

남극 은암치(*Pleuragramma antarcticum*) 치어의 음향산란특성

이사라 · 오우석 · 나형술¹ · 손우주² · 김정훈³ · 이경훈^{4*}

전남대학교 수산과학과 학생, ¹한국해양과학기술원 극지연구소 해양연구본부 책임연구원,

²한국과학기술연합대학교대학원 극지과학과 학생 ³극지연구소 생명과학연구본부 연구원,

⁴전남대학교 해양생산관리학과 교수

Target strength of juvenile Antarctic silverfish (*Pleuragramma antarcticum*)

Sara LEE, Wooseok OH, Hyung Sul LA¹, Wuju SON², Jeong-Hoon KIM³ and Kyounghoon LEE^{4*}

Student, Division of Fisheries Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

¹Principal Research Scientist, Division of Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

²Student, Department of Polar Science, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

³Scientist, Division of Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

⁴Professor, Department of Marine Production Management, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

In this study, the target strength for multi-frequency (38 kHz, 120 kHz, 200 kHz) of juvenile silverfish (*Pleuragramma antarcticum*) was estimated using by the KRM (Kirchhoff-ray mode) model. The body shape of the silverfish was described by a picture and the body length of nine individuals ranged in 1.8 cm to 8.8 cm. The maximum TS_{cm} according to the total length for the constant term (b20) was -92.93 dB at 38 kHz, -86.63 dB at 120 kHz, and -85.89 dB at 200 kHz, respectively. The averaged TS_{cm} according to total length for the constant term (b20) was -100.0 dB at 38 kHz, -93.0 dB at 120 kHz, and -106.9 dB at 200 kHz, respectively.

Keywords: Antarctic silverfish, Juvenile fish, Target strength, Kirchhoff-ray mode model

서론

남극해는 세계에서 가장 생산성이 풍부한 해역으로 다양한 유기체가 서식하고 있으며, 남극에 서식하는 생물 자원은 무한한 생태적 가치와 과학적 중요성을 가지고 있다. 특히, 해양보호구역(Marine Protected Areas: MPAs)으로 지정된 남극 로스해는 남극에서 생산성이 가장 높고 다양한 해양생물이 서식하고 있는 해역으로

생태, 환경, 연구적인 측면에서 중요한 해역이다(Davis et al., 2017). 남극 은암치(*Pleuragramma antarcticum*)는 남극해에 널리 분포하고 있으며, 수가 많다. 또한, 고래, 물개, 펭귄과 같은 남극에 서식하는 대부분에 상위포식자의 먹이가 되며, 최하위 피식자인 남극 크릴을 먹이로 하여, 로스해 해역의 먹이사슬에서 상위 포식자와 크릴을 연결하는 중요한 역할을 한다(Vacchi et al., 2004; La

Received 27 October 2022; Revised 24 November 2022; Accepted 25 November 2022

*Corresponding author: khlee71@jnu.ac.kr, Tel: +82-61-659-7124, Fax: +82-61-659-7129

Copyright © 2022 The Korean Society of Fisheries and Ocean Technology

Mesa et al., 2010; Suttin and Horn, 2011). 따라서, 남극 로스해에 분포하는 펭귄과 크릴의 현존량과 관계가 높은 남극 은암치의 생물 분포를 파악하는 것은 중요하다.

생물의 밀도 및 분포를 파악하는 다양한 방법 중 수중 음향기법은 단기간에 넓은 해역을 파악할 수 있어 남극과 같이 제한된 시간동안 조사를 진행하는 지역에서 가장 효과적인 방법이다. 수중음향기법을 이용하여 대상 어류의 에코 신호를 추출하기 위해서는 대상 어류의 초음파산란강도(Target Strength, TS)를 파악하는 것이 중요하다. 어류의 TS를 측정하는 방법에서, 음향산란 모델을 이용하는 방법은 대상 어종의 형태학적 특성을 고려하여 크기, 유영 자세각, 부레의 크기, 사용 주파수 등 다양한 변수를 고려하여 TS를 측정한다. 음향산란이론 모델 가운데 KRM (Kirchhoff-ray mode) 모델은 어체와 부레를 실린더 형태로 근사한 부피의 합으로 계산하여 TS를 측정한다. 이 이론모델은 목표종을 해부학적으로 분리하여 초음파산란강도를 추정하는 방법으로 일반적으로 생물의 형태만을 이용하여 추정하는 방법보다 정교하게 값을 추정할 수 있다(Park et al., 2022). 남극 은암치 치어와 아이스 크릴(*E.crystallorophias*)은 서식하는 장소와 TS가 유사하여 에코 신호를 분리하는 것이 쉽지 않으므로 정확한 자원량 추정을 위해서는 정교한 초음파산란강도 파악이 필수적이다.

본 연구에서는 음향산란이론모델을 이용하여 남극 로스해에 서식하는 남극 은암치 치어의 체장에 따른 음향산란특성을 규명함으로써 남극 은암치 치어에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

남극 은암치 표본

본 연구에서 사용된 남극 은암치 표본은 남극 로스해 해역에서 Framed Midwater Trawl (FMT, net mouse area 4 m² and mesh size 4 mm)를 이용하여 2019년도에 채집하였다. 채집된 표본은 해수와 함께 -80°C에서 급속 냉동시키고 아이스박스를 이용하여 옮겼으며, 모델에 사용된 개체는 총 9 개체로 체장 1.8 ~ 8.8 cm이었고, 체고 0.2 ~ 1.5 cm, 체폭 0.1 ~ 1.0 cm이었다(Table 1).

KRM모델을 이용하여 추정한 남극 은암치의 초음파산란강도

KRM (Kirchhoff-ray mode)모델을 이용하여 남극 로

Table 1. Measured scale of silverfish

No.	Total length (cm)	Body height (cm)	Body width (cm)
1	6.0	0.8	0.5
2	5.5	0.7	0.4
3	6.0	0.7	0.5
4	5.5	1.0	0.5
5	6.1	0.8	0.7
6	1.8	0.2	0.1
7	8.8	1.5	1.0
8	7.0	1.2	0.7
9	4.6	0.7	0.3
Avg.	5.7	0.8	0.5

스해에 서식하는 남극 은암치의 TS를 계산했다. KRM 모델은 어체의 형태를 파악하여 이를 수치화하여 초음파산란강도를 계산한다(Foote, 1988).

$$\mathcal{L}_{body} = f(f_r, \theta_{tilt}, S_b, \rho_w, \rho_b, c_w, c_b) \quad (1)$$

$$TS = 10 \log_{10} |\mathcal{L}|^2 \quad (2)$$

여기서, f_r 은 주파수, θ_{tilt} 는 체축과 입사각 사이의 각도, S_b 는 원뿔형으로 근사한 어체의 체형, ρ_w 는 매질 (해수)의 밀도, ρ_b 는 어체의 밀도, c_w 는 매질 (해수)의 음속, c_b 는 어체의 음속을 의미한다.

KRM 모델을 이용한 TS는 자세각을 -45 ~ 45°까지 1° 간격으로 계산하였다. 또한, TS는 최대값과 평균값을 평가하였으며, 평균값은 다음 식 (3)과 (4)에 나타난 바와 남극 은암치의 평균 자세각과 표준편차를 각각 0°, 15°로 가정하여 확률밀도함수(Probability density function: PDF)로 구하고(Azzali et al., 2010), 1°마다 계산된 각 자세각의 TS는 산란단면적으로 바꾸어 자세각 0±15°의 확률밀도함수와 각각을 곱한 후 그 합으로 평균 TS를 계산하였다(Hwang et al., 2012).

$$\sigma_{bs} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sigma(\theta) f(\theta) d\theta \quad (3)$$

$$TS_{avg} = 10 \log_{10} \sigma_{avg} \quad (4)$$

여기서, $\sigma(\theta)$ 는 각 유영자세각별 θ 에서 후방산란단면적, $f(\theta)$ 는 각 유영자세각별의 출현빈도를 말한다. 또한, 남극 은암치에 TS 관계식은 다음 식 (5)로 표현할

수 있다. 식 (6)은 반사강도가 체장의 2승에 비례한다고 가정한 식을 나타낸다.

$$TS = a \log_{10} L + b \quad (5)$$

여기서, a 는 기울기, b 는 절편, L 은 체장(cm)을 말한다.

$$TS = 20 \log_{10} L + TS_{cm} \quad (6)$$

KRM 모델은 어체와 부레를 근사한 부피의 합으로 계산하여 초음파산란강도를 추정하는 모델이지만, 남극 은암치에 경우 부레가 없는 무표어 어종이기 때문에 모델에 적용할 때 부레에 대한 수식은 제거하였다(Vacchi et al., 2012). 대상 생물의 밀도비, 음속비가 필요하기 때문에 본 논문에서는 선행 연구 결과를 이용하여 밀도비와 음속비를 각각 1.018, 1.017를 적용하였다(Chu and Wiebe, 2005).

KRM 모델을 이용하기 위해서는 윤곽데이터가 필요하기 때문에 은암치를 가지런히 정렬하여 사진을 촬영하였다(Fig. 1). 촬영된 샘플사진은 디지털타이징 소프트웨어 프로그램(Getdata Ver. 2.26, Fedorov Software Co. Germany)을 이용하여 어체의 측면을 0.2 mm 간격으로 나누어 체형 좌표 정보를 수집하고, KRM 모델에 적용하였다.



Fig. 1. Example of silverfish sample (No. 3).

결과 및 고찰

유영자세각에 따른 남극 은암치의 초음파산란강도

남극 은암치의 유영자세각[-45° ~ +45°] 변화에 따른 유영자세각과 초음파산란강도의 관계는 9마리의 남극 은암치를 대상으로 분석하였다. 남극 은암치의 유영자세각은 수평일 때 0°이고, 머리가 아래 방향(Head-down)일 때 마이너스(-)를 나타내고, 머리가 위 방향(Head-up)일 때 플러스(+)를 나타낸다.

사용된 표본 가운데 어체 크기가 가장 큰 8.8 cm인 남극 은암치의 유영자세각에 따른 TS 값은 38 kHz에서 -94.8 ~ -68.5 dB로 나타났다. 38 kHz에서 남극 은암치

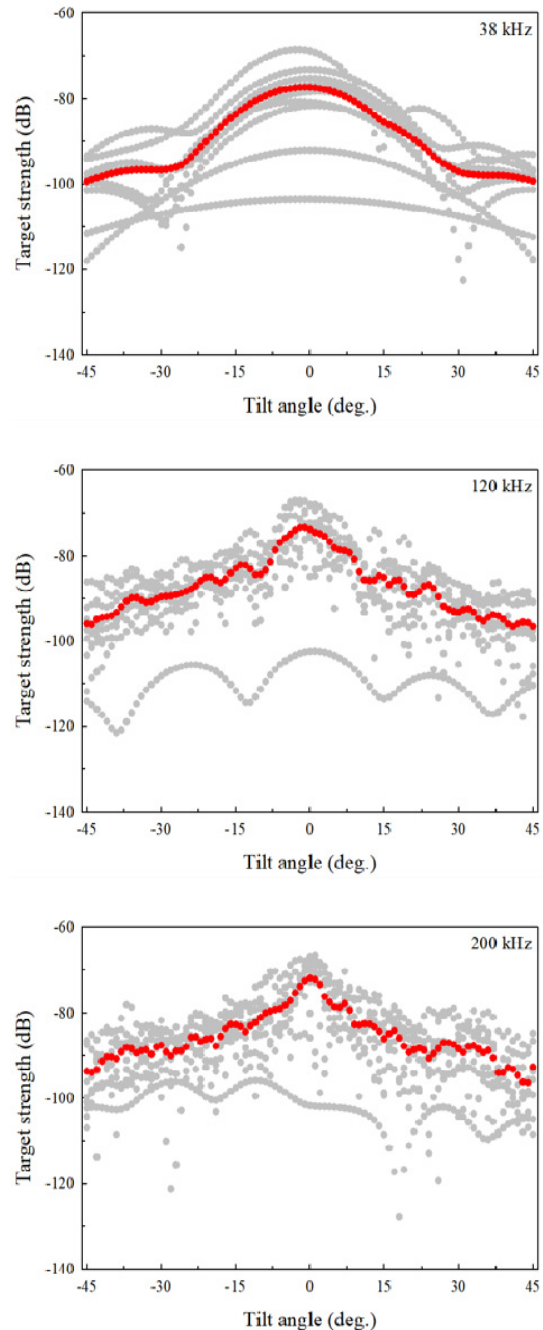


Fig. 2. Target strength patterns of juvenile silverfish by average tilt angle at frequency 38, 120, 200 kHz.

의 유영자세각이 36°일 때 -94.8 dB로 가장 낮은 값을 나타냈고, 남극 은암치의 유영자세각이 -3°일 때 -68.5 dB로 최대값을 나타냈다. 120 kHz에서 남극 은암치의 유영자세각에 따른 TS 값은 -100.5 ~ -67.1 dB의 범위를 나타냈으며, 38 kHz와 동일하게 남극 은암치의 유영자

세각이 -3° 일 때 -67.1 dB로 가장 높았다. 200 kHz에서 유영자세각에 따른 TS 값은 $-113.0 \sim -67.6$ dB로 나타났고, 남극 은암치의 유영자세각이 1° 일 때 -67.6 dB로 가장 높았다.

어체 크기가 제일 작은 1.8 cm인 남극 은암치의 유영자세각에 따른 TS 값은 38 kHz에서 $-112.4 \sim -103.5$ dB로 나타났으며, 남극 은암치의 유영자세각이 -1° 일 때 -103.5 dB로 가장 높았다. 120 kHz에서 남극 은암치의 유영자세각에 따른 TS 값은 $-121.4 \sim -102.4$ dB로 나타났으며, 유영자세각이 1° 일 때 -102.4 dB로 가장 높았다. 200 kHz에서 남극 은암치의 유영자세각에 따른 TS 범위는 $-127.7 \sim -95.8$ dB로 나타났고, 유영자세각이 -11° 일 때 -95.8 dB로 가장 높은 값을 나타냈다.

유영자세각에 따른 남극 은암치의 평균 TS는 38 kHz에서 $-99.3 \sim -77.3$ dB, 120 kHz에서 $-96.5 \sim -73.3$ dB, 200 kHz에서 $-96.3 \sim -71.9$ dB의 범위로 나타났다(Fig. 2). 남극 은암치의 TS 값은 유영자세각이 0° 에 가깝고, 고주파일수록 높은 경향을 나타냈다.

남극 은암치 치어 체형에 따른 초음파산란강도

남극 은암치 치어의 자세각 $[-45 \sim +45^\circ]$ 변화에 따른 유영음향산란이론모델을 이용하여 산정한 남극 은암치 치어의 체형에 따른 최대 TS는 자세각 $-45 \sim +45^\circ$ 사이에서 가장 높은 값을 나타냈고, 평균 TS는 자세각 $0 \pm 15^\circ$ 를 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)로 계산하여 나타내었다(Hwang et al., 2012). 남극 은암치 치어의 체형과 최대 TS의 관계식은 38 kHz에서 $TS = 52.136 \log_{10} TL - 119.00$, 120 kHz에서 $TS = 52.103 \log_{10} TL - 112.67$, 200 kHz에서 $TS = 46.32 \log_{10} TL - 107.24$ 으로 나타났으며, 체형과 평균 TS의 관계식은 38 kHz에서 $TS = 47.742 \log_{10} TL - 118.44$, 120 kHz에서 $TS = 47.651 \log_{10} TL - 115.43$, 200 kHz에서 $TS = 41.379 \log_{10} TL - 110.21$ 로 나타났다(Table. 2). 주파수별 TS를 체장의 2승에 비례하여 계산한 기준화 TS의 최대 TS 값은 38 kHz에서 -92.93 dB, 120 kHz에서 -86.63 dB, 200 kHz에서 -85.89 dB로 나타났다. 남극 은암치 치어의 기준화 평균 TS는 38 kHz에서 -100.00 dB, 120 kHz에서 -93.00 dB, 200 kHz에서 -106.90 dB로 나타났다(Fig. 3~5).

본 연구와 같이 남극 은암치를 대상으로 초음파산란강도를 측정하는 Azzali et al. (2010)의 선행연구에서는

Table 3. TS of Juvenile silverfish at frequency 38, 120, 200 kHz

Target strength	Frequency (kHz)	$TS = a \log_{10} TL - b$			b20
		a	b	R2	
TSmax.	38	52.136	119.00	0.891	-92.93
	120	52.103	112.67	0.841	-86.63
	200	46.32	107.24	0.829	-85.89
TSavg.	38	47.742	118.44	0.884	100.00
	120	47.651	115.43	0.866	-93.00
	200	41.379	110.21	0.876	-106.90

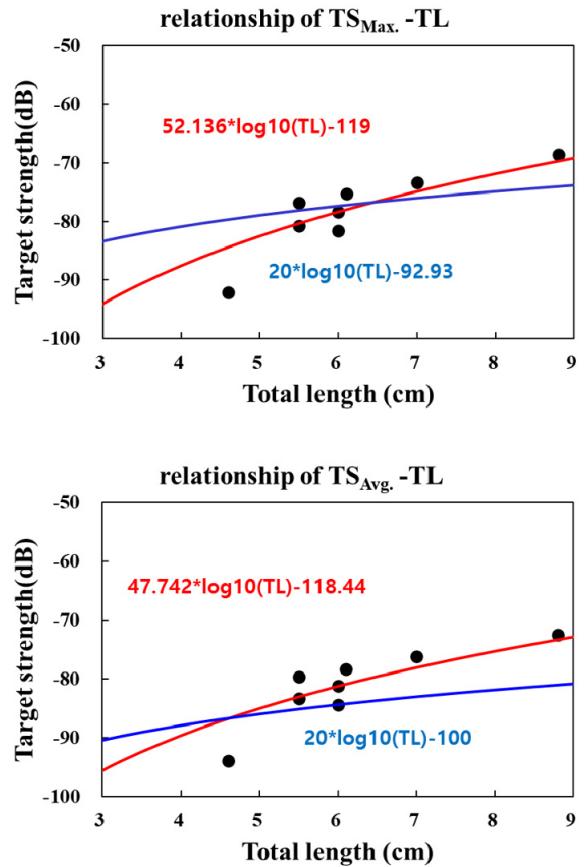


Fig. 3. TS of Juvenile silverfish according to the total length; 38 kHz.

남극 은암치를 체장에 따라 성어와 자치어로 나누어 음향산란특성을 추정하였으나, 본 연구에서는 자치어를 대상으로 초음파산란강도를 측정하였기 때문에 자치어에 대한 음향산란특성만을 비교하였다. Azzali et al. (2010)의 연구에서는 형태학적 특성에 기초한 일반적인 모델 방법을 이용하여 남극 은암치의 초음파산란강도를 측정하

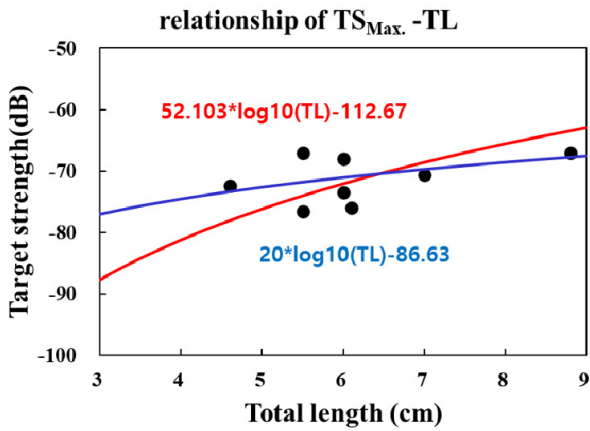


Fig. 4. TS of Juvenile silverfish according to the total length; 120 kHz.

였으며, 각 주파수별 남극 은암치 크기와 평균 TS의 관계식은 38 kHz에서 $TS = 57.58 \log_{10} TL - 123.77$, 120 kHz에서 $TS = 51.94 \log_{10} TL - 105.92$, 200 kHz에서 $TS = 46.6 \log_{10} TL - 95.29$ 으로 나타내었다. O'Driscoll et al. (2011)의 연구에서도 Azzali et al. (2010)과 같은 모델을 이용하여 남극은암치의 초음파산란강도를 측정하였으며, 38 kHz에 대한 남극 은암치의 초음파산란강도는 $TS = 146.8 \log_{10} TL - 216$ 으로 나타내었다. 본 연구와 선행연구에서 나타난 관계식을 통해 나타난 38 kHz에 대한 TS를 다음과 같이 비교하였다(Fig. 6).

본 연구와 선행연구를 비교하였을 때, 남극 은암치의 체장이 작을수록 선행연구와 큰 차이를 나타내었으며, 체장이 클수록 선행연구와 유사한 TS 값을 나타내었다. 체장이 작은 개체일수록 밀도비와 음속비, 유영 자세각

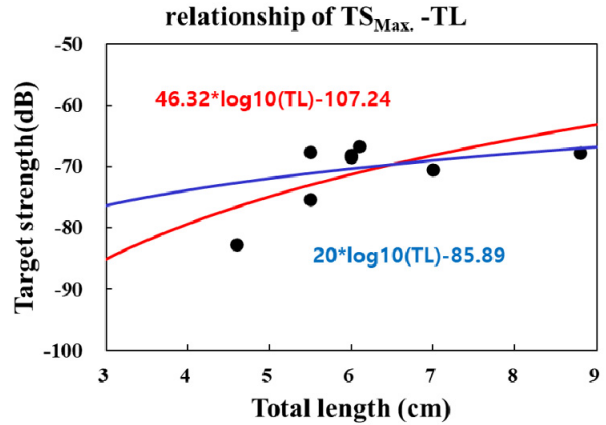


Fig. 5. TS of Juvenile silverfish according to the total length; 200 kHz.

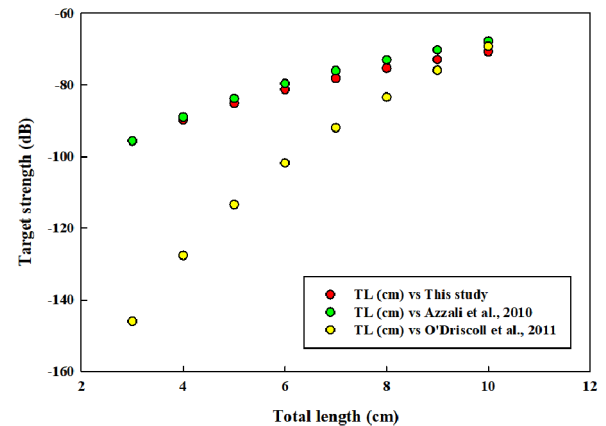
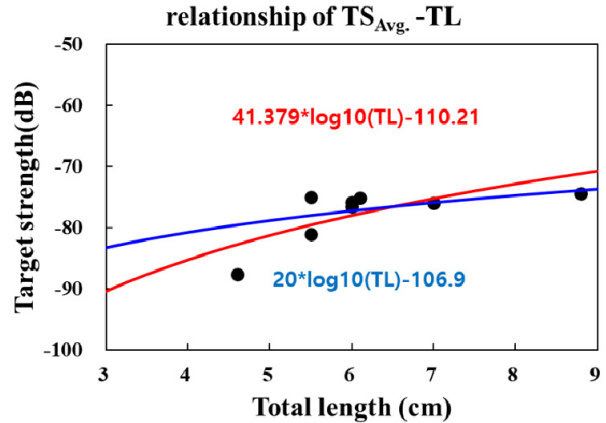
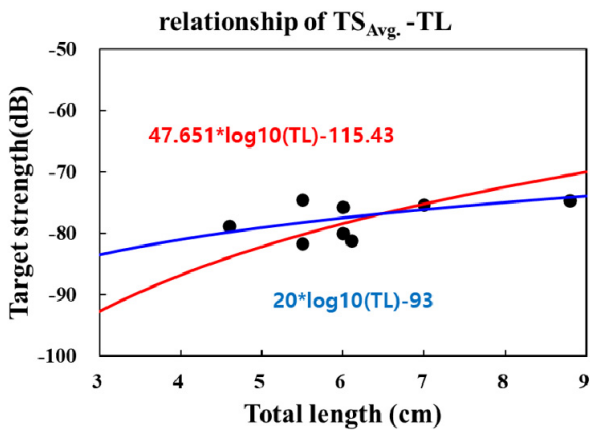


Fig. 6. Comparison of the relationship between target strength and total length with juvenile silverfish from this studies.

과 같은 임피던스에 크게 영향을 받기 때문에 TS 결과 값의 차이가 크게 나타난 것으로 판단된다.

주파수가 높아짐에 따라 Azzali et al. (2010)의 선행연구 결과 값과 차이를 나타내었는데, 이러한 이유는 선행연구에서 남극 은암치의 체형을 체고를 기준으로 구의 모양으로 묘사하였고, 본 연구에서는 남극 은암치의 체형을 체고, 체폭에 대한 실린더 형태로 정교하게 묘사하였기 때문에 음향산란단면적의 차이로 인한 것으로 판단된다. 또한, 선행연구는 어체와 골격을 나누어 초음파 산란강도를 계산하였기 때문에 본 연구 결과와 차이를 보이는 것으로 추정된다. 선행연구와 본 연구 모두 주파수가 증가함에 따라 초음파 산란강도가 증가하였으며, 이러한 이유는 부레가 없는 어종의 특징이라 판단된다 (Zhu et al., 2022).

결론

남극 은암치는 남극 로스해 해역의 먹이사슬에서 상위포식자와 최하위 피식자를 연결하는 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 음향산란이론 모델을 이용하여 남극 은암치의 음향산란특성을 추정하였다.

남극 은암치 치어의 체형과 최대 TS의 관계식은 38 kHz에서 $TS = 52.136 \log_{10} TL - 119.00$, 120 kHz에서 $TS = 52.103 \log_{10} TL - 112.67$, 200 kHz에서 $TS = 46.32 \log_{10} TL - 107.24$ 으로 나타났으며, 체형과 평균 TS의 관계식은 38 kHz에서 $TS = 47.742 \log_{10} TL - 118.44$, 120 kHz에서 $TS = 47.651 \log_{10} TL - 115.43$, 200 kHz에서 $TS = 41.379 \log_{10} TL - 110.21$ 로 나타났다. 주파수별 TS를 체장의 2승에 비례하여 계산한 기준화 TS의 최대 TS 값은 38 kHz에서 -92.93 dB, 120 kHz에서 -86.63 dB, 200 kHz에서 -85.89 dB로 나타났다. 남극 은암치 치어의 기준화 평균 TS는 38 kHz에서 -100.00 dB, 120 kHz에서 -93.00 dB, 200 kHz에서 -106.90 dB로 나타났다.

본 연구에서는 남극 은암치 치어를 대상으로 음향산란특성을 추정하였다. 남극 은암치는 성장하는 과정에서 매질이 달라지는 것으로 알려져 있으며, 치어와 성어의 초음파 산란강도가 크게 차이가 나타난다(La Mesa and Eastman, 2012). 따라서, 다양한 크기의 남극 은암치를 대상으로 연구가 수행되어야 한다. 남극 은암치는 치어기에 아이스 크릴과 서식 수심이 같고 TS가 유사하여 에코 신호와 혼재될 수 있기 때문에 남극 은암치의

에코신호 식별을 위해서는 정확한 TS를 파악하는 것이 중요하다. 정밀하게 TS를 측정하기 위해서는 TS에 크게 영향을 주는 남극 은암치의 밀도비와 음속비 그리고 유영자세각에 대한 정확한 정보가 중요하다. 하지만 관련 연구가 부족한 실정으로, 남극 은암치에 대한 에코신호를 정교하게 분리하기 위해서는 남극 은암치의 밀도비와 음속비 그리고 유영자세각에 대한 연구가 필수적으로 진행되어야 한다.

사사

이 연구는 해양수산부의 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 : KIMST 20220547). 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다

References

- Azzali M, Leonori I, Biagiotti I, De Felice A, Angiolillo M, Bottaro M and Vacchi M. 2010. Target strength studies on Antarctic silverfish (*Pleuragramma antarcticum*) in the Ross Sea. CCAMLR Science 17, 75-104.
- Chu D and Wiebe PH. 2005. Measurements of sound-speed and density contrasts of zooplankton in Antarctic waters. ICES Journal of Marine Science 62, 818-831. <https://doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.12.020>.
- Davis LB, Hofmann EE, Klinck JM, Piñones A and Dinniman MS. 2017. Distributions of krill and Antarctic silverfish and correlations with environmental variables in the western Ross Sea, Antarctica. Marine Ecology Progress Series 584, 45-65. <https://doi.org/10.3354/meps12347>.
- Foote KG and Traynor JJ. 1988. Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from insitu measurements and calculations based on swimbladder form. The Journal of the Acoustical Society of America 83, 9-17. <https://doi.org/10.1121/1.396190>.
- Hwang KS, Lee KH and Hwang BK. 2012. Verification and application of Target Strength for Japanese anchovy (*Engraulis japonicas*) by theoretical acoustic scattering model. Korean Soc Fish Ocean Technol 48, 487-494. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.4.487>.
- La Mesa M and Eastman JT. 2012. Antarctic silverfish: life strategies of a key species in the high-Antarctic ecosystem. Fish and Fisheries 13, 241-266. <https://doi.org/10.1111/>

j.1467-2979.2011.00427.x.

- La Mesa M, Catalano B, Russo A, Greco S, Vacchi M and Azzali M. 2010. Influence of environmental conditions on spatial distribution and abundance of early life stages of Antarctic silverfish, *Pleuragramma antarcticum* (*Nototheniidae*), in the Ross Sea. *Antarctic Science* 22, 243-254. <https://doi.org/10.1017/S0954102009990721>.
- O'Driscoll RL, Macaulay GJ, Gauthier S, Pinkerton M and Hanchet S. 2011. Distribution, abundance and acoustic properties of Antarctic silverfish (*Pleuragramma antarcticum*) in the Ross Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 58, 181-195. <https://doi.org/10.1017/S0954102009990721>.
- Park GC, Oh WS, Oh SY and Lee KH. 2022. Acoustic scattering characteristics of chub mackerel (*Scomber japonicus*) by KRM model. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 58, 32-38. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.1.032>.
- Sutton CP and Horn PL. 2011. A preliminary assessment of age and growth of Antarctic silverfish. *CCAMLR Science* 18, 75-86.
- Vacchi M, DeVries AL, Evans, CW, Bottaro M, Ghigliotti L, Cutroneo L and Pisano E. 2012. A nursery area for the Antarctic silverfish *Pleuragramma antarcticum* at Terra Nova Bay (Ross Sea): first estimate of distribution and abundance of eggs and larvae under the seasonal sea-ice. *Polar biology* 35, 1573-1585. <https://doi.org/10.1007/s00300-012-1199-y>.
- Vacchi M, La Mesa M, Dalu M, and MacDonald J. 2004. Early life stages in the life cycle of Antarctic silverfish, *Pleuragramma antarcticum* in Terra Nova Bay, Ross Sea. *Antarctic Science* 16, 299-305. <https://doi.org/10.1017/S0954102004002135>.
- Zhu Y, Mizutani K, Minami K, Shirakawa H, Kawauchi Y, Shao H and Miyashita K. 2022. Target Strength Measurements of Free-Swimming Sandeel Species, *Ammodytes* spp., in a Large Indoor Experimental Aquarium. *Journal of Marine Science and Engineering* 10, 966. <https://doi.org/10.3390/jmse10070966>.