 수 암***
(Donhyug Kang*, Doojin Hwang**, Jungyul Na*, Suam Kim***)

*한양대학교 지구해양과학과, **여수대학교 해양생산학과, ***부경대학교 해양생물학과
(접수일자: 2001년 3월 12일; 채택일자: 2001년 4월 27일)

부레를 가진 어류의 산란 강도를 조사하기 위하여 길이가 다른 참돔 (red seabream, *pagrus major*)을 이용한 음향 실험을 실시하였다. 대상 어류를 살아 있는 상태로 – (1) 망 내에 각각 넣은 후, (2) 자유 유영 상태로 놓은 후 – 3개의 음향 센서 (38, 120, 200 kHz)를 이용하여 길이에 따른 산란강도를 측정하였다. 실험 결과 길이에 따른 참돔의 산란 강도는 각 주파수별로 $TS_{38kHz} = 20\log_{10}(l) - 66.41$, $TS_{120kHz} = 20\log_{10}(l) - 71.80$, $TS_{200kHz} = 20\log_{10}(l) - 73.94$로 나타났다. 실험 결과와 이론 모델을 비교하기 위하여 어류의 형태를 근거로 한 Helmholtz-Kirchhoff 음선 근사법을 사용한 결과, 산란강도는 어류 몸체보다는 부레에 의한 효과가 95% 이상으로 나타났다. 한편, 수신된 산란강도 자료를 이용한 확률밀도 함수로부터 어류의 형태에 따른 산란강도 변위는 망 내의 산란체에서는 가우스 확률밀도함수 (Gaussian PDF)로, 자유 유영 상태에서는 레일리 확률밀도 함수 (Rayleigh PDF) 특성을 나타냈다.
핵심용어: 산란강도, 어류의 부레, 참돔, 음향산란 모델, 확률밀도함수
투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

The backscattered sound energy by fish depends on size and physical structure and, most important, on the presence or absence of a swimbladder. Target strength experiments of red seabream (*Pagrus major*) were conducted by using 38 (split-beam), 120 (split-beam) and 200 kHz (dual-beam) frequencies with live fishes confined in a net-cage and free swimming in tank without the cage, respectively. For 38, 120, and 200 kHz frequencies, target strength equations are expressed as a function of fish length: $TS_{38kHz} = 20\log_{10}(l) - 66.41$, $TS_{120kHz} = 20\log_{10}(l) - 71.80$, and $TS_{200kHz} = 20\log_{10}(l) - 73.94$. To test the acoustic models by using Helmholtz-Kirchhoff ray approximation, predictions of target strength based on swimbladder morphometries are compared with target strength measurements. The target strength of whole fish depends on variations in swimbladder morphology than fish body morphology. In the mean time, when the fish is confined in the net cage, scattering length by the backscattered signal matched with the Gaussian PDF, while under the free-swimming condition, scattering length is close to the Rayleigh PDF.
Keywords: *Target strength, Fish swimbladder, Red seabream, Acoustic model, PDF*
ASK subject classification: *Underwater acoustics (5.6)*

책임저자: 강돈혁 (dhkang@ihanyang.ac.kr)
425-744 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-5533; 팩스: 031-406-6458)

I. 서 론

해양에 존재하는 어류의 자원량과 분포를 조사하기 위해 수중음향을 사용하기 시작한 것은 1920년대 후반으로 2차 세계대전을 계기로 개발되어 현재의 수산음향학 (fisheries acoustics)으로 발전하였다[1]. 초기에는 어류의 식별이나 자원량보다는 불특정 어군의 전체적인 분포만을 고려하였으나, 1970년 중반부터 상업적으로 관심 있는 어종의 식별이나 자원량 조사를 위한 음향 조사가 실시되었다[2]. 컴퓨터 공학의 발전과 더불어 최근에 많이 사용되는 방법으로 임의의 수심에서 수신되는 모든 음파를 수신하는 반사파 적분법 (echo integration method)이 있다[3]. 이 방법은 전체 수층에 걸쳐 단일 어군이 형성되거나, 임의의 수층에 특정 어군이 존재할 때 음향 조사를 이용한 자원량 조사에 많이 사용되는 방법으로 특정 어종에 대한 산란강도 (target strength; TS) 특성이 필수적이다. 특정 어류에 대한 산란강도는 수신된 음향 신호로부터 자원량을 산출할 때 가장 기본이 되는 출발점으로 이에 대한 사전 지식이 반드시 필요하다. 일반적으로 산란강도를 측정하는 방법으로는 대상 어류를 (1) 죽여서 움직일 수 없거나, 마취를 시켜 의식이 없게 만든 상태, (2) 활동을 할 수 있지만 망에 갇혀 있는 상태, (3) 자유 유영 상태로 분류하여 실험을 하고 있다[4]. 자유유영 상태의 확장으로 현장에서 직접 산란강도를 측정 (*in situ* method) 하기도 하는데 어종의 혼합이나 불규칙한 길이 조성으로 정확한 산란강도 값을 유추하는 데 한계가 있다. 대부분 어류의 산란강도는 음향학적으로 중요한 요소인 부레 (swimbladder)로부터 결정이 되며, 일부 종의 경우 부레에 의해 90% 혹은 그 이상으로 산란강도가 결정될 수도 있다[5]. 그러나 산란강도는 개개 어류 사이의 변위가 있고, 심지어 같은 크기와 종 (species)이라 하지라도 차이가 있으므로 많은 실험을 통하여 이를 검증한 다음 수산 자원량 조사에 응용을 해야 한다.

본 논문은 음향을 이용한 수산 자원량을 추정할 때 정확도를 높이기 위한 방법으로 우리나라 주변 해역에서 많이 서식하고 또한 최근에 연안에서 수행되고 있는 바다목장화 사업의 주요 어종인 참돔 (red seabream, *pagrus major*)을 대상으로 실시한 산란강도 실험을 이용하여 실험 어종의 산란강도 식을 이끌어내는 것을 목적으로 하였다. 다른 한편으로는 실험치와 비교하기 위하여 어류의 형태학적 특성을 근거로 한 모델 결과와 비교하였으며 또한 어류의 행동에 따른 산란 강도의 변위를 알아보았다.

II. 실험 개요

실험 어종은 참돔 (red seabream, *pagrus major*)으로 이 종은 우리나라 연안, 발해만, 남동 중국해 등에 서식하는 어종으로 주로 수심 30~50 m의 대륙붕에 분포하고 있으며[6], 상하가 긴 타원체 모양을 가지고 있다. 최근 연안 수산자원의 고갈로 인한 자원량 감소를 극복하고자 남해안의 통영을 중심으로 참돔 및 조피볼락 (rock fish, *sebastes schlegeli*)을 방류한 바다 목장화 사업을 추진하고 있는데 방류한 자원의 자원량 조사를 위하여 두 어종의 산란강도 자료가 필요한 실정이다. 산란강도 측정을 위한 음향 실험은 가로, 세로, 높이가 각각 5 m인 해수 수조에서 실시하였다 (Fig. 1).

음향 센서는 동일면 상에 spilt-beam (SIMRAD) 형태의 38, 120 kHz와, dual-beam (BioSonics) 형태의 200 kHz를 설치한 후 회전을 시키면서 연속적으로 측정을 실시하였다[7,8]. 세 가지 센서의 -3 dB 빔 폭은 각각 7.0°, 7.1°, 5.8°이며, 송신 간격 (ping rate)은 0.5, 0.5 그리고 0.25초였다. 한편, 어류의 행동 형태를 관찰하기 위하여 망의 중심과 같은 수심에 음파의 영향을 받지 않는 위치를 선정하여 수중 카메라를 설치하여 비디오로 촬영을 하였다.

동일한 음향 조건과 어종에 대해 측정 방법을 달리한 두 가지 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험은 수조 내의 음향 센서면으로부터 3.1 m 되는 지점에 그물 망을 설치한 후 길이가 각각 다른 참돔을 넣어 살아 있는 상태지만 제한된 공간에 한정시킨 후 개개 어류의 산란강도를 측정

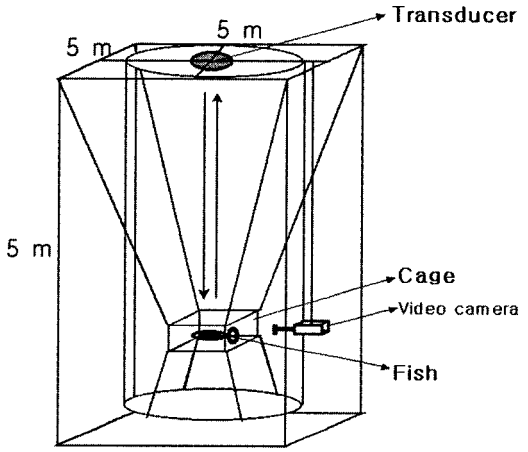


그림 1. 그물 망 내의 어체로부터 산란강도 측정을 위한 해수 수조 장치

Fig. 1. Apparatus for target strength measurement on encaged fish. The distance from transducer to fish is about 3.1 m.

표 1. 개개 참돔의 길이, 무게와 모델 입력변수를 위한 실린더의 격자 수 및 체적
Table 1. Morphology measurements from individual red seabream.

Num	Total Length (l, cm)	Weight (g)	N_s	N_b	Vol_s	Vol_b
1	10.31	21.65	14	20	1.03	22.4
2	11.22	23.24	13	23	1.18	22.9
3	10.63	23.60	13	23	1.22	23.3
4	23.70	197.35	15	30	9.24	206.2
5	24.30	270.60	12	22	13.63	371.1
6	31.30	578.65	15	22	25.89	735.9
7	34.90	791.19	18	27	39.89	999.9
8	25.30	278.46	13	17	15.51	382.3
9	29.25	426.00				
10	28.00	436.00				
11	14.52	46.00				
12	14.42	44.00				
13	15.69	58.00				
14	14.21	48.00				
15	10.94	19.26	11	17		
16	11.54	30.11	13	17		
17	26.00	326.00				
18	27.00	380.00				
19	17.80	104.00				
20	16.30	84.00				

하였다. 이 때 사용한 그물 망은 한 변이 50 cm의 정육면체로 그물 망에 의한 산란강도는 −70 dB 이하로 실험 어종에 비해 아주 낮은 분포를 가지고 있었으므로 무시하였다. 또한 수조 바닥과 어류와의 신호 식별을 위하여 그물 망의 하부와 수조 바닥과의 거리를 0.8 m 정도 분리시켜 실험을 실시하였다. 개개 어류에 대한 실험을 시작하기 앞서 해수면의 임시 망에 두었던 대상 어종을 실험 망에 넣은 후 실험 환경에 적응시킨 후에 실험을 실시하였다. 이 때 길이에 따른 산란강도의 변화를 조사하기 위하여 결정한 어류의 개체수는 총 20마리로, 그 길이는 10.3~34.9 cm였다 (Table 1). 한편, 개개 어류에 대한 실험이 끝난 후 전체 길이와 습 중량과의 관계 (Fig. 2), 상하 폭, 좌우 폭을 측정한 후, 드라이아이스와 에틸알코올을 혼합하여 급속 냉동시켜 보관하였다. 이후 음향 산란 모델의 입력 변수들을 위한 부레와 어체의 형태학적 특징을 알기 위하여 냉동 보관된 어류들을 측면과 배면에서 X-ray (SOFTEX M-1005, JIRA)를 투과시켰다 (Fig. 3).

두 번째 실험은 수조 가운데의 그물 망을 제거한 후 8~10 cm의 길이를 가진 참돔 30마리와 10~13 cm 길이의 참돔 50마리를 야간에 자유 유영시킨 상태에서 음향

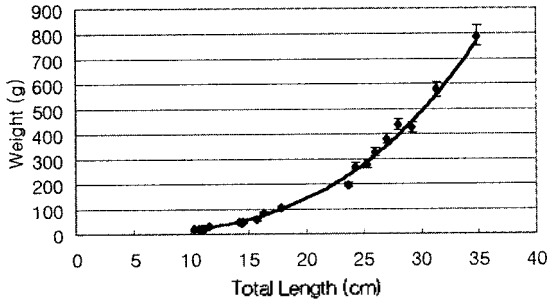


그림 2. 개개 참돔의 전체 길이와 습 중량과의 관계식
Fig. 2. The relationship of the total length-wet weight is expressed as follows:
weight (g) = 0.0148 $(l)^{3.05}$, (r=0.9).

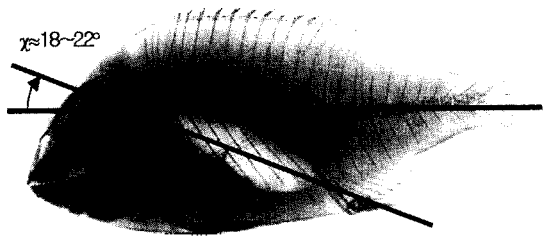


그림 3. 참돔의 X-ray 사진 부레는 흰색부분이며 부레의 장축은 어체의 수평축에 대해 약 18~22° 정도 기울어져 있다.
Fig. 3. Lateral X-ray of red seabream (pagrus major). The swimbladder is light part and its angle relative to the to the horizontal axis is about 18~22°.

관측을 실시하였다. 야간에 실시한 이유는 참돔이 주간에는 해저 바닥 근처에 머무르고 밤이 되면 중층으로 떠오르는 습성 때문이었다. 수조에서 자연 상태의 환경을 완벽하게 재현하는 것은 불가능하지만 적응 시간이 지난 후 일부 개체들은 수조 중간까지 이동하는 양상을 보이고 있었다. 이 실험의 목적은 자유 유영 상태에서 산란강도 측정뿐만 아니라 어류의 행동에 따른 음향 신호의 변위를 알기 위함이다. 이와 같은 신호의 변위는 현장 상태에서 음향 신호를 수신했을 때 수중에 존재하는 어류의 행동을 간접적으로 유추할 수 있을 뿐만 아니라 산란강도에도 영향을 주기 때문이다.

두 실험에 사용된 시스템의 신호 처리 부분에는 임의의 수심에 존재하는 어류로부터 수신되는 음향 자료로부터 각각의 산란강도 값을 산출할 수 있는 알고리즘이 내장되어 있으므로 앞에서 언급한 각 주파수 별로 송신 간격(ping rate) 마다 하나의 산란강도 값이 나오게 된다. 이때 어류의 위치가 주빔 내에 들어오게 되면 시스템에 내장된 빔 패턴 함수에 의해 빔축으로 보정을 하여 산란강도를 결정한다. 한편, 모든 음향 자료에서 계산된 산란강도 값의 산술 평균을 사용하지 않고 산란 특성을 포함하고 있는 각각의 후방산란 단면적 (backscattering cross-section, σ_{bs}, m^2)을 이용한 평균으로부터 평균 산란강도 값을 산출하였다.

평균 산란 단면적: $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \ldots + \sigma_n)/n$ (1)

평균 산란 강도: $10 \log 10(\bar{\sigma}/4\pi)$ (2)

III. HK 산란 모델과 산란 강도 신호의 변위

Helmholtz-Kirchhoff (HK) 음선 근사법을 이용한 어류의 산란 모델을 참돔에 적용시켰다. 이 방법은 어류의 형상을 음향 산란 모델에 적용시키는 방법으로 대서양 대구 (*gadus morhua*), 전어과 어류의 일종인 Threadfin shad (*dorosoma petenense*) 등에 사용하여 실험치와 모델 결과치가 잘 맞는 것으로 나타났으며, 특히 고주파 산

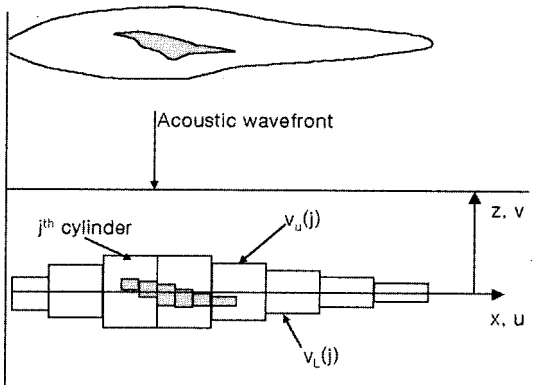


그림 4. 사진현상을 통한 어류몸체와 부레의 단순 모식도(위) Helmholtz-Kirchhoff (HK) 음선 모델을 위해 몸체와 부레를 실린더 형태로 고려한 모식도로 x-y 좌표계를 어류 중심을 기준으로 u-v 좌표계로 변환

Fig. 4. Fish body and swimbladder outline from lateral X-ray image (upper). Helmholtz-Kirchhoff ray model representation of fish body and swimbladder (lower). The Cartesian x-y coordinate system is transformed to a u-v fish centered coordinated system.

란 모델에 많이 사용되고 있다[9,10]. 이와 같은 방법으로 참돔의 X-ray 사진으로부터 부레와 몸체를 여러 부분으로 나누어 각각을 하나의 유한길이 실린더 (finite length cylinder) 형태로 가정하여 모델 입력 변수 및 기하학적 모형을 결정하였다 (N_s:부레의 격자 수, N_b: 몸체의 격자수, Vol_s: 부레의 부피, Vol_b: 몸체의 부피, Table 1, Fig. 4). 부레는 기체가 채워진 실린더로, 몸체는 액체로 채워진 실린더로 가정을 하였으며 부레 및 몸체의 부피는 개개 격자 부피의 합으로 계산하였다. 해수와 매질 사이의 음속비 (g)와 밀도비 (h)를 위해 해수는 직접 측정을 하였으나 어류의 경우 몸체는 어류의 일반적인 생리학적 특징을, 부레 내부는 공기의 특성을 이용하였다 (Table 2). 일반적으로 산란체의 음향 특성을 후방산란 단면적 혹은 산란길이 (scattering length, L_{bs})의 함수로 나타내며 이에 따른 산란강도는 다음의 간단한 함수로 표시된다. 본 논문에서는 음향 모델에 의한 어류의 산란강도를 계산하기 위하여 산란 길이를 이용하였다.

$$TS(f) = 10\log(\sigma_{bs}), \quad TS(f) = 20\log(|L_{bs}|) \qquad (3)$$

표 2. 모델 계산을 위한 음향 입력 변수

Table 2. Acoustical parameters. ρ is density and c is sound speed.

	ρ (kg/m³)	c (m/s)	g	h
Sea water ($_w$)	1030	1541	-	-
Fish body ($_{f_b}$)	1070	1570	1.04	1.02
Swimbladder ($_{s_b}$)	1.24	345	0.001	0.22

여기서, TS : 산란강도 (dB), σ_{bs}: 후방산란 단면적(m^2)
L_{bs}: 후방산란 길이(m), f : 주파수(kHz)

부레와 어류 몸체, 그리고 어류 전체에 의한 산란 길이를 입사 각도 (x)가 0°로 입사되는 기하학적 모형만을 고려하여 표시하였으며, 이때 부레에 의한 산란 길이 (L_s)와 몸체에 의한 산란 길이 (L_b)는 다음과 같이 표시된다[11].

$$L_s \approx -i\frac{R_{fs}(1-R_{wf}^2)}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N_s-1} A_{sb} \times [(k_{fb}a(j)+1)]^{1/2} \times \exp[-j(2k_{fb}v_U(j)+\Psi_{sb})] \cdot \Delta u(j) \quad (4)$$

$$L_b \approx -i\frac{R_{wf}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N_b-1} [ka(j)]^{1/2} \Delta u(j) \times [\exp(-i2kv_U(j)-(1-R_{wf}^2) \times \exp\{-i2kv_U(j)+i2k_f(v_U(j)-v_L(j)+i\Psi_{fb}\}] \quad (5)$$

여기서,

$$A_{sb} \approx \frac{ka(j)}{ka(j)+0.083}, \quad \Psi_{sb} \approx \frac{ka(j)}{40+ka(j)} - 1.05,$$

$$R_{fs} = \frac{gh-1}{gh+1}, \quad R_{wf} = \frac{\rho_{fb}c_{fb}-\rho_w c_w}{\rho_{fb}c_{fb}+\rho_w c_w},$$

$$g = \frac{\rho_{sb}}{\rho_{fb}}, \quad h = \frac{c_{sb}}{c_{fb}}$$

$$\Psi_{sb} \approx -\frac{\pi k_{fb}v_U(j)}{2[k_{fb}v_U(j)+0.4]}, \quad k_{sb} = \frac{s\pi f}{c_{fb}}$$

$a(j)$: j번째 부레 격자 실린더의 반지름

위의 두 식으로부터 어류 전체의 산란 길이 (L_{wf})는 부레에 의한 산란 길이와 몸체에 의한 산란길이의 coherent 합으로 계산한다.

$$L_{wf} = L_s + L_b \quad (6)$$

한편, 산란 신호로부터 관찰하는 어류의 행동을 알아보기 위하여 산란강도 신호의 후방산란 단면적으로부터 확률밀도 함수 (probability density function)를 이용하였다. 즉 어류로부터 산란되는 신호의 평균은 부레와 어류 몸체로부터 일정하게 들어오는 산란강도 (concentrated cross section, $\sigma_c = \langle |L_{bs}| \rangle^2$)와 어류의 움직임에 따라 변하는 산란강도 (fluctuated cross section, $\sigma_d = Var|L_{bs}|$)의 합으로 구성이 되며, 이 두 변수의 비율 ($\gamma \equiv \sigma_c/\sigma_d$)을 이용하여 확률밀도 함수로 표시한다. 어류 자체에 의한 일정한 신호 (signal, σ_c)와 움직임에 의해 변하는 신호 (random noise, σ_d)를 확률밀도 함수로 나타내기 위하여 Rician PDF를 이용하였다[11].

$$\langle \sigma_{bs} \rangle = \sigma_c + \sigma_d \quad (7)$$

$$w_R(e) = \frac{2e[1+\gamma]}{\langle \sigma bs \rangle} \exp\left(-\frac{[1+\gamma]e^2+\gamma\langle \sigma bs \rangle}{\langle \sigma bs \rangle}\right) \times I_0\left(\frac{2e\gamma[1+\gamma]^{1/2}}{\langle \sigma bs \rangle^{1/2}}\right) \quad (8)$$

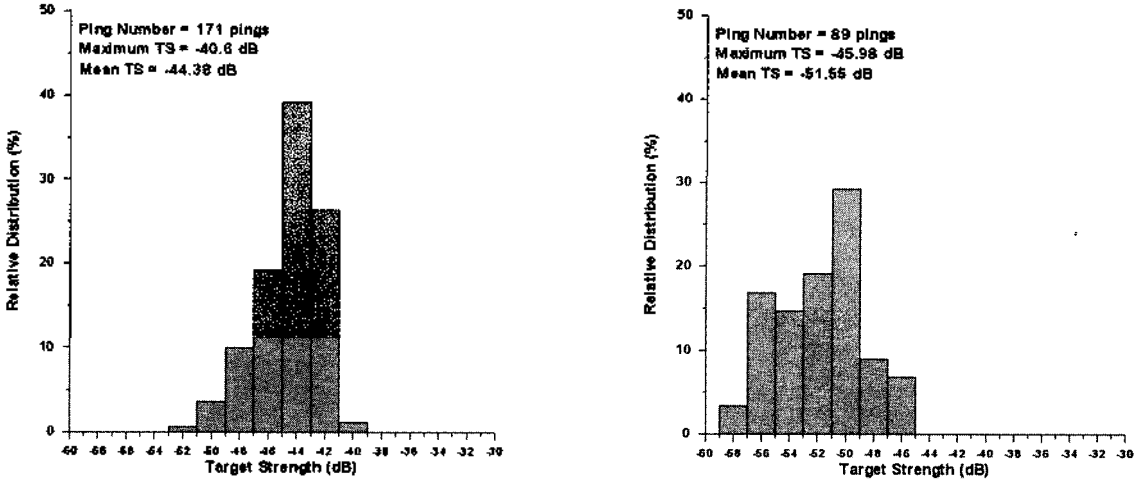
여기서, $\langle \sigma_{bs} \rangle$: 평균 후방산란 단면적
e : 산란강도의 최대치
$I_0(\cdot)$: modified Bessel 함수

IV. 결과 및 토의

4.1. 참돔의 산란강도 특성

같은 길이의 참돔에 대해 3개의 주파수별로 수신된 산란강도의 분포를 후방산란 단면적이 아닌 관측치 자체를 이용하여 그림 5에 예시하였다 (Fig. 5). 부레 내부에 있는 공기에 의한 공진 주파수 영역에 가까운 38 kHz에서 120 kHz에 비해 약 5~6 dB 정도 높게 나오고 있으며 이러한 경향은 200 kHz에서도 나타나고 있다. 한편 자료의 수는 망 내에 존재하는 참돔의 유영 상태에 따른 빔 축으로의 접근 정도와 송신 간격 (ping rate)에 따라 크게 차이가 나고 있는데 38과 120 kHz에서는 80~400 ping 정도, 200 kHz에서는 많은 경우 1,000 ping 이상의 자료가 수신되었다. 그림 5에서 최대 산란강도 분포를 보이고 있는데 이는 어류의 방향성과 관련이 있다. 즉 전체 산란강도에 영향을 주는 것이 부레라고 가정을 한다면 어류의 각도가 수평면을 기준으로 머리가 아래로 내려가는 상태에서 부레가 수평면을 형성하고 이 때 음향 축과 직각이 되므로 가장 크게 산란강도가 나타날 수 있게 된다. 본 실험에서 살아있는 개체를 대상으로 실험을 실시하면서 어류의 움직임을 관찰하였으나 자세각과 산란강도 자료를 일치시키는데 어려움이 있어 자세각에 대한 고찰은 추후 연구 과제로 남아 있다.

참돔의 길이별, 주파수별 산란강도 특성을 알기 위하여 개체별로 관측된 산란강도를 후방산란 단면적으로 변환하여 평균 값을 계산하여 나타냈다 (Table 3, Fig. 6). 길이별 산란강도를 함수로 나타내기 위하여 일반적으로 "TS=mlog(l)+b" 형태의 회귀 함수식을 사용한다 (l, cm). 이때 계수 m 은 보통 18~30 사이인데 보통 후방산란 단면적이 어류 길이의 2제곱 형태로 표시되므로 log로



(a) (b)

그림 5. 38(a), 120 kHz (b) 음원을 이용한 참돔의 산란강도 분포의 예 (길이: 10.3 cm)
Fig. 5. Target strength histogram for single red seabream in net cage. Examples of experimental results with split-beam echosounder at 38 (a) and 120 kHz (b). The fish length is 10.3 cm.

표시할 때 계수로 20을 사용하며, 어종에 따라 또 다른 계수 b의 값이 결정이 된다. 따라서 실험 결과 중 자료 양이 적은 17~20번의 참돔 자료를 제외한 나머지 자료를 이용하여 함수로 표현한 결과 다음과 같이 나타났다.

38 kHz : $TS = 20\log_{10}(l) - 66.41$ (r=0.86)
120 kHz : $TS = 20\log_{10}(l) - 71.80$ (r=0.76)
200 kHz : $TS = 20\log_{10}(l) - 73.94$ (r=0.21)

동일한 길이를 가진 참돔의 경우, 상대적으로 주파수가 낮은 38 kHz의 산란강도가 약 6 dB 정도(후방 산란 단면적으로는 약 4배) 높게 나타났으며, 120 kHz와 200 kHz 사이에는 약 2 dB 정도로 차이가 크지 않게 나타났다. 문헌에 나타난 실험 결과에 의하면 38 kHz의 음원에서 폐쇄성 부레 (physoclistous swimbladder fish, 목과 부레가 연결되지 않은 상태)를 가진 어종 (대구류)의 계수 값은 -67.4 dB, 개방형 부레 (physostomes swimbladder fish)를 가진 어류 (청어류)는 -71.9 dB, 부레가 없는 고등어류는 -85 dB 정도로 나타나고 있다[12]. 본 실험에 사용된 참돔의 경우, 38 kHz의 계수 값이 폐쇄성 부레를 가진 다른 어종과 유사한 결과를 보여주고 있으므로 참돔이 폐쇄성 부레를 가진 종임을 간접적으로 알 수 있었다. 어류 산란강도 측정에 많이 사용되는 38 kHz의 경우 실험 결과의 분포가 120, 200 kHz 보다 길이에 따른 산란강도의 분포가 큰 차이를 보이지 않고 회귀식에 근사하므로 자원량 조사에는 38 kHz의 함수식을 사용하는 것이 더 적합함을 보여주고 있다.

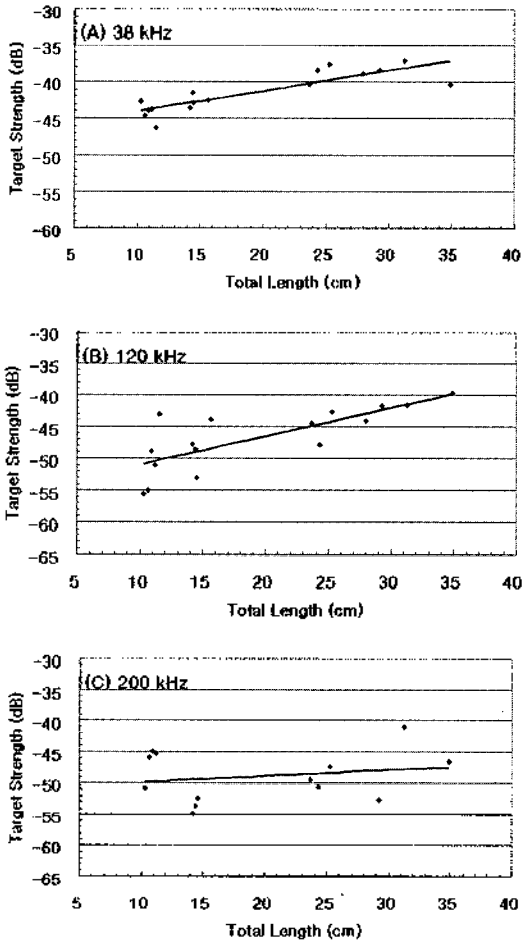


그림 6. 길이 변화에 의한 참돔의 산란강도 (A) 38 kHz (B) 120 kHz (C) 200 kHz
Fig. 6. Variation of target strength with fish length (cm) at each frequency. A:38 kHz, B:120 kHz, C:200 kHz.

표 3. 개개 참돔으로부터 측정된 후방산란 강도
Table 3. Backscatter measurements from individual red seabream.

Num	Freq.(kHz)	$\overline{\sigma_{bs}}$ (m²)	$\overline{TS}$ (dB)	$\lvert L\rvert/TL$
1	38	5.38e-5	-42.7	0.071
	120	2.75e-6	-55.6	0.016
	200	8.35e-6	-50.8	0.028
2	38	4.23e-5	-43.7	0.057
	120	7.87e-6	-51.0	0.025
	200	2.95e-5	-45.3	0.048
3	38	3.42e-5	-44.7	0.055
	120	3.16e-6	-55.0	0.016
	200	2.56e-5	-45.9	0.047
4	38	9.26e-5	-40.3	0.040
	120	3.51e-5	-44.5	0.025
	200	1.13e-5	-49.5	0.014
5	38	1.42e-4	-38.5	0.049
	120	1.60e-5	-48.0	0.016
	200	8.66e-6	-50.6	0.012
6	38	1.90e-4	-37.2	0.044
	120	6.93e-5	-41.6	0.026
	200	7.70e-5	-41.1	0.028
7	38	9.35e-5	-40.3	0.027
	120	1.08e-4	-39.7	0.029
	200	2.18e-5	-46.6	0.013
8	38	1.71e-4	-37.7	0.051
	120	5.30e-5	-42.8	0.028
	200	1.82e-5	-47.4	0.016
9	38	1.43e-4	-38.4	0.040
	120	6.77e-5	-41.7	0.028
	200	5.40e-6	-52.8	0.007
10	38	1.28e-4	-38.9	0.040
	120	3.92e-5	-44.1	0.022
	200			
11	38	5.14e-5	-42.9	0.049
	120	4.83e-6	-53.2	0.015
	200	5.69e-6	-52.4	0.016
12	38	7.12e-5	-41.5	0.058
	120	1.38e-5	-48.6	0.025
	200	4.28e-6	-53.7	0.014
13	38	5.54e-5	-42.6	0.047
	120	4.07e-5	-43.9	0.040
	200			
14	38	4.33e-5	-43.6	0.046
	120	1.66e-5	-47.8	0.028
	200	3.25e-6	-54.9	0.012
15	38	4.07e-5	-43.9	0.058
	120	1.29e-5	-48.9	0.032
	200	3.21e-5	-44.9	0.051
16	38	2.35e-5	-46.3	0.042
	120	4.91e-5	-43.1	0.060
	200			
17	38	2.81e-5	-45.5	0.020
	120	1.80e-5	-47.4	0.016
	200	1.68e-5	-47.8	0.015
18	38	2.89e-5	-45.4	0.019
	120	6.88e-6	-51.6	0.009
	200	1.52e-5	-48.2	0.014
19	38	1.72e-5	-47.6	0.023
	120	1.20e-5	-49.2	0.019
	200	6.29e-6	-52.0	0.014
20	38	9.62e-6	-50.2	0.019
	120	7.24e-6	-51.4	0.016
	200	3.14e-5	-45.0	0.034

4.2. 음향 산란 모델

참돔의 부레와 어류를 실린더 모양으로 고려한 후 주파수별 산란강도 값을 음향 모델을 통하여 산출하였다. 이 때 산란체에 도달하는 입사파의 각도는 0만을 고려하였는데 이는 본 연구에서 어류의 자세에 따른 입사파의 영향을 배제시켰기 때문이다.

길이가 작은 참돔의 경우 (예: 10.31 cm), 부레에 의한 산란강도는 주파수가 커짐에 따라 선형적으로 감소하는 추세를 보이나 몸체에 의한 산란강도는 주파수에 따라 주기적으로 진동하는 결과를 보이고 있다. 이 때 어류 전체의 산란강도를 위해 두 산란강도를 coherent 합으로 표현하면 최대 산란강도는 약 37 ~48 kHz에서 -42 dB로 계산되었다. 이러한 산란강도 분포를 결정하는 요인은 그림에서 보여주듯이 부레에 의한 효과 때문으로, 38 kHz의 경우 전체 산란강도의 약 95 %가 부레에 의한 영향으로 나타났다. 실험에 사용한 해당 주파수의 산란강도 값을 평균 값 (그림 7의 하단 그림에서 아래 점)과 최대 값 (그림 7의 하단 그림에서 위의 점)을 이용하여 모델 결과와 비교한 결과 전체 어류에 의한 산란강도 값에서 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 경향을 보이고 있었다 (Fig. 7).

상대적으로 어류의 길이가 큰 경우 (예: 31.30 cm)에는 몸체뿐만 아니라 부레에 의한 산란강도에도 주기성이 나타나고 있다. 이것은 부레와 몸체를 실린더 형태로 형상화시킬 때 격자 수 (N_s: 15, N_b: 22)를 작게 하여 개개 실린더의 합이 실제 참돔의 형상을 재현하는 데 부족했기 때문이다. 이것은 앞에서 설명한 참돔의 경우 길이는 작지만 격자 수 (N_s: 14, N_b: 20)가 많아 실제 형상을 좀 더 가깝게 재현할 수 있었고 이로 인해 부레에 의한 산란강도가 주기를 가지지 않고 단조 감소하는 경향을 보여주는 것이다. 전체적으로 작은 참돔 보다는 실험 결과와 일치성이 감소하고 있으나 200 kHz를 제외하고는 모델치의 경계에 포함되고 있다 (Fig. 8). 이와 같이 길이가 다른 참돔을 음향 산란 모델로 구현한 결과, 모델 입력 변수로 결정되는 격자 수를 가능한 증가시켜 실제 어류의 몸체 및 부레의 형상을 구현하는 것이 중요함을 알 수 있다. 또한 적절한 격자 수를 결정하면 다른 어종에 사용되는 HK 산란 모델이 참돔의 음향 모델에도 이용 가능함을 알 수 있다.

4.3. 어류 행동에 따른 음향 특성

어류의 행동에 따른 음향 특성을 알기 위하여 80마리의 참돔을 자유 유영 시킨 상태에서 각 센서의 주빔 내에 들어오는 어류에 대해 산란강도를 측정하였다. 이러한 실

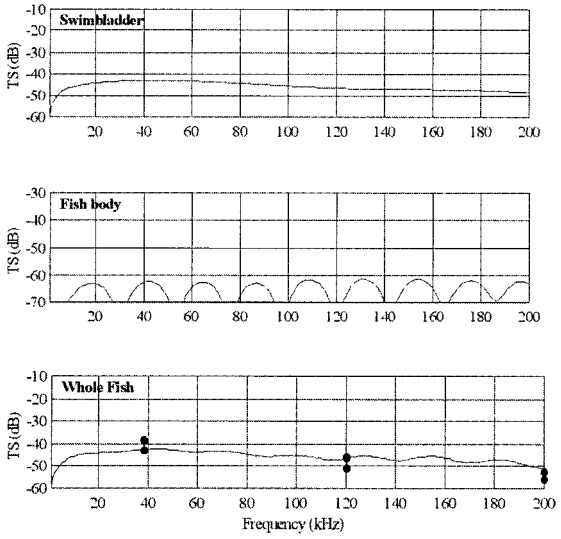


그림 7. HK 음선 모델을 이용한 참돔의 산란강도 (길이: 10.31 cm). 입사각은 0°임 어류 전체의 산란강도 값에서 위의 점은 최대 산란강도를 아래의 점은 평균 산란강도를 나타냄

Fig.7. Target strengths of a red seabream (*Pagrus major*) by HK ray acoustic model. Total length of the fish is 10.31 cm, and incident angle is 0 degree. Upper filled circles in target strength by whole fish indicate maximum target strength and lower filled circles mean target strength.

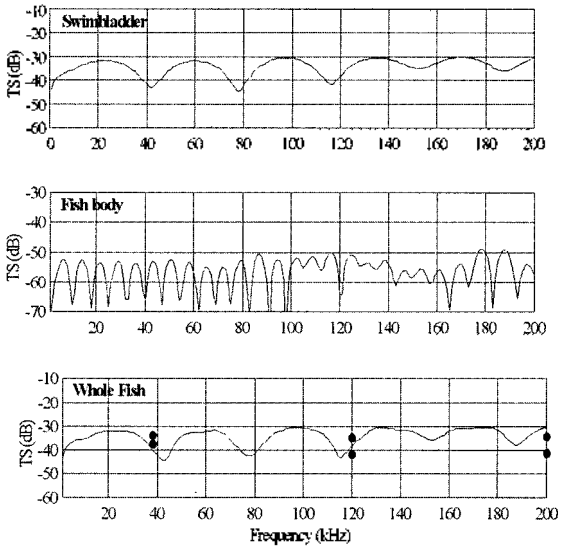


그림 8. HK 음선 모델을 이용한 참돔의 산란강도 (길이:31.30 cm). 입사각은 0 임 어류 전체의 산란강도 값에서 위의 점은 최대 산란강도를 아래의 점은 평균 산란강도를 나타냄

Fig.8. Target strengths of a red seabream (*Pagrus major*) by HK ray acoustic model. Total length of the fish is 31.30 cm, and incident angle is 0 degree. Upper filled circles in target strength by whole fish indicate maximum target strength and lower filled circles mean target strength.

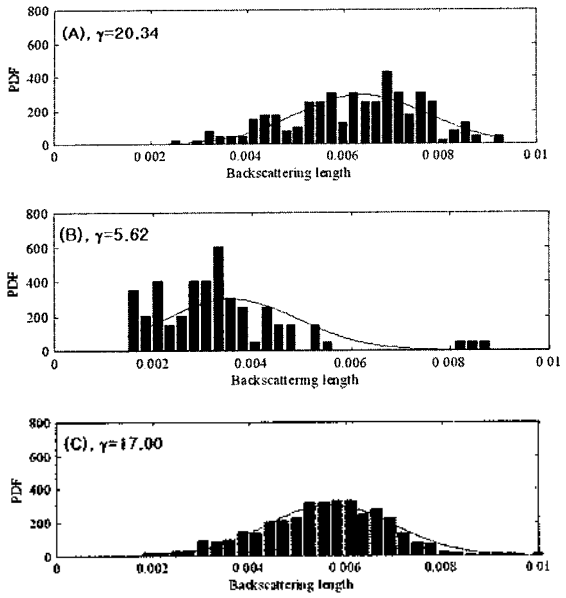


그림 9. 망 속의 단일 참돔에 의한 산란길이와 확률밀도 함수 (길이: 10.94 cm)
(A) 38 kHz (B) 120 kHz (C) 200 kHz

Fig. 9. Probability density function of backscattering length from a live red seabream that was placed in net cage. Vertical bar measured scattering length and solid line are Rician PDF. Fish length is 10.94 cm.
(A) 38 kHz, (B) 120 kHz, and (C) 200 kHz.

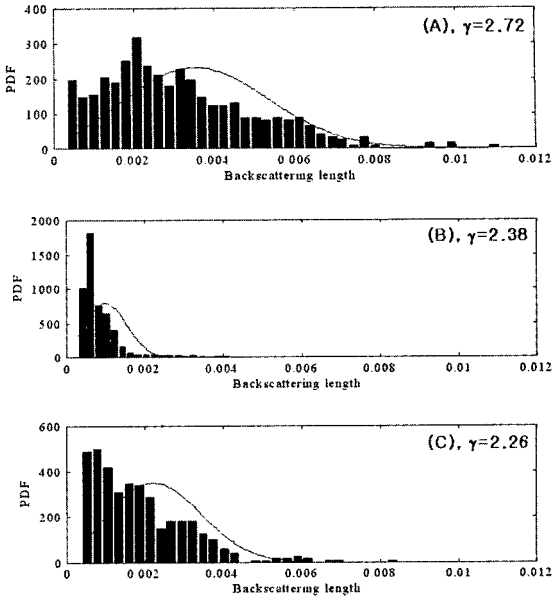


그림 10. 자유유영 상태의 참돔에 의한 산란길이와 확률밀도 함수 (개체 수: 80 마리)
(A) 38 kHz (B) 120 kHz (C) 200 kHz

Fig. 10. Probability density function of back scattering length from free-swimming red seabream that was placed in whole tank. Vertical bar measured scattering length and solid line are Rician PDF. The fish used in this experiment is 80 specimens and length is 8-13 cm.
(A) 38 kHz, (B) 120 kHz, and (C) 200 kHz.

험은 앞에서 설명한 대로 망 내에 넣은 단일 개체에 의한 산란강도 분포와는 다른 결과를 예측할 수 있다. 단일 산란체에 의한 산란 특성과 자유로이 움직이는 다중 산란체의 특성을 서로 비교하기 위하여, 두 조건에서 수신된 산란강도 자료로부터 후방산란 길이를 계산하고 식 (7)을 이용하여 평균 산란 단면적을 계산하였다. 또한 계산된 평균 산란 단면적과 개개 산란 강도에 의한 단면적으로부터 Rician 확률밀도 함수 (식 8)에 의한 음향 특성을 파악하였다.

망 내에 제한된 어류의 경우 (예: 10.94 cm) 평균 산란강도는 38 kHz에서 - 40 ~ -44 dB로 가장 높게 나타났다. 주파수에 따른 산란길이의 분포는 정규 분포 형태를 보여주고 있으며, 이때 γ 값은 주파수 38, 120, 200 kHz에서 각각 20.24, 5.62, 17.00으로 상대적으로 120 kHz 측정 당시에 어류의 움직임이 큰 것으로 나타났다. 이것을 확률밀도 함수로 나타내면 가우스 확률밀도함수 (Gaussian PDF)의 특성과 유사함을 나타내고 있다 (Fig. 9).

자유 유영 상태에서는 이와는 다른 양상을 보여 주고 있다. 길이 분포가 8~13 cm로 평균 길이는 비교를 위해 사용한 망 내의 참돔 길이와 유사하나 38 kHz의 경우 평균 산란강도는 -48 dB로 망 내의 어류에 비해 낮은 분포를 보여 어류의 움직임에 따른 산란강도 변위가 크게 나타남을 알 수 있었으며 이러한 경향은 120, 200 kHz에서도 뚜렷하게 보여주고 있다. 이러한 산란강도 분포로 계산된 γ 값은 주파수별로 각각 2.72, 2.38, 2.26으로 어류의 움직임에 의한 변동에 의해 산란 단면적의 크기가 concentrated 산란 단면적과 큰 차이가 없게 나타났다. 이것을 확률밀도 함수로 나타내면 레일리 확률밀도함수 (Rayleigh PDF) 분포를 보여주게 된다 (Fig. 10).

이와 같이 산란강도 측정에 주로 사용되는 두 가지 방법으로부터 참돔의 음향 특성을 산란강도 측면에서 보았을 때 서로 차이가 있음을 알 수 있다. 수산 자원량을 조사하는 지역에서 직접 산란강도를 측정하는 것이 가장 현실성을 반영한다고 볼 수 있지만 대상 어종의 움직임이나 다른 어종과의 혼합성에 의해 정확한 산란강도를 유추하는 것은 어려운 일이다. 현장에서 어류 길이에 따른 산란강도 분포는 수신된 신호와 트롤이나 그물을 이용하여 어획한 어류 길이 자료와의 상관성을 이용하지만 정확도 면에서는 살아있는 상태에서 망을 이용한 길이별 산란강도 실험에 비해 변위가 크게 나타날 것이다. 따라서 바다

목장과 같이 일정한 공간에 방류한 참돔의 자원량 조사를 실시할 때 망을 이용한 살아 있는 참돔의 길이별 산란강도 실험이 선행되어야 하며, 현장 조사에서 수신된 신호의 PDF를 통하여 어류의 움직임 정도를 역추정하여 수조에서 계산된 산란강도 식의 계수 값을 조정하는 것이 필요하다. 즉 38 kHz에서 계산된 "TS=20log(l) −66.41"에서 −66.41의 계수 값을 현장 자료에 접목시킬 때 어류의 움직임 정도에 따라 낮게 변화시켜야 한다.

본 연구의 산란강도 측정 실험에서 고려하지 못한 참돔의 자세각에 따른 산란 특성 및 분포 수심에 따른 산란강도 실험은 추후에 고려해야 할 사항으로 남아 있다.

V. 결 론

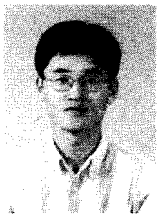
부레 (swimbladder)를 가진 어류의 산란 강도 특성을 조사하기 위하여 길이가 다른 참돔 (red seabream, *pagrus major*)을 이용한 음향 실험을 실시하였다. 실험은 해수 수조에서 수행되었으며 참돔을 살아 있는 상태로 망 내에 각각 넣은 상태로 길이에 따른 산란강도를 측정하였다. 실험 결과, 각 주파수별로 $TS_{38kHz} = 20\log_{10}(l) - 66.41$, $TS_{120kHz} = 20\log_{10}(l) - 71.80$, $TS_{200kHz} = 20\log_{10}(l) - 73.94$의 함수 식을 유도하였다. 실험 결과와 이론 모델을 비교하기 위하여 어류의 형태를 근거로 한 Helmholtz-Kirchhoff 음선 근사법을 사용하였으며, 38 kHz에서 전체 산란강도는 부레에 의한 효과가 95 % 정도로 나타났다. 한편, 수신된 산란강도 자료를 이용한 확률밀도 함수로부터 어류의 행태에 따른 산란강도 변위는 확률밀도 함수로 나타낸 결과 망 내의 참돔은 가우스 확률밀도함수 (Gaussian PDF)로 나타났으나 자유 유영 상태의 참돔의 산란 특성은 레일리 확률밀도함수 (Rayleigh PDF)의 특성을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. D. N. MacLennan and E. J. Simmonds, *Fisheries Acoustic*, Chapman & Hall, Chap. 1, pp. 1–6, 1992.
2. J. E. Ehrenberg, "A comparative analysis of in-situ methods for directly measuring the acoustic target strength of individual fish," *IEEE J. Oceanics Engineering*, OE-4, 141–152, 1979.
3. M. Aksland, "Estimating numbers of pelagic fish by echo integration," *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*, **43**, 7–25, 1986.
4. D. N. MacLennan and E. J. Simmonds, *Fisheries Acoustic* Chapman & Hall, Chap. **6**, pp. 164–200, 1992.
5. M. A. Do and A. M. Surti, "Estimation of dorsal aspect target strength of deep-water fish using a simple model of swimbladder backscattering," *J. Acoust. Soc. Am.* **87**, 1588–1596, 1990.
6. 국립수산진흥원, 태평양산 원양어류도감, 해양수산부, pp. 142, 1999.
7. SIMRAD, Simrad EK500 Scientific Echo Sounder, 1997.
8. BioSonics, Guide to Using DT Series, Hardware and Software, 1997.
9. C. S. Clay and J. H. Horne, "Acoustic models of fish: Atlantic cod (Gadus morhua)," *J. Acoust. Soc. Am.* **96(3)**, 1661–1668, 1994.
10. J. M. Jech, D. M. Schael and C. S. Clay, "Application of three sound scattering models to threatin shad (Dorosoma petenense)," *J. Acoust. Soc. Am.* **98(4)**, 2262–2269, 1995.
11. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, Academic press, Chap. **9**, pp. 348–402, 1998.
12. K. G. Foote, "Fish target strength for use in echo integrator survey," *J. Acoust. Soc. Am.* **82**, 981–987, 1987.

저자 약력

● 강 돈 혁 (Donhyug Kang)



1992년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 이학사
1994년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 석사
1996년 4월~2000년 3월: 한국해양연구원 극지연구센터위촉연구원
2000년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 박사과정 수료
※ 주관심분야: 수산음향학, 수중음향 모델링

● 황 두 진 (Doojin Hwang)

1990년 2월: 부경대학교 수산물리학과 석사
1995년 3월: 일본 북해도대학교 수산학연구과 박사
1996년 4월~1997년 8월: 일본수산공학연구소 연구원
1997년 9월~현재: 여수대학교 해양생산학과 교수
※ 주관심분야: 수산음향학, 수중음향 신호처리, 수산공학

● 나 정 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제8권 제6호 참조

● 김 수 암 (Suam Kim)

1979년 8월: 서울대학교 해양학과 대학원 석사
1987년 8월: Univ. of Washington 수산해양학 박사
1989년 9월: NOAA 박사후 과정
1989년 10월~2000년 2월: 한국해양연구원 선임/책임연구원
2000년 3월~현재: 부경대학교 해양생물학과 교수
※ 주관심분야: 수산자원학, 해양생물학