

# 남극 로스해에 분포하는 에메랄드돌치(*Trematomus bernacchii*)의 음향 산란강도 추정

이사라 · 오우석 · 나형술<sup>1,2</sup> · 손우주<sup>1</sup> · 김정훈<sup>3</sup> · 이경훈<sup>4\*</sup>

국립부경대학교 어업기술안전연구소, <sup>1</sup>한국해양과학기술원 극지연구소 해양대기연구본부, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 극지과학과, <sup>3</sup>한국해양과학기술원 극지연구소 생명과학본부, <sup>4</sup>국립부경대학교 해양생산관리학부

## Estimation of Target Strength of Emerald Rockcod *Trematomus bernacchii* in the Ross Sea, Antarctica

Sara Lee, Wooseok Oh, Hyoung Sul La<sup>1,2</sup>, Wuju Son<sup>1</sup>, Jeong-Hoon Kim<sup>3</sup> and Kyoungsoon Lee<sup>4\*</sup>

Institute of Fisheries Technology and Safety, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

<sup>1</sup>Division of Ocean & Atmosphere Science, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Polar Science, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

<sup>3</sup>Division of Life Science, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

<sup>4</sup>Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

*Trematomus bernacchii*, a dominant benthic notothenioid in the Ross Sea, plays a key role in Antarctic coastal food webs. It has no swimbladder and its acoustic target strength (TS) fundamentally differs from that of swimbladdered fish. Therefore, species-specific TS estimation is essential when assessing acoustic biomass. This study applied the Kirchhoff Ray Mode (KRM) model to estimate the frequency-dependent TS at 38, 70, 120, and 200 kHz using morphological contour data collected from the Terra Nova Bay polynya in March, 2024. The results show a typical broadside-dominant scattering pattern, with a peak TS near the 0° tilt and decreasing responses at larger angles. At higher frequencies, the increased *ka* ratios amplified the tilt-angle sensitivity, whereas responses at 38 kHz were comparatively stable across tilt angles. Despite the low to moderate regression fits, this study provides the first frequency-specific TS relationships for a swimbladderless Antarctic benthic fish species, as well as baseline parameters for acoustic-based distribution mapping and biomass estimation under the CCAMLR ecosystem monitoring framework.

Keywords: *Trematomus bernacchii*, Target strength, Kirchhoff Ray Mode model, Ross Sea, Underwater acoustics

## 서 론

에메랄드돌치(*Trematomus bernacchii*)는 Nototheniidae과에 속하는 대표적인 남극 저층성 어류로, 남극 연안 생태계에서 높은 개체수와 넓은 분포 범위를 바탕으로 생태학적 중요성이 매우 큰 종이다. 특히 저서성 상위 포식자인 이 종은 다모류, 단각류, 연체동물, 소형 어류를 주로 섭식하며, 계절적으로 동물플랑크톤을 적극적으로 이용하는 등 폭넓은 먹이 폭을 가진 일반적 포식자이다(DeWitt et al., 1990; La Mesa et al., 1996; Vacchi et al., 2000; Li et al., 2025). 이러한 생태적 특성으로 인해 에메

랄드돌치는 남극 연안 먹이사슬에서 에너지 전달의 핵심 역할을 수행하며, 로스해를 포함한 남극 대륙 주변 연안에서 대규모 군집을 이루고 서식한다(Kawaguchi et al., 1989; Vacchi et al., 1994; Vacchi et al., 2000; La Mesa et al., 2004; Li et al., 2025). 따라서 이들의 공간 분포 및 자원 변동을 정량적으로 규명하는 것은 남극 해양생태계의 구조와 기후변화에 따른 반응 메커니즘을 이해하는 데 필수적이다.

기존의 어류 분포 조사는 주로 네트 및 저층트롤을 이용한 직접 채집에 의존해 왔다. 이러한 방법은 출현종 확인과 생물학적 특성 분석에 유리하지만, 광범위한 해역에 대한 조사가 제한적

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5889 Fax: +82. 51. 629. 5886

E-mail address: klee71@pknu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0452>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 452-459, August 2026

Received 3 March 2026; Revised 24 March 2026; Accepted 19 June 2026

저자 직위: 이사라(박사후연구원), 오우석(박사과정), 나형술(선임연구원), 손우주(박사), 김정훈(선임연구원), 이경훈(교수)

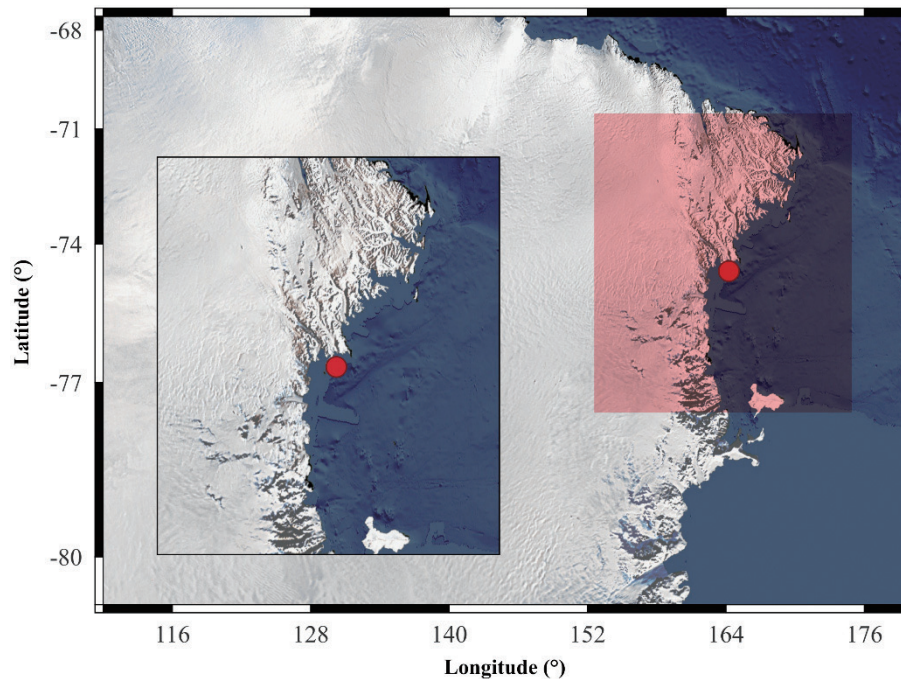


Fig. 1. Map of Terra Nova Bay polynya (TNBP) near Jang Bogo Station, Antarctica, showing the sampling location of *Trematomus bernacchii* (circle).

이며, 대상생물의 회피행동으로 인해 정량적 정확성이 저하될 수 있다는 한계를 가진다(Walsh, 1996; Kaartvedt et al., 2012; Dean et al., 2021). 이에 따라 수중음향기법은 넓은 공간적 범위에서 생물의 분포와 밀도를 정량화할 수 있는 대안적 조사 방법으로 활용되고 있다(Leonori et al., 2021; Lee et al., 2023). 특히 짧은 시간 내에 넓은 면적을 조사할 수 있어 극지 연구와 같은 접근이 어려운 환경에서 더욱 효율적이다.

수중음향기법을 활용하기 위해서는 대상종의 음향산란강도(Target strength, TS), 즉 음파가 생체 표면에서 반사·산란되어 되돌아오는 에너지의 강도를 정확히 이해하는 것이 필수적이다(Foote, 1987). 음향산란강도는 종별·체장별 음향산란특성을 규명하고, 수직 및 수평 분포를 정량적으로 해석하는 데 핵심적인 변수로 활용된다(Stevens et al., 2021). 음향산란강도는 자연환경에서 개체를 측정하는 *in situ* 방법, 통제된 실험환경을 이용한 *ex situ* 방법, 그리고 생물의 크기·형태·유영자세각·부레 특성 등을 반영한 음향산란이론모델에 의해 추정될 수 있다(Henderson and Home, 2007; Macaulay et al., 2013; Sobradillo et al., 2021; Dunning et al., 2023).

음향산란이론모델은 생물학적·물리적 변수를 수치적으로 재현함으로써 다양한 환경 조건에서 음향산란특성을 효율적으로 분석할 수 있는 장점을 가진다. 또한 비용과 시간 소모가 적고, 개체 크기 및 자세각 변화에 따른 음향 반응 특성을 정밀하게 추정할 수 있어 대상종의 음향 신호를 명확히 분리하고 정량적 자원평가의 정확도를 높일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 음향산란이론모델을 적용하여 에메랄드돌치의 음향산란강도를 추정하고, 향후 수중음향 기반 자원량 추정 및 분포 해석에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 조사해역 및 표본채집

음향산란이론모델을 이용하여 대상생물의 음향산란강도를 추정하기 위해서는 대상생물의 윤곽데이터 자료가 필수적이다. 에메랄드돌치 표본 채집은 장보고기지 인근해역에서 2024년 3월에 수행되었다(Fig. 1). 조사해역은 테라노바 만 폴리냐(Terra Nova Bay polynya, TNBP)로 동남극의 대표적인 연안 폴리냐 중 하나이며, 로스해(Ross Sea) 해빙의 약 10%에 해당하는 해빙을 생산하고 있다(Nihashi et al., 2017; Kim et al., 2022). 표본 채집에 사용된 통발은 사다리꼴 형태로 양 옆에 입구가 설치되어 있으며 가로 2 m, 세로 1 m, 높이 0.6 m였다.

### 음향산란이론모델

본 연구에서는 Kirchhoff-Ray-Mode (KRM) 모델을 이용하여 남극 로스해에 분포하는 에메랄드돌치의 음향산란강도를 계산하였다. KRM 모델은 어류의 체형과 부레를 실린더 또는 원뿔모양으로 근사하여 각각의 음향산란성분을 구하여 어류 전체의 음향산란강도를 추정한다. 에메랄드돌치는 부레가 없는 어종으로 부레에 대한 수식을 제외하고 음향산란강도를 추정하였

다(Clay and Horne, 1994). 식 (1)은 에메랄드돌치 체형에 대한 산란 진폭 추정식이다.

$$L \sim -i \frac{R_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{N_s-1} [ka_j]^{\frac{1}{2}} \Delta u_j [e^{-i2kv_{Lj}} - T_{wb} T_{bw} \cdot e^{-i2kv_{Lj} + i2k(v_{Lj} - v_{Lj}) + i\psi_b}] \dots (1)$$

여기서  $L$ 는 위상 정보를 포함하기 위한 허수 항이며,  $R_{wb}$ 는 어류 조직과 해수 간의 음향 임피던스 반사계수(reflection coefficient)로, 밀도와 음속 차이를 반영하는 요소이다.  $N_s$ 는 어체를 근사하기 위해 길이 방향으로 분할한 원통형 체적 요소의 총 개수를 의미한다.  $k$ 는 주파수와 파장에 의해 결정되는 파수이며,  $k_b$ 는 어체 조직 내에서의 파수이다.  $a_j$ 는  $j$ 번째 체적 요소의 단면 반경이며,  $\Delta u_j$ 는 해당 체적 요소의 축 방향 투영 길이를 나타내며,  $v_{Lj}$  및  $v_{Lj}$ 는 각각  $j$ 번째 체적요소의 상면과 하면의  $u$ 좌표이다.  $T_{wb} T_{bw} = 1 - R_{wb}^2$ 는 어체 앞뒤 경계면에서의 투과계수 곱이며,  $i\psi_b$ 는 경험적 위상 보정항이다. 대괄호 안의 첫 번째 항은 어체 앞면에서의 반사 성분을, 두 번째 항은 어체를 투과한 후 뒷면에서 반사되어 돌아오는 성분을 나타낸다. 각 원통형 성분에서의 산란 기여분을 복소 합산하여 전체 산란 진폭을 도출한다. 대상생물의 음향산란강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다(식 2).

$$TS = 20 \log |L_{body}| \dots (2)$$

KRM 모델을 이용하여 각 자세각  $\theta$ 에서 음향산란강도  $TS(\theta)$ 는 식 (3)에 따라 선형치  $Ts(\theta)$ 로 변환하였다.

$$Ts(\theta) = 10^{TS(\theta)/10} \dots (3)$$

에메랄드돌치의 평균 자세각과 표준편차는 각각  $0^\circ$ 와  $15^\circ$ 로 가정하였으며, 이를 바탕으로 정규분포 형태의 자세각 확률밀도함수  $f(\theta)$ 를 구성하였다. 이때  $f(\theta)$ 는 적분 구간인  $-45^\circ$ 부터  $+45^\circ$ 까지의 자세각 범위 내에서 정규화하여 적용하였다. 자세각 평균 음향산란강도의 선형치  $\overline{TS}$ 는 각 자세각 범위  $-45^\circ$ 부터  $+45^\circ$ 까지에서 각  $Ts(\theta)$ 에  $f(\theta)$ 를 가중하여 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$\overline{TS} = \frac{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} Ts(\theta) f(\theta) d\theta}{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} f(\theta) d\theta} \dots (4)$$

이후  $\overline{TS}$ 를 식 (5)에 따라 dB 단위로 변환하여 자세각 평균 음향산란강도  $\overline{TS}$ 를 산출하였다.

$$\overline{TS} = 10 \log_{10} (\overline{TS}) \dots (5)$$

여기서  $Ts(\theta)$ 는 각 자세각  $\theta$ 에서의  $Ts(\theta)$ 를 선형치로 변환한 값이며,  $f(\theta)$ 는 자세각 확률밀도함수이다. KRM 모델을 통해 추정된 자세각 평균 음향산란강도  $\overline{TS}$ 와 체장 간의 관계는 식 (6)

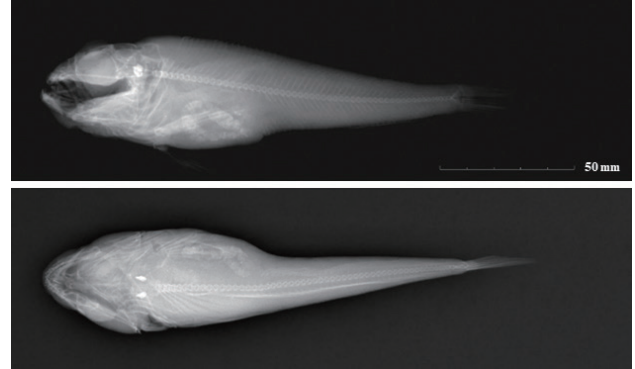


Fig. 2. X-ray radiographs demonstrating the absence of a swim bladder in the specimen, obtained using a Vetter-DR9 digital radiography system (MEDIEN International Co., Ltd., Anyang, Republic of Korea).

과 같이 표현하였다.

$$\overline{TS} = a \log_{10} L + b \dots (6)$$

여기서,  $a$ 는 기울기,  $b$ 는 절편,  $L$ 는 체장(cm)을 말한다. 또한,  $TS$ 의 선형치가 체장의 제곱에 비례한다는 가정에 따른 일반적인 음향산란강도 관계식은 식 (7)과 같이 나타내었다.

$$\overline{TS} = 20 \log_{10} L + b_{20} \dots (7)$$

KRM 모델은 어체와 부레를 근사한 부피의 합으로 계산하여 음향산란강도를 추정하는 모델이지만, 에메랄드돌치의 경우 부레가 없는 어종이기 때문에 모델에 적용할 때 부레에 대한 수식은 제거하였다(Fig. 2). 또한, 대상 생물의 밀도비와 음속비가 필요하기 때문에 본 논문에서는 부레가 없는 어류에 대한 선행 연구 결과를 이용하여 밀도비와 음속비를 각각 1.010, 1.025로 적용하였다(Gorska et al., 2005).

## 결과 및 고찰

### 표본의 생물학적 특성

본 연구에 사용된 에메랄드돌치 35마리의 전장은 17.9–28.2 cm (Avg. 24.0 cm), 체중은 59.2–304.4 g (Avg. 195.8 g)의 범위를 보였다(Table 1). 전장과 체중의 상관관계를 분석한 결과, 전장이 증가함에 따라 체중이 선형적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 거듭제곱 모델을 적용한 회귀 분석 결과는  $W = 0.0349TL^{2.7071}$  ( $R^2 = 0.6036$ )로 나타났다(Fig. 3).

### 자세각 변화에 따른 남극 에메랄드돌치의 TS

KRM 모델을 이용하여 에메랄드돌치의 자세각( $-45^\circ$ – $45^\circ$ )에

따른 각 주파수별 음향산란강도를 추정하였다(Fig. 4). 자세각 0°는 에메랄드돌치가 수평 방향을 유지하고 있음을 의미하며, 음수(-)일 때는 머리가 아래로, 양수(+)일 때는 머리가 위로 향한 자세를 나타낸다. 에메랄드돌치의 개체 크기에 따른 음향산

Table 1. Morphometric characteristics of *Trematomus bernacchii* collected near Jang Bogo Station, Terra Nova Bay in March 2024

| No   | TL(cm) | BL(cm) | W(cm) | H(cm) | Wt(g) |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1    | 19.5   | 16.8   | 4.1   | 5.4   | 158.5 |
| 2    | 24.1   | 20.0   | 4.9   | 6.2   | 157.9 |
| 3    | 24.4   | 21.5   | 6.1   | 6.5   | 201.7 |
| 4    | 22.8   | 20.0   | 5.8   | 7.2   | 183.5 |
| 5    | 23.0   | 20.0   | 5.0   | 6.1   | 185.1 |
| 6    | 23.2   | 19.0   | 5.1   | 5.8   | 162.7 |
| 7    | 28.2   | 23.1   | 6.0   | 7.0   | 239.2 |
| 8    | 27.1   | 24.0   | 5.2   | 6.3   | 220.6 |
| 9    | 25.6   | 22.5   | 5.8   | 7.2   | 243.9 |
| 10   | 24.6   | 23.0   | 5.8   | 7.3   | 304.4 |
| 11   | 22.4   | 19.5   | 4.6   | 6.5   | 166.2 |
| 12   | 27.1   | 24.2   | 5.8   | 7.1   | 263.5 |
| 13   | 24.1   | 21.7   | 5.7   | 5.6   | 194.8 |
| 14   | 23.2   | 19.9   | 5.3   | 6.7   | 197.0 |
| 15   | 24.4   | 21.7   | 4.8   | 7.7   | 208.5 |
| 16   | 25.6   | 23.0   | 5.5   | 6.0   | 220.0 |
| 17   | 23.3   | 22.5   | 5.0   | 6.7   | 184.8 |
| 18   | 17.9   | 17.7   | 3.7   | 4.1   | 59.2  |
| 19   | 23.4   | 21.0   | 5.8   | 6.2   | 194.6 |
| 20   | 22.8   | 20.2   | 5.6   | 6.9   | 168.8 |
| 21   | 22.5   | 19.8   | 4.3   | 4.9   | 114.7 |
| 22   | 26.8   | 23.8   | 5.3   | 6.1   | 198.9 |
| 23   | 24.0   | 21.0   | 4.8   | 6.6   | 207.6 |
| 24   | 20.9   | 18.4   | 5.1   | 5.9   | 117.7 |
| 25   | 23.2   | 20.5   | 5.3   | 6.6   | 184.5 |
| 26   | 26.4   | 23.0   | 6.4   | 6.9   | 284.1 |
| 27   | 25.8   | 23.0   | 5.1   | 6.8   | 230.7 |
| 28   | 23.0   | 20.4   | 5.9   | 6.4   | 190.5 |
| 29   | 24.3   | 21.3   | 5.9   | 6.3   | 185.8 |
| 30   | 25.2   | 22.2   | 5.7   | 6.5   | 230.5 |
| 31   | 25.7   | 22.9   | 6.8   | 6.0   | 201.0 |
| 32   | 24.1   | 21.4   | 5.7   | 6.6   | 209.9 |
| 33   | 23.3   | 20.5   | 6.5   | 5.4   | 142.7 |
| 34   | 26.2   | 23.0   | 6.2   | 7.3   | 288.1 |
| 35   | 22.4   | 19.9   | 5.5   | 6.2   | 153.9 |
| Avg. | 24.0   | 21.2   | 5.4   | 6.4   | 195.8 |

TL, total length; BL, body length; W, width; H, height; Wt, weight.

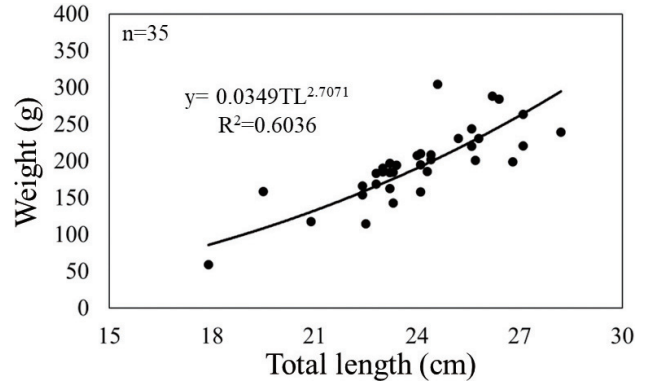


Fig. 3. Relationship between total length and body weight of *Trematomus bernacchii* (n=35) collected from the Terra Nova Bay, Antarctica.

란특성을 비교한 결과, 모든 개체에서 공통적으로 자세각 0°에 가까울 때 가장 높은 TS 값을 나타내었으며, 자세각이 ±방향으로 증가할수록 TS가 점차 감소하는 전형적인 어류의 산란 패턴이 확인되었다. 그러나 TS 값과 각도 변화에 따른 민감도는 개체 크기에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 에메랄드돌치의 개체 크기에 따른 음향산란특성을 비교한 결과, 모든 주파수에서 큰 개체(점선, No. 7, TL 28.2 cm)가 작은 개체(실선, No. 18, TL 17.9 cm)보다 전반적으로 높은 TS 값을 나타내었으며, 이는 체장 증가에 따라 산란에 기여하는 어체 부피 및 형상 요소가 증가하기 때문으로 판단된다.

주파수별로는 저주파수에서 자세각에 따른 TS 변화가 비교적 완만하게 나타난 반면, 고주파수에서는 특정 자세각에서 TS가 급격히 감소하는 구간이 반복적으로 관찰되었다.

작은 개체의 경우 체폭의 절반값을 대표 반경으로 사용하여 계산한  $ka$  값은 38, 70, 120, 200 kHz에서 각각 약 2.9, 5.4, 9.3, 15.5로 증가하였다. 큰 개체의  $ka$  값은 동일 주파수에서 각각 약 4.8, 8.8, 15.1, 25.1로 계산되었다. 즉, 주파수가 증가할수록 두 개체 모두  $ka$  값이 증가하였으며, 이에 따라 자세각 변화에 따른 TS 변동도 더 복잡하게 나타났다. 특히 120 kHz와 200 kHz에서는 작은 개체와 큰 개체 모두에서 TS 곡선의 국소적 변동이 뚜렷해졌으며, 이는 고주파수에서 파장이 짧아지면서 어체의 외부 형상 및 내부 구조에 의한 간섭 효과가 증가한 결과로 해석된다(Simmonds and MacLennan, 2005).

#### 체장 변화에 따른 남극 에메랄드돌치의 TS

KRM모형을 이용하여 어군탐지기에서 주로 사용되는 주파수(38, 70, 120, 200 kHz)별 에메랄드돌치의 체장과 TS의 관계를 Table 2에 나타내었다(Fig. 5). 이하 본문에서 평균 TS는 식 (5)에서 정의한 자세각 평균 음향산란강도 ( $\overline{TS}$ )를 의미한다. 최대 TS는 유영 자세각 -45°~45° 범위 내에서 나타난 TS 중 최댓값으로 정의하였으며, 평균 0°, 표준편차 15°의 자세각 정규분

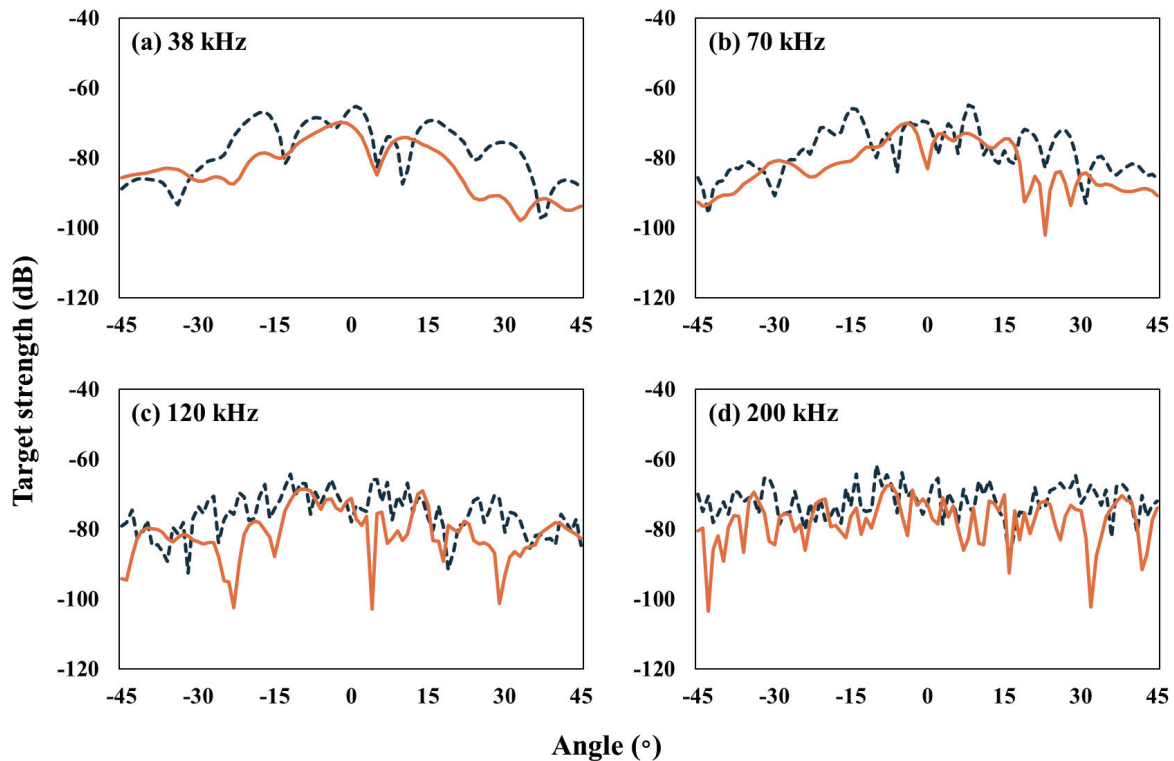


Fig. 4. Target strength as a function of tilt angle at four frequencies (38, 70, 120, and 200 kHz) for two representative individuals of *Trematomus bernacchii*. The solid and dashed lines indicate smallest (No. 18, TL=17.9 cm) and the largest (No. 7, TL=28.2 cm) specimens, respectively. TL, total length.

포를 가정하고,  $-45^{\circ}$ — $+45^{\circ}$  범위에서 확률밀도함수로 가중 평균 하여 계산하였다.

최대 TS는 38 kHz에서  $-70.3$ — $64.9$  dB, 70 kHz에서  $-70.0$ — $61.6$  dB, 120 kHz에서  $-68.6$ — $61.7$  dB, 200 kHz에서  $-67.5$ — $61.8$  dB 범위로 나타났다. 평균 TS는 38 kHz에서  $-75.4$ — $69.6$

dB, 70 kHz에서  $-75.4$ — $70.0$  dB, 120 kHz에서  $-75.1$ — $69.7$  dB, 200 kHz에서  $-73.7$ — $69.3$  dB 범위로 나타났다. 남극 에메랄드 돌치와 최대 TS 회귀선은 38 kHz에서  $TS=20.10\log_{10}TL-95.32$  ( $R^2=0.30$ ), 70 kHz에서  $TS=24.50\log_{10}TL-99.85$  ( $R^2=0.30$ ), 120 kHz에서  $TS=22.87\log_{10}TL-97.07$  ( $R^2=0.33$ ), 200 kHz에서  $TS=23.18\log_{10}TL-96.00$  ( $R^2=0.53$ )으로 나타났다. 남극 에메랄드 돌치와 평균 TS 회귀선은 38 kHz에서  $TS=22.12\log_{10}TL-103.24$  ( $R^2=0.37$ ), 70 kHz에서  $TS=21.32\log_{10}TL-101.81$  ( $R^2=0.48$ ), 120 kHz에서  $TS=22.95\log_{10}TL-103.77$  ( $R^2=0.50$ ), 200 kHz에서  $TS=20.18\log_{10}TL-98.95$  ( $R^2=0.53$ )으로 나타났다. TS가 체장의 2승에 비례한다고 가정하여 산출한 기준화 최대 TS는 38 kHz에서  $-95.19$  ( $R^2=0.29$ ), 70 kHz에서  $-93.64$  ( $R^2=0.29$ ), 120 kHz에서  $-93.10$  ( $R^2=0.33$ ), 200 kHz에서  $-91.62$  ( $R^2=0.39$ )로 계산되었다. 동일한 가정하에서 산출한 기준화 평균 TS는 38 kHz에서  $-100.3$  ( $R^2=0.37$ ), 70 kHz에서  $-99.99$  ( $R^2=0.48$ ), 120 kHz에서  $-99.70$  ( $R^2=0.50$ ), 200 kHz에서  $-98.69$  ( $R^2=0.53$ )으로 나타났다.

## 고 찰

본 연구는 KRM 음향산란모델을 적용하여 남극 로스해 연안

Table 2. Mean TS represents the tilt-averaged modeled TS rather than the arithmetic mean of replicate measurements. The coefficients a and b are point estimates for the fitted relationship  $TS=a\log_{10}(TL)+b$

|            | Frequency (kHz) | a     | b       | R <sup>2</sup> |
|------------|-----------------|-------|---------|----------------|
| Maximum TS | 38              | 20.10 | -95.32  | 0.30           |
|            | 70              | 24.50 | -99.85  | 0.30           |
|            | 120             | 22.87 | -97.07  | 0.33           |
|            | 200             | 23.18 | -96.00  | 0.53           |
| Mean TS    | 38              | 22.12 | -103.24 | 0.37           |
|            | 70              | 21.32 | -101.81 | 0.48           |
|            | 120             | 22.95 | -103.77 | 0.50           |
|            | 200             | 20.18 | -98.95  | 0.53           |

TS, target strength; TL, total length. Mean TS represents the tilt-angle averaged target strength ( $\overline{TS}$ ) defined in equation (5).

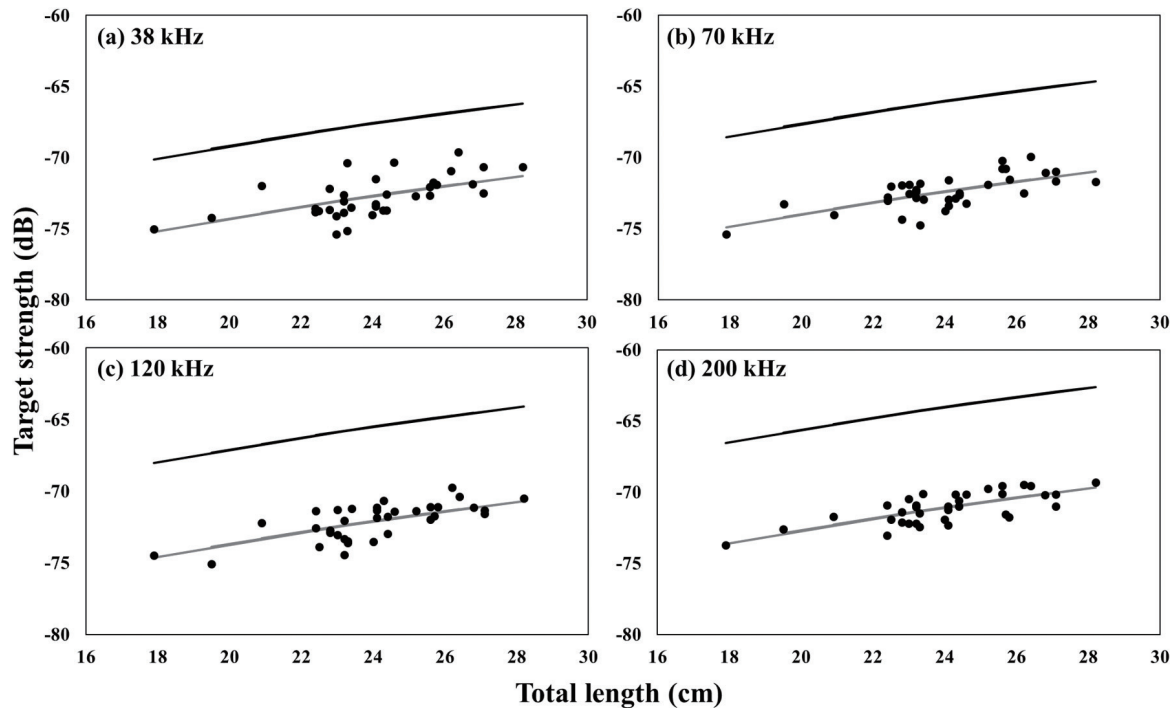


Fig. 5. Relationships between total length and target strength of *Trematomus bernacchii* at four frequencies (38, 70, 120, and 200 kHz). TL, total length. Black and gray lines indicate maximum and mean TS regressions, respectively.

에 서식하는 저층 어류인 에메랄드돌치의 주파수별 TS 특성과 자세각 및 체장 의존성을 정량적으로 제시하였다. 에메랄드돌치는 부레가 없어 일반적인 부레어류와 달리 강한 공기-조직 경계면에 의한 산란이 발생하지 않으며, 산란은 주로 어체 외부 형상, 근육 조직, 골격 구조, 두부 및 이석 등으로부터 발생하는 것으로 판단된다(Ladino et al., 2024; Yan et al., 2024). 따라서 본 연구에서 제시한 결과는 남극 연안 저층어류의 음향 기반 분포 해석과 자원량 추정에 필요한 기초자료로 활용될 수 있다.

자세각 변화에 따른 TS는 모든 주파수에서  $0^\circ$  부근에서 가장 높게 나타났으며, 자세각이  $\pm$  방향으로 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 어체가 수평 자세에 가까울 때 입사 음파에 노출되는 어체의 유효 크기와 산란 기여도가 가장 크게 나타나기 때문으로 판단된다. 다만 자세각에 따른 TS 변동 양상은 주파수와 개체 크기에 따라 달라졌다. 저주파수에서는 TS 곡선이 비교적 완만하게 나타난 반면, 고주파수에서는 특정 자세각에서 급격한 TS 감소가 반복적으로 나타났다.

본 연구에서는 어류가 수평 자세를 유지한 상태에서 선박 하부의 음향빔이 주로 등 방향으로 입사한다고 가정하였으며, 어체의 횡단면 특성을 대표하기 위해 체폭의 절반값을 대표 반경으로 사용하여  $ka$ 값을 계산하였다. 작은 개체의  $ka$ 값은 38 kHz에서 약 2.9, 200 kHz에서 약 15.5로 증가하였고, 큰 개체는 38 kHz에서 약 4.8, 200 kHz에서 약 25.1로 증가하였다. 즉, 주파수가 증가할수록 파장이 체폭에 비해 짧아지고, 산란은 점차

기하학적 산란 영역에 가까워진다. 이 조건에서는 어체 표면, 두부, 골격 구조 등 여러 산란 중심에서 발생한 반사파의 위상 관계가 자세각에 따라 달라지므로, TS 곡선에 국소적인 최대·최소값이 반복적으로 나타날 수 있다(Love, 1971; Simmonds and MacLennan, 2005; Yan et al., 2024).

특히 작은 개체에서 고주파수의 TS 변동이 더 불규칙하게 나타난 것은 단순히  $ka$ 값만으로 설명되기보다는, 음향산란에 기여하는 어체 구조의 크기와 산란 중심의 분포가 함께 작용한 결과로 해석된다. 큰 개체는 상대적으로 넓은 산란면과 다양한 산란 중심을 가지므로 일부 구조에서 상쇄간섭이 발생하더라도 전체 TS가 평균화될 수 있다. 반면 작은 개체는 전체 산란 강도에 기여하는 구조가 제한적이기 때문에 특정 자세각에서 발생하는 간섭 효과가 전체 TS에 더 크게 반영될 가능성이 있다. 따라서 개체 크기에 따른 자세각 민감도 차이는 동일 종 내에서도 체장 구조에 따라 TS 변동성이 달라질 수 있음을 의미한다(Love, 1971; Simmonds and MacLennan, 2005; Yan et al., 2024).

체장-TS 관계에서도 주파수에 따른 차이가 확인되었다. 본 연구에서 평균 TS 기준  $R^2$ 는 38 kHz에서 0.37, 70 kHz에서 0.48, 120 kHz에서 0.50, 200 kHz에서 0.53으로 주파수 증가에 따라 점진적으로 증가하였다. 이는 단순한 통계적 변동이라기보다 주파수에 따른 산란 메커니즘의 차이를 반영하는 것으로 해석된다. 38 kHz의 파장(약 39.5 mm)은 에메랄드돌치의 체폭

및 체고와 유사한 크기 범위에 있어, TS가 체장만으로 단순히 설명되기 어렵다. 이 조건에서는 자세각, 체형, 조직 밀도, 골격 구조 등 개체 간 형태·조직학적 차이가 산란 변동성에 크게 기여할 수 있다.

반면 200 kHz에서는 파장이 약 7.5 mm로 짧아져 체폭보다 훨씬 작아진다. 이 경우 음향 산란은 어체의 전체 크기 및 외부 형상과 더 밀접하게 관련될 수 있으며, 그 결과 체장과 TS 간의 관계가 상대적으로 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다. 다만  $R^2$ 가 0.53으로 나타난 것은 체장만으로 에메랄드돌치의 TS를 완전히 설명하기 어렵다는 것을 의미한다. 이는 부레가 없는 어종에서 산란이 단일한 강한 산란체에 의해 지배되기보다는, 근육, 골격, 두부, 이석 등 여러 약한 산란 요소의 복합적인 기여로 형성되기 때문으로 해석된다.

에메랄드돌치는 부레가 없는 어종이지만, 고주파수에서는 이석의 기여 가능성도 고려할 필요가 있다. Perciformes 어류의 이석 크기가 표준체장의 약 2~5% 수준이라는 보고를 본 연구 표본의 평균 표준체장(약 212 mm)에 적용하면, 이석 크기는 약 4~11 mm로 추정된다(Paxton, 2000). 이는 200 kHz의 파장(약 7.5 mm)과 유사한 크기 범위이다. 따라서 고주파수에서는 이석이 TS에 일부 기여했을 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서는 이석 크기를 직접 측정하거나 이석의 산란 기여도를 분리하여 분석하지 않았으므로, 이 해석은 가능성 수준에 머물러야 한다. 향후에는 이석 실측, 고분해능 CT 영상, 조직 음속 및 밀도 측정을 통해 고주파수 산란원의 기여도를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구에서 도출된 회귀식의  $R^2$ 가 전반적으로 0.30~0.53 수준에 머문 점은 결과 적용 시 중요한 제한점으로 고려되어야 한다. 표본 수가 제한적이고, 체장 범위가 상대적으로 좁으며, 실제 유영자세각 분포를 직접 측정하지 못한 점이 주요 불확실성으로 작용했을 가능성이 있다. 또한 밀도비와 음속비를 문헌값에 기반하여 적용하였기 때문에, 개체별 조직 물성 차이가 충분히 반영되지 않았을 수 있다. 특히 무부레어류에서는 부레어류와 달리 강한 공기 산란체가 존재하지 않으므로, 체장뿐만 아니라 체형, 조직 조성, 골격 발달 정도, 생리 상태 등이 TS 변동에 상대적으로 더 크게 작용할 수 있다.

따라서 에메랄드돌치의 음향 기반 자원량 추정에는 단일 TS 값을 일괄적으로 적용하기보다, 주파수, 체장 분포, 자세각 분포, 조사 해역 및 계절적 특성을 함께 고려해야 한다. 특히 38 kHz 기반 조사자료를 이용할 경우, 체장-TS 관계의 설명력이 상대적으로 낮고 자세각 및 개체별 형태 차이에 따른 변동성이 클 수 있으므로, 현장 트롤 샘플링을 통한 체장 조성 보정과 다중 주파수 자료의 병행 활용이 필요하다. 또한 지역 및 계절별 TS 변동성을 축적하여 장기적인 TS 데이터베이스를 구축한다면, 남극 저층어류의 음향 자원평가 정확도를 향상시키는 데 기여할 수 있을 것이다.

종합하면, 본 연구는 남극 로스해 연안의 무부레성 저층어류

인 에메랄드돌치에 대해 KRM 모델을 적용하여 38, 70, 120, 200 kHz에서의 TS 특성을 제시하였으며, 주파수 증가에 따라 자세각 민감도와 체장-TS 관계가 달라질 수 있음을 확인하였다. 특히 고주파수에서  $R^2$ 가 증가하는 경향은 에메랄드돌치의 산란 특성이 주파수에 따라 변화함을 시사한다. 이러한 결과는 향후 남극 연안 저층어류의 음향 탐지, 종 판별, 자원량 추정에 필요한 기초적인 음향학적 정보를 제공한다.

## 사 사

이 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과제번호: KIMST RS-2022- KS221661) 및 2026년도 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과제번호 KIMST, RS-2025-02307389/RS-2025-03329912)의 지원으로 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님과 편집위원님께 감사드립니다.

## References

- Clay CS and Horne JK. 1994. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*). J Acoust Soc Am 96, 1661-1668. <https://doi.org/10.1121/1.410245>.
- Dean MJ, Hoffman WS, Buchan NC, Cadrin SX and Grabowski JH. 2021. The influence of trawl efficiency assumptions on survey-based population metrics. ICES J Mar Sci 78, 2858-2874. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab164>.
- DeWitt HH, Heemstra PC and Gon O. 1990. Nototheniidae. In: Fishes of the Southern Ocean. Gon O and Heemstra PC, eds. JLB Smith Institute of Ichthyology, Grahamstown, South Africa, 279-331.
- 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>.
- Footo KG. 1987. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. J Acoust Soc Am 82, 981-987. <https://doi.org/10.1121/1.395298>.
- Gorska N, Ona E and Korneliussen R. 2005. Acoustic backscattering by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder. Backscattering by individual fish. ICES J Mar Sci 62, 984-995. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2005.03.010>.
- Henderson MJ and Horne JK. 2007. Comparison of in situ, ex situ, and backscatter model estimates of Pacific hake (*Merluccius productus*) target strength. Can J Fish Aquat Sci 64, 1781-1794. <https://doi.org/10.1139/f07-134>.
- Kaartvedt S, Staby A and Aksnes DL. 2012. Efficient trawl avoidance by mesopelagic fishes causes large underestimation of their biomass. Mar Ecol Prog Ser 456, 1-6. <https://doi.org/10.3354/meps09785>.
- Kawaguchi K, Ishikawa S, Matsuda O and Naito Y. 1989. Tag-

- ging experiment of nototheniid fish, *Trematomus bernacchii* Boulenger under the coastal fast ice in Lutzow-Holm Bay, Antarctica. In: Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Biology. National Institute of Polar Research, Tokyo, Japan, 111-116. <https://doi.org/10.15094/00005057>.
- Kim J, Kim S and Han H. 2022. Analysis of development characteristics of the Terra Nova Bay polynya in East Antarctica by using SAR and optical images. *Korean J Remote Sens* 38, 1245-1255. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2022.38.6.1.20>.
- La Mesa M, Vacchi M and Castelli A. 2004. Trophic ecology of the emerald notothen *Trematomus bernacchii*(pisces, nototheniidae) from Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica. *Polar Biology* 27, 721-728. <https://doi.org/10.1007/s00300-004-0645-x>.
- La Mesa M, Vacchi M, Arneri E, Giannetti G and Greco S. 1996. Age and growth of the nototheniid fish *Trematomus bernacchii* Boulenger from Terra Nova Bay, Antarctica. *Polar Biol* 16, 139-145. <https://doi.org/10.1007/BF02390434>.
- Ladino A, Pérez-Arjona I, Espinosa V, Chillarón M, Vidal V, Godinho LM, Moreno G and Boyra G. 2024. Role of material properties in acoustical target strength: insights from two species lacking a swimbladder. *Fish Res* 270, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106895>.
- Lee H, Yoon E, Lee S and Lee J. 2023. Acoustic characteristics of largehead airtail (*Trichiurus japonicus*) using multi-frequency detection in the Southern Sea, South Korea. *J Mar Sci Eng* 11, 1918. <https://doi.org/10.3390/jmse11101918>.
- Leonori I, Tičina V, Giannoulaki M, Hattab T, Iglesias M, Bonanno A, Costantini I, Canduci G, Machias A, Ventero A, Somarakis S, Tsagarakis K, Bogner D, Barra M, Basilone G, Genovese S, Juretić T, Gašparević D and De Felice A. 2021. History of hydroacoustic surveys of small pelagic fish species in the European Mediterranean Sea. *Mediterr Mar Sci* 22, 751-768. <https://doi.org/10.12681/mms.26001>.
- Li Z, Sun P, Xu S, Wang Y and Tian Y. 2025. Age and feeding habits of *Trematomus bernacchii* in the Ross Sea. *Fishes* 10, 58. <https://doi.org/10.3390/fishes10020058>.
- Love RH. 1971. Measurements of fish target strength: A review. *Fish Bull* 69, 703-715.
- Macauley GJ, Peña H, Fässler SM, Pedersen G and Ona E. 2013. Accuracy of the Kirchhoff-approximation and Kirchhoff-ray-mode fish swimbladder acoustic scattering models. *PLoS One* 8, e64055. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064055>.
- Nihashi S, Ohshima KI and Tamura T. 2017. Sea-ice production in Antarctic coastal polynyas estimated from AMSR2 data and its validation using AMSR-E and SSM/I-SSMIS data. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 10, 3912-3922. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2731995>.
- Paxton JR. 2000. Fish otoliths: Do sizes correlate with taxonomic group, habitat and/or luminescence? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 355, 1299-1303. <https://doi.org/10.1098/rstb.2000.0688>.
- Simmonds EJ and MacLennan DN. 2005. *Fisheries Acoustics: Theory and Practice*. 2nd ed. Blackwell Science, Oxford, U.K., 1-437. <https://doi.org/10.1002/9780470995303>.
- Sobradillo B, Boyra G, Pérez-Arjona I, Martínez U and Espinosa V. 2021. Ex situ and in situ target strength measurements of European anchovy in the Bay of Biscay. *ICES J Mar Sci* 78, 782-796. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa242>.
- Stevens JR, Jech JM, Zydlewski GB and Brady DC. 2021. Estimating target strength of estuarine pelagic fish assemblages using fisheries survey data. *J Acoust Soc Am* 150, 2553-2565. <https://doi.org/10.1121/10.0006449>.
- Vacchi M, Cattaneo-Vietti R, Chiantore M and Dalù M. 2000. Predator-prey relationship between the nototheniid fish *Trematomus bernacchii* and the Antarctic scallop *Adamussium colbecki* at Terra Nova Bay (Ross Sea). *Antarct Sci* 12, 64-68. <https://doi.org/10.1017/S0954102000000092>.
- Vacchi M, La Mesa M and Castelli A. 1994. Diet of two coastal nototheniid fish from Terra Nova Bay, Ross Sea. *Antarct Sci* 6, 61-65. <https://doi.org/10.1017/S0954102094000088>.
- Walsh SJ. 1996. Efficiency of bottom sampling trawls in deriving survey abundance indices. *NAFO Scientific Council Studies* 28, 9-24.
- 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>.