

음향기법을 이용한 해저 저질 특성과 먹이생물 분포 평가

이사라 · 송세현¹ · 오우석² · 이창근³ · 김종성⁴ · 이경훈^{5*}

국립부경대학교 해양생산관리학부 수산물리학전공, ¹국립수산과학원 수산자원연구부 연근해자원과, ²국립부경대학교 저탄소해양생산기술연구소, ³서울대학교 지구환경과학부, ⁴서울대학교 지구환경과학부, ⁵국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

Assessment of Seabed Sediment Characteristics and Prey Organism Distribution Using a Hydroacoustic Survey

Sara Lee, Se-Hyun Song¹, Wooseok Oh², Chang Keun Lee³, Jong Seong Khim⁴ and Kyounghoon Lee^{5*}

Department of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

²Institute of Low-Carbon Marine Production Technology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

³School of Earth and Environmental Sciences, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

⁴School of Earth and Environmental Sciences, Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea

⁵Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

In this study, we assessed the volume backscattering strength (S_v) of seabed sediments using a scientific echo sounder. The characteristics of the seabed sediments were determined using a sediment core sampler. Additionally, the S_v and nautical area scattering coefficient (NASC) values for prey organisms were measured within the seabed sediments using the scientific echo sounder. Grain size analysis showed that the sediments in the surveyed area were mostly composed of sand and clay, and the NASC values for fish and zooplankton were relatively high in sediments composed of clay and silt.

Keywords: Hydroacoustic survey, Seabed sediment, Volume backscattering strength (S_v)

서론

음향기법은 다른 방법에 비하여 넓은 해역에 걸쳐 해양 생태계의 다양한 정보를 수집할 수 있으며, 이는 음향기법이 단순히 해양생물의 분포와 행동을 연구하는 데 국한되지 않고, 해양환경의 다양한 물리적 및 생물학적 특성을 분석하는데도 유용하게 적용될 수 있음을 시사한다(Shabangu et al., 2014; Hilgert et al., 2019; Bulut and Ergin, 2023). 해양환경의 물리적 특성 가운데 해저 저질은 해양 생태계의 기초를 형성하며, 저서 생물의 서식지와 먹이생물의 분포를 이해하는 데 중요한 역할을 한다. 해저저질의 구성, 밀도, 입자 크기 등은 저서 생물의 분포와 다양성에 직접적인 영향을 미치므로, 이러한 특성을 정확하게 파악하는 것은 해양 생태계의 건강 상태와 기능을 이해하는 데 필

수적이다(Wu et al., 1994; Dalley et al., 2017). 일반적으로 해저 저질의 특성을 파악하기 위해서는 저질 코어 채집기 또는 그랩을 이용하며(Campbel et al., 2010; Xie et al., 2023), 이러한 방법들은 다양한 정보를 수집할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 이러한 방법들은 많은 시간과 비용이 소비되며, 제한된 해역에 대한 정보를 제공한다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위한 방법 중 하나로 수중음향을 이용한 방법이 있다. 수중음향을 이용하여 해저 저질을 파악한다면 기존의 방법에 비해 인력과 시간의 소요가 적고 퇴적물의 인공적인 변형없이 저질을 파악할 수 있다는 장점이 있다(Anderson et al., 2013). 또한, 음향분석을 통해 해저 저질 파악과 동시에 해양생태계에 중요한 먹이생물의 분포도 파악할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 현재까지 음향기법은 해양 생물의 분포와 행동을 연구하는 데 주로 사용되

*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.2024.0575>

Korean J Fish Aquat Sci 57(5), 575-580, October 2024

Received 10 July 2024; Revised 3 August 2024; Accepted 4 September 2024

저자 직위: 이사라(대학원생), 송세현(연구사), 오우석(전임연구원), 이창근(교수), 김종성(교수), 이경훈(교수)

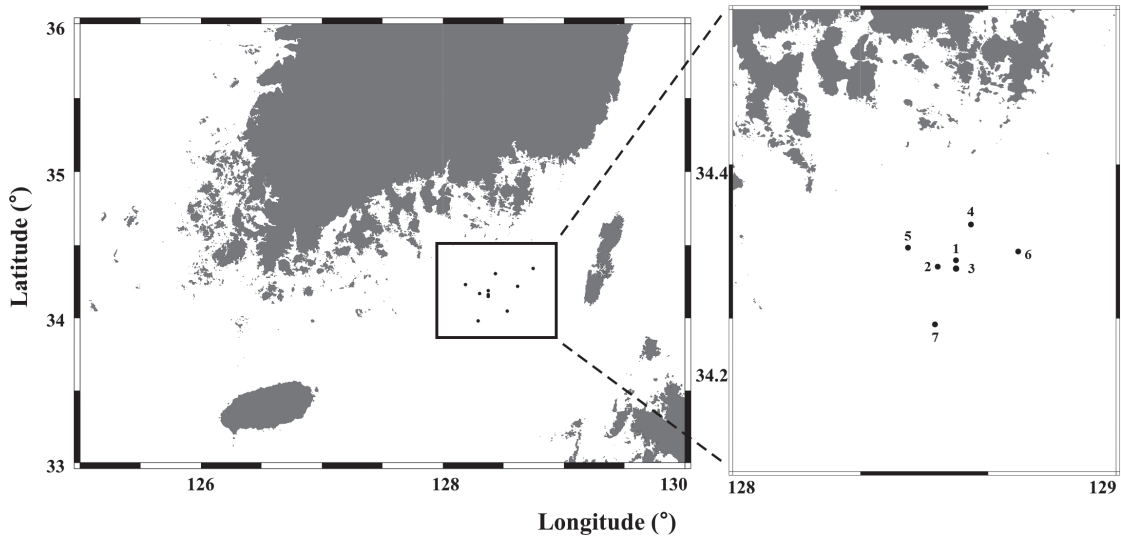


Fig. 1. Acoustic survey line and survey area.

어 왔으나, 해양환경의 물리적 특성을 분석하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 남해 인근 해역에서 수집된 음향 자료를 대상으로 해저저질의 반사강도를 파악하였으며, 이를 통해 해저저질의 특성을 분석하고 먹이사슬의 분포를 추정하였다.

재료 및 방법

조사해역 및 조사방법

음향조사는 2020년 5월 남해해역에서 EK80 과학어군탐지기를 이용하여 수행되었다. 조사해역은 거제 인근 해역으로 사퇴(sandridge) 및 고하천(paleochannel)이 발달된 해역이다(Fig. 1). 조사에 사용된 음향 시스템은 split beam 방식의 EK80 과학어군탐지기(Simrad, Kongsberg, Norway)이며, 주파수 18, 38, 70, 120, 200, 333 kHz에 대한 음향자료를 수집하였다. 음향자료는 선속 7-10 knots를 유지하면서 수집하였다. DGPS 수신기로부터 연속적으로 위치 정보를 수신하여 음향자료와 함께 수록하였다.

퇴적물 채취 및 입도분석

퇴적물 채취는 2020년 5월 남해해역의 7개 정점에서 수행되었다. 조사 해역의 퇴적물 분석을 위한 퇴적물 시료는 코어를 이용하여 채취하였다. 입도분석은 공정시험기준에 따라 이루어졌다. 퇴적물 20-30 g을 500 mL 비커에 담아 10% 과산화수소(H₂O₂)로 유기물을 제거하고, 1 L 매스실린더에 40 표준체를 이용하여 조립질과 세립질로 구분하며 패각을 제거하였다. 또한, 40 이하 조립질 퇴적물은 건조시켜 표준체를 이용하여 크기별로 분리하여 무게를 측정하였고, 40 이상 세립질 퇴적물은 피펫팅방법을 사용하여 무게를 측정하여 등급별 무게 백분율을

구하였다. 평균 입도(mean grain size)는 Folk and Ward (1957) 그래프 방법에 따라 아래 식 1을 이용하여 계산하였다. 입장 직경에 대한 단위는 phi($\phi = -\log_2(\text{Size in mm})$)이다(식 1).

$$M_z = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})/3 \dots\dots\dots (1)$$

음향자료 잡음 제거

현장에서 수집된 음향데이터는 음향분석 소프트웨어(Echoview V 8.0; Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia)를 이용하여 분석하였다. 수집된 음향자료에는 수심이 깊어짐에 따라 배경 잡음(background noise)이 발생하였으며, 선박 장비 등으로 인한 임펄스 잡음(impulse noise)이 포함되었다. 배경 잡음을 제거하기 위하여 TVT (time varied threshold)방법을 적용하였다(De Robertis and Higginbottom, 2007). 이것은 인위적으로 배경 잡음을 만든 후에 raw data 자료에서 인위적으로 만든 잡음을 다시 감하였을 때 SNR (signal to ratio) 값이 역치값보다 큰 경우 제거되는 방법이다(식 2). 여기서 i는 수직 샘플 번호를, j는 평 번호를 의미한다.

$$SNR(i,j) = S_{v,corr}(i,j) - S_{v,noise}(i,j) \dots\dots\dots (2)$$

if $SNR(i,j) \leq Threshold_{SNR}$

임펄스 잡음은 먼저 해수면과 해저면에서 데이터 처리 제외선을 설정하여 잡음 소거 알고리즘의 데이터 처리 과정에서 불필요한 부분을 제외한다. 본 연구에서는 잡음을 제거하기 위한 역치 값(δ)을 -170 dB로 설정하였고, 잡음의 후보로 판단된 값은 Ryan et al. (2005)의 two-sided comparison method를 이용하여 잡음 또는 생물 신호로 판별했다. Two-sided comparison method는 데이터 샘플 a, b, c가 있다고 할 때, 샘플 b를 정의하

기 위해서 양 옆 데이터 샘플인 a와 c를 b와 비교하는 방법이다 (식 3). 배경 잡음과 임펄스 잡음을 제거하기 위한 파라미터는 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

$$S_{v_{ij}} - \widetilde{S_{v_{m,n}}} > \delta \text{ and } S_{v_{ij}} - \widetilde{S_{v_{m,n}}} > \delta \dots\dots\dots (3)$$

어류와 동물플랑크톤의 식별

동물플랑크톤과 어류의 신호를 분리하기 위해서는 먼저, 동물플랑크톤과 어류의 주파수 38과 120 kHz에 대한 주파수 특성 및 차이를 파악하여야 한다. 여기서, 주파수 차이는 다중 주파수에서 평균 체적후방산란강도(mean volume backscattering strength, MVBS)의 차이를 나타내는 것으로 ΔMVBS는 양의 값을 두기 위하여 분리하고자 하는 대상 중의 주파수별 음향산란강도(target strength, TS)를 비교하여 TS가 큰 값의 주파수에서 작은 값의 주파수를 감하면 된다. 일반적으로 어류는 주파수 120 kHz보다 38 kHz에서 높게 나타난다. 따라서, 행렬로 만들어진 38 kHz, 120 kHz의 새로운 에코그램에서 ΔMVBS는 다음 식(4)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta MVBS &= TS(38 \text{ kHz}) - TS(120 \text{ kHz}) \dots\dots\dots (4) \\ &= SV(38 \text{ kHz}) - SV(120 \text{ kHz}) \end{aligned}$$

본 연구에서는 이전의 연구결과를 고려하여 동물플랑크톤과 어류는 2 dB를 기준으로 하여 >2 dB은 동물플랑크톤, <2 dB은 어류로 주파수 차이 범위를 정하였다(Kang et al., 2002, 2003;

Kim et al., 2016). 이 방법으로 추출된 어류와 동물플랑크톤의 밀도는 주파수 120 kHz의 탐지거리를 고려하여 표층부터 수심 250 m까지 1 n.mile의 EDSU (elementary distance sampling unit) 간격으로 적분하고, NASC (nautical area scattering coefficient) 값으로 나타내었다.

해저반사강도

해저반사강도는 다음과 같은 식(5)를 통하여 분석되었다.

$$S_v = \frac{\sum_s^{inA} \epsilon_s \tau_s S_{vs}}{\sum_s^{inA} \epsilon_s} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 Sv는 모든 샘플의 선형평균 Sv_mean를 의미한다. A는 분석영역 내에 샘플집합을 의미하며, Svs는 샘플 s의 선형 Sv 값을 의미한다. 이 수식을 통해 각 샘플이 분석 영역에 포함되는지와 최소 임계값 이상인지를 고려하여 평균화하였다. 영역은 해저면 아래의 1 m, 수평으로 100 m 구간으로 설정하였다.

결 과

퇴적물 채취 결과 및 해저반사강도

채취된 시료에 분석결과, 니사질(muddy sand), 니질(mud), 함력니질사(slightly gravelly muddy sand), 사질(sand)의 4개의 퇴적상이 나타났고, 니사질이 가장 우세했다(Fig. 2). 대부분의 정점에서 모래의 비율이 70% 이상인 것으로 나타났으나, 정점 4와 정점 5에서는 실트와 점토의 비율이 더 높은 것으로 나타

Table 1. Parameters to remove background noise

Frequency	38 kHz	120 kHz
Horizontal extent (ping)	20	20
Vertical units	Samples	Samples
Vertical extent (samples)	5	5
Vertical overlap (%)	0	0
Maximum noise (dB)	-125	-120
Minimum signal-to-noise ratio (SNR)	10	10

Table 2. Parameters to remove impulse noise

Parameters	Values
Exclude above	Surface
Exclude below	Bottom
Exclude below threshold (dB at 1 m)	-170
Vertical window units	Samples
Vertical window size (samples)	5
Horizontal size (pings)	5
Threshold (dB)	10
Noise sample replacement value	Mean

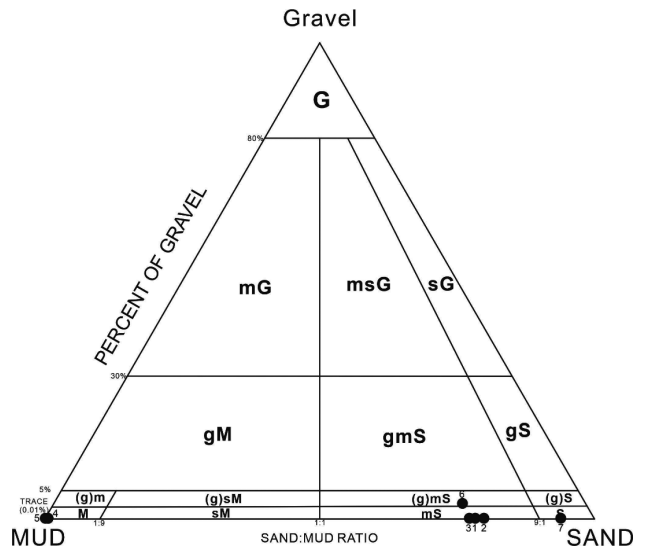


Fig. 2. The triangular diagram showing the major sediment types of surface sediment around the survey area in southern sea of Korea. M, Mud; m, Muddy; S, Sand; s, Sandy; G, Gravel; g, Gravelly; (g), Slightly gravelly.

났다. 모래의 비율이 높은 정점에서 S_{v_mean} 의 구간은 -4.3 ~ -13.5 dB으로 나타났고, 실트와 점토의 함유 비율이 높은 정점에서 S_{v_mean} 값은 약 -21.4 dB으로 나타났다. 저질과 모래의 함유비율이 높은 해역에서는 높은 반사 강도를 나타내었고, 실트와 점토 비율이 낮은 해역에서는 모래 해역보다 낮은 반사 강도를 나타내었다. 그리고 정점 1과 정점 6에서는 저질에 대한 비율이 유사하게 나타났으나, S_{v_mean} 의 강도 차이는 정점 6에서 약 2배 이상 높게 나타났다. 이러한 이유는 정점 6의 저질에서 자갈의 비율이 0.8을 함유하기 때문으로 판단된다. 반사 강도의 결과를 바탕으로 음향 반사 강도는 자갈에서 가장 높은 반사 강도를 나타내었고 모래, 실트, 점토 순서로 반사 강도가 강하게 나타났다(Table 3).

먹이생물의 수평분포

어류의 수평 분포 분석 결과, 정점 4의 NASC 값은 1,084.3 $m^2/n.mile^2$ 으로 다른 정점과 비교했을 때 가장 높은 값을 나타내었다(Table 4). 뿐만 아니라, 정점 1과 정점 5에서도 NASC 값이 각각 88.6 $m^2/n.mile^2$ 와 111.6 $m^2/n.mile^2$ 으로 상대적으로 높

은 수치가 나타났다.

동물플랑크톤의 수평 분포 역시 어류의 분포와 유사한 양상을 나타내었다. 특히 정점 4에서 동물플랑크톤의 NASC 값이 315.6 $m^2/n.mile^2$ 으로 매우 높은 강도로 분포하고 있었으며, 정점 5에서도 286.0 $m^2/n.mile^2$ 으로 높은 값을 나타내었다. 이는 동물플랑크톤도 어류와 마찬가지로 북쪽 해역에서 집중적으로 분포하고 있음을 시사한다. 반면, 동물플랑크톤의 분포는 어류와 달리 정점 4와 5를 제외한 다른 해역에서는 대체로 균일한 강도를 나타내었다. 정점 2와 3에서의 NASC 값은 각각 15.7 $m^2/n.mile^2$ 과 14.6 $m^2/n.mile^2$ 으로 나타났으며, 이는 북쪽 해역의 높은 NASC 값에 비해 상대적으로 낮은 수치이다. 이는 동물플랑크톤이 북쪽 해역에서의 높은 밀도와 달리, 다른 해역에서는 비교적 고르게 분포하고 있음을 나타낸다.

고 찰

본 연구에서 수행된 분석을 통해 먹이생물과 해저반사강도 간의 상관관계를 파악한 결과, 해저반사강도가 낮은 해역에서 높은 NASC 값을 나타내는 경향이 확인되었다. 특히, 동물플랑크톤과 해저반사강도는 높은 상관성이 관찰되었다. 이는 조사해역에 서식하는 어류와 동물플랑크톤이 자갈보다는 실트와 점토와 같은 더 세밀한 해저 저질을 선호하는 경향이 있음을 시사한다. 이러한 결과는 어류 및 동물플랑크톤이 더 낮은 해저반사강도를 보이는 부드러운 해저 환경에서 더 풍부한 먹이 자원과 더 적합한 서식 조건을 찾을 수 있음을 의미한다. 그러나 어류의 종류에 따라 선호하는 저질이 상이할 수 있기 때문에 연구 결과의 일반화에는 신중을 기해야 한다. 따라서 연구 해역 내에서 서식하는 어종의 종조성을 면밀히 파악하는 것이 연구 결과의 신뢰성을 높이는 데 중요하다. 국립수산물품질관리원(NIFS, 2024)의 주요 생물 생태와 생활사 자료에 따르면 조사해역은 고등어와 멸치 등 많은 어종의 주요 서식장과 월동장으로 알려져 있다. 고등어와 멸치는 주로 중층에 서식하는 중층어종으로 저질에 대한 선호도가 크지 않지만, 일반적으로 어류의 산란장은 자갈과 같은 해저 저질을 선호한다고 알려져 있다(Jonker, 2023). 하지만 관련 연구가 아직 부족하기 때문에, 이러한 관찰이 모든 개체군이나 환경 조건에 동일하게 적용되는지는 추가적인 연구가 필요하며, 이는 향후 해양 자원 관리와 보존 전략 수립에 중요한 기초 자료가 될 수 있을 것이다. 추가적으로, 음향 데이터를 활용하여 해저반사강도와 먹이생물 간의 상호작용을 분석하는 선행 연구는 매우 제한적이다. 이는 음향학을 통한 해저 환경 평가와 생물 분포 연구가 아직 초기 단계에 있음을 나타낸다.

우리나라에서 음향기법은 대부분 해양 생태계에서 생물량의 추정에 적용되고 있으며(Kim et al., 2011; Lee et al., 2014), 해저에 대한 정보를 파악하기 위한 연구는 거의 진행되지 않고 있다. 또한, 해저에 대한 정보를 파악하기 위한 연구는 주로 해저 저질의 반사강도 보다는 해저 지형 파악에 초점을 맞추고 있다. 따라서 본 논문은 음향기법을 이용하여 해저 저질의 반사

Table 3. The major sediment types of surface sediment around the survey area in southern sea of Korea

Station	Textures (%)				Sediment type (Folk, 1968)
	Gravel	Sand	Silt	Clay	
1	0.0	78.4	7.7	13.9	mS
2	0.0	80.0	6.1	13.9	cS
3	0.0	77.3	7.3	15.4	cS
4	0.0	0.4	48.8	50.8	M
5	0.0	0.1	39.0	60.9	M
6	0.8	75.8	8.0	15.4	(g)mS
7	0.0	94.0	1.7	4.3	S

mS, Muddy sand; cS, Clayey sand; M, Mud; (g)mS, Slightly gravelly muddy sand; S, Sand .

Table 4. Mean NASC (nautical area scattering coefficient, $m^2/n.mile^2$) of fish and zooplankton and the seafloor volume backscatter strength_mean

Station	Mean NASC of fish ($m^2/n.mile^2$)	Mean NASC of zooplankton ($m^2/n.mile^2$)	Volume backscatter strength_mean of seafloor
1	88.6	4.9	-12.7
2	32.5	15.7	-10.8
3	39.1	14.6	-13.5
4	1,084.3	315.6	-21.4
5	111.6	286.0	-21.4
6	59.3	3.2	-5
7	56.3	9.8	-4.3

NASC, Nautical area scattering coefficient.

강도를 추정함으로써 해저 저질의 특성을 파악하는 연구를 제시한다.

음향기법을 활용하면 수집된 음향 자료를 기반으로 다양한 분석 방법을 적용할 수 있어, 생물량뿐만 아니라, 해저 환경에 대한 정보를 얻을 수 있다(Tęgowski, 2005). 이는 해양 과학 연구와 해양 자원 관리에 중요한 데이터로 활용될 수 있다. 또한, 이러한 기술은 해저면의 퇴적물 표본을 직접 수집하지 않고도, 음향분석을 함으로써 해저 퇴적물의 종류와 그 특성을 식별할 수 있게 한다. 본 논문의 결과를 통해 해저 저질을 음향적으로 파악하는 연구에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하며, 더 나아가 향후 해저 지형 및 환경 연구에 기여할 수 있는 실용적인 정보를 제시할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 음향 반사 데이터와 함유량 데이터를 통합하여 저질의 강도와 함유 물질의 상관관계를 분석하고, 지통계적 모델링을 통해 공간적 변동성을 예측하고 분석할 예정이다.

사 사

논문은 2024년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20210427, 과학기술기반 해양환경영향평가 기술개발).

References

- Anderson MA, Conkle JL, Pacheco P and Gan J. 2013. Use of hydroacoustic measurements to characterize bottom sediments and guide sampling and remediation of organic contaminants in lake sediments. *Sci Total Environ* 458-460, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.009>.
- Bulut S and Ergin S. 2023. An investigation on hydro-acoustic characteristics of submerged bodies with different geometric parameters. *Continuum Mech Therm* 35, 1123-1146. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01086-8>.
- Campbell KA, Nelson CS, Alfaro AC, Boyd S, Greinert J, Nyman S, Grosjean E, Logan GA, Gregory MR, Cooke S, Linke P, Milloy S and Wallis I. 2010. Geological imprint of methane seepage on the seabed and biota of the convergent Hikurangi Margin, New Zealand: Box core and grab carbonate results. *Mar Geol* 272, 285-306. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.01.002>.
- Dalley KL, Gregory RS, Morris CJ and Cote D. 2017. Seabed habitat determines fish and macroinvertebrate community associations in a subarctic marine coastal nursery. *Trans Am Fish Soc* 146, 1115-1125. <https://doi.org/10.1080/00028487.2017.1347105>.
- De Robertis A and Higginbottom I. 2007. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. *ICES J Mar Sci* 64, 1282-1291. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm112>.
- Folk RL and Ward WC. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *J Sediment Res* 27, 3-26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>.
- Hilgert S, Sotiri K and Fuchs S. 2019. Advanced assessment of sediment characteristics based on rheological and hydroacoustic measurements in a Brazilian reservoir. In: *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*. Panama City, Panama, 1-6.
- Jonker A. 2023. Mapping essential fish habitats of herring (*Clupea harengus*) and mackerel (*Scomber scombrus*) in the North East Atlantic. M.S. Thesis, University of Wageningen, Wageningen, Netherlands.
- Kang D, Sin H, Kim S, Lee Y and Hwang D. 2003. Species identification and noise cancelation using volume backscattering strength difference of multi-frequency. *Korean J Fish Aquat Sci* 36, 541-548. <https://doi.org/10.5657/kfas.2003.36.5.541>.
- Kang MH, Furusawa M and Miyashita K. 2002. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. *ICES J Mar Sci* 59, 794-804. <https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1229>.
- Kim EH, Mukai T and Iida K. 2016. Acoustic identification of krill and copepods using frequency differences of volume backscattering strength around Funka Bay, Hokkaido, Japan. *Nippon Suisan Gakkaishi* 82, 587-600. <https://doi.org/10.2331/suisan.15-00039>.
- Kim HY, Hwang BK, Lee YW, Shin HO, Kwon JN and Lee KY. 2011. Hydro-acoustic survey on fish distribution and aggregated fish at artificial reefs in marine ranching area. *J Kor Soc Fish Tech* 47, 139-145. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2011.47.2.139>.
- Lee HB, Lee KY, Kim SH, Kim IO and Kang DH. 2014. Hydroacoustic survey of fish distribution and aggregation characteristics in the Yongdam Reservoir, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 47, 1055-1062. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.1055>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2024. Database for Major Species Ecology and Life History. Retrieved from <https://www.nifs.go.kr/contents/actionContentsCons0088>. do on Aug 09, 2023.
- Shabangu FW, Coetzee JC, Hampton I, Kerwath SE, de Wet WM and Lezama-Ochoa A. 2014. Hydro-acoustic technology and its application to marine science in South Africa. In: *Reflections on the State of Research and Technology in South Africa's Marine and Maritime Sectors*. Funke N, Claassen M, Meissner R and Nortje K, eds. The Council for Scientific and Industrial Research Marine and Maritime Sectors, Pretoria, South Africa, 122-152.
- Tęgowski J. 2005. Acoustical classification of the bottom sediments in the southern Baltic Sea. *Quater Inter* 130, 153-161. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.04.038>.
- Wu RSS, Lam KS, MacKay DW, Lau TC and Yam V. 1994. Impact of marine fish farming on water quality and bottom

sediment: A case study in the sub-tropical environment. *Mar Environ Res* 38, 115-145. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0141-1136(94)90004-3).

Xie H, Hu Y, Gao M, Chen L, Zhang R, Liu T, Gao F, Zhou H, Peng X, Li X, Zhu J, Li C, Peng R, Gao Y, Li C, Li J and He Z. 2023. Research progress and application of deep in-situ condition preserved coring and testing. *Int J Min Sci Technol* 33, 1319-1337. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.06.007>.

Ryan TE, Downie RA, Kloser RJ and Keith G. 2015 Reducing bias due to noise and attenuation in open-ocean echo integration. *ICES J Mar Sci* 72, 2482-2493. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv121>.

Bulu S and Ergin S. 2023. An investigation on hydro-acoustic characteristics of submerged bodies with different geometric parameters. *Continuum Mech Therm* 35, 1123-1146.