

부세에 대한 음향반사강도의 체장 의존성*

강희영 · 이대재†

부경대학교

Fish length dependance of acoustic target strength for large yellow croaker

Hee-Young KANG and Dae-Jae LEE

Pukyong National University

Abstract

This paper was conducted as an attempt in order to construct the data bank of target strength for acoustic estimation of fish length in the coastal waters of Korea. The fish length dependence of acoustic target strength for 13 large yellow croakers (*Pseudosciaena crocea*) at 75 kHz was investigated and the prediction of the target strength by using the Kirchhoff-Ray Mode model(KRM model) was compared with target strength measurements. The results obtained are summarized as follows;

1. In the averaged target strength pattern for 13 large yellow croakers the maximum target strength was -35.13 dB at -13.35° on a tilted angle.

2. The relationship between fork length(L, cm) and averaged target strength(TS, dB) was expressed as follows;

$$TS = 23.76 \log(L) - 73.45 \quad (r = 0.47)$$

$$TS = 20 \log(L) - 67.35$$

From this result, the conversion coefficient was -73.45 dB and 6.1 dB lower than the coefficient -67.35 dB where the value of the slope of the regression equation is forced to be 20.

3. Averaged target strength and a length conversion coefficient derived from a target strength histogram for 13 large yellow croakers of mean length 25.59 cm were -41.23 dB , -69.72 dB , respectively.

4. In the range of $2 < L(\text{fish length} / \lambda(\text{wave length})) < 40$, the prediction of the averaged target strength by the KRM model increased gradually with the increasing of L/λ and was lower than the measured target strength.

Key word : target strength(반사강도), fish length dependance(체장 의존성), acoustic model(음향모델), Kirchhoff-Ray Mode model(KRM 모델)

* 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00012-0) 지원으로 수행되었음.

† Corresponding author : daejael@pknu.ac.kr

서 론

재료 및 방법

현재, 우리나라는 허가제를 중심으로 한 어획 노력량 제한과 금어기, 금어구, 금지체장 등의 어업관리제도를 시행하고 있다. 그러나, 이러한 기술적인 제한만으로는 남획과 불법조업을 막는데 한계가 있어 어업자원의 고갈현상은 지속되고 있는 실정이다.

또한, 우리나라는 1996년 UN해양법협약의 비준과 더불어 한·일 및 한·중 어업협정 협약을 체결함으로써, 직접적으로 어획량을 관리하기 위한 총허용어획량(TAC, Total Allowable Catch) 제도를 도입하기에 이르렀다.

현재, 우리나라에서 채택하고 있는 TAC 관리대상 어종은 고등어, 전갱이, 정어리, 부세 외 19개 어종이며, 2003년도 시행 TAC 어종은 고등어, 전갱이, 정어리 외 9개 어종이다¹⁾.

이들 어족 자원에 대한 보다 효율적이고 지속적인 자원 관리를 위해서는 정확한 자원량의 평가가 실행되어야 한다. 일반적으로 계량어군탐지기(scientific echo sounder)를 이용하여 자원량을 추정하고자 하는 경우, 체장변환계수에 대한 정보가 필요하고, 그 체장변환계수의 신뢰도가 높을수록 정확한 어류의 체장 추정이 가능하다²⁾.

여기서, 어류의 음향반사강도를 추정하는 방법에는 실험적인 방법과 음향산란모델에 의한 이론적인 방법이 있다.

전자의 경우에는, 현장 측정법과 제어법이 있는데, 현장 측정법은 dual beam이나 split beam 이용하는 추정법이 주류를 이루고 있고, 제어법에는 현수법 및 cage를 이용하는 측정법이 있다³⁾.

그 중에서 음향산란모델에 의한 추정법은 어류의 형태, 특히, 어체와 부레의 형태를 X-ray 등으로 촬영하거나 혹은 해부를 통하여 획득한 3차원 이미지를 계수화하여 어류의 반사강도를 추정하는 방법이다⁴⁾⁻⁷⁾.

본 연구에서는 우리나라 주변해역에 서식하는 주요 어족생물자원에 대한 음향반사강도의 data bank를 구축하기 위한 기초연구로서 현수법을 이용하여 대형실험수조에서 부세(*Pseudosciaena crocea*)의 반사강도를 측정하고, 또한, 음향산란모델을 이용하여 추정한 이론반사강도와 측정치를 비교, 분석하였다.

1. 실험어류 및 실험장치의 구성

실험에 사용한 어류는 TAC 관리 대상 어종 중의 하나인 부세를 대상으로 하였다. 부세는 농어목 민어과 어류로서, 체형은 민어와 유사하여 길고 다소 측면형이며, 주로 우리나라 서·남해, 동중국해 및 남중국해에 널리 분포한다⁸⁾.

부세의 반사강도는 대형실험수조(L6m×W5m×H5m)에서 75 kHz의 주파수를 이용하여 현수법에 의해 측정하였다. 실험장치의 구성은 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 실험은 대형실험수조에 차대장치를 설치한 후 행하였고, 차대장치의 상면에는 1.0m × 0.5m의 현수창을 장치하여 이를 통해 실험어류 및 송수파기를 현수시킬 수 있도록 하였다.

실험에 사용한 어군탐지기는 SAMYUNG ENC의 SF-7000으로서 사용주파수는 75 kHz이고, 송수파기(직경 110mm, 지향각 1.5°)는 수면으로부터 0.2 m 아래에 위치시켰다. 실험어류는 송수파기의 음축상 2.05 m의 위치에 현수시켜 이로부터 산란되는 초음파 신호를 수신하였다.

어군탐지기의 송신신호의 펄스폭은 0.5 ms이며, 실험어의 echo 신호는 수신부의 포락선 검파단에서 추출하여 트리거 신호와 함께 신호처리장치(comizoa, LX203, 20 MHz)에 입력하여 처리하였다.

실험어를 수중에 현수시키기 위한 어류위치제어장치는 직류전동기(RF, 42 rpm/24V), 감속장치(감속비 1/9), 모터구동장치, 클러치제어장치, D/A 변환장치(comizoa, COMI-SD301)로서 구성하였다.

실험장치의 교정은 직경 45 mm의 교정구(calibration ball)를 이용하여 행하였는데, 교정구는 황동구(copper sphere)로서 그 반사강도는 -37.9 dB 이었다.

2. 실험방법

1) 현수법에 의한 반사강도 추정

실험에 사용한 총 13마리의 부세에 대한 체장과 체중의 범위는 Table 1과 같이 21.0~32.5 cm, 198~705 g이며, 그 평균 체장 및 평균 체중은 각각 25.59 cm, 332.46 g이었다.

부세에 대한 음향반사강도의 측정 의존성

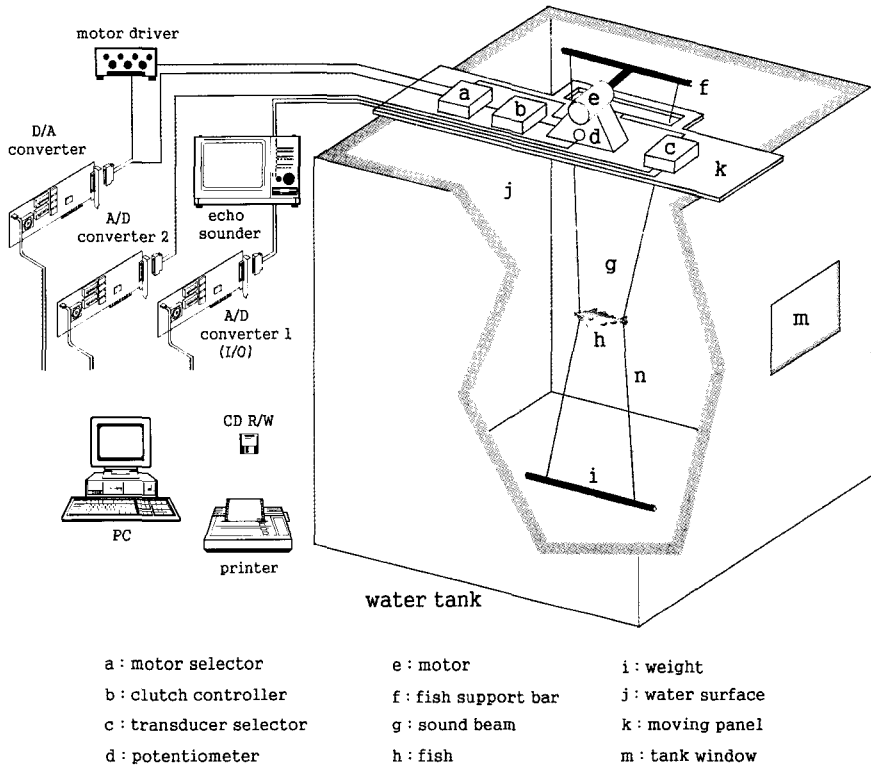


Fig. 1. Arrangement of experimental setup in water tank.

Table 1. Fork length and body weight of individual large yellow croaker used in the experiment

No.	length(cm)	weight(g)
1	21.0	198
2	22.4	200
3	23.2	223
4	23.8	285
5	24.4	270
6	24.8	288
7	25.4	320
8	25.5	298
9	26.7	292
10	26.8	405
11	27.5	328
12	28.0	510
13	32.5	705

실험은 부세의 자세변화에 따른 echo 신호의 변동을 정량적으로 측정후, 이들 데이터를 전처리 하여 Fig. 2와 같이 일차적으로 도표화하였는데, 부세의 반사강도는 $\pm 45^\circ$ 의 tilt angle 범위에 대하여 측정하였다.

어류의 반사강도를 측정할 때, 시스템의 설정, 어체의 고정 등에 대한문제가 발생하여 반복적인 실험이 요구될 때에는 수신된 실험 데이터를 삭제한 후 다시 실험을 실행하였다. 이와 같은 과정을 통하여 실험 데이터의 신뢰성이 인정되면 software 모듈의 데이터 수록 명령을 실행하여 hard disk에 저장, 데이터의 수, tilt angle의 변화에 따른 echo 전압 등의 데이터를 수록한 후, 이들 데이터는 후일 실험실에서 정량적인 분석을 행하였다.

부세의 반사강도 TS_r (dB)는 교정구에 의한 간접법을 이용하여 다음식을 이용하여 구하였다.

$$TS_f = 20 \log \frac{V_f}{V_{ref}} + TS_{ref} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, TS_{ref} 는 교정구의 반사강도, V_f, V_{ref} 는 각각 실험어류 및 교정구에 대한 echo 신호의 전압 (V)이다.

부세의 평균반사강도는 Foote의 방법⁹⁾에 의해 어류의 유명자세에 대한 확률밀도함수를 정규분포로 가정하여 추정하였다.

어체의 자세, 즉 pitch 각 (θ)의 변화에 대한 평균후방산란단면적 $\langle \sigma \rangle$ 는

$$\langle \sigma \rangle = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma(\theta) f(\theta) d\theta \dots\dots\dots (2)$$

에 의해 구하였고, 평균반사강도 (TS)는

$$TS = 10 \log [\langle \sigma \rangle / 4\pi] \dots\dots\dots (3)$$

에 의해 구하였는데, 여기에서, $f(\theta)$ 는 pitch angle θ 에 대한 확률밀도함수이다.

또한, 부세 반사강도와 체장의 관계는

$$TS(dB) = M \log L + A \dots\dots\dots (4)$$

$$TS(dB) = 20 \log L + B \dots\dots\dots (5)$$

에 의해 구하였는데, 여기에서, L 은 fork length (cm)이고, A, B 는 어체의 체장 1 cm 당에 대한 반사강도 (dB), M 은 어종 고유의 상수, 즉 체장에 대한 의존성을 나타내는 파라미터이다.

2) KRM 산란모델에 의한 이론 반사강도 추정

음향산란모델에 의한 반사강도는 먼저 어체의 형태, 즉 어체를 구성하고 있는 척추골 및 부레(swim

bladder)의 위치 및 형태를 파악한 후 이를 계수화 하여 추정하였다.

특히, 반사강도는 부레에 의한 영향이 매우 크기 때문에 부레에 의한 반사강도를 추정하는 것으로부터 대상 어류에 대한 산란특성을 평가하고자 하였다.

보통, 부레의 형상과 크기는 어종, 체장, 유영수층 및 자세변화 등에 따라 매우 복잡한 형상을 나타내기 때문에 음향모델에서는 X-ray 촬영이나 해부를 통하여 획득한 3차원 형상을 토대로 부레 체적을 여러 개의 미소체적요소로 분할한 후, 각 체적요소의 산란성분의 합을 산출하여 어류의 반사강도를 예측하는 방법을 사용하였다.

본 연구에서는 Kirchhoff-Ray Mode model(이하 KRM model)을 이용하여 반사강도를 예측하였는데⁵⁾⁻⁷⁾, Fig. 3과 같이 부세의 X-ray 영상(sofran SRO-M50) 및 부레를 제거한 어체와 부레의 3차원 형상을 토대로 어체는 fluid-filled cylinder로서, 또한, 부레는 gas-filled cylinder로서 가정하여 이론 반사강도를 계산하였다¹⁰⁾⁻¹²⁾.

수치 계산은 먼저 부세가 음향학적으로 이들 두 cylinder로서 구성된 산란체라고 가정하고, 어체의 내부조직 및 부레를 각각 N_s 개의 미소체적요소로서 분할 한 후, 이들 각 체적요소로부터 음향산란성분의 합을 구하였다.

어체의 내부조직에 의한 음향산란성분 \mathcal{L}_{body} 는

$$|\mathcal{L}_{body}| = -j \frac{R_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^{N_s-1} [ka(i)]^{1/2} \cdot [e^{-j2kv_s(i)} - (1 - R_{wb}^2) \cdot e^{-j(-2kv_s(i) - 2k(v_s(i) - v_L(i) - \phi_s))}] \Delta u(i) \dots\dots\dots (6)$$

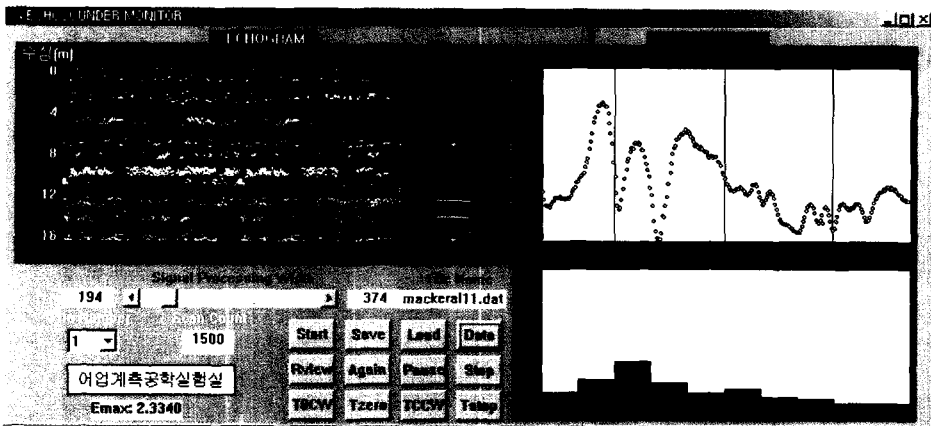


Fig. 2. Layout of data acquisition and processing program developed in this study.

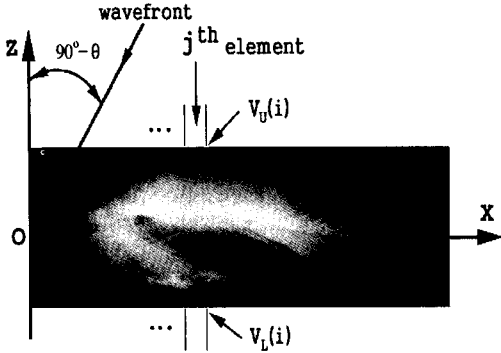


Fig. 3. Geometric construction of Kirchhoff-ray mode model for a large yellow croaker.

에 의해 구하였고, 부레에 의한 음향학적 산란성분 $\mathcal{L}_{bladder}$ 는

$$|\mathcal{L}_{bladder}| = -j \frac{R_{bc}(1 - R_{wb}^2)}{2\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{i=0}^{N_s-1} A_{sb} [(k_b a_s(i) + 1) - \sin \theta]^{1/2} e^{-j[2k_b v_u(i) + \phi_s]} \Delta u(i) \dots \dots \dots (7)$$

에 의해 구하였다. 또한, 어류의 음향반사강도 $TS(dB)$ 은

$$TS = 10 \log_{10} |\mathcal{L}_{body} + \mathcal{L}_{bladder}|^2 \dots \dots \dots (8)$$

에 의해 구하였다.

식 (6)~(8)에서 j 는 복소수의 허수이고, R_{wb} 는 어체의 내부조직과 주위매질의 경계면에 대한 반사계수로서, 그 내부조직에 대한 음속과 밀도를 각각 c_b , ρ_b 물에 대한 음속과 밀도를 c_w , ρ_w 라 하면,

$$R_{wb} = \frac{\rho_b c_b - \rho_w c_w}{\rho_b c_b + \rho_w c_w} \dots \dots \dots (9)$$

이 된다. R_{bc} 는 부레와 내부조직 사이의 경계면에 대한 반사계수로서, 부레에 대한 음속과 밀도를 각각 c_c , ρ_c 라 하면,

$$R_{bc} = \frac{g'h' - 1}{g'h' + 1} \dots \dots \dots (10)$$

이 되고, 여기서, g' 와 h' 는

$$g' = \frac{\rho_c}{\rho_b}, \quad h' = \frac{c_c}{c_b} \dots \dots \dots (11)$$

이다. 또한, 이들 식에서 k , k_b 는 각각 물과 어체의 내부조직에 대한 파수로서, 측정주파수를 f 라 할 때, 각각

$$k = \frac{2\pi f}{c_w}, \quad k_b = \frac{2\pi f}{c_b} \dots \dots \dots (12)$$

이 되고, $a(i)$ 는 어체를 형상화한 fluid filled cylinder의 i 번째 체적요소의 반경, $a_s(i)$ 는 부레를 형상화한 gas filled cylinder의 i 번째 체적요소의 반경이다.

한편, A_{sb} , ϕ_p , ϕ_b 는 각각

$$A_{sb} = \frac{k a_s(i)}{k a_s(i) + 0.083} \dots \dots \dots (13)$$

$$\phi_p = \frac{k a_s(i)}{[40 + k a_s(i)]} - 1.05 \dots \dots \dots (14)$$

$$\phi_b = \frac{\pi k_b v_u(i)}{2[k_b v_u(i) + 0.4]} \dots \dots \dots (15)$$

와 같이 주어지는 실험적인 파라미터로서, 여기서, $v_u(i)$, $v_L(i)$ 는 각각 부레나 어체조직의 i 번째 체적요소에 대한 상부표면과 하부표면의 위치좌표, Δu_i 는 부레나 어체조직의 i 번째와 $i+1$ 번째 체적요소 사이의 간격, θ 는 tilt angle이다.

결과 및 고찰

1. 반사강도의 체장 의존성

대형실험수조에서 13마리의 부세를 대상으로 tilt angle $\pm 45^\circ$ 범위에 대하여 0.4° 간격으로 반사강도 패턴을 구하여 함께 중첩시켜 나타낸 결과는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 부세의 평균체장은 25.59 cm이며, 평균반사강도 패턴에 있어 최대반사강도는 tilt angle이 -13.35° 인 입사방향에서 출현하였고, 이때의 반사강도는 $-35.13 dB$ 이었다.

Fig. 4에서 총 13마리 부세에 대한 평균적인 반사강도 패턴을 살펴볼 때, 부세의 두부가 하방으로 향하는 $-10^\circ \sim -20^\circ$ 부근에서 강한 반사파가 수신되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 우리나라 주변수역에서 어획되는 부세의 평균적인 부레의 tilt angle이 약 16° 인 점을 고려할 때¹²⁾, 부레의 형상

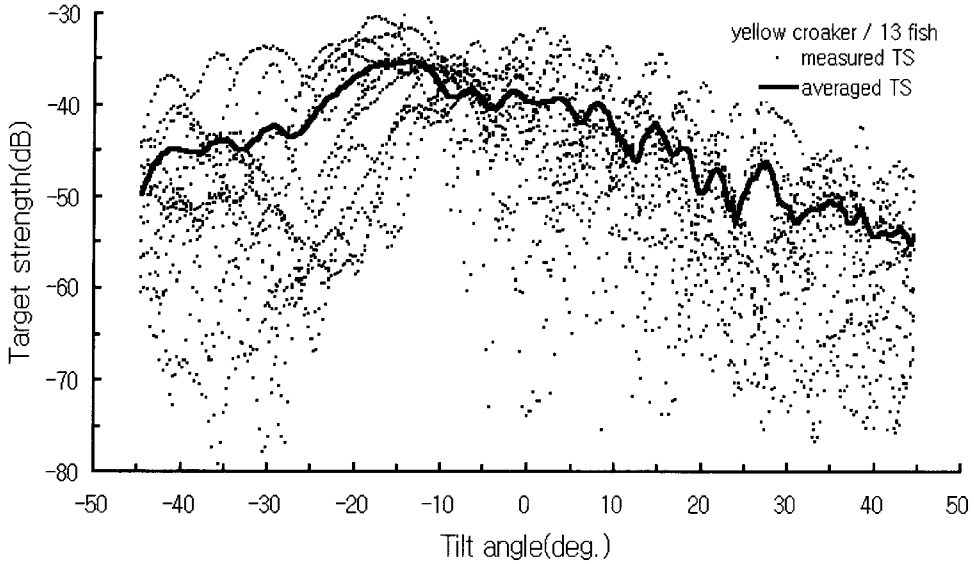


Fig. 4. Averaged target strength pattern for 13 large yellow croakers.

및 분포위치에 기인하는 영향이 크게 작용하고 있다고 판단된다. 또한, tilt angle에 따른 반사강도의 불규칙한 변동은 어체의 복잡한 형상과 내부조직의 각 부분부터 수신된 서로 다른 반사파가 합성되어, 이 합성파에 기인한 위상간섭으로 인하여 반사신호가 불규칙하게 변동하는 것으로 판단된다.

한편, 총 13마리 부세를 대상으로 측정한 각각의 어체에 대한 반사강도패턴에 유영자세각, 즉, tilt angle의 평균과 표준편차가 각각 $[-5^\circ, 15^\circ]$ 인 정규분포를 가정하여 각각의 어체에 대한 평균반사강도를 추정하였는데, 반사강도와 체장과의 관계를 나타낸 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 ○은 반사강도의 측정치이고, 가는 실선과 굵은 실선은 측정치에 대한 회귀직선이고, 굵은 실선은 반사강도가 체장의 2승에 비례한다는 가정하에서 구한 회귀직선이다. Fig. 5에서 각각의 회귀직선은

$$TS = 23.76 \log(L) - 73.45 (r = 0.47) \dots\dots\dots (16)$$

$$TS = 20 \log(L) - 67.35 \dots\dots\dots (17)$$

이었고, 여기서, L 은 체장(fork length, cm)이다.

Fig. 5에서 회귀직선의 기울기 M 과, 체장변환계

수 A 는 각각 $M=23.76$, $A=-73.45 \text{ dB}$ 이며, 부세의 반사강도를 체장의 2승에 근사시킨 경우의 체장변환계수 B 는 $B=-67.35 \text{ dB}$ 이었다. 이 결과로부터 부세의 반사강도는 체장의 2.376승에 비례하는 경향을 나타내었고, 이 경우에 대한 체장변환계수는 체장의 2승에 근사시킨 체장변환계수보다 6.1 dB 더 낮았다. 이 B 값은 추후 체장어군탐지기의 체장변환계수의 값으로서 활용될 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 tilt angle의 변화에 따른 반사강도 값의 범위는 $-30 \text{ dB} \sim -80 \text{ dB}$ 에 걸쳐 매우 불규칙하게 변동하였다. 여기서는 모든 어류에 대해 구한 $\pm 45^\circ$ 의 tilt angle의 변화에 따른 반사강도의 빈도분포로부터 평균반사강도를 산출한 후, 이 평균반사강도가 평균체장의 2승에 비례한다는 가정 하에서 체장변환계수를 구하였는데, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 13마리의 부세에 대하여 측정한 총 3135개의 반사강도의 평균치는 -41.23 dB 이었고, 이들 데이터에 의한 체장변환계수는 -69.72 dB 이었다. 이 값은 어체의 유영자세가 $[-5^\circ, 15^\circ]$ 인 정규분포에 따른다는 가정하에서 산출한 부세의 체장변환계수보다 3.73 dB 더 높았다.

부세에 대한 음향반사강도의 체장 의존성

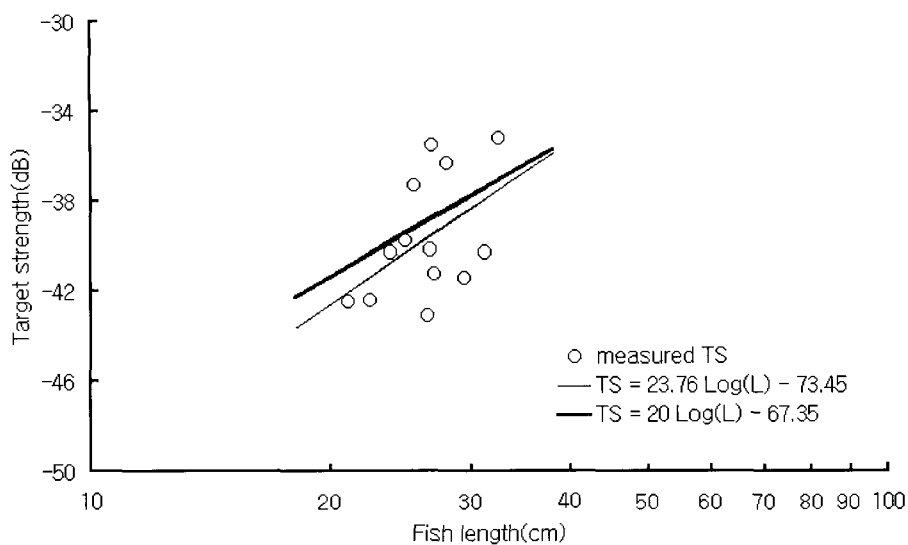


Fig. 5. Relationship between target strength and fork length of large yellow croaker.

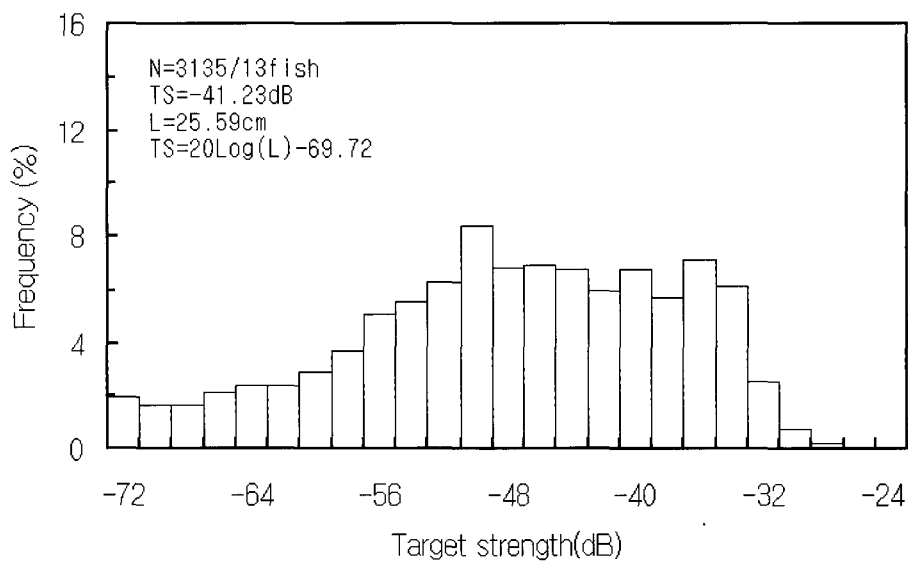


Fig. 6. Target strength frequency histogram for 13 large yellow croakers.

2. KRM model에 의한 이론 반사강도와 측정 반사강도의 비교

KRM model에 의한 부세의 이론 반사강도는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 부레의 tilt angle 및 L/λ (L : 체장, λ : 파장) 비와 음향반사강도의 관계를 살펴보면, 어류의 자세가 변화함에 따라 부레가 경사지면, 초음파의 입사방향에 대한 부레의 유효산란단면적이 변화하여 반사강도가 급격히 변동하는 경향을 나타내었다. 또한, L/λ 비가 작은 영역에서는 L/λ 의 변화에 따른 반사강도가 상대적으로 완만하게 증가하는 경향을 나타내었으나, L/λ 비가 커질수록, 즉 어류의 체장이나 주파수가 높아질수록 tilt angle의 변화에 따른 반사강도가 현저하게 낮아지는 현상이 나타났다. 이러한 현상은 주파수가 증가할수록 파장이 짧아져 부레의 각 부분으로부터 산란성분의 간섭효과에 대한 영향이 크게 나타나는 데 기인하는 것으로 판단

된다.

Fig. 7의 KRM model에 의한 반사강도 패턴에 유영자세의 통계적인 분포를 정규분포로서 가정하여 추정한 이론 반사강도와 측정치를 비교한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 실선은 어류의 tilt angle이 정규분포에 따른다는 가정 하에서 음향산란모델을 이용하여 계산한 평균반사강도이고, ○는 반사강도의 실측치이다.

Fig. 8에서 평균반사강도는 L/λ 비가 15보다 작은 영역에서는 파동상의 변화를 나타내면서 증가하는 경향을 나타내었고, 15보다 큰 영역에서는 매우 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 부세의 평균 반사강도의 측정치는 L/λ 비에 따른 변동이 상대적으로 크게 나타났고, KRM model에 의한 예측치보다 전반적으로 낮은 경향을 나타내었다. 따라서, 보다 정량적인 분석을 위해서는 더 광범위한 주파수 범위에 대한 실험이 필요하다고 판단된다.

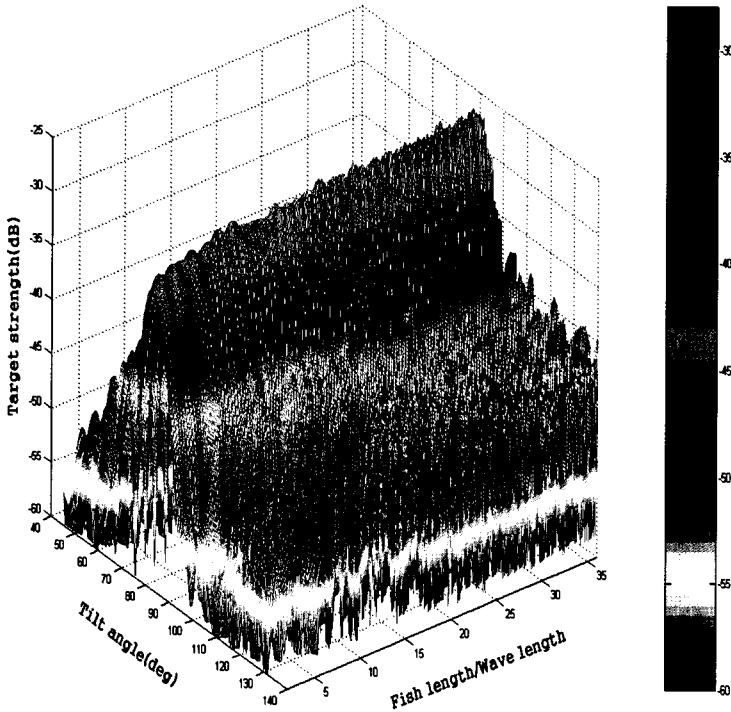


Fig. 7. Calculated target strength by KRM model of large yellow croaker plotted as a function of tilt angle and fish length/wave length (L/λ).

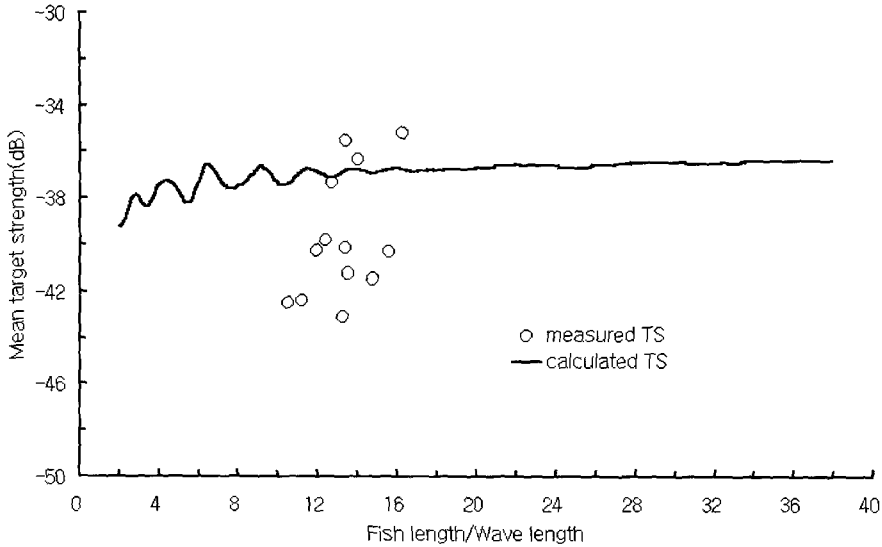


Fig. 8. Comparison of measured target strength with the target strength calculated by KRM model.

요 약

우리나라 주변해역에 서식하는 주요 어종의 체장 식별에 필요한 음향반사강도의 data bank를 구축하기 위한 연구의 일환으로 대형음향수조에서 부세의 체장에 따른 음향반사강도를 측정하고, 그 반사강도의 체장 의존성 및 KRM 산란모델에 의한 이론 반사강도와 측정치를 비교, 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 체장의 범위가 21.0~32.5 cm인, 총 13마리의 부세를 대상으로 구한 평균반사강도패턴에서 최대 반사강도는 tilt angle이 -13.35° 인 입사방향에서 나타났고, 이 때의 반사강도는 -35.13 dB 이었다.
2. 부세의 체장(fork length, cm)과 평균반사강도의 사이에는 다음의 회귀직선식이 성립하였다.

$$TS = 23.76 \log(L) - 73.45 \quad (r = 0.47)$$

$$TS = 20 \log(L) - 67.35$$

이 결과로부터 부세의 반사강도는 체장의 2.376승에 비례하는 경향을 나타내었고, 체장변환계수는 체장의 2승에 근사시켜 구한 값 보다 6.1 dB 더 낮게 나타났다. 이들의 결과는 향후 체장어군탐지기의 체장변환계수의 값으로서 활용될 것으로 판단된다.

3. 평균체장은 25.59 cm인 총 13마리의 부세에 대한 반사강도의 빈도분포로부터 구한 반사강도는 -41.23 dB이었고, 이 값으로부터 구한 체장변환계수는 -69.72 dB이었다.

4. KRM model에 의한 부세의 이론반사강도는 L/λ 비가 15보다 작은 영역에서는 파동상의 변화를 나타내면서 증가하는 경향을 나타내었고, 15보다 큰 영역에서는 매우 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다.

5. 부세의 평균반사강도의 측정치는 KRM 산란모델에 의한 예측치보다 전반적으로 낮은 경향을 나타내었고, 보다 정량적인 분석을 위해서는 광범위한 주파수 범위에 대한 실험이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 해양수산부(2003) : 총허용어획량(TAC)제도 기본계획 및 2003년도 시행계획, 해양수산부, 1-18.
2. 이대재(1999) : 漁業計測工學 理論과 實際, 태화출판사, 180-207.
3. 澤田浩一(2000) : 魚의ターゲット스트rength의高精度推定に關する研究, 水産工學研究所研究報告

- 15, 83-144.
4. Kang, Donhyug and Hwang, Doojin. (2002) : Ex situ target strength of Rockfish(*Sebastes schlegeli*) and Red seabream(*Pagrus major*) in the Northwest Pacific, ICES International Symposium on Acoustic in Fisheries and Aquatic Ecology, Paper No. 209, 452-472.
 5. Horne, J. K. and Jech, J. M. (1999) : Multi-frequency estimates of fish abundance: constraints of rather high frequency, ICES Journal of Marine Science, 56, 184-199.
 6. Jech, J. M., Schael, D. M., and Clay, C. S. (1995) : Application of three sound scattering models to threadfin shad (*Dorosoma Petense*), Journal of the Acoustic Society of America, 98(4), 2262-2269.
 7. Clay, C. S. and Horne, J. K. (1994) : Acoustic models of fish : The Atlantic cod (*Gadus morhua*), Journal of the Acoustic Society of America, 96, 1661-1668.
 8. 해양수산부 국립수산물진흥원(2000) : 생태와 어장, 166-175.
 9. Foote, K. G. (1980) : Averaging of fish target strength functions, Journal of the Acoustic Society of America, 67(2), 504-515.
 10. Clay, C. S. (1991) : Low-resolution acoustic scattering models: Fluid-filled cylinders and fish with swim bladders, Journal of the Acoustic Society of America, 89(5), 2168-2179.
 11. Clay, C. S. (1992) : Composite ray-mode approximations for backscattered sound from gas-filled cylinders and swimbladder. Journal of the Acoustic Society of America, 92(4), 2173-2180.
 12. 向井徹·佐野典達·飯田浩二·佐々木成二(1994) : 東シナ海で漁獲された魚の背方向ターゲットストレンスと鰾との關係, 日本水産學會 60(2), 215-222.

2003년 6월 27일 접수

2003년 6월 27일 수리