pISSN 2671-9940
eISSN 2671-9924
J Korean Soc Fish Ocean Technol, 60(2), 142-151, 2024
https://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.2.142

KSFOT FISHERIES OCEAN TECHNOLOGY
www.fishtech.or.kr
〈Original Article〉

중심 주파수 200 kHz의 과학어군탐지기를 활용한 전갱이의 광대역 주파수 특성

강명희 · 김한수[1] · 강동하[2] · 정지훈[2] · Fredrich Simanungkalit[2] · 강돈혁[3]*
경상국립대학교 해양경찰시스템학과/해양산업연구소 교수, [1]한국해양과학기술원 해양영토 · 방위연구부 선임연구원,
[2]경상국립대학교 대학원 해양경찰시스템학과 학생, [3]한국해양과학기술원 해양영토 · 방위연구부 책임연구원

Ex situ combined *in situ* target strength of Japanese horse mackerel using a broadband echosounder

Myounghee Kang, Hansoo Kim[1], Dongha Kang[2], Jihoon Jung[2], Fredrich Simanungkalit[2] and Donhyug Kang[3]*

Professor, Department of Maritime Police and Production System/Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

[1]Senior Research Scientist, Marine Domain and Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

[2]Student, Department of Maritime Police and Production System, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

[3]Principal Research Scientist, Marine Domain and Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

Recently, domestic fishing production of Japanese horse mackerel has been continuously decreasing. To achieve sustainable fishing of this species, it is essential to acquire its target strength (TS) for accurate biomass estimation and to study its ecological characteristics. To date, there has been no TS research using a broadband echosounder targeting Japanese horse mackerel. In this study, for the first time, we synchronized an underwater camera with a broadband frequency (nominal center frequency of 200 kHz, range: 160-260 kHz) to measure the TS according to the body size (16.8-35.5 cm) and swimming angle of the species. The relationship between Japanese horse mackerel length and body weight showed a general tendency for body weight to increase as length increased. The pattern of the frequency spectra (average values) by body length exhibited a similar trend regardless of body length, with no significant fluctuations in frequency observed. The lowest TS value was observed at 243 kHz while the highest TS values were recorded at 180 and 257.5 kHz. The frequency spectra for the swimming angles appeared to be flat at angles of −5, 0, 30, 60, 75, and 80° while detecting more general trends of frequency

Received 2 May 2024; Revised 24 May 2024; Accepted 29 May 2024
*Corresponding author: dhkang@kiost.ac.kr, Tel: +82-51-664-3650, Fax: +82-51-719-9591
Copyright Ⓒ 2024 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

spectra for swimming angle proved challenging. The results of this study can serve as fundamental data for Japanese horse mackerel biomass estimation and ecological research.

Keywords: Broadband echosounder, Japanese horse mackerel, Frequency spectra, Target strength

서 론

전갱이(Jack mackerel, *Trachurus japonicus*)는 우리나라 전 연안과 동중국해, 황해, 일본 남부, 북서태평양의 열대 해역까지 광범위하게 분포하는 어종이다. 전갱이는 표층이나 중층에서 무리를 지어 서식하며, 성장하면서 요각류 등의 소형 동물플랑크톤에서부터 소형 새우류 및 작은 어류 등을 섭식하는 육식성 어류이다. 전갱이의 수명은 7세 이상으로 추정되며, 부화 후 1년이면 가랑이 체장 약 17 cm, 부화 후 2년이면 23 cm, 3년이면 27 cm, 4년이면 30 cm로 자란다(Huh and Cha, 1998; NFRDI, 2024). 산란시기는 북쪽으로 갈수록 늦어지며, 동중국해 중부해역은 2~3월, 큐슈 서부해역은 4~5월, 제주도 근해는 6~8월로 알려져 있다(Cha et al., 2009; NFRDI, 2024). 전갱이는 우리나라에서 대형 선망어업에서 어획되고 있으며, 주로 제주도 동부와 남부 해역에서 어장이 형성되는 중요한 상업 어종 중 하나이다(Kim et al., 2015; Statistics Korea, 2024).

우리나라 전갱이 어업생산량은 1958년 역대 최고 어획량인 48,361 톤을 기록한 후 1990년도부터 1만 톤 대를 유지했으며, 2000년도까지 어업생산량이 꾸준히 증가하는 모습을 보였다. 2000년대 이후 전갱이 어업생산량은 1만 톤 대에서 4만 톤 대까지 매년 급격한 증감을 보이고 있다. 최근 2019년부터 2021년까지 40,000 톤 이상의 어업생산량을 기록하다 2022년 37,732 톤을 기록하며 다시 어업생산량이 감소하는 추세를 보이고 있다(Statistics Korea, 2024). 우리나라에서는 수산자원관리를 위해 1999년부터 고등어, 전갱이, 정어리 3개 어종과 붉은 대게 등에 대해 총허용어획량(Total Allowable Catch, TAC) 제도를 설정한 것을 시작으로 2024년 현재 16개 어종, 18개 업종에 적용하여 지속 가능한 어업을 위해 수산자원관리를 실시하고 있다. 2023~2024년 전갱이의 TAC 할당량은 41,693 톤으로 설정되었다(FIRA, 2024). 연간 어획량 변동이 큰 전갱이 종에 대한 지속 가능한 어업을 위하여 전갱이의 현존량 파악 및 행동, 생태학적인 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

전 세계에 많은 국가들이 수산 자원량과 이들의 행동 및 생태 특징을 파악하기 위하여 과학어군탐지기(이하 과학어탐)를 보편적으로 사용하고 있다. 그 중, 과학어탐을 이용한 음향조사법(Transect line survey)은 조사 해역에서 측정한 체적후방산란강도(Volume backscattering strength, Sv) 값을 이용하여 대상 종의 생물량을 추정하기 위해서는 그 종의 표적강도(Target strength, TS)의 정확한 값이 필요하다. 대상 생물 종의 TS 값은 생물학적으로는 대상 생물의 크기, 유영 자세각, 부레의 유무 및 형태, 그리고 물리학적으로는 사용 주파수, 해수와 체내 음속비, 체내 밀도비 등에 따라 변한다. TS 값을 구하기 위하여 1) *in situ* 측정(대상종이 자연 상태에서 자유롭게 유영할 때 측정(Bertrand et al., 1999; O'Driscoll and Rose, 2001; Sawada et al., 2009), 2) *ex situ* 측정(통제된 환경에서 살아 있거나 죽은 생물에 대한 측정(Gauthier and Rose, 2001; Kang et al., 2004; Kang et al., 2010; Park et al., 2017), 3) 대상 종의 형태에 기초한 수치적 또는 이론적 후방 산란 모델(Kang et al., 2001; Jech and Horne, 2002; Hazen and Horne, 2004; Hwang et al., 2008; Lee and Kang, 2010; Choi et al., 2018) 등 세 가지 기술이 보편적으로 사용되고 있다. *Ex situ* TS는 특히 종의 체장 및 유영 각도와 같은 변수가 개체어의 TS 값에 어떻게 영향을 미치는지 확인하기 위해 빈번히 활용되고 있는 기술이다.

한편, 광대역 주파수는 단일 펄스 내에 저주파수에서 고주파수까지 선형적으로 증가하는 주파수를 활용하여, 수직(즉 수심)별로 생물을 보다 더 정확하게 분리시킬 수 있고(높은 거리분해능), 신호대잡음비(SNR)가 높고, 대상 생물에 대한 광대역 주파수 특성을 제공하여 생물종 식별을 위한 정도 높은 정보를 획득할 수 있다. 예를 들면, 광대역 음향 자료로부터 어군 내에 분포하는 단일 개체 어류를 다른 어류와 구분이 가능하다(Hwang et al., 2016). 새로운 기술인 광대역 주파수를 활용하여 최근

다양한 생물 종을 대상으로 TS 연구를 포함한 정량 및 정성적인 생물량 및 생태 연구가 진행되고 있다. 현재까지 전갱이 종을 대상으로 광대역 주파수를 활용한 TS 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 국내 최초로 광대역 주파수와 수중 카메라를 동기화시켜 전갱이의 어체 크기 및 유영 자세각에 따른 TS 값을 구하여 전갱이 종 식별과 이 종의 생물량 추정 및 행동, 생태 연구에 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

현장조사

경상남도 통영에 위치한 한국해양과학기술원(KIOST) 통영 메가코즘 시험기지에서 2021년 10월 25일부터 28일까지 광대역 음향 시스템을 이용하여 전갱이의 *in situ*를 고려한 *ex situ* TS를 측정하였다. 음향 시스템은 빔각 7°의 과학어탐(Simrad EK80, Kongsberg, Norway, 명목 중심 주파수 200 kHz)을 사용하였고, 펄스 폭은 512 μs, 파워는 150 W, 핑률은 0.5 Hz, 주파수 범위는 160~260 kHz를 설정하여 데이터를 수록하였다(Fig. 1).

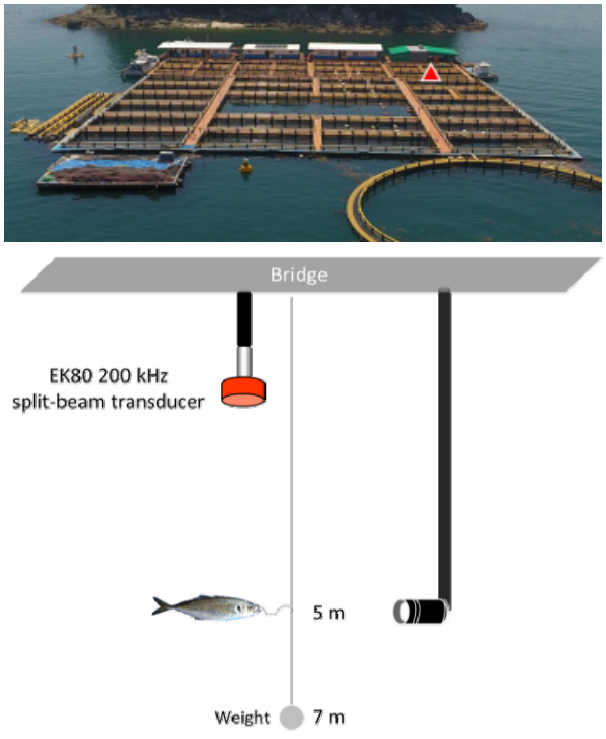

Fig. 1. Schematic diagram of TS experiment for Japanese horse mackerel.

과학어탐은 2021년 7월 29일에 국립수산과학원 수산자원연구센터의 해수 수조(5 m×5 m×10 m)에서 교정구(텅스텐 재질의 직경 22 mm)를 이용하여 음축값과 빔 패턴에 대하여 교정하였다(Foote et al., 1987). 과학어탐과 동기화시킨 수중 카메라는 전갱이 개체어의 유영 자세각이 녹화되도록 위치시켜 영상자료를 수집하였다. 수중 카메라는 수심 5 m 깊이에 센서에 영향을 주지 않기 위해 센서의 빔 폭을 고려하여 센서의 범위 밖에 설치하였다. 대상 어종인 전갱이는 메가코즘 시험기지에서 사육 중인 전갱이를 사용하였는데 매 측정 때마다 전갱이 개체를 그물채로 건져 올려 마취액(해수 10 L당 마취제 1 mL)에 마취 후 소형 낚시 바늘(8 mm)를 주둥이에 꿰고 수심 5 m에 위치시켰다. 전갱이 개체어는 어느 정도 자유롭게 유영할 수 있으나, 전갱이의 아래 쪽에 무게 추를 달아 수심에 따른 빔 내의 폭(swath width) 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 음향데이터를 받은 후, 즉시 전갱이 개체어의 전장과 습중량을 측정하였다. 실험에 사용된 전갱이는 총 21 개체이며, 체장(Total length, 16.8~35.5 cm; 평균 24.3 cm), 습중량 44~450 g (평균 155.2 g)이었다. 실험에 사용한 전갱이는 최대한 체장이 작은 것에서부터 큰 것까지 골고루 분포하도록 선별하였다.

자료 분석

음향 데이터 분석은 과학어탐 자료 분석용 프로그램인 Echoview (Echoview Software Pty. Ltd, ver. 14, Australia)를 사용하였다. 음향 데이터 처리는 해수면 선은 2 m, 해저선은 9 m로 설정하여 해수면 선 위와 해저선의 아래 데이터는 분석에서 제외시켰다. 또한 무게추의 에코는 매우 선명하게 표시되어서, 전갱이 개체가 분포하는 수심대를 중심으로 데이터를 추출하고 무게추에 의한 수신 자료도 제외하였다. 총 21개체의 전갱이 데이터를 수신하였지만, 잡음이 매우 높은 1번 개체어의 데이터는 사용하지 않았다. 광대역 주파수 특성은 펄스압축기술(pulse compression technique)을 활용한 것인데, 기존의 단일 표적탐지(Single target detection) 방법에서 광대역 데이터, 즉 펄스압축된 TS (TS pulse compressed wideband pings)와 각도(angular position pulse compressed wideband pings) 데이터를 이용하는 것이 다르다고 할 수 있다. 따라서, Single target detection-wide 연산자와

펄스압축된 TS와 각도 데이터를 활용하여 광대역 단일 표적(전갱이 개체어 신호)을 탐지하였다. 탐지된 각각의 전갱이 개체어 에코를 구역(region)으로 선택하고 광대역 특성, 즉 주파수 스펙트럼을 생성하였다. 생성된 개체별 주파수 스펙트럼을 CSV (Comma-separated values) 형식으로 엑스포트를 하여 결과를 시각화하였다. 주파수 스펙트럼 생성에 사용된 매개변수는 FFT (Fast Fourier Transform) 길이(Window size 혹은 FFT length)와 주파수 스펙트럼의 주파수 간격인 주파수 축의 분해능(Resolution of frequency axis)을 각각 0.4 m와 0.5 kHz로 설정하였다. 주파수 스펙트럼의 가장자리(edge)를 신뢰할 수 없어(Demer et al., 2017; Lavery et al., 2017), 162.5~257.5 kHz의 주파수 범위만 사용하였다. 체장별 주파수 스펙트럼은 음향데이터에 수록된 모든 유영 자세각을 포함하여 처리되었다.

Echoview에서 음향데이터와 동기화된 카메라 영상을 재생하여 유영 자세각(-85°부터 +85°까지)에 대한 음향값을 추출하였다. Echoview에 내재되어 있는 기능을 활용하여 핑별 음향 값과 영상 각도 값을 확인하여 분석하였다. 여기서, 어류가 아래로 유영하면 음의 각도(-), 어류가 수평이면 0°, 어류가 위로 향하면 양의 각도(+)로 정의하였다. 총 20 개체어를 대상으로 카메라 영상과 음향데이터가 동시에 획득한 것만 선별하여 유영 자세각에 대한 TS 값의 변동을 살펴보았다. 또한 동기화된 수중 카메라의 전갱이 유영 자세각에 따른 주파수 스펙트럼을 표시하기 위하여 카메라 영상과 음향데이터가 동시에 분석 가능한 자료만을 추출하여 사용하였다. 모든 개체어를 대상으로 유영 자세각에 따른 주파수 스펙트럼을 분석하기 위하여, 즉 체장의 요소를 고려하지 않고 TS의 주파수 스펙트럼을 표시하기 위하여 TScm를 사용하였다. TScm는 TS값을 체장의 제곱으로 정규화한 값으로 다음과 같이 대수의 형태로 표현할 수 있다.

$$TScm = TS - 20 \log L \quad (1)$$

여기서 L은 어류의 체장(cm)이다.

결과 및 고찰

실험에 사용된 전갱이의 전장과 체중 관계식은 Fig. 2에 나타내었다. 가장 작은 개체어의 전장과 체중은 16.8 cm와 44 g이고, 가장 큰 개체어는 각각 35.5 cm, 450 g이었다. 체장이 커질수록 체중이 늘어나는 정의 상관관계를 보였다. 전장(TL)과 체중(W)의 관계식은 다음과 같다.

$$W = 0.005156 \cdot TL^{3.177} \quad (1)$$
$$R^2 = 0.93$$

체장별 TS 주파수 스펙트럼의 평균값, 10과 90번째 백분위수를 Fig. 3에 표시하였다. 앞서 언급한 것같이 첫 번째 어류의 데이터는 잡음이 너무 심해 제외시켜 총 20 개체어에 대한 주파수 스펙트럼을 나타내었다. 주파수 스펙트럼의 평균선 패턴은 전반적으로 모든 체장에서 유사한 패턴을 보이며 체장과 무관하게 유사한 경향을 보였다(그림의 진한 실선). 주파수 스펙트럼의 평균선에서 최저 TS 값은 243 kHz에서 최고 TS 값은 180과 257.5 kHz에서 관찰되었다. 체장이 증가할수록 TS 값은 매우 미소하게 증가하였으나, 체장이 28.3 cm 이상이면 TS 값이 높아지고 가장 큰 35.5 cm의 평균 TS 값은 -39.7 dB이었다. 전갱이의 체장별 TS 주파수 스펙트럼의 평균 및 표준편차는 Table. 1에 나타내었다. 전체 평균선의 평균 TS 값은 −44.0 dB이었다. 표에서도 평균 TS값은 체장이 증가할수록 커지는 일반적인 경향을 보였다. 다만 체장 21.2와 29.1 cm에서 TS값(-47.0, -45.3 dB)이 떨어지는 것으로 확인되었다. 체장이 35.5 cm일 경우 TS값이 대폭 증가하는 것을 알 수 있었다.

동기화된 수중 카메라를 이용하여 전갱이의 유영 자

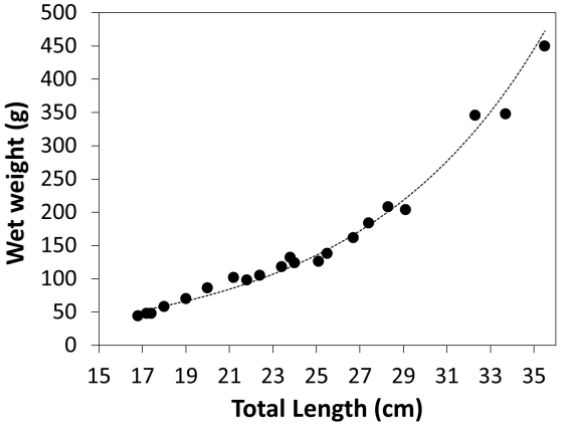

Fig. 2. Body weight-total length relationship of Japanese horse mackerel.

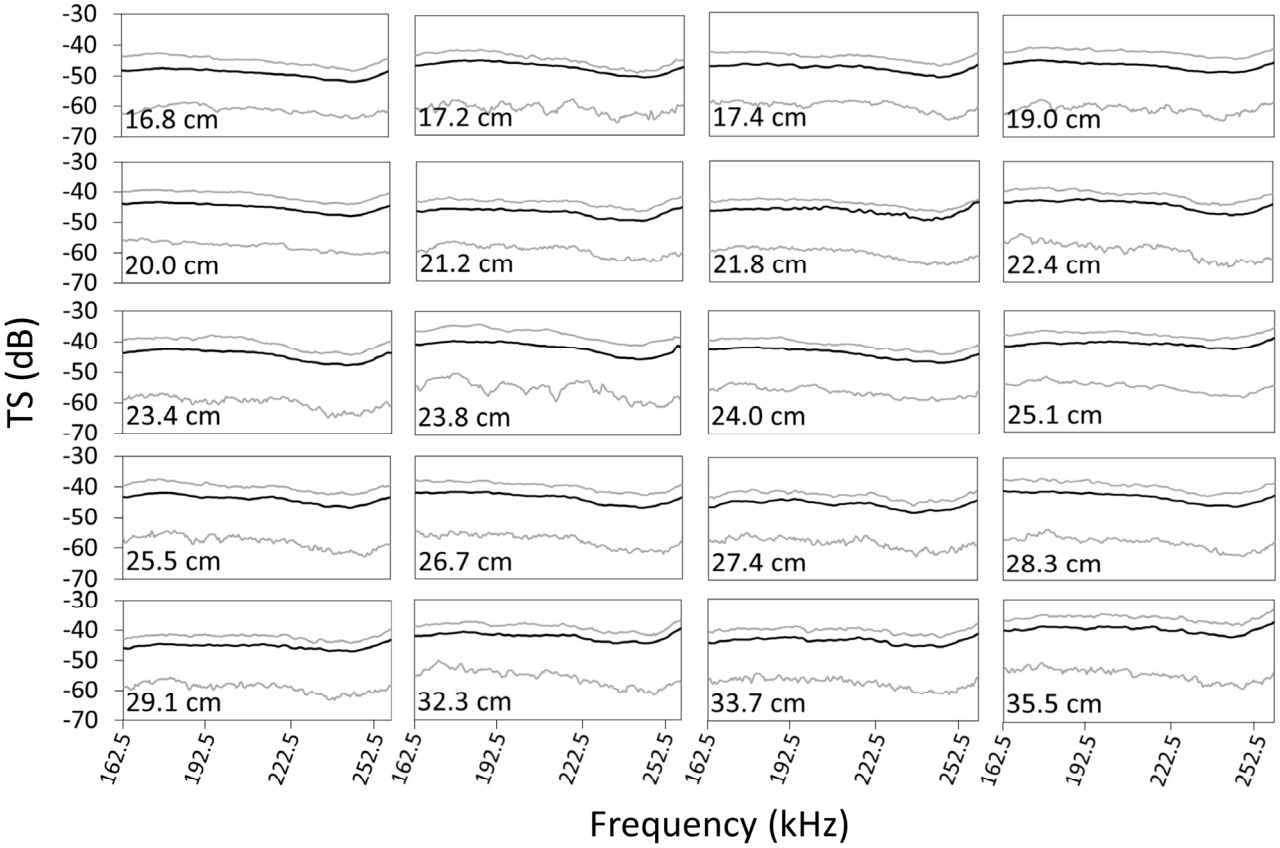

Fig. 3. TS frequency spectra by total length of Japanese horse mackerel. The thick black line indicates the mean of frequency spectra. The upper and lower lines mean 10th and 90th percentiles.

Table 1. The mean TS and the standard deviation of the mean TS frequency spectra by the total length of the Japanese horse mackerel

Length (cm)	Mean TS (dB)	S.D. TS (dB)
16.8	-49.0	1.4
17.2	-46.8	1.9
17.4	-47.7	1.3
19.0	-46.2	1.3
20.0	-44.9	1.5
21.2	-47.0	1.4
21.8	-46.5	1.3
22.4	-44.3	1.7
23.4	-44.1	1.8
23.8	-42.7	2.3
24.0	-45.3	2.0
25.1	-40.9	0.8
25.5	-43.8	1.4
26.7	-43.3	1.7
27.4	-45.3	1.3
28.3	-42.6	1.7
29.1	-45.3	0.8
32.3	-42.3	1.2
33.7	-43.7	1.0
35.5	-39.7	1.0

세각에 따른 주파수 스펙트럼을 분석한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 유영 자세각에 따른 주파수 스펙트럼은 TScm를 사용하여 시각화하였으며, 이를 통해 유영 자세각에 따른 주파수 스펙트럼의 경향을 관찰할 수 있다. 그러나 전반적으로 유영 자세각에 따른 주파수 스펙트럼의 명확한 경향을 파악하기는 어려웠다. 유영 자세각에서 -5, 0, 30, 60, 75, 80°에서 주파수 스펙트럼이 평이한 것이 관찰되었다. 널(null)이 있는 주파수 구간이 관찰되지만, 전체적인 주파수 범위에서는 일반적인 경향(-40 dB을 중심으로 상하 이동)을 보였다. 수중 카메라와 과학어탐을 동기화하여 자료를 수집하였으나, 카메라 영상에는 찍히고 과학어탐에는 수록되지 않는 그 반대의 경우도 매우 많아, 데이터 수가 부족하여 유영 자세각에 대한 보다 일반적인 주파수 스펙트럼의 경향이 보기 어렵다고 할 수 있다.

어류의 부레는 수신된 음향 후방 산란 강도에 최대 95%까지 기여하는 것으로 알려져 있다. 어류의 부레는

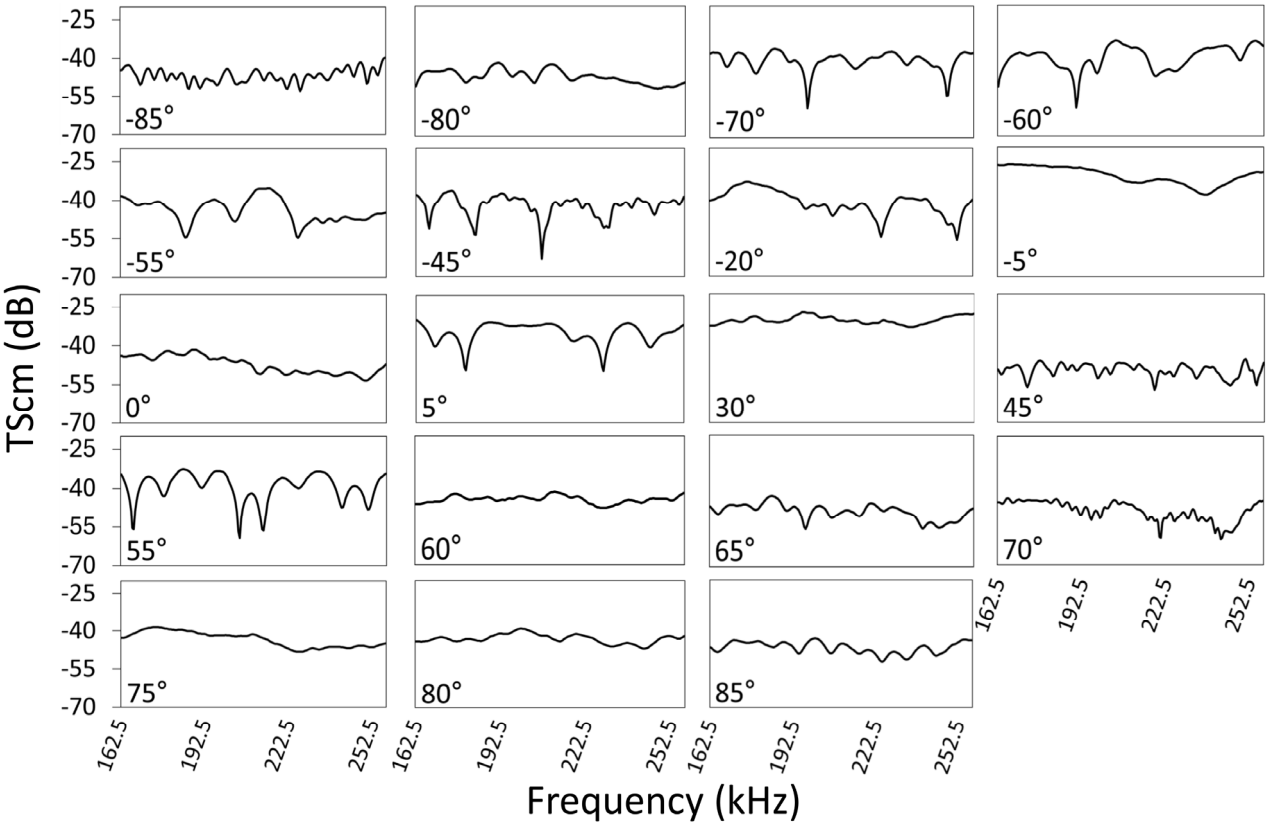

Fig. 4. Frequency spectra using TScm by swimming angle of Japanese horse mackerel. The plus mark indicates the fish heads upward and the minus mark means the fish heads downward. The number on the sub-graph indicates the degree of swimming angle.

어종과 특정 어종의 발달 단계에 따라 모양, 크기, 유영 자세각에 따라 다르며, 또한 어류의 생리 및 생태적인 특성이 달라, 이들 요소들이 음향 값에 막대한 영향을 미친다(Horne, 2003; Simmonds and MacLennan, 2005; Scoulding et al., 2015; Zhang et al., 2018; Dunning et al., 2023). TS 스펙트럼은 주파수와 유영 자세각에 따라 결정되는 널의 영향을 받는다. 따라서, 자세각의 작은 변화는 TS값의 큰 변화를 초래할 수 있다. 광대역 과학어탐의 높은 거리 분해능(명목 주파수가 200 kHz일 경우 0.4 cm)은 개별 생물(예, 전갱이 개체어)의 높이(thickness)보다 작기 때문에 음향산란강도가 개별 생물의 전체가 아닌 일부에서 생성되므로 확률적(stochasticity) 요소가 도입된다(Demer et al., 2017; Andersen et al., 2021). 이 연구에서 유영 자세각에 대한 큰 변동을 보인 주파수 스펙트럼도 이런 원인으로 발생하였다고 볼 수 있다. 음향산란특성은 다양한 요소에 반응하여 복잡한 방식으로 변하는데, 특히 광대역 데이터의 해석에서 장점으로 볼 수 있는 점이 해석을 할 때는 주의가 필요하다고 할 수 있다. 개체어의 음향 반응은 자세각과 잡음에 특히 민감하다. 따라서 변동성을 완화하고 종 식별에 적용할 수 있는 통계적으로 평균화 과정을 거쳐서 TS 스펙트럼을 생성하는 것이 현실적으로 효과적이다. 이 연구에서는 평균값과 전체 데이터 범위를 제시하기 위해 10번째 및 90번째 백분위수를 사용했다.

이 연구에서는 더 높은 레벨 범위의 사이드 로브(side lobe)를 가질 수 있지만 슬로우 램핑보다 훨씬 더 넓은 대역폭을 허용하는 패스트 램핑 모드를 사용했다. 광대역 데이터 처리에서 중요한 단계는 주파수 스펙트럼을 계산하는 데 사용되는 데이터 포인트의 수인 FFT 창 크기 또는 길이를 선택하는 것이다. FFT 창 길이를 줄이면 공간 분해능은 증가하지만 주파수 분해능은 감소한다. 그러나 두 가지 해상도를 모두 충족할 수는 없다.

따라서 이 길이를 결정하는 것은 범위와 주파수 해상도를 절충하여 선별해야 한다. 이 연구에서는 0.4 m의 FFT 윈도우 길이를 사용하였는데, 이 창 길이는 어종 식별(*Merluccius productus; Engraulis mordax; Euphausiia pacifica*; Benoit-Bird and Waluk, 2020)에 유효한 결과를 도출한 연구 사례가 있다. 협대역 과학어탐일 경우 여러 협대역 송수파기가 동시에 전송되어도 일반적으로 혼선(crosstalk)이 발생하지 않고, 송수파기 간의 샘플링 볼륨이 일정하게 유지된다. 따라서 주파수는 서로의 대역폭 내에 있지 않고 고조파(harmonics)에서 멀리 떨어지도록 선택된다. 그러나 여러 광대역 송수파기는 대역폭이 겹쳐서 특히 대역 가장자리에서 시스템 잡음인 고조파를 생성할 수 있다. 따라서 광대역 주파수 스펙트럼은 종종 FFT 분석과 관련된 감도 감소 및 에지(edge) 효과 때문에 각 대역의 극단을 제거하여 트리밍(trimming)한다(Demer et al., 2017; Lavery et al., 2017). 이 연구에서는 혼선을 피하기 위해 각 가장자리에서 2.5 kHz를 트리밍했다. 대역의 가장자리를 트리밍하면 분류학적 정보와 관련될 수 있는 전체 데이터의 일부가 제거되므로 분류력이 저하될 수 있다. 따라서 가장자리의 데이터를 제거할 때는 특별한 주의를 기울여야 한다(Benoit-Bird and Waluk, 2020). 한편, 광대역 과학어탐 각 4개 채널에서 수신된 신호는 최대 주파수 500 kHz의 나이퀴스트 샘플링 속도보다 높은 1.5 MHz로 디지털화되며, 두 단계로 필터링 및 데시메이션된다. 첫 번째 단계에서는 신호가 하드웨어 필터를 통과하여 데시메이션(decimation)된다. 두 번째 단계에서는 소프트웨어 필터에서 추가 데시메이션이 수행된다. 그런 다음 최종 복소수 값 데이터는 추가 처리를 위해 원시 데이터 확장자를 가진 바이너리 파일에 저장된다. 복소수 샘플은 펄스 압축에 앞서 저장되므로 데이터 속도를 크게 줄이고 후처리를 위한 유연성을 확보할 수 있다. 펄스압축 신호 처리 기술은 매칭 필터 처리를 기반으로 하며 에코 전압 시계열과 전송 신호 전압 시계열의 교차 상관관계를 포함한다(복제 신호; Stanton and Chu, 2008; Demer et al., 2017; Lavery et al., 2017). 이러한 과정을 거치면서 광대역 과학어탐의 데이터 양은 대단히 커서, 데이터 수집 및 분석에 이 점을 고려해야 한다. 이번 실험에서는 교정구를 한 개를 사용하여 널 구간이 발생하였는데, 복수의 교정구를 사용하여 널 구간이 최대한 줄이는 것도 중요하다고 할 수 있다. 또한 소형바늘을 사용하여 전갱이 개체어의 주둥이에 꿰어서 실험을 하였는데, 소형 바늘에 대한 영향은 고려하지 않았다. 추후, 보다 정밀한 광대역 TS실험을 위하여 이런 요소를 감안해야 한다.

이전에 수행된 전갱이의 TS 연구에서 주파수에 대한 정규화 TS (TScm)의 값을 정리하였다(Table 2). 이 연구들은 협대역 주파수 모드를 사용한 것이므로 이 연구의 TS값과 직접적인 비교는 어려우나, 전갱이의 TScm는 비교적 광대역 고주파수에 의한 큰 변동은 없는 것으로 보인다. 따라서, 이 연구의 목적인 전갱이 체장별 주파수 패턴(Fig. 3)의 낮은 변동성과 유사한 경향이 있다고 할 수 있다. 한편, 전갱이와 유사한 고등어(*Scomber japonicus*)를 대상으로 Kirchhoff-ray mode (KRM) 모델을 사용하여 체장에 대한 38, 70, 120, 200 kHz에서의 TS, 피치 각도와

Table 2. Previous studies conducted on TS measurement in Japanese horse mackerel

Frequency (kHz)	Fish Length (cm)	TScm (dB)	Reference
70.4	14.2~25.2	-69.95~-65.13	Yamanaka et al., 1999
75	16.8~34.3	-69.7	Lee, 2005
18	7.5~12.9	-68.70	Nakamura et al., 2013
38		-68.70	
50		-69.00	
70		-69.40	
120		-69.60	
200		-69.90	
38	12.2~22.0	-65.33	Hwang et al., 2015
70		-65.90	
120		-66.65	
38	12.5~27.5	-67.7	Kawauchi et al., 2019
120		-69.5	

수심에 대한 TS변동을 조사하였다(Tong et al., 2022). 또한 어류의 형태가 다른 임연수어(*Pleurogrammus azonus*), 까나리(*Ammodytes personatus*), 용가자미(*Cleisthenes pinetorum*)를 대상으로 두 개의 주파수 범위(45~90 kHz와 80~120 kHz)에서의 *ex situ* TS 스펙트럼을 조사한 연구에서 특히, 주파수와 피치(pitch) 각도를 병행하여 TS 주파수 스펙트럼을 표시하였다(Yan et al., 2024). TS 변동이 가자미와 임연수어는 높은 주파수에 더 높은 TS 값과 지향성이 관찰되는 반면, 까나리는 주파수 스펙트럼이 상대적으로 평탄한 것을 알 수 있었다. 사용한 광대역의 주파수 범위가 다르지만, 이 연구의 전갱이 TS 주파수 스펙트럼은 까나리와 같이 큰 변동을 보이지 않았다. 전갱이의 평탄한 주파수 스펙트럼 특징과 최저 및 최고 TS값을 보이는 243 kHz 및 80과 257.5 kHz를 토대로 음향적인 전갱이 종 식별을 시도할 수 있다. 이들 주파수에 TS의 최저와 최고값이 보이는 원인을 파악하기 위해서는 보다 정밀한 조건(앞서 설명한 어류의 생리 및 발달 단계의 특징, 부레 및 체형의 형태와 구성성분의 특징 등)에서 실험을 수행해야 한다. 더불어, 정도 높은 전갱이 종 식별과 우리나라 해역에 주로 서식하는 부어종의 식별을 위하여 보다 광범위한 주파수 범위에서 TS 모델식과 함께 연구가 수행되어야 할 것으로 판단한다.

결 론

최근, 국내 전갱이 어업 생산량은 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있다. 전갱이의 지속 가능한 어업을 하기 위해서 전갱이의 TS를 측정하여 현존량을 파악하는 것과 생태학적인 특성을 연구하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 현재까지 전갱이 종을 대상으로 광대역 주파수를 활용하여 TS 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 세계 최초로 광대역 주파수(명목 중심 주파수: 200 kHz, 160~260 kHz)와 수중 카메라를 동기화시켜 전갱이의 체장(16.8~35.5 cm) 및 유영 자세각에 따른 TS 값을 구하였다. 전갱이 체장과 체중의 관계식은 체장이 커질수록 체중이 늘어나는 정의 상관관계를 보였다. 체장별 주파수 스펙트럼의 평균선 패턴은 전반적으로 체장과 무관하게 유사한 경향을 보이고 주파수에 대한 큰 변동은 보이지 않았다. 다만, 최저 TS 값은 243 kHz, 최고 TS 값은 180과 257.5 kHz에서 관찰되었다. 유영 자세각에 대한 주파수 스펙트럼은 자세각 −5, 0, 30, 60, 75, 80°에서 주파수 스펙트럼이 평이한 것이 관찰되었으며 유영 자세각에 대한 보다 일반적인 주파수 스펙트럼의 경향이 보기 어려웠다. 이 연구의 결과는 전갱이의 생물량 추정 및 생태 연구에 기초 자료로 활용될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소(KRIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-056, 과제명: 해양생물음 측정 및 특성 분석 연구). 또한, 이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20230005).

References

Andersen LN, Chu D, Heimvoll H, Korneliussen R, Macaulay GJ and Ona E. 2021. Quantitative processing of broadband data as implemented in a scientific split beam echosounder. arXiv preprint. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.07248.

Benoit-Bird KJ and Waluk CM. 2020. Exploring the promise of broadband fisheries echosounders for species discrimination with quantitative assessment of data processing effects. J Acoust Soc Am 147, 411-427. https://doi.org/10.1121/10.0000594.

Bertrand A, Josse E and Massé J. 1999. In situ acoustic target-strength measurement of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking, ICES J Mar Sci 60, 51-60. https://doi.org/10.1006/jmsc.1998.0430.

Cha HK, Lee JB, Kang SK, Chang DS and Choi JH. 2009. Reproduction of the jack mackerel, *Trachurus japonicus* Temminck et Schlegel in the coastal waters around Jeju Island, Korea: Maturation and spawning. Bull Korean Soc Fish Tech 45, 243-250. https://doi.org/10.3796/KSFT.2009.45.4.243.

Choi JH, Oh WS, Yoon EA, Im YJ and Lee KH. 2018. Target Strength According to Tilt Angle and Length of Black Seabream *Acanthopagrus schlegeli* at 200 kHz-frequency. Korean J Fish Aquat Sci 51, 566-570. https://doi.org/

10.5657/KFAS.2018.0566.

Demer DA, Andersen LN, Bassett C, Berger L, Chu D, Condiotty J and Cutter GR. 2017. Evaluation of a wideband echosounder for fisheries and marine ecosystem science. ICES Coop Res Rep 336, 1-79.

Dunning J, Jansen T, Fenwick AJ and Fernandes PG. 2023. A new in-situ method to estimate fish target strength reveals high variability in broadband measurements. Fish Res 261, 106611. https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106611.

Fira. 2024. Website on total allowable catch. Retrieved from https://www.fira.or.kr/fira/fira_030601.jsp on Mar 7.

Foote KG, Knudsen HP, Vestnes G, MacLennan DN and Simmonds EJ. 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide. ICES CRR 144, 2707-7144. https://doi.org/10.17895/ices.pub.8265.

Gauthier S and Rose GA. 2001. Target Strength of encaged Atlantic redfish (*Sebastes spp*.). ICES J Mar Sci 58, 562-568. https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1066.

Hazen EL and Horne JK. 2004. Comparing the modelled and measured target-strength variability of walleye pollock, Theragra chalcogramma. ICES J Mar Sci 61, 363-377. https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.01.005.

Horne JK. 2003. The influence of ontogeny, physiology, and behaviour on the target strength of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). ICES J Mar Sci 60, 1063-1074. https://doi.org/10.1121/10.0000594.

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.

Hwang BK, Shin HO, Cho SH, Lee DJ and Kang DH. 2008. Acoustic target strength measurements on immobile riverine shrimp, oriental river prawn (*Macrobrachium koreana*), in freshwater. J Kor Soc Fish Tech 44, 37-45. https://doi.org/10.3796/KSFT.2008.44.1.037.

Hwang KS, Lee JH, Park JH, Cha HK, Choi JH, Lee HB, Park JS and Kang MH. 2016. First trial of the state of the art acoustic systems mounted on the R/V Tamgu 21. Kor J Fish Aqua Sci 49, 509-515. https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0509.

Hwang KS, Yoon EA, Lee KH, Lee HB and Hwang DJ. 2015. Multifrequency acoustic scattering characteristics of jack mackerel by KRM model. J Kor Soc Fish Technol 51, 424-431. https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.3.424.

Jech JM and Horne JK. 2002. Three-dimensional visualization of fish morphometry and acoustic backscatter. J Acoust Soc Am 3, 35-40. https://doi.org/10.1121/1.1430676.

Kang DH, Hwang DJ, Tohru M, Kohji I and Lee KH. 2004. Acoustic Target Strength of Live Japanese Common Squid (*Todarodes pacifica*) for Applying Biomass Estimation. J Kor Fish Soc 37, 345-353. https://doi.org/10.5657/kfas.2004.37.4.345.

Kang DH, Hwnag DJ, Na JY and Kim SA. 2001. Study on the Backscattered Signal of Swimbladdred Fish: Target Strength due to Length and Behavior of Red Seabream (*Pagrus Major*). J Acoust Soc Kr 20, 100-109.

Kang DH, Kim JH and Lim SH. 2010. Acoustic Target Strength Characteristics of Two Species of Multiple Jellyfishes, *Aurelia aurita* and *Cyanea nozakii*, in the Southern Coast of Korea. Ocean Polar Res 32, 113-122. https://doi.org/10.4217/OPR.2010.32.2.113.

Kawauchi Y, Minami K, Shirakawa H, Miyashita K, Iwahara Y, Tomiyasu M, Kobayashi M, Sakai T, Shao H and Nakagawa M. 2019. Target strength measurement of free-swimming jack mackarel using an indoor large experimental tank. Nippon Suisan Gakkaishi 85, 2-16. https://doi.org/10.2331/suisan.18-00008.

Kim HY, Lim YN, Jeong JM, Kim HJ and Baeck GW. 2015. Diet composition of juvenile *Trachurus japonicus* in the coastal waters of Geumodo Yeosu, Korea. J Korean Soc Fish Technol 51, 637-643. https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.4.637.

Lavery AC, Bassett C, Lawson GL and Jech JM. 2017. Exploiting signal processing approaches for broadband echosounders. ICES J Mar Sci 74, 2262-2275. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx155.

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. https://doi.org/10.3796/KSFT.2005.41.4.296.

Lee HB and Kang DH. 2010. In situ side-aspect target strength of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in northwestern Pacific Ocean. J Kor Soc Fish Tech, 46, 248-256. https://doi.org/10.3796/KSFT.2010.46.3.248.

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. https://doi.org/10.2331/suisan.79.345.

NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2024. Website on Biodiversity information. Retrieved from https://www.nifs.go.kr/frcenter/sub/sub_view.html?taxonId=59186 on Mar 7.

O'Driscoll RL and Rose GA. 2001. In situ acoustic target strength of juvenile capelin. ICES J Mar Sci 58, 342-345. https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.1015.

Park MS, Yoon EA, Hwang KS, Lee DI, Oh WS and Lee KH. 2017. Variation of target strength by swimming orientation and size for Pacific herring (*Clupea pallasii*) at the frequency of 70-kHz. J Korean Soc Fish Tech 53, 396-403. https://doi.org/10.3796/KSFT.2017.53.4.396.

Sawada K, Takahashi H, Abe K, Ichii T, Watanabe K and Takao Y. 2009. Target-strength, length, and tilt-angle measurements of Pacific saury (*Cololabis saira*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using an acoustic-optical system. ICES J Mar Sci 66, 1212-1218. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp079.

Scoulding B, Chu D, Ona E and Fernandes PG. 2015. Target strengths of two abundant mesopelagic fish species. The J Acoust Soc Ame 137, 989-1000. https://doi.org/10.1121/1.4906177.

Simmonds J and MacLennan DN. 2005. Fisheries Acoustics: theory and practice, 2nd Edn. Oxford: Blackwell Science 437.

Stanton TK and Chu D. 2008. Calibration of broadband active acoustic system using a single standard spherical target. J Acoust Soc Am 124, 128-136. https://doi.org/10.1121/1.2917387.

Statistics Korea. 2024. Fishery production survey. Retrieved from https://kostat.go.kr/ansk/ on Feb 8.

Tong J, Xue M, Zhu Z, Wang W and Tian S. 2022. Impacts of Morphological Characteristics on Target Strength of Chub Mackerel (*Scomber japonicus*) in the Northwest Pacific Ocean. Front Mar Sci 9, 2296-7745. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.856483.

Yamanaka Y, Fujieda S, Nagano T, Kaparang FE and Matsuno Y. 1999. Measurement of Directivity Pattern of Target Strength of Japanese Horse Mackerel by Split-beam Echo Sounder. Nippon Suisan Gakkaishi 65, 414-418. https://doi.org/10.2331/suisan.65.414.

Yan N, Mukai T, Hasegawa K, Yamamoto J and Fukuda Y. 2024. Broadband target strength of arabesque greenling, Pacific sand lance, and pointhead flounder. ICES J Mar Sci 81, 195-203. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad195.

Zhang H, Li J, Wang C, Wang C, Wu J, Du H, Wei Q and Kang M. 2018. Acoustic Target Strength of the Endangered Chinese Sturgeon (*Acipenser sinensis*) by *Ex Situ* Measurements and Theoretical Calculations. Appl Sci 8, 2554. https://doi.org/10.3390/app8122554.