

KRM 모델을 이용한 전갱이의 다주파수 음향산란특성

황강석 · 윤은아^{1*} · 이경훈¹ · 이형빈 · 황두진¹

국립수산과학원 자원관리과, ¹전남대학교 해양기술학부

Multifrequency acoustic scattering characteristics of jack mackerel by KRM model

Kangseok HWANG, Eun-A YOON^{1*}, Kyoungsoon LEE¹, Hyungbeen LEE, Doo-Jin HWANG¹

Fisheries Resource Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

¹Division of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

This study was focused on acoustic scattering characteristics of jack mackerel (*Trachurus japonicus*) at frequency 38, 70, and 120 kHz by Kirchhoff-ray mode (KRM) model. The body length (BL) of 16 individuals ranged in 12.2~22.0 cm (mean±S.D.: 17.8±3.2 cm) and the swimbladder length ranged in 4.2~8.6 cm (mean±S.D.: 6.6±1.6 cm) and the swimbladder cross section ranged in 1.7~6.6 cm² (mean±S.D.: 3.8±1.6 cm²). This result shows that results correlate well between the BL and the length and cross section of swimbladder. The swimbladder angle ranged in 7~12° and the maximum TS values ranged in -16~-5° at tilt angle. The averaged TS-to-BL relationship were $TS_{38\text{kHz}}=20\log_{10}BL-65.33$ ($R^2=0.66$), $TS_{70\text{kHz}}=20\log_{10}BL-65.90$ ($R^2=0.67$), and $TS_{120\text{kHz}}=20\log_{10}BL-66.65$ ($R^2=0.65$). These results can be used fundamental data in order to estimate distribution and biomass of jack mackerel by using hydro-acoustic method.

Keywords: Jack mackerel, Target strength, Kirchhoff-ray mode model, Swimbladder

서론

전갱이 (Jack mackerel, *Trachurus japonicus*)는 농어목, 전갱이과에 속하는 어류로서 우리나라 전 연안에 서식하고, 상업적으로 중요한 어종이다 (Huh and Cha, 1998). 우리나라에서 전갱이는 대부분 대형선망 어업에서 어획되고, 전갱이류의 어업 생산량은 1970년대에 1만톤 미만으로 저조하였으나, 1980년대 이후 4만톤 정도로 증가하였다. 1995년에는 1만 2천톤으로 급감하는 어획 변동을 보였고, 2011년에는 4만톤으로 증가하다

2013년에는 1만 5천톤 정도로 감소하여 어획량의 변동이 크다. 전갱이는 우리나라 총허용어획량 (Total allowable catch, TAC) 어종 가운데 하나로서, 전갱이를 지속적으로 이용하기 위해서는 적절한 자원 관리와 현존량 평가가 필요하다.

음향 조사 방법은 현장에서 대상 생물의 체적후방산란강도 (Volume backscattering strength, SV)는 쉽게 취득할 수 있지만, 현존량으로 변환하기 위해서는 대상 어류의 명확한 초음파산란강도 (Target strength, TS) 자

*Corresponding author: euna7979@nate.com, Tel: 82-61-659-7126, Fax: 82-61-659-7129

료가 필요하다 (MacLennan and Simmonds, 1992). 또한, 우리나라에서는 한 어종이 우점하는게 아니라 다수 어종이 혼재하고 있기 때문에 대상 어류를 식별하기 위해서는 다중 주파수에 대한 대상 어류의 음향산란정보가 요구된다 (Lee et al., 2010).

일반적으로 어류의 TS값은 생물학적으로 사이즈, 유영자세각, 부레의 유무 및 형태와 물리학적으 사용주파수, 체내 음속, 체내 밀도 등에 따라 변화한다 (Mukai and Iida, 1996; Sawada et al., 2002). 어류의 TS를 파악하기 위한 방법 가운데 이론적인 방법인 음향 모델을 이용하는 것은 대상 생물의 생물학, 물리학적 요소를 모두 고려하여 TS를 계산할 수 있다 (Sawada, 2002). 또한, 음향산란이론 모델은 다수 어종에 대한 TS를 빠른 시간에 파악 할 수 있기 때문에 우리나라와 같이 다수 어종이 혼재하고 있는 해역에 서식하는 다수 어종의 TS값을 파악하는데 유용하게 이용할 수 있다 (Lee et al., 2010).

따라서, 본 연구에서는 음향산란이론 모델을 이용하여 우리나라의 상업 어종인 전갱이의 주파수별 자세각 및 체장 의존성에 따른 TS의 변동 특성에 대하여 분석하였다.

재료 및 방법

음향산란이론 모델

전갱이의 TS를 추정하기 위하여 Kirchhoff-ray mode (KRM) 모델 (Clay and Horne, 1994)을 이용하였다. KRM 모델은 어류의 부레와 체형을 실린더 혹은 원뿔 모양으로 근사하여 이들의 부피의 합으로 계산된다.

먼저, 부레에 의한 음향산란특성을 파악하기 위한 후방산란성분 L_{blad} 는

$$L_{blad} \approx -i \frac{R_{bc}(1-R_{wb}^2)}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N_b-1} A_{sb} \times [(k_y a(j)+1)\sin\theta]^{1/2} \times \exp[-i(2k_y v_j + \psi_{sb})] \Delta u(j) \quad (1)$$

으로 구할 수 있고, 체형에 의한 후방산란성분 L_{body} 는

$$L_{body} \approx -i \frac{R_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N_b-1} [ka(j)]^{1/2} \Delta u(j) \times [\exp(-i2kv_{uj} - (1-R_{wb}^2)) \times \exp\{-i2kv_{uj} + i2k_b(v_{uj} - v_{Lj}) + i\psi_b\}] \quad (2)$$

으로 구할 수 있다.

여기서, N_s 는 부레의 실린더 수, N_b 는 어체의 실린더 수, i 는 복소수의 허수, k 와 k_b 는 각각 해수와 체형에 대한 파수 ($\lambda/2\pi$)이다.

전체 어류에 대하여 계산된 부레와 체형의 후방산란성분을 합하여 아래 식 (3)과 같이 대상 어류의 후방산란성분 (L_{fish})를 나타낼 수 있다.

$$L_{fish} = L_{blad} + L_{body} \quad (3)$$

따라서, 어류의 TS는 다음 식 (4)으로 구할 수 있다.

$$TS = 20 \log |L_{fish}| \quad (4)$$

A_{sb} 는 ka 에 대한 진폭으로 식 (5), ψ_{sb} 는 ka 에 대한 위상 조정으로 식 (6), ψ_b 는 위상 계수로 식 (7)으로 표현할 수 있다.

$$A_{sb} \approx \frac{ka_j}{ka_j + 0.083} \quad (5)$$

$$\psi_{sb} \approx \frac{ka_j}{40 + ka_j} - 1.05 \quad (6)$$

$$\psi_b \approx \frac{\pi k_b z_u}{2[k_b z_u + 0.4]} \quad (7)$$

또한, R_{wb} 는 어류의 체형과 해수 사이의 경계면에 대한 반사계수로서, 식 (8)로 표현된다.

$$R_{wb} = \frac{\rho_b c_b - \rho_w c_w}{\rho_b c_b + \rho_w c_w} \quad (8)$$

여기서, ρ_b 는 어체의 밀도, c_b 는 어체의 음속, ρ_w 는 해수의 밀도, c_w 는 해수의 음속이다. R_{bc} 는 어류의 체형과 부레 사이의 경계면에 대한 반사계수이다 (식 9).

$$R_{bc} = \frac{gh - 1}{gh + 1} \quad (9)$$

밀도비 (g)와 음속비 (h)는 각각 식 (10), 식 (11)으로 나타낼 수 있다.

$$g = \frac{\rho_c}{\rho_b} \quad (10)$$

$$h = \frac{c_c}{c_b} \quad (11)$$

여기서, ρ_c 는 부레의 밀도, c_c 는 부레의 밀도이다.

KRM 모델을 이용한 전갱이의 TS는 음향자원 조사에서 주로 사용한 38, 120 kHz 주요 주파수와 최근 관심도가 높아지는 70 kHz 대역의 3주파수를 대상으로 자세각을 $-90\sim 90^\circ$ 까지 1° 간격으로 계산하였다. 또한, TS는 최대값과 평균값을 평가하였으며, 평균값은 다음 식 (12)와 (13)에 나타난 바와 같이 일반적인 어류의 평균 자세각과 표준편차를 각각 -5° , 15° 로 가정하여 확률밀도함수 (Probability density function, PDF)로 구하고, 1° 마다 계산된 각 자세각의 TS는 산란단면적으로 바꾸어 자세각 $-5\pm 15^\circ$ 의 확률밀도함수와 각각을 곱한 후 그 합으로 평균 TS를 계산하였다.

$$\sigma_{bs} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma(\theta)f(\theta)d\theta \quad (12)$$

$$TS_{avg} = 10\log_{10}\sigma_{avg} \quad (13)$$

여기서, $\sigma(\theta)$ 는 각 유영 자세각별 θ 에서 후방산란단면적, $f(\theta)$ 는 각 유영 자세각별의 출현빈도를 말한다.

또한, 전갱이의 어체 크기에 따른 TS 관계식은 다음 식 (14)와 식 (15)로 표현할 수 있다. 식 (15)는 반사강도가 체장의 2승에 비례한다고 가정한 식을 나타낸다.

$$TS = a\log_{10}BL + b \quad (14)$$

$$TS = 20\log_{10}BL + TS_{cm} \quad (15)$$

여기서, a 는 기울기, b 는 절편, BL 은 체장을 말한다.

전갱이의 체형 묘사

KRM 모델에 사용된 전갱이가 자연 상태와 유사하게 부레의 형상을 유지하도록 드라이아이스와 알코올을 이용하여 급속 냉동을 시킨 후 실험실로 운반하였다. 음향산란모델을 수행하기 위해서는 어류의 체형과 부레가 필요하기 때문에 급속 냉동시킨 어류의 측면과 배면을 Fig. 1과 같이 X-ray 촬영을 하였다. 촬영된 X-ray

사진은 디지털라이징 소프트웨어를 이용하여 어류의 측면과 배면 방향의 몸체와 부레를 0.2 mm간격의 슬라이드로 나누어 체형 좌표를 묘사하였다. Table 1은 KRM 모델에 사용된 16 개체 전갱이의 체장과 가랑이 체장을 나타낸 것이다. Table 1에 나타난 바와 같이 전갱이의 체장은 12.2~22.0 cm (mean±S.D.: 17.8±3.2 cm)이었고, 가랑이 체장은 12.9~22.8 cm (mean±S.D.: 18.5±3.3 cm)이었다. 또한, 전갱이 부레의 기울기, 길이, 높이, 폭은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 측정하였다.

Table 1. Summary of body length and fork length of jack mackerel 16 individuals in this study

Number	Body length (cm)	Fork length (cm)
1	13.0	13.4
2	12.2	12.9
3	13.8	14.5
4	13.6	14.5
5	14.3	15.0
6	16.8	17.3
7	20.0	20.5
8	19.2	20.3
9	21.0	22.3
10	20.8	21.5
11	21.0	21.6
12	18.6	19.3
13	20.6	21.3
14	22.0	22.8
15	19.2	19.8
16	18.2	19.0

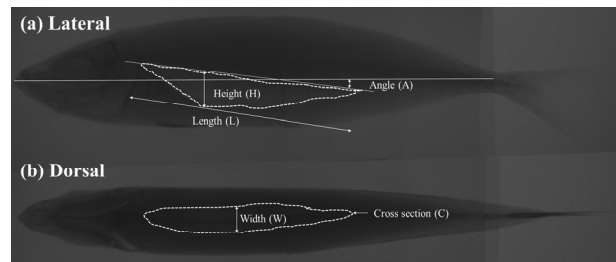


Fig. 1. X-ray image of jack mackerel *Trachurus japonicus*.

(a) and (b) was lateral aspect and dorsal aspect, respectively. The dashed white line was swimbladder shape. The swimbladder angle (A) was indicated the tilt angle of swimbladder, centerline between anterior and posterior margins according to the fish body. The swimbladder length (L) was indicated distance between anterior margin and posterior margin of swimbladder. The swimbladder height (H) was indicated maximum thickness of swimbladder in the lateral aspect. The swimbladder width (W) was indicated maximum thickness of swimbladder in the dorsal aspect. The swimbladder cross section (C) was area of swimbladder in the dorsal aspect.

음향산란이론 모델에 적용한 파라미터

KRM 모델로 TS를 계산하기 위해서는 대상 어류에 대한 몸체의 음속, 밀도, 부레의 음속, 밀도 및 해수의 음속, 밀도의 파라미터가 필요하다. 본 연구에서는 Clay and Horne (1994)의 연구 결과를 인용하여 어체의 음속은 1,570 m/s, 밀도는 1,070 kg/m³, 부레의 음속은 345 m/s, 밀도는 1.24 kg/m³, 해수의 음속은 1,490 m/s, 밀도는 1,030 kg/m³을 음향 모델에 사용하였다 (Table 2).

Table 2. Summary of parameter need to calculate TS using a KRM model

Item	sound speed (m/s)	density (kg/m ³)
Body	1,570	1,070
Swimbladder	345	1.24
Sea water	1,490	1,030

결 과

전갱이의 체형과 부레와의 관계

X-ray로 취득한 16 개체의 전갱이 어체의 체형과 부레 형상과의 관계를 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 나타내었다.

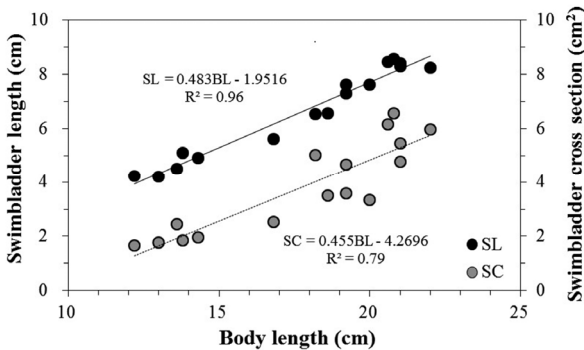


Fig. 2. Relationship between body length and length and cross section of swimbladder.

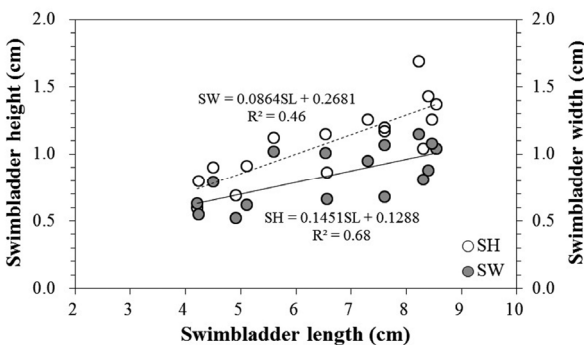


Fig. 3. Relationship between length and height and width of swimbladder.

Fig. 2는 전갱이의 체장과 부레의 길이 관계를 나타낸 것으로 체장이 12.2~22.0 cm (mean±S.D.: 17.8±3.2 cm) 일 때 부레의 길이는 4.2~8.6 cm (mean±S.D.: 6.6±1.6 cm), 부레의 단면적은 1.7~6.6 cm² (mean±S.D.: 3.8±1.6 cm²)으로 체장이 커질수록 부레의 길이와 단면적도 커지며, 체장에 대한 부레의 길이비 (SL/BL)는 0.32~0.41 (mean±S.D.: 0.37±0.03), 체장에 대한 부레의 단면적비는 (BC/BL)는 0.13~0.32 (mean±S.D.: 0.21±0.06)으로 계산되었다. 또한, 부레의 높이는 0.60~1.69 cm (mean±S.D.: 1.09±0.28 cm), 부레의 폭은 0.52~1.15 cm (mean±S.D.: 0.84±0.20 cm)로 부레의 형태는 폭 보다 높이가 더 높은 특징을 보였고, 부레의 길이가 증가하면 부레의 높이와 폭이 증가하는 경향을 나타내었다 (Fig. 3).

자세각 변화에 따른 전갱이의 TS

Fig. 4는 KRM 모델을 이용하여 주파수 38, 70, 120 kHz에 대한 전갱이의 자세각과 TS 변화 관계를 나타낸 것이다. 여기서, 자세각 0°는 전갱이가 수평인 상태, -는 전갱이의 머리가 아래로 향하는 상태 (Head-down), +는 전갱이의 머리가 위로 향하는 상태 (Head-up)를 나타낸다.

Fig. 4(a)는 체장 12.2 cm, 부레의 기울기가 8°인 전갱이의 TS를 나타낸 것이고, 최대 TS는 38 kHz의 경우 자세각 -7°에서 -44.3dB, 70 kHz의 경우 자세각 -7°에서 -40.4 dB, 120 kHz의 경우 자세각 -8°에서 -39.2 dB으로 나타났다. Fig. 4(b)는 체장 22.0 cm, 부레의 기울기가 8°인 전갱이의 TS를 나타낸 것이고, 최대 TS는 38 kHz의 경우 자세각 -7°에서 -33.4 dB, 70 kHz의 경우 자세각 -7°에서 -32.9 dB, 120 kHz의 경우 자세각 -8°에서 -33.8 dB으로 나타났다.

16개체 전갱이의 부레 기울기의 범위는 7~12°이었고, 최대 TS는 38 kHz의 경우 자세각 -15~5°에서 -44.3~32.0 dB, 70 kHz의 경우 자세각 -11~7°에서 -41.5~32.0 dB, 120 kHz의 경우 자세각 -16~7°에서 -40.4~31.0 dB으로 자세각이 Head-down일 때 가장 높은 값을 나타내었다 (Fig. 5).

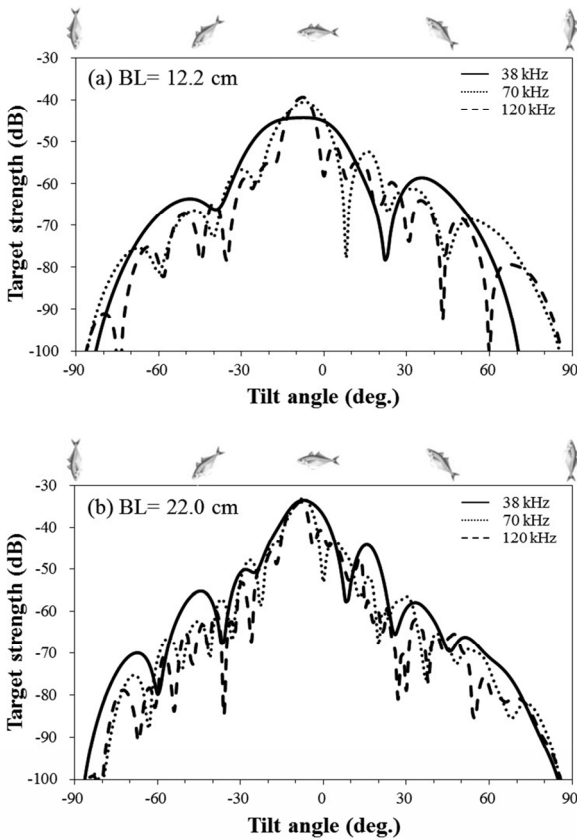


Fig. 4. Estimated target strength pattern according to tilt angle of jack mackerel calculated by KRM model.

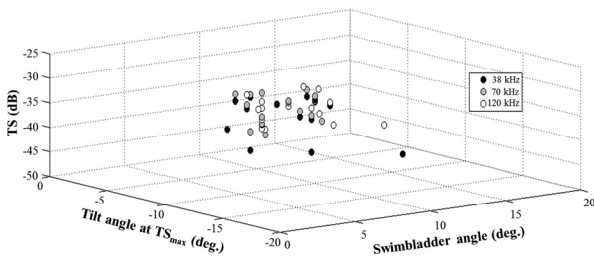


Fig. 5. Target strength relative to tilt angle at maximum TS and swimbladder angle.

어체 크기 변화에 따른 전갱이의 TS

주파수 38, 70, 120 kHz에 대한 전갱이의 어체 크기와 TS와의 관계를 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. 최대 TS는 자세각 -90~90°사이에서 가장 높은 값을 말하고, 평균 TS는 자세각 -5±15°를 확률밀도함수로 계산한 값이다. 최대 TS는 38 kHz에서 -44.3~32.0 dB, 70 kHz에서 -41.5~32.0 dB, 120 kHz에서 -40.4~31.0 dB이었고 (Fig. 6(a)), 평균 TS는 38 kHz에서 -46.5~36.9 dB,

70 kHz에서 -45.7~38.2 dB, 120 kHz에서 -45.9~38.9 dB (Fig. 6(b))으로 나타났다.

전갱이의 어체 크기와 최대 TS의 회귀선은 38 kHz에서 $TS=41.14\log_{10}BL-87.63$ ($R^2=0.82$), 70 kHz에서 $TS=31.44\log_{10}BL-74.27$ ($R^2=0.77$), 120 kHz에서 $TS=25.98\log_{10}BL-67.17$ ($R^2=0.64$)으로 나타낼 수 있고, 평균 TS의 회귀선은 38 kHz에서 $TS=30.54\log_{10}BL-78.42$ ($R^2=0.74$), 70 kHz에서 $TS=21.67\log_{10}BL-67.97$ ($R^2=0.67$), 120 kHz에서 $TS=21.46\log_{10}BL-68.46$ ($R^2=0.64$)으로 표현할 수 있다. 뿐만 아니라, 각 주파수별 TS를 체장의 2승에 비례한다는 가정하에 계산한 기준화 최대 TS (TS_{cm})가 38 kHz에서 -61.38 dB ($R^2=0.61$), 70 kHz에서 -60.07 dB ($R^2=0.67$), 120 kHz에서 -59.75 dB ($R^2=0.60$)로 계산되었고, 38 kHz에서 가장 낮은 값을 보이며, 고주파로 갈수록 높아지는 것을 알 수 있었다. 유영자세각 $-5\pm 15^\circ$ 을 고려하여 확률밀도함수로 구한 기준화 평균 TS (TS_{cm})를 38 kHz에서 -65.33 dB ($R^2=0.66$), 70 kHz에서 -65.90 dB ($R^2=0.67$), 120 kHz는 -66.65 dB ($R^2=0.65$)으로 $TS_{38-70kHz}=0.57$ dB, $TS_{38-120kHz}=1.32$ dB으로 주파수 차이가 크지 않았다.

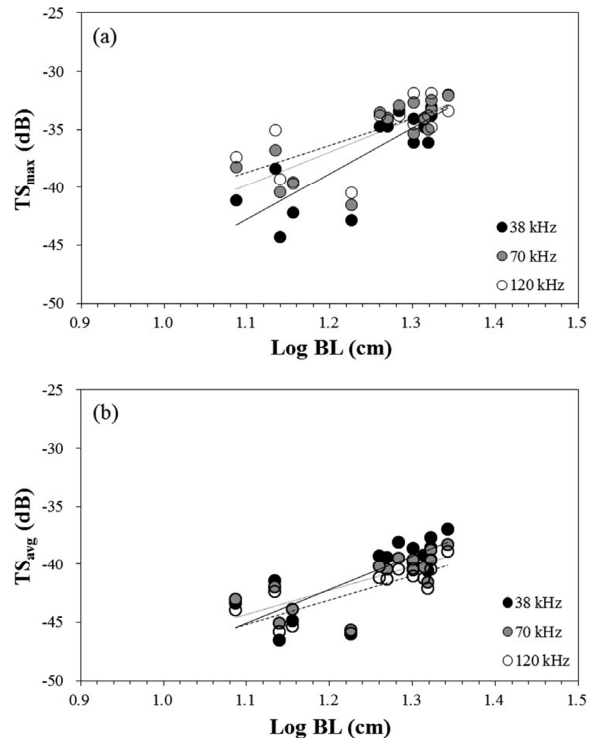


Fig. 6. Relationship between maximum TS (a) and averaged TS (b) based on log body length of jack mackerel at frequency 38, 70, and 120 kHz.

Table 3. Summary of linear regression of TS verse body length of jack mackerel at frequency 38, 70, and 120 kHz

Target strength	Frequency (kHz)	TS= $\log_{10}BL+b$			Normalized TS _{cm} (dB)
		a	b	R ²	
TS _{max}	38	41.14	-87.63	0.82	-61.38
	70	31.44	-74.27	0.77	-60.07
	120	25.98	-67.17	0.64	-59.75
TS _{avg}	38	30.54	-78.42	0.74	-65.33
	70	21.67	-67.97	0.67	-65.90
	120	21.46	-68.46	0.64	-66.65

고 찰

전갱이 부레의 특징

일반적으로 부레를 가지고 있는 어류의 TS는 약 90~95%가 부레의 영향이 크므로 부레의 특징을 파악하는 것이 중요하다 (Foote, 1980). 본 연구에서는 체장 12.2~22.0 cm인 전갱이 16개체에 대해 X-ray 촬영을 하여 부레의 형상을 파악하였다. 체장과 부레의 길이 관계식은 $SL=0.483BL-1.9516$ 으로 체장이 커질수록 부레의 길이가 증가하였고, 체장에 대한 부레 길이의 비 (SL/BL)는 0.32~0.41이었으며, 부레의 폭 보다는 높이가 더 큰 형태를 보였다. Nakamura et al. (2013)는 체장이 7.5~12.9 cm인 소형 전갱이의 부레의 특징을 파악한 결과 체장과 부레의 길이 관계식은 $SL=0.45BL-0.77$ 로 나타났고, 체장에 대한 부레 길이의 비 (SL/BL)는 0.34~0.40으로 본 연구 결과와 유사한 결과를 나타내었다. Lee et al. (2010)은 다수 어종에 대한 부레의 특징을 파악하였고, 어종마다 부레의 형태학적 특징이 다르게 나타났기 때문에 부레가 있는 어종의 TS를 계산할 때는 먼저, 부레의 특징을 파악하는게 필요할 것으로 판단된다.

자세각에 따른 TS의 영향

본 연구에서 사용된 전갱이 부레의 기울기는 7~12° 사이이었고, 최대 TS는 38 kHz에서 자세각 -15~-5°, 70 kHz에서 자세각 -11~-7°, 120 kHz에서 자세각 -16~-7°에서 나타나, 부레가 수평일 때 TS가 높게 나타났다. Kurnia et al. (2012)는 체장 10.8~14.6 cm 전갱이의 부레의 기울기를 X-ray 촬영으로 확인하였고, 그 결과 4.5~12.5°로 측정되어 본 연구의 결과와 거의 유사한

값을 나타내었다. 하지만, 현수법과 prolate spheroid model (PSM)로 주파수 50 kHz에 대한 전갱이의 3D TS를 계측하였고, 자세각 0°에서 최대 TS값을 나타내었다. 이것은 어류의 자세각을 0, 30, 60, 90°로 변화시키고 TS를 진동자가 어류의 등방향을 향하여 각도를 변화시키면서 측정된 것이 아니라 어류의 측면 방향으로 360°회전하면서 계측하였기 때문이다. Nakamura et al. (2013)는 PSM을 이용하여 주파수 18, 38, 50, 70, 120, 200 kHz에 대한 전갱이의 TS를 평가하였고, 위 모든 주파수에서 자세각 0°부근에서 최대 TS를 나타내었다. 대부분 부레를 가지는 어류는 부레가 기울어져 있는 특징을 가지고, 최대 TS는 부레의 기울기가 수평이 될 때 나타나므로 부레의 기울기를 파악하는 것도 중요하다. 뿐만 아니라, 본 연구에서는 전갱이의 평균 TS를 일반적인 어류의 자세각 (-5±15°)을 확률밀도함수로 계산하였다. Nakamura et al. (2013)는 전갱이를 입 주변에 낚시줄을 이용하여 현수한 상태에서 움직이는 유영자세각을 관측한 결과 평균값은 -4.3°이고, 표준편차는 19.0°로 나타나 전갱이의 유영자세각도 일반적인 어류와 비슷한 유영자세각을 가지는 것을 알 수 있었다. Chilean jack mackerel (*Trachurus symmetricus murphyi*)는 현장에서 평균 1°로 유영하는 것을 확인하였다 (O'Driscoll et al., 2013). Nakamura et al. (2013)의 연구는 어류의 일부분을 낚시줄을 이용하여 현수하였기 때문에 완벽히 자유유영 상태의 유영자세각의 결과라고 보기 어렵기 때문에 외부의 제약 없이 자유롭게 움직이는 전갱이의 유영자세각을 관측할 필요가 있을 것으로 사료된다.

어체 크기에 따른 TS의 영향

본 연구에서는 주파수 38, 70, 120 kHz에서 모두 전갱이의 어체 크기가 커짐에 따라 최대 TS와 평균 TS도 높아지는 경향을 나타내었다. 본 연구와 동일 어종 전갱이의 어체 크기에 따른 TS의 연구 결과는 Lee (2005), Kurnia et al. (2012), Nakamura et al. (2013)에 의해 보고되었다. Lee (2005)는 주파수 75 kHz를 이용하여 죽은 개체 27 마리 (체장: 16.8~34.3 cm)의 TS를 측정된 결과 사이즈와 TS와의 관계식은 $TS=20\log L-69.72$ 로 나타났다. Kurnia et al. (2012)는 주파수 50 kHz를 이용하여 죽은 개체 8마리 (체장: 10.7~14.6 cm)의 측면 TS를 측정된 결과 평균 $TS=27.4\log BL-79.0$ 으

로 측면 TS 역시 어체 크기가 증가하면 TS도 증가하는 것을 알 수 있었다. Nakamura et al. (2013)은 PSM으로 주파수 18, 38, 50, 70, 120, 200 kHz에 대한 전갱이 사이즈 (체장: 7.5~12.9 cm)와 TS와의 관계를 기준화 TS_{cm}로 계산하였고, 그 결과 평균 TS_{cm}는 18 kHz에서 -68.7 dB, 38 kHz에서 -68.7 dB, 50 kHz에서 -69.0 dB, 70 kHz에서 -69.4 dB, 120 kHz에서 -69.6 dB, 200 kHz에서 -69.9 dB로 나타났다. 본 연구의 기준화 평균 TS_{cm}는 38 kHz에서 -65.33 dB, 70 kHz에서 -65.90 dB, 120 kHz는 -66.65 dB으로 본 연구 결과와 2.9~3.5 dB 차이가 나타났다. 뿐만 아니라, 본 연구에서 TS_{cm}가 주파수가 높아질수록 낮아지는 경향을 보였고, 주파수 차이가 크지 않는 것으로 나타났으며, Nakamura et al. (2013) 연구 결과 역시 전갱이의 TS_{cm}는 고주파보다 저주파에서 높게 나타나기는 하나, 그 차이는 미미한 것을 알 수 있었다. 또한, Lillo et al. (1996), Peña (2008), O'Driscoll et al. (2013)는 전갱이와 유사종인 Chilean jack mackerel (*Trachurus symmetricus murphyi*)의 TS의 연구 결과를 보고하였다. Lillo et al. (1996)는 주파수 38 kHz를 사용하여 *in situ*에서 사이즈-TS 함수 회귀선은 TS=20logL-68.91로 나타났다. Peña (2008)도 주파수 38 kHz를 사용하여 *in situ*에서 target tracking을 통하여 평균 TS를 파악하였고, b₂₀는 -68 dB로 본 연구 샘플종과 유사한 값을 나타내었다. 또한, *in situ*에서 주파수 38 kHz를 이용하여 계측한 Chilean jack mackerel의 사이즈와 TS 관계식은 TS=11.28log₁₀FL-49.0으로 나타났다.

본 연구에서는 음향모델을 이용하여 전갱이의 자세각과 어체 크기에 따른 TS를 파악하였다. 이러한 결과를 검증하고 자원량 추정에 대한 정량적인 요소를 확립하기 위해서는 추가적으로 직접적인 방법인 현수법 (*ex situ*)과 자유유영상태 (*in situ*)에 대한 TS 변동값을 파악할 필요가 있는 것으로 판단된다.

결론

KRM 모델을 이용하여 주파수 38, 70, 120 kHz에 대한 전갱이의 음향산란특성을 파악하였다. 모델에 사용된 전갱이의 체장은 12.2~22.0 cm (mean±S.D.: 17.8±3.2 cm), 부레의 길이는 4.2~8.6 cm (mean±S.D.: 6.6±1.6 cm), 부레의 단면적은 1.7~6.6 cm² (mean±S.D.: 3.8±1.6

cm²)으로 체장이 커질수록 부레의 길이와 단면적도 커졌다. 부레의 기울기는 7~12°이었고, 전갱이의 TS값은 자세각 -16~5°에서 최대값으로 나타났으며, 부레가 수평일 때 최대 TS값을 나타내었다. 또한, 어체 크기와 평균 TS의 관계식은 38 kHz에서 20log₁₀BL-65.33 (R²=0.66), 70 kHz에서 20log₁₀BL-65.90 (R²=0.67), 120 kHz에서 20log₁₀BL-66.65 (R²=0.65)으로 주파수 차이가 크게 나타나지 않았다. 본 연구 결과는 음향조사기법을 이용하여 우리나라 주변 해역에 회유하는 전갱이 어족자원의 분포 밀도 및 현존량을 파악하는 기초 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 국립수산물과학원 수산시험연구사업 (R2015052)의 지원에 의해 수행되었으며, 현장 조사 수행에 도움을 준 전남대학교 수산과학과 대학원생 여러분과 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Clay CS and Home JK. 1994. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*). J Acoust Soc Am 96, 1661-1668. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.410245>)
- Foote KG. 1980. Averaging of fish target strength function. J Acoust Soc Am 80, 612-621. (doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.383915>)
- Huh SH and Cha BY. 1998. Feeding habits of jack mackerel, *Trachurus japonicus*, collected from the Nakdong river estuary. Bull Korean Soc Fish Tech 34, 320-327.
- Kurnia M, Iida K and Mukai T. 2012. Characteristics of three-dimensional target strength of swim bladdered fish. J Marine Acoust Soc 39, 93-102.
- Lee DJ. 2005. Fish length dependence of acoustic target strength for 12 dominant fish species caught in the Korean waters at 75 kHz. J Kor Soc Fish Tech 41, 296-305. (doi: 10.3796/KSFT.2005.41.4.296)
- Lee SJ, Lee YW, Kim JI, Oh TY, Hwang BK, Kim BY and Lee KH. 2010. Target strength estimation of dominant species in marine ranching ground of Jeju coastal water by KRM model. J Kor Soc Fish 46, 157-163. (doi: 10.3796/KSFT.2010.46.2.157)
- Lillo S, Cordova J and Paillaman A. 1996. Target-strength measurements of hake and jack mackerel. ICES J Mar Sci 53, 267-271. (doi: 10.1006/jmsc.1996.0033)
- MacLennan DN and Simmonds EJ. 1992. Fisheries acoustics.

- Chapman and Hall, London. 325 pp.
- Mukai T and Iida K. 1996. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. ICES J Mar Sci 53, 245-248. (doi: 10.1006/jmsc.1996.0029)
- Nakamura T, Hamano A, Abe K, Yasuma H and Miyashita K. 2013. Acoustic scattering properties of juvenile jack mackerel *Trachurus japonicus* based on a scattering model and *ex situ* target strength measurements. Nippon Suisan Gakkaishi 79, 345-354. (doi: <http://doi.org/10.2331/suisan.79.345>)
- O'Driscoll RL, Oeffner J, Ross O, Dunford AJ and McMillan PJ. 2013. Pilot acoustic survey for jack mackerel on the west coast New Zealand (JMA7). New Zealand Fisheries Assessment Report 2013/1, 1-53.
- Peña H. 2008. *In situ* target-strength measurements of Chilean jack mackerel (*Trachurus symmetricus murphyi*) collected with a scientific echosounder installed on a fishing vessel. ICES J Mar Sci 65, 594-604. (doi: 10.1093/icesjms/fsn043)
- Sawada K. 2002. Study on the precise estimation of the target strength of fish. Bull Fish Res Agen 11, 47-122.
- Sawada K, Takao Y, Miyahana Y and Kinacigil HT. 2002. Introduction of the precise TS measurement for fisheries acoustics. Turk J Vet Anim Sci 26, 209-214.
-
2015. 8.03 Received
2015. 8.21 Revised
2015. 8.22 Accepted