KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 619-629, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),619-629,2026

남서대서양 심해 조업해역의 취약해양생태계(VMEs) 분포와 상업용 단일빔 음향자료를 활용한 서식지 특성 분석

박치완 · 지건웅[1] · 이경훈[2]*

국립부경대학교 해양생산관리학부 수산물리학전공, [1](주)정일산업 해양수산본부, [2]국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

VME Distribution and Habitat Characteristics in the Southwest Atlantic Deep-Sea Fisheries Using Commercial Single-Beam Acoustics

Chiwan Park, Kunwoong Ji[1] and Kyounghoon Lee[2]*

Division of Marine Production Management Major of Fisheries Physics, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
[1]Maritime Fisheries Division, Jeongil Corp., Seoul 04410, Republic of Korea
[2]Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

This study analyzed seafloor topography, seabed volume backscattering strength (S_v), and vulnerable marine ecosystem (VME) distribution in a high-seas fishing area of the Southwest Atlantic using commercial 18 kHz single-beam acoustic data collected during 2017–2019. Acoustic data were processed through noise removal, bottom detection, elementary distance sampling unit definition, and spatial matching with bottom-longline VME collection records. Sixteen VME indicator taxa totaling 576.86 kg were recorded mainly near canyon margins, slopes, and elevated topographic features. VME records occurred at depths of 867–3,036 m, while major taxa had mean depths generally around 1,700–1,800 m. Taxon-specific mean S_v values at matched VME locations ranged from -11.17 to -20.89 dB, with frequent values near -15 dB. Relatively high S_v values occurred on elevated topographic features, whereas lower values were observed in deeper canyons and basin areas. Commercial single-beam acoustic data can support exploratory assessment of relative seafloor acoustic conditions and their spatial association with VME collection records. Independent validation using multibeam acoustics, seabed imagery, and sediment samples is needed to identify substrate types and develop quantitative VME habitat models.

Keywords: Vulnerable marine ecosystems (VMEs), Backscatter intensity, Single-beam acoustics, Seafloor topography, Southwest Atlantic high seas

서 론

취약해양생태계(vulnerable marine ecosystems, VMEs)는 FAO 심해어업 가이드라인에 따라 느린 성장률, 긴 수명, 낮은 자연사망률 및 번식력을 가진 생태계로 정의된다(FAO, 2009). 대표적으로 심해 산호(*Lophelia pertusa* 등), 대형 해면(*Geodia* spp.), 태형동물(Bryozoa) 및 고착성 심해생물 군락이 이에 해당하며, 이들은 주로 수심 200–4,000 m의 협곡, 해산(seamount), 급경사지 등 복잡한 해저지형에 서식하며 어류의 산란장 및 보육장 기능을 수행한다(Rossi, 2013; Clark et al., 2016; Watling and Auster, 2021). 그러나 저층 트롤 등 저층어업은 어구가 해저면을 소해(sweeping)하는 과정에서 이러한 군락을 직접 파손시키며, 최근 연구에 따르면 장기간의 조업은 중형저서생물(meiofauna)의 다양성을 25% 이상 감소시켜 '해저 사막화(seafloor desert)'를 초래하는 것으로 보고되었다(Pusceddu et al., 2014; Stockholm University Baltic Sea Centre, 2021). 이에 UN 총회 결의와 FAO 가이드라인은 VME에 대한 '중대한 악영향(significant adverse impacts, SAI)' 방지를 의무화

*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.2026.0619
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 619-629, October 2026
Received 9 May 2026; Revised 24 June 2026; Accepted 24 June 2026
저자 직위: 박치완(대학원생), 지건웅(총괄책임자), 이경훈(교수)

하였으며(UNGA, 2006; FAO, 2009), 특히 2026년 1월 17일에 발효된 국가관할권 이원지역 해양생물다양성(biodiversity beyond national jurisdiction, BBNJ) 협약은 공해상 VME 보호를 국제법적 의무로 규정하고 있다(UN, 2023). 국내적으로도 원양산업발전법 제13조를 통해 국제수산기구의 보존관리조치 준수 의무를 명시하며 이러한 국제적 흐름에 동참하고 있다.

이러한 규제 강화에도 불구하고, 남서대서양(FAO Area 41) 공해 해역은 타 해역 대비 VME 분포 지도화(mapping) 및 정밀 영향 평가가 현저히 부족하다(UNGA, 2006; FAO, 2009; Gianni, 2011; NPFC, 2025). 남서대서양의 브라질-말비나스 합류대(Brazil–Malvinas Confluence, BMC)는 따뜻한 브라질 해류와 영양염이 풍부한 말비나스 해류가 교차하며 세계 해양에서 가장 역동적인 중규모(mesoscale) 활동을 보이는 구역이다(Comas-Rodríguez, 2014; Garzoli and Garraffo, 1989; Orúe-Echevarría et al., 2021; Torres Alberto et al., 2021; Laureanti et al., 2025). 높은 1차 생산력을 바탕으로 아르헨티나 짧은지느러미오징어(*Illex argentinus*)와 아르헨티나 민대구(*Merluccius hubbsi*) 등의 거대 어장을 형성하고 있어 조업이 매우 활발하지만, 본 연구해역의 협곡과 해산 지형은 냉수 산호의 잠재적 서식지로서 어업 활동과의 충돌 가능성이 상존한다(Gu et al., 2019; SAERI, 2022; SPRFMO, 2025). 따라서 해당 해역의 VME 분포를 파악하고 서식지 특성을 규명하기 위한 과학적 조사가 시급한 실정이다.

VME 서식지를 정밀하게 판별하기 위해 수중음향 기술인 체적후방산란강도(volume backscattering strength, S_v) 분석이 널리 활용되고 있다. 해저 기질의 물리적 특성에 따라 반사되는 음향 에너지가 다르다는 원리를 이용한 이 기술은, 고정밀 다중빔 음향측심기(multibeam echo sounder)의 경우 고비용과 운용상의 제약으로 광역 모니터링에 한계가 있다(Cutter and Demer, 2014). 반면, 상업용 어선에 탑재된 18 kHz 단일빔 음향측심기(single-beam echo sounder)는 조업 중 지속적인 데이터 수집이 가능해 실용적인 대안으로 주목받고 있다. 특히 18 kHz 저주파 시스템은 심해 관측에 유리하며, 최근 UN 총회 결의(A/RES/79/145)를 포함한 국제 사회에서도 이러한 상업용 음향 자료의 표준화와 활용에 관한 논의가 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 남서대서양 공해 심해 조업해역에서 상업용 18 kHz 단일빔 음향자료를 활용하여 해저지형과 저질 특성을 분석하고, 이를 실제 VME 채집 데이터와 결합하여 서식지 특성을 정량적으로 규명하는 것이다. 본 연구의 결과는 향후 남서대서양 VME 보호 및 지속 가능한 어업 관리를 위한 과학적 기초 자료를 제공하는 동시에, 상업용 음향 자료의 실용적 활용 가능성을 제시하는 데 그 의의가 있다.

재료 및 방법

조사 해역 및 시기

연구는 남서대서양 공해 심해 조업구역(FAO Major Fishing Area 41)을 대상으로, 2017년 7월부터 12월, 2018년 1월부터 12월, 2019년 1월부터 12월까지 3개년에 걸쳐 수행되었다. 조사는 상업용 어선인 메르디안 8호(Meridian No. 8, 전장(length overall, LOA) 46 m, 736 tons)를 이용하여 실시되었으며, 주요 조사 해역은 BMC 남측 대륙사면과 중앙 분지, 그리고 남북 방향으로 발달한 심해 협곡을 포함한다(Fig. 1). 해당 기간 수집된 총 음향 자료의 용량은 약 1.4 TB이며, 총 8,409개의 raw 데이터 파일이 분석에 사용되었다.

음향 시스템 및 데이터 수집

조사 선박에 탑재된 상업용 단일빔 음향측심기(Simrad ES80; Kongsberg Discovery AS, Horten, Norway)를 사용하여 18 kHz 주파수의 수중음향 데이터를 수집하였다. 선박의 위치 정보는 differential global positioning system을 통해 음향 시스템에 실시간으로 동기화되어 기록되었다. 수집된 음향 자료의 후처리 및 분석에는 후처리 분석 소프트웨어인 Echoview (ver. 10.0; Echoview Software Pty Ltd., Hobart, Australia)를 활용하였으며, 해저면 경계 식별 및 S_v 추출 과정을 거쳐 분석에 적합한 데이터셋을 구축하였다.

잡음 제거

수집된 음향 자료는 심해 조업 환경 특유의 간섭 신호를 배제하기 위해 분석 소프트웨어(Echoview ver. 10.0; Echoview Software Pty Ltd.)를 활용하여 전처리를 수행하였다. Background noise, Transient noise, Impulse noise 및 Attenuated signal의 4가지 잡음 유형은 물리적 특성에 따른 개별 알고리즘을 통해 체계적으로 제거되었으며, 상세 파라미터는 Table 1 및 Fig. 2와 같다.

탐지 범위를 초과하는 수심이나 수층 내 미세 입자로부터 기인하는 Background noise는 수심에 비례하여 증폭되는 특성을 갖는다. 이를 효과적으로 제거하기 위해 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)가 임계값(δ, 10 dB) 이상인 유효 신호만을 추출하는 time varied threshold 알고리즘을 적용하였다(Eq. 1). 이때 분석 윈도우는 수평 20 pings, 수직 5 samples로 설정하였으며, 해저 신호의 왜곡을 방지하기 위해 최대 노이즈 수준은 -125 dB로 제한하였다.

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

$$\text{if } \mathrm{SNR}(i,j) \le \mathrm{threshold}_{\mathrm{SNR}}, \text{ then } S_v(i,j) = \text{No data} \quad \cdots\cdots (1)$$

선내 각종 전자 장비의 전기적 간섭(electrical interference)으로 발생하는 Transient noise는 에코그램상에서 불연속적인 수

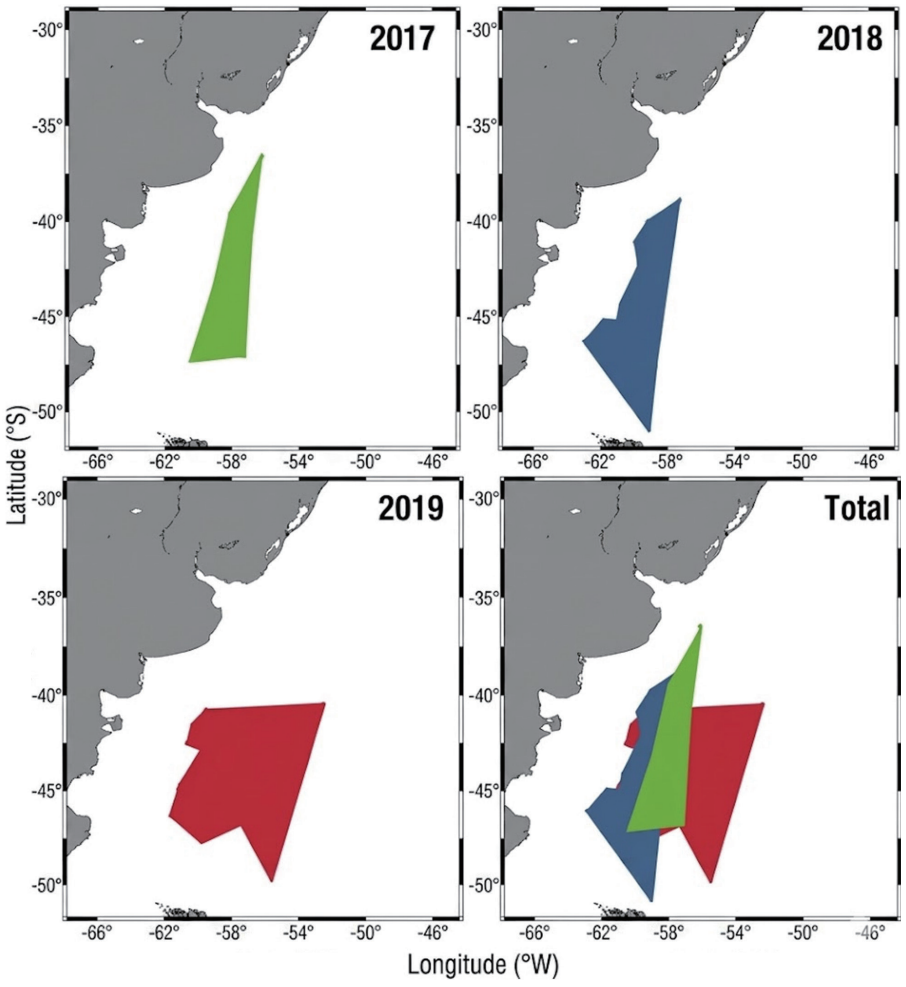


Fig. 1. Survey areas in the Southwest Atlantic by year.

직 스파이크 형태로 관측된다. 본 연구에서는 특정 영역의 중앙 데이터 표본과 해당 영역 중위값(median)의 차이가 역치값(10 dB)을 초과할 경우 이를 잡음으로 식별하여 제거하였다(Eq. 2).

$$S_{v i,j} - \widetilde{S}_{vm,n} > \delta \quad \cdots\cdots (2)$$

타 선박 음향 장비와의 상호 간섭으로 인해 불규칙하고 강한 수직 선형 패턴을 형성하는 Impulse noise는 'Two-sided comparison' 방식을 통해 제어하였다. 이는 중앙 데이터와 전후 pings의 표본값 차이가 역치값을 초과하는 신호를 추출하여 제거하는 방식이다(Eq. 3). 두 잡음 유형 모두 분석 윈도우는 수평 5 pings, 수직 5 samples의 표준 규격을 적용하였다.

$$S_{v i,j} - S_{v(i+n),j} > \delta \text{ and } S_{v i,j} - S_{v(i-n),j} > \delta \quad \cdots\cdots (3)$$

마지막으로 기상 악화 시 기포층(bubble layer)에 의해 음향 신호가 급격히 약화되는 Attenuated signal은 에코그램상에 수직적인 결손 구간을 형성하여 지형 판독에 오류를 야기한다. 따라서 특정 ping의 중위값이 주변 영역에 비해 현저히 낮아 역치값 미만인 경우를 감쇠 구간으로 판별하였으며(Eq. 4), 식별된 결손부는 데이터의 연속성 확보를 위해 인접 표본을 활용하여 선형 보간(interpolation) 처리하였다. 이러한 일련의 과정을 통해 확보된 순수 해저 반사 신호만을 최종 서식지 특성 분석에 활용하였다.

$$\widetilde{S}_{vp} - \widetilde{S}_{vn} < \delta \quad \cdots\cdots (4)$$

해저면 탐지와 분석 단위 설정

전처리 과정을 통해 잡음이 제거된 음향 자료로부터 해저 지형 정보를 추출하기 위해 Echoview의 Best Bottom Candidate 알고리즘을 적용하여 해저면(bottom line)을 자동 탐지하였다.

Table 1. Parameter settings for noise removal and attenuated signal interpolation

Parameter	Value
Frequency	18 kHz
Horizontal extent	20 pings
Vertical extent	5 samples
Maximum noise	-125 dB
Minimum SNR	10 dB
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

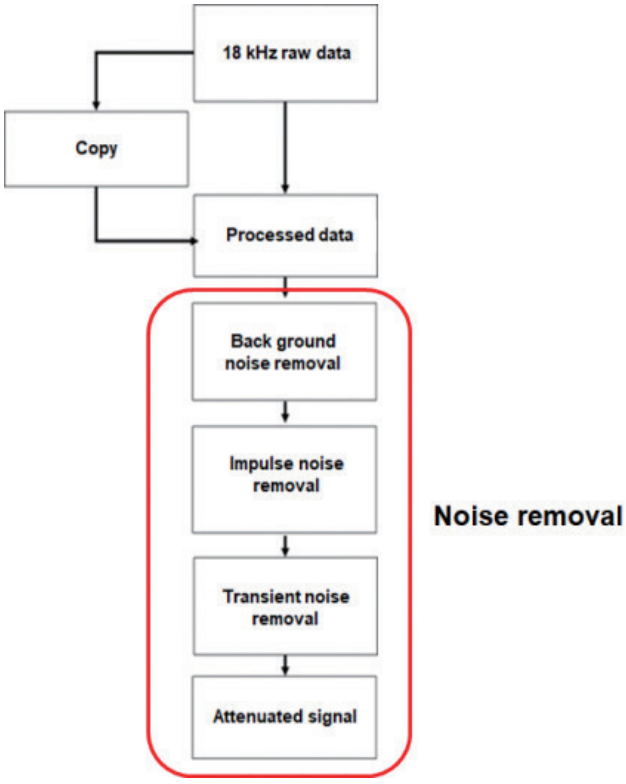


Fig. 2. Acoustic noise processing flowchart.

탐지된 해저면을 기준으로 수심 데이터를 추출하였으며, 해저 기질의 음향적 특성을 정량화하기 위해 기본 분석 단위(elementary distance sampling unit, EDSU)를 설정하였다.

EDSU의 수평적 범위는 심해 서식지 분석의 공간 해상도를 고려하여 0.1 n.mile (약 185 m)로 설정하였다. 수직적 범위는 해저면으로부터 1 m 하단까지의 레이어(layer)를 적분 영역으로 지정하였다. 조사 선박의 평균 선속(6–7 knots)과 심해 탐지 시의 핑 주기(ping interval)를 고려할 때, 하나의 EDSU에는 약 10–15개의 핑이 포함되었으며, 이 구간 내에서 산출된 평균 S_v (dB)를 해당 지점의 저질 후방산란강도로 정의하였다.

설정된 EDSU는 전체 음향 트랜섹트(transect)를 구성하는 최소 분석 단위로서, 각 지점의 지형적 요인(수심, 경사도)과 저질의 경도 정보를 포함한다. 이는 향후 VMEs 채집 위치와의 공간적 중첩(overlay) 분석을 수행하고, VME 서식지의 물리적 환경 특성을 정량적으로 규명하기 위한 핵심적인 기준점으로 활용되었다.

이러한 방식은 상업용 음향 자료를 활용한 해저 기질 분류 연구에서 널리 사용되는 방법론으로(Ryan et al., 2015), 해저면 하단의 특정 레이어 내 에너지를 적분하여 기질의 물리적 특성을 정량화하는 원리에 기초한다(von Szalay and McConnaughey, 2002; Anderson et al., 2008).

VMEs 채집 · 분류

VMEs 샘플은 조사 선박인 메르디안 8호에 탑재된 저층연승(bottom longline) 어구를 활용하여 수집하였다. 각 조업(set)별로 채집 위치(위·경도), 채집량(kg) 및 시각을 현장에서 기록하였으며, 채집된 개체는 신선도를 유지한 상태에서 사진 촬영과 중량 측정을 수행한 후 즉시 해양으로 재투입(returned to sea)하였다. 이러한 모든 현장 처리 및 시료 채집 절차는 남극해양생물자원보존위원회(Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources, CCAMLR)의 VME Registry 보고 지침 및 보존조치(CCAMLR, 2009a)에 따른 표준 가이드라인을 엄격히 준수하여 수행되었다.

채집된 VMEs의 분류는 CCAMLR (2009b)에서 발행한 VME 분류 가이드라인(Fig. 3)에 따라 문(phylum)에서 목(order) 수준의 계층적 코드 체계를 적용하였다. 특히 수산물리학적 공간 매칭 분석을 위한 기초 자료로서 Pennatulacea (NTW) 및 Gorgonacea (GGW) 등 주요 지표종의 생물량(biomass) 데이터를 확보하였다(Table 2). 분석된 VME 분포 현황은 분류군별 채집 위치와 중량을 원의 크기와 색상으로 도식화하여 지도 위에 나타내었으며(Rice, 2011), 이러한 시각화 자료는 향후 음향 데이터 기반의 서식지 특성 분석과 연계하여 지형적 선호도를 규명하는 데 활용되었다.

VMEs와 음향자료 매칭

VME 채집 위치와 음향탐사 자료 간의 공간적 연계를 위해, 각 VME 채집 위치(lat_1, lon_1)를 중심으로 반경 1 n.mile (1,852 m) 이내에 위치한 EDSU 중 가장 가까운 지점(lat_2, lon_2)을 탐색하여 해당 EDSU의 저질 S_v와 수심 정보를 추출하였다. 두 지점 간의 거리는 지구의 곡률을 고려한 구면 측지거리(spherical geodesic distance)를 이용하여 산출하였으며, 계산식은 다음과 같다.

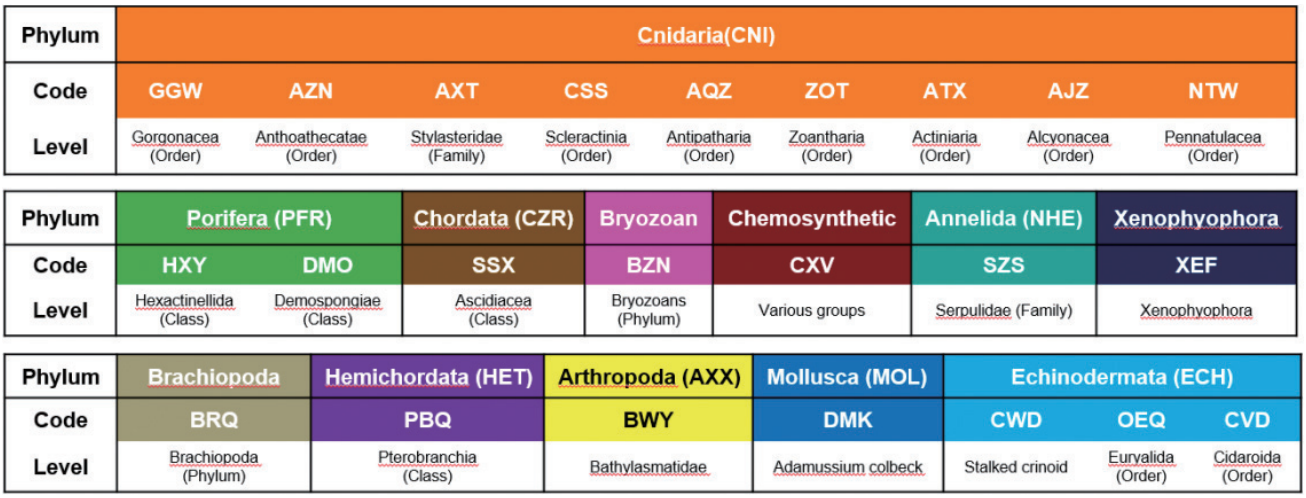


Fig. 3. CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources) VME (vulnerable marine ecosystem) taxa classification guide (CCAMLR, 2009b). GGW, Gorgonacea; AZN, Anthoathecatae; AXT, Stylasteridae; CSS, Scleractinia; AQZ, Antipatharia; ZOT, Zoantharia; ATX, Actiniaria; AJZ, Alcyonacea; NTW, Pennatulacea; HXY, Hexactinellida; DMO, Demospongiae; SSX, Ascidiacea; BZN, Bryozoa; CXV, Chemosynthetic communities; SZS, Serpulidae; XEF, Xenophyophora; BRQ, Brachiopoda; PBQ, Pterobranchia; BWY, Bathylasmatidae; DMK, *Adamussium colbecki*; CWD, Stalked crinoid; OEQ, Euryalida; CVD, Cidaroida.

Table 2. Annual catch counts and recorded weights of VME indicator taxa collected by bottom longline during 2017–2019.

VMEs (Code)	2017		2018		2019	
	Catch count	Weight (kg)	Catch count	Weight (kg)	Catch count	Weight (kg)
AQZ	20	1.96	275	2.63	47	3.06
ATX	4	0.52	256	3.13	14	1.87
AXT	77	15.43	392	37.67	223	25.43
AZN	17	1.05	277	1.55	73	1.81
BRQ		-	2	0.04		-
BWY		-		-	1	0.01
BZN	43	6.48	327	11.40	193	13.58
CSS	102	10.33	397	28.29	219	19.17
CVD		-	1	0.04		-
CWD		-	1	0.01		-
DMO	19	5.40	287	6.73	73	7.20
GGW	161	22.77	418	28.83	307	22.86
NTW	197	36.29	429	90.33	705	152.98
OEQ	59	2.90	29	1.88		-
SSX	19	2.91	19	3.24	37	6.67
ZOT		-	9	0.41		-

AQZ, Antipatharia; ATX, Actiniaria; AXT, Stylasteridae; AZN, Anthoathecatae; BRQ, Brachiopoda; BWY, Bathylasmatidae; BZN, Bryozoa; CSS, Scleractinia; CVD, Cidaroida; CWD, Stalked crinoid; DMO, Demospongiae; GGW, Gorgonacea; NTW, Pennatulacea; OEQ, Euryalida; SSX, Ascidiacea; ZOT, Zoantharia.

$$Dist = R_{aver} \times \mathrm{acos}[\cos(lat_1)\cos(lat_2)\cos(lon_1 - lon_2) + \sin(lat_1)\sin(lat_2)] \quad \cdots\cdots (5)$$

$$\mathrm{Idx} = \mathrm{Find}(Dist \times 1{,}000 < 1{,}852) \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

여기서 $Dist$는 두 지점 간의 거리(km), lat_1,lon_1은 VME 채집 위치의 위도와 경도, lat_2,lon_2는 음향조사 EDSU의 위도와 경도를 나타낸다. R_{aver}는 지구 평균 반경(6,374 km)이며, 모든 위도와 경도 값은 계산 시 라디안(radian) 단위로 변환하여 적용하였다.

각 VME 채집 위치에 대해 계산된 거리 중 1 n.mile (1,852 m) 이내에 포함되는 EDSU를 대상으로 최근접 지점을 선정하였으며, 해당 EDSU의 평균 S_v 값과 수심을 각각 VME의 "서식 저질 강도" 및 "대표 수심"으로 정의하였다.

본 분석은 MATLAB (R2015a; The MathWorks Inc., Natick, MA, USA)을 이용하여 수행되었으며, 적용된 1 n.mile 공간 범위는 국제 수산 관리 기구의 VME 보호 가이드라인에서 제시된 encounter radius 개념과 BBNJ 협약의 공해 해양유전자원(marine genetic resources, MGR) 관련 공간 불확실성에 대한 '최선의 노력(best endeavor)' 원칙을 고려하여 설정하였다. 이러한 최근접 매칭 방법은 설정된 공간 범위 내 음향 특성이 해당 VME 서식 환경을 대표한다는 가정을 기반으로 한다.

결 과

해저 지형 및 수심 분포

조사 해역의 수심 분포는 연도별 변동에도 불구하고 전반적으로 유사한 지형적 패턴을 보였다. 전체 수심 범위는 최소 약 80 m에서 최대 5,600 m 이상까지 나타났으며, 중앙 해역에서는 가장 깊은 분지 구조가 형성되었다. 남쪽 해역에서는 남북 방향으로 길게 발달한 깊고 폭 넓은 협곡이 뚜렷하게 나타났으며, 일부 협곡의 끝부분에서는 수심이 3,000 m 이상으로 급격히 증가하는 특징이 확인되었다(Fig. 4).

또한 중앙 해역에서는 주변보다 상대적으로 얕은 돌출 지형(ridge 또는 outcrop)이 관측되었으며, 이들 구조는 약 2,000 m 내외의 수심에서 나타났다. 북쪽 해역의 경우, 상대적으로 얕고 좁은 협곡이 다수 분포하는 특징을 보였으며, 전반적으로 지형 복잡도는 남쪽 해역에 비해 낮은 경향을 보였다.

연도별로 보면, 2017년에는 남쪽 해역에서 음향 표본 밀도가 높아 지형 구조가 비교적 선명하게 나타난 반면, 북쪽 및 중앙 일부 구간에서는 자료 부족으로 해상도가 낮았다. 2018년과 2019년에는 보다 광범위한 해역에서 수심 자료가 확보되면서 최대 수심이 각각 약 5,626 m와 5,265 m까지 확인되었으며, 협곡과 돌출 지형이 반복적으로 관측되었다.

이와 같이 본 연구 해역은 깊은 협곡, 돌출 지형, 그리고 중앙 분지로 구성된 복합적인 해저 지형 구조를 가지며, 이러한 지형적 복잡성은 이후 분석된 저질 후방산란강도 및 VME 분포와 밀접하게 연관되는 것으로 판단된다.

해저 저질의 후방산란강도 분포

해저 저질의 S_v는 상대적으로 높은 값일수록 갈색, 낮은 값일수록 보라색으로 표현하였으며, Fig. 5의 색상 범위는 약 0 dB에서 -40 dB로 설정하였다. -40 dB 이하의 낮은 S_v 값은 색상 범

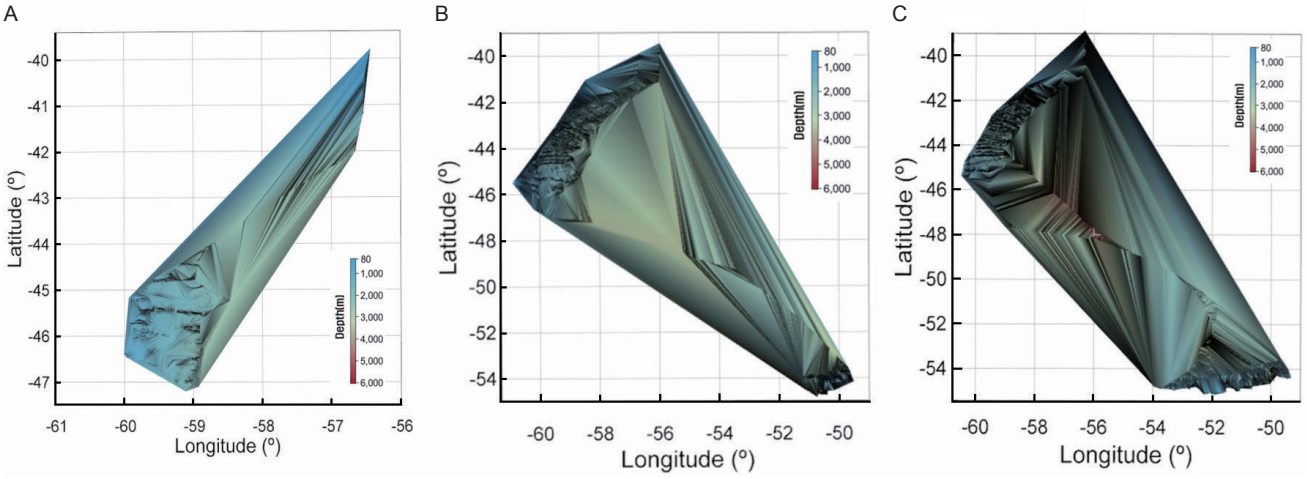


Fig. 4. Seafloor topography and bathymetry distribution. A, 2017; B, 2018; C, 2019.

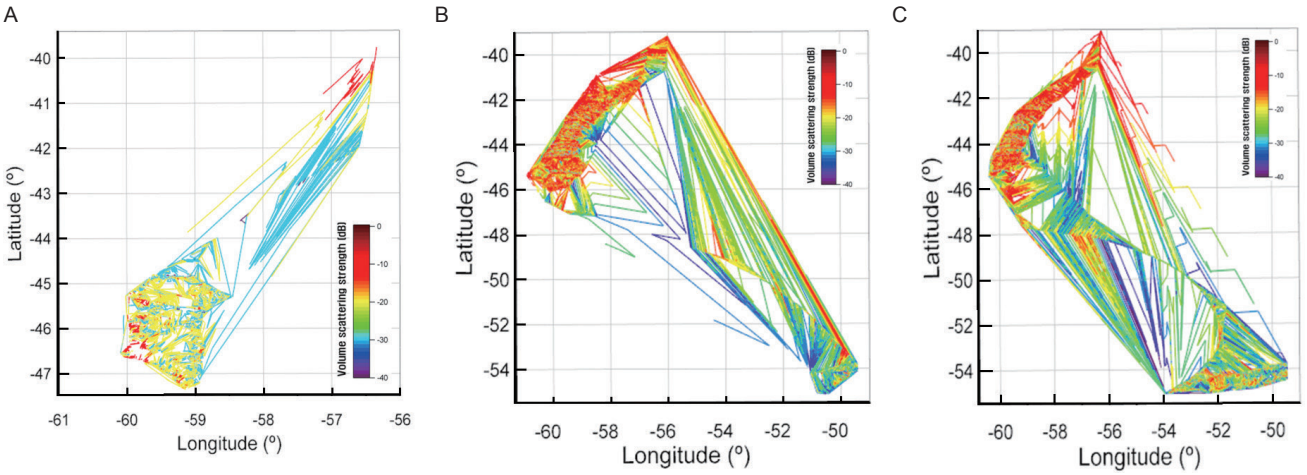


Fig. 5. Backscattering strength distribution of seafloor sediments. A, 2017; B, 2018; C, 2019.

위의 하한 값으로 표시하였다.

조사 해역의 저질 후방산란강도는 공간적으로 뚜렷한 구배를 나타냈다. 북쪽 해역과 돌출 지형에서는 상대적으로 강한 반사 신호가 나타나 -10–-20 dB 범위의 높은 S_v 값이 분포하였으며, 특히 일부 돌출 지형에서는 -10 dB 내외의 매우 강한 반사가 관측되었다. 반면, 남쪽 해역의 협곡 및 깊은 분지 구간에서는 -30 dB 이하의 약한 반사 강도가 우세하게 나타났으며, 실제 추출된 S_v 값은 일부 협곡 및 깊은 분지 구간에서 -40 dB 이하로 나타났다. 특히 협곡의 끝부분에서는 약 -45–-65 dB 수준까지 낮아지는 경향이 확인되었다. 중앙 해역에서는 상대적으로 완만한 지형과 함께 -20–-45 dB 범위의 중간 수준 후방산란강도가 분포하였으며, 일부 돌출 지형에서는 주변보다 강한 반사 신호가 국지적으로 나타났다. 이러한 경향은 각 연도 자료에서 공통적으로 관찰되었으며, 전체적으로 얕고 구조적으로 복잡한 지형에서는 강한 반사, 깊은 협곡 및 분지에서는 상대적으로 약한 반사가 나타나는 특징을 보였다.

이와 같이 확인된 후방산란강도의 공간적 분포 패턴은 해저 기질의 경도와 표면 거칠기, 입사각 및 사용 주파수 등의 차이가 S_v에 영향을 미친다는 기존 음향 해저분류 연구와 대체로 일치한다(Anderson et al., 2008; Cutter and Demer, 2014). 따라서 본 연구 해역에서는 해저 지형과 저질 특성이 음향적 반사 강도에 직접적으로 반영되고 있으며, 이는 이후 분석된 VME 분포와의 연관성을 해석하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

VMEs 분포

VME 채집 결과는 분류군별 종 구성과 채집량을 기준으로 색상과 원의 크기로 구분하여 나타내었으며, 각 채집 위치의 수심은 해당 위치를 중심으로 반경 1 n.mile 이내에서 추출된 음향 자료의 수심 값을 기준으로 산출하였다(Fig. 6).

전체 조사 기간 동안 VMEs는 해역 전반에 걸쳐 분포하였으나, 공간적으로는 특정 지형 구간에 집중되는 경향을 보였다. 특히 협곡 가장자리, 급경사지 및 돌출 지형 주변에서 높은 밀도의 분포가 확인되었으며, 전체 채집 위치의 약 70–80%가 이러한 지형적 특징을 가진 구간에 집중되었다.

수심 분포를 보면, VMEs는 약 1,100–3,000 m 범위에서 채집되었으며, 특히 1,700–1,800 m 구간에서 가장 높은 출현 빈도를 나타냈다. 이러한 수심대는 해저 지형이 복잡하게 발달한 협곡 및 사면 구간과 일치하는 특징을 보였다.

분류군별 채집 결과에서는 NTW (Pennatulacea)가 총 279.60 kg으로 전체 기록중량 576.86 kg의 약 48.5%를 차지하여 가장 높은 기록중량을 나타냈으며, Cnidaria 분류군(Gorgonacea, Actiniaria 등)은 전반적으로 넓은 공간 분포를 보였다. 또한 Bryozoa, Porifera, Echinodermata 및 일부 Chordata 분류군도 다양한 해역에서 확인되었으나, 상대적으로 낮은 채집 빈도를 나타냈다.

공간적으로는 북쪽 해역에서 상대적으로 높은 채집 밀도가 나타났으며, 특히 위도 40°–43°S 부근의 협곡 및 돌출 지형 주변에서 다양한 분류군이 집중적으로 분포하였다. 남쪽 해역에서도 협곡 및 돌출 지형을 중심으로 VME 분포가 확인되었으나, 전반적인 밀도는 북쪽 해역에 비해 낮은 경향을 보였다. 일부 채집 위치는 음향 조사 정선과 완전히 중첩되지 않는 구간에서도 확인되었는데, 이는 상업 조업 기반 자료의 공간적 불균일성과 관련된 것으로 해석된다.

이와 같이 VME 분포는 특정 수심 범위와 해저 지형 특성에 따라 뚜렷한 공간적 집중 패턴을 보였으며, 이는 해저 지형 및 저질 환경이 VME 서식지 형성에 중요한 역할을 함을 시사한다.

해저 저질 후방산란강도와 VMEs 위치 분포

VME 채집 위치와 해저 저질 S_v는 채집 분류군과 채집량을 기준으로 색상과 원의 크기를 달리하여 나타내었으며, 각 채집 위치의 S_v 값은 해당 위치를 중심으로 반경 1 n.mile 이내에서 추출된 음향 자료를 이용하여 산출하였다(Fig. 7).

전체 분석 결과, VME 채집 위치의 저질 후방산란강도는 약 -10 dB에서 -70 dB까지 폭넓게 분포하였으나, 대부분의 값은

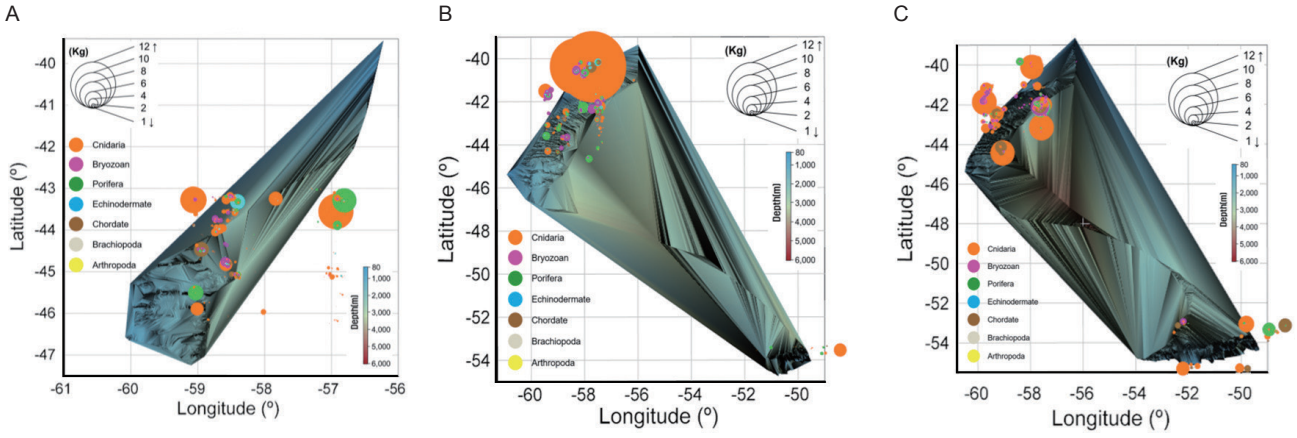


Fig. 6. Matching seafloor topography with VMEs (vulnerable marine ecosystems) distribution. A, 2017; B, 2018; C, 2019.

-10–-30 dB 범위에 집중되는 경향을 보였다. 특히 -15 dB 전후 구간에서 가장 높은 출현 빈도가 나타났으며, 이는 VME가 상대적으로 단단하거나 중간 이상의 경도를 가진 저질 환경과 연관되어 분포할 가능성을 시사한다.

공간적으로는 북쪽 해역과 협곡 가장자리, 돌출 지형 주변에서 VME와 비교적 강한 후방산란강도(-10–-20 dB)가 함께 나타나는 경향이 확인되었으며, 반대로 깊은 협곡 및 분지 구간에서는 -30 dB 이하의 약한 반사 강도와 함께 VME 분포가 상대적으로 감소하는 양상이 나타났다. 이러한 패턴은 해저 지형의 복잡성과 저질 특성이 VME 분포에 중요한 영향을 미친다는 점을 뒷받침한다.

분류군별로 보면, 일부 분류군은 상대적으로 강한 반사 강도 구간에서 주로 나타난 반면, 다른 분류군은 비교적 약한 반사 강도에서도 관측되는 등 차이를 보였다. 예를 들어, 일부 Cnidaria 계통 및 Euryalida는 -20 dB 내외의 비교적 강한 반사 환경에서 분포하는 경향을 보였으며, Bryozoa 등 일부 분류군은 -25 dB 이하의 상대적으로 약한 반사 환경에서도 확인되었다. 그러나 이러한 차이는 일부 분류군의 표본 수가 제한적인 점에 기인할 가능성이 있으며, 해석에는 주의가 필요하다.

또한 일부 VME 채집 위치는 음향 조사 정선과 완전히 중첩되지 않는 구간에서도 확인되었는데, 이는 상업 조업 기반 자료의 공간적 불균일성과 관련된 것으로 판단된다. 이러한 공간적 불일치는 일부 지점에서 음향 자료와 실제 서식 환경 간의 차이를 발생시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있다.

종합하면, VME는 특정 수심대뿐 아니라 일정 범위의 후방산란강도 조건에서 선택적으로 분포하는 경향을 보였으며, 특히 -15 dB 전후의 중간 이상 경도의 저질 환경과 협곡·급경사지와 같은 지형적 복잡성이 결합된 구간에서 높은 출현 빈도를 나타냈다. 이는 해저 지형과 저질 특성이 결합된 환경 요인이 VME 서식지 형성에 중요한 역할을 함을 시사한다.

고 찰

해저지형 · 저질과 VME 분포 패턴

본 연구 결과는 남서대서양 공해 심해 해역에서 VME의 분포가 해저지형의 복잡성과 저질 특성에 의해 강하게 제어됨을 보여준다. VMEs는 수심 1,100–3,000 m 범위에서 분포하였으며, 특히 1,700–1,800 m 구간에서 가장 높은 출현 빈도를 나타냈다. 이러한 수심대는 협곡 가장자리, 급경사지 및 돌출지형과 같은 구조적으로 복잡한 지형이 발달한 구간과 일치하였다.

공간적으로는 협곡 벽과 사면, 돌출 지형 주변에서 VME가 집중적으로 분포하는 경향이 확인되었으며, 이는 심해 산호 및 대형 해면류가 구조적으로 복잡한 환경을 선호한다는 기존 연구 결과와 일관된다(Watling and Auster, 2021). 이러한 지형은 부착성 생물에 필요한 단단한 기질을 제공하고, 유속 및 유기물 공급이 유지되는 환경을 형성함으로써 VME 서식지로 기능하는 것으로 해석된다(Rossi, 2013).

저질 S_v 분석 결과, 돌출지형에서는 -10 dB 내외의 상대적으로 강한 반사 신호가 나타난 반면, 협곡 및 분지에서는 -30 dB 이하의 약한 반사가 우세하였다. 특히 VME 채집 위치에서 최근접 EDSU와 매칭된 분류군별 평균 S_v는 -11.17–-20.89 dB 범위에 분포하였으며, 다수의 분류군에서 -15 dB 전후 값을 보였다. 이는 VME 채집기록이 상대적으로 높은 후방산란강도를 보이는 해저면 인접 환경과 함께 나타나는 경향을 시사한다. 다만 단일주파수 단일빔 자료만으로 저질의 경도 또는 세부 기질 유형을 확정할 수 없으므로, 이러한 S_v 값은 저질 특성의 상대적 음향구배로 해석하였다.

상업용 단일빔 음향자료의 VME 서식지 평가 가능성

상용어군탐지기는 과학어군탐지기에 비해 정량적 보정에 한계가 있으나, 최근 연구에서는 적절한 보정 절차를 적용할 경

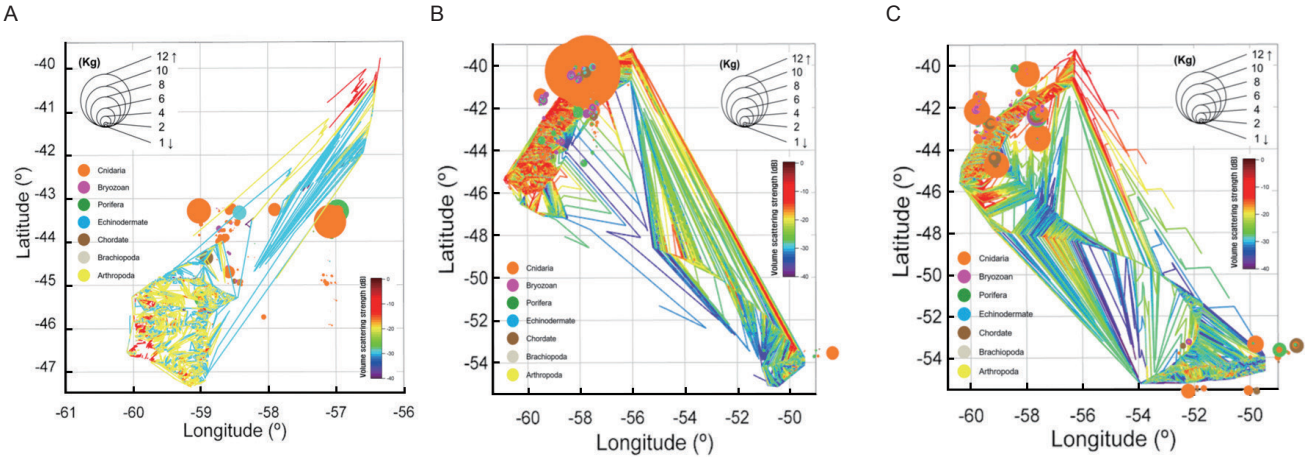


Fig. 7. Correlation between seafloor sediment backscattering strength and VMEs (vulnerable marine ecosystems) location. A, 2017; B, 2018; C, 2019.

우 두 장비 간 음향산란강도의 차이가 크지 않은 것으로 보고되고 있어(Demer et al., 2015; Zhu et al., 2024), 본 연구에서는 S_v 값의 절대치보다는 상대적인 공간 분포 패턴을 중심으로 분석하였다. 분석 결과, 돌출지형과 협곡 간의 뚜렷한 후방산란강도 구배가 확인되었으며, VME가 특정 S_v 범위에 집중되는 경향 또한 나타났다. 이는 단일빔 자료가 제한된 정보에도 불구하고 광역 규모의 서식지 스크리닝에 활용될 수 있음을 시사한다(Anderson et al., 2008; Demer et al., 2015). 따라서, 상업어선에서 지속적으로 수집되는 음향자료는 고비용의 과학조사가 어려운 공해 해역에서도 장기적인 VME 모니터링을 수행할 수 있다는 점에서 활용 가치가 크다. 그러나 자료의 정량적 활용과 정밀한 VME 판별을 위해서는 장비 보정이 필수적이며, 자료 해석 시 보정의 한계와 공간적 불균일성을 충분히 고려할 필요가 있다(van Helmond et al., 2020; Garone et al., 2023; Elson et al., 2025; WWF-Australia et al., 2025).

방법론적 한계와 향후 연구 방향

본 연구는 단일주파수 단일빔 자료를 활용하였기 때문에 입사각 기반 분석이나 주파수 의존적 산란 분리가 제한된다. 또한 심해 환경에서는 음파 감쇠로 인해 저질 간 반사 강도 차이가 감소할 수 있으며, 이는 저질 분류 정확도에 영향을 줄 수 있다.

공간적 측면에서도 자료는 특정 조업 경로에 제한되어 있으며, 일부 해역에서는 음향 자료의 밀도가 낮아 해상도가 충분하지 않았다. 또한 일부 VME 분류군은 표본 수가 제한적이어서 해석에 주의가 필요하다. 또한, 본 연구에서는 VME가 특정 Sv 범위 및 협곡, 급경사지와 같은 지형적 특성을 보이는 해역에 주로 분포하는 경향을 확인하였으나, 이에 대한 통계적 검증은 수행하지 못하였다.

향후 연구에서는 멀티빔 및 다중주파수 음향자료, 원격조종무인잠수정(remotely operated vehicle) 영상 및 실제 저질 시료를 결합한 통합 분석과 함께, 서식지 적합도 모델 및 기계학습 기법을 활용한 정량적 분석이 필요하다(Menandro et al., 2025). 또한, VME 출현·비출현 지점 간 S_v 차이 검정, 수심 및 지형 특성별 출현 빈도 분석, 그리고 일반화선형모형(generalized linear model)/일반화가법모형(generalized additive model) 기반 서식지 적합성 분석 등을 통해 VME 분포 특성을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이를 통해 VME 분포에 영향을 미치는 환경요인을 보다 객관적으로 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

관리 · 정책적 함의

본 연구에서 확인된 협곡 가장자리와 급경사지, 돌출지형 주변은 VME가 집중적으로 분포하는 잠재적 핵심 서식지로 판단된다. 이러한 해역은 공해 심해 저층어업 활동에 따른 중대한 악영향(SAI) 평가 시 우선적으로 고려되어야 한다(FAO, 2009; WWF-Australia et al., 2025).

또한 상업어선 음향자료를 활용한 모니터링 체계를 구축할 경우, 지속적인 VME 서식지 감시와 관리가 가능하며, 이는 심해 생태계 보전과 지속가능한 어업 관리에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다(Rice, 2011; Gianni, 2022).

사 사

본 연구는 해양수산부/해양수산과학기술진흥원의 지원(국제사회 IUU어업을 위한 원양어선 전자 모니터링 기술개발, 과제번호 RS-2025-02307389, RS-2025-02219912)을 받아 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

Anderson JT, Holliday DV, Kloser R, Reid DG and Simard Y. 2008. Acoustic seabed classification: Current status, observations and future directions. ICES J Mar Sci 65, 1004-1011. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn061.

CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources). 2009a. Conservation Measure 22-07 (2009): Interim measure for bottom fishing activities subject to Conservation Measure 22-06 encountering potential vulnerable marine ecosystems in the Convention Area. Retrieved from https://cm.ccamlr.org/sites/default/files/22-07%20(2009).pdf on Apr 8, 2026.

CCAMLR (Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources). 2009b. CCAMLR VME taxa classification guide. CCAMLR, Hobart, Tasmania, Australia, 4. Retrieved from https://atlant.vniro.ru/images/stories/foto_sobitij/sys_inspectirovania_antkom/systema_nau4no-go_nablydenija/ruk_i_spravo4naj_lit/Guide_CCAMLR_VME_taxa.pdf

Clark MR, Althaus F, Schlacher TA, Williams A, Bowden DA and Rowden AA. 2016. The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: A review. ICES J Mar Sci 73, i51-i69. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsv123.

Comas-Rodríguez VM. 2014. Inverse modeling of the Brazil-Malvinas Confluence: Mass and heat transports. Ph.D. Dissertation, University of Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas, Spain. Retrieved from https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/55072/1/inverse_modeling_brazil.pdf on Apr 10, 2026.

Cutter GR Jr and Demer DA. 2014. Seabed classification using surface backscattering strength versus acoustic frequency and incidence angle measured with vertical, split-beam echosounders. ICES J Mar Sci 71, 882-894. https://doi.org/10.1093/icesjms/fst177.

Demer DA, Berger L, Bernasconi M, Bethke E, Boswell K, Chu D, Domokos R, Dunford A, Fässler S, Gauthier S, Hufnagle LT, Jech JM, Le Bouffant N, Lebourges-Dhaussy A, Lurton X, Macaulay GJ, Perrot Y, Ryan T, Parker-Stetter S, Stienessen S, Weber T and Williamson N. 2015. Calibration of

acoustic instruments. ICES Cooperative Research Report No. 326. ICES, Copenhagen, Denmark, 133 pp. https://doi.org/10.17895/ices.pub.5494.

Elson L, Manik HM, Hestirianoto T and Pujiyati S. 2025. Seabed geoacoustic analysis using scientific single beam echosounder. J Ilm Perikan Kelaut 17, 28-39. https://doi.org/10.20473/jipk.v17i1.55832.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009. International guidelines for the management of deep-sea fisheries in the high seas. FAO, Rome, Italy, 73. Retrieved from https://www.fao.org/4/i0816t/i0816t00.htm on Sep 4, 2026.

Garone RV, Birkenes Lønmo TI, Schimel ACG, Diesing M, Thorsnes T and Løvstakken L. 2023. Seabed classification of multibeam echosounder data into bedrock/non-bedrock using deep learning. Front Earth Sci 11, 1285368. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1285368.

Garzoli SL and Garraffo Z. 1989. Transports, frontal motions and eddies at the Brazil-Malvinas currents confluence. Deep Sea Res Part A 36, 681-703. https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90145-3.

Gianni M. 2011. Review of the implementation of UNGA Resolutions 61/105 and 64/72. In: Workshop to Discuss Implementation of Paragraphs 80 and 83–87 of Resolution 61/105 and Paragraphs 117 and 119–127 of Resolution 64/72 on Sustainable Fisheries, 15-16 September 2011, United Nations, New York, NY, U.S.A. Retrieved from https://www.un.org/depts/los/reference_files/2011_fisheries_wrkshp_presentations/Panel-1_Matthew-Gianni_Deep-Sea-Conservation-Coalition.pdf on Apr 10, 2026.

Gianni M. 2022. Implementation of UNGA resolutions 61/105, 64/72, 66/68 and 71/123 related to the management of bottom fisheries on the high seas/ABNJ. Presentation at the UN Bottom Fisheries Workshop, 2-3 August 2022, UN Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea, New York, NY, U.S.A. Retrieved from https://www.un.org/depts/los/PanellistPRE4Website/DSCC-GianniM--UNGA-WORKSHOP_BOTTOM_FISHING.pdf on Apr 10, 2026.

Gu F, Chiessi CM, Zonneveld KAF and Behling H. 2019. Shifts of the Brazil-Falklands/Malvinas Confluence in the western South Atlantic during the latest Pleistocene–Holocene inferred from dinoflagellate cysts. Palynology 43, 483-493. https://doi.org/10.1080/01916122.2018.1470116.

Laureanti NC, Curchitser E, Hedstrom K, Adcroft A, Hallberg R, Harrison MJ, Dussin R, Chou SC, Nobre P, Giarolla E and Camayo R. 2025. Controls of the latitudinal migration of the Brazil-Malvinas Confluence described in MOM6-SWA14. EGUsphere [Preprint], egusphere-2025-3823. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3823.

Menandro PS, Misiuk B, Schneider von Deimling J, Bastos AC and Brown CJ. 2025. Multifrequency seafloor acoustic backscatter as a tool for improved biological and geological assessments – updating knowledge, prospects, and challenges. Front Remote Sens 6, 1546280. https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1546280.

NPFC (North Pacific Fisheries Commission). 2025. Report of the 9th Meeting of the Scientific Committee (NPFC-2024-SC09). NPFC, Tokyo, Japan. Retrieved from https://www.npfc.int/sites/default/files/2025-01/SC09%20Report.pdf on Apr 10, 2026.

Orúe-Echevarría D, Pelegrí JL, Alonso-González IJ, Benítez-Barrios VM, Emelianov M, García-Olivares A, Gasser i Rubinat M, De La Fuente P, Herrero C, Isern-Fontanet J, Masdeu-Navarro M, Peña-Izquierdo J, Piola AR, Ramírez-Garrido S, Rosell-Fieschi M, Salvador J, Saraceno M, Valla D, Vallès-Casanova I and Vidal M. 2021. A view of the Brazil-Malvinas confluence, March 2015. Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap 172, 103533. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2021.103533.

Pusceddu A, Bianchelli S, Martín J, Puig P, Palanques A, Masqué P and Danovaro R. 2014. Chronic and intensive bottom trawling impairs deep-sea biodiversity and ecosystem functioning. Proc Natl Acad Sci USA 111, 8861-8866. https://doi.org/10.1073/pnas.1405454111.

Rice J. 2011. Review of progress on implementation of the FAO international guidelines for the management of deep-sea fisheries in the high seas: Experience of RFMO/As with identifying and protecting VMEs. In: FAO Workshop for the Development of a Global Database for Vulnerable Marine Ecosystems (VMEs), 7-9 December 2011, Rome, Italy. FAO, Rome, Italy. Retrieved from https://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/vme/VME-DB_FAO_Workshop_December2011/background_1.pdf on Apr 14, 2026.

Rossi S. 2013. The destruction of the 'animal forests' in the oceans: Towards an over-simplification of the benthic ecosystems. Ocean Coast Manag 84, 77-85. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.08.002.

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

SAERI (South Atlantic Environmental Research Institute). 2022. Vulnerable marine ecosystems (VMEs). Retrieved from https://www.south-atlantic-research.org/vulnerable-marine-ecosystems-vmes/ on Oct 25, 2024.

SPRFMO (South Pacific Regional Fisheries Management Organisation). 2025. 2025 SPRFMO Annual Report. Retrieved from https://www.sprfmo.int/assets/Basic-Documents/Article-29-Reports/2025-SPRFMO-Annual-Report.pdf on Apr 10, 2026.

Stockholm University Baltic Sea Centre. 2021. Bottom trawling threatens European marine ecosystems. Policy Brief. Retrieved from https://www.su.se/download/18.11777a0b1993704a058d499/1758182298071/Policy%20brief%20

Bottom%20trawling%20threatens%20European%20marine%20ecosystems.pdf on Apr 14, 2026.

Torres Alberto ML, Bodnariuk N, Ivanovic M, Saraceno M and Acha EM. 2021. Dynamics of the Confluence of Malvinas and Brazil currents, and a southern Patagonian spawning ground, explain recruitment fluctuations of the main stock of *Illex argentinus*. Fish Oceanogr 30, 127-141. https://doi.org/10.1111/fog.12507.

UN (United Nations). 2023. Agreement under the United Nations Convention on the Law of the Sea on the Conservation and Sustainable Use of Marine Biological Diversity of Areas beyond National Jurisdiction. UN Treaty Series, Chapter XXI, No. 10. Retrieved from https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?chapter=21&clang=en&mtdsg_no=XXI-10&src=TREATY on Apr 10, 2026.

UNGA (United Nations General Assembly). 2006. Resolution 61/105: Sustainable fisheries, including through the 1995 Agreement for the Implementation of the Provisions of the United Nations Convention on the Law of the Sea of 10 December 1982 relating to the Conservation and Management of Straddling Fish Stocks and Highly Migratory Fish Stocks, and related instruments. Retrieved from https://iilj.org/wp-content/uploads/2016/08/General-Assembly-Resolution-61.105-2006.pdf on Apr 8, 2026.

van Helmond ATM, Mortensen LO, Plet-Hansen KS, Ulrich C, Needle CL, Oesterwind D, Kindt-Larsen L, Catchpole T, Mangi S, Zimmermann C, Olesen HJ, Bailey N, Bergsson H, Dalskov J, Elson J, Hosken M, Peterson L, McElderry H, Ruiz J, Pierre JP, Dykstra C and Poos JJ. 2020. Electronic monitoring in fisheries: Lessons from global experiences and future opportunities. Fish Fish 21, 162-189. https://doi.org/10.1111/faf.12425.

von Szalay PG and McConnaughey RA. 2002. The effect of slope and vessel speed on the performance of a single beam acoustic ground classification system. Fish Res 54, 181-194. https://doi.org/10.1016/S0165-7836(01)00266-9.

Watling L and Auster PJ. 2021. Vulnerable marine ecosystems, communities, and indicator species: Confusing concepts for conservation of seamounts. Front Mar Sci 8, 622586. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.622586.

WWF-Australia, Deep Sea Conservation Coalition and IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2025. IUCN Motion 032: Protecting seamounts and other vulnerable marine ecosystems from destructive practices. IUCN World Conservation Congress 2025. Retrieved from https://iucn-2025.s3.eu-west-3.amazonaws.com/motions/en/032-V001-Protecting%20seamounts%20and%20other%20vulnerable%20marine%20ecosystems-EN.pdf on Apr 12, 2026.

Zhu Y, Kenji M, Tokeshi T, Nishiyama Y, Kasai A, Matsuura M, Horie H and Miyashita K. 2024. Calibration of commercial fisheries echo sounders using seabed backscatter for the estimation of fishery resources. PLoS One 19, e0301689. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0301689.