

수산음향 기반의 제주 한림 해상풍력단지 해역에서의 시·공간 어류 분포 특성 및 현존량 추정

김한수^{1,2} · 김미라¹ · 강영철³ · 조성호^{1,2} · 강돈혁^{1*}

¹한국해양과학기술원 해양력강화·방위연구부, ²과학기술연합대학원대학교 KIOST스쿨, ³(주)제주오션

Spatiotemporal Distribution and Biomass Estimates of Fishes around the Jeju Hanlim Wind Farm Using Fisheries Acoustics

Hansoo Kim^{1,2}, Mira Kim¹, Youngchul Kang³, Sungho Cho^{1,2} and Donhyug Kang^{1*}

¹Sea Power Reinforcement·Security Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Busan 49111, Republic of Korea

²University of Science and Technology, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan 49111, Republic of Korea

³Jeju Ocean Ltd., Jeju 63309, Republic of Korea

We investigated the spatiotemporal distribution and biomass of fishes around the Jeju Hanlim offshore wind farm using hydroacoustic methods. Acoustic surveys were conducted in April and October 2025 under daytime and nighttime conditions using a 200 kHz scientific echosounder. During the daytime, fishes were primarily concentrated near the bottom at depths of 20–30 m. In contrast, nighttime distributions were broader within the upper and middle water layers, indicating diel vertical migration behavior. Spatially, relatively high acoustic backscatter was observed in coastal areas and around wind turbine structures. These findings suggest that rocky bottoms and artificial structures provide favorable habitats for fish aggregation. Estimated total biomass was highest during daytime surveys in April (44.1 M/T) and lowest during nighttime surveys in April (11.0 M/T). Biomass estimates in October were 34.85 M/T during the daytime and 15.49 M/T during the nighttime. Overall, these findings indicate that hydroacoustic methods are effective for monitoring fish resources around coastal wind farms and provide useful baseline data for long-term ecological assessment and fisheries resource management.

Keywords: Hydroacoustics, Coastal wind farm, Fish distribution, Biomass estimation, Jeju Hanlim

서 론

제주도 연안은 화산섬의 지형 특성으로 인하여 연안의 수심이 비교적 급격하게 깊어지고, 현무암 기반의 암반 해안이 넓게 분포하며 조간대(갯벌)는 상대적으로 협소한 특성을 보인다. 특히 제주도 동부 및 북부 해안은 암반 해안이 우세하며, 잘피밭 및 해조류 군락과 연산호 군락 등 다양한 서식처가 발달해 연안 생태계의 구조적 복잡성이 높다(Kim et al., 2021). 또한 쿠로시오 해류의 지류인 제주 난류의 영향으로 수온은 연평균 약 17–19°C 수준을 보이고(여름 25–28°C, 겨울 12–14°C), 염분은 약 33–34 psu 범위로 안정적으로 분포한다(Ko et al., 2003). 큰

하천 유입이 적어 담수에 의한 영향은 제한적이지만, 여름철 장마 시기에는 중국의 양쯔강에서 발생하는 저염분수에 의해 국지적 변동이 발생할 수 있는 특징이 있다(Moon et al., 2009; Son and Choi, 2022). 특히, 최근 수온 상승에 따라 열대 및 아열대성 생물의 북상과 종 조성 변화가 보고되고 있어서 제주 연안의 생물 다양성과 어류 군집은 장기적으로 변동 가능성이 큰 해역으로 인식되고 있다(Ribas-Deulofeu et al., 2023, Perrois et al., 2024). 제주도 북서부에 위치한 한림 인근 해역은 회유성 어종(고등어, 전갱이, 갈치, 방어/부시리 등)과 함께 암반 연안 환경에 적응된 쏨뱅이, 뽕에돔, 감성돔, 돌돔, 참돔 등의 어종들이 서식한다고 알려져 있다(Kang et al., 2008). 제주 북서부 해

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 664. 3650 Fax: +82. 51. 719. 9591

E-mail address: dhkang@kiost.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.2026.0217>

Korean J Fish Aquat Sci 59(3), 217-228, June 2026

Received 22 April 2026; Revised 12 May 2026; Accepted 19 May 2026

저자 직위: 김한수(선임연구원), 김미라(전임기능원), 강영철(대표이사), 조성호(책임연구원), 강돈혁(책임연구원)

역의 주요 어업은 연안 정치망, 연안자망, 연승, 소규모 통발, 해녀 채취 등 연안 기반 어업이 중심이며, 수산업 활동은 계절성과 기상 조건의 영향을 크게 받는 것으로 보고되어 왔다. 따라서 한림 연안은 생태적으로 중요한 서식처 기능과 지역 수산업 가치가 동시에 높은 해역으로 수산자원을 지속적으로 평가할 필요가 있다(Kim et al., 2014; Ko et al., 2015; Kang et al., 2022).

제주 북서부 한림읍 수원리 해상에 조성된 해상풍력단지는 국내 최대 규모의 100 MW급 해상 풍력 발전 단지로서, 5.56 MW급 발전기 18기를 설치하여 연간 약 235 GWh의 전력을 생산할 수 있다(Ministry of Climate, Energy and Environment, 2025). 해상 풍력은 탄소 중립을 위한 핵심 에너지원으로 확대되고 있으나, 건설 단계에서는 항타 및 공사 과정에서 수중소음 및 부유사 발생으로 인해 정착성 저서 생물, 패류 및 어류의 행동 및 서식에 영향을 미칠 수 있다(Williams et al., 2023; Watson et al., 2025). 운영 단계에서는 터빈 및 구조물에서 발생하는 저주파 소음 및 진동, 해류 흐름 변화, 서식처 구조 변화 등이 장기적인 생태계 변동 요인으로 제시된다(Watson et al., 2025; Zhu et al., 2026). 반면, 해상 풍력 하단의 기초 사석과 구조물은 부착 생물 군집을 형성하며 시간이 경과함에 따라 인공 어초와 유사한 서식처 제공 효과를 나타낼 수 있고, 단지 내 어업 제한은 잠재적으로 부분적 보호구역 기능을 부여하여 일부 어류 및 무척추 동물의 현존량이 증가한 것으로 보고되었다(Watson et al., 2025). 해상풍력단지는 잠재적 부정적 영향과 함께 긍정적 기능 또한 동시에 가질 수 있으므로 단기 또는 장기간의 주·야간 시기, 계절에 따른 변동을 고려한 수산 자원의 지속적인 모니터링이 필요하다.

해상풍력단지의 수산자원을 정량적으로 평가하기 위해서는 풍력 단지 내 특정 위치에서 어구를 이용한 조사 방법은 종 조성 등의 정성적인 측면에서는 장점을 제공하지만 분포 특성 및 자원량 추정 등에 대해서는 한계가 있을 수 있다. 이러한 상호 보완적인 과학어군탐지기기를 활용한 수산음향 조사는 넓은 해역에서 연속적인 자료를 확보할 수 있으며, 수직 및 공간 분포를 동시에 파악할 수 있어 해상풍력단지 내 영향 평가 및 모니터링에 적합한 방법으로 제시되고 있다(Kang et al., 2008; Watson et al., 2025). 특히 제주 해역과 같이 수심 변화가 다양하고 암반 지형이 발달한 해역에서는 어류가 저층 부근에서 분포하는 특성을 보이기 때문에 고주파 음향센서를 이용한 음향 조사 기반 수산 자원의 현존량 추정 기법이 큰 장점을 가질 수 있다.

본 연구에서는 제주 한림 해상풍력단지 주변 해역에서 과학 어군 탐지기기 기반 음향 조사를 수행하여 주야 시간 및 계절에 따른 어류의 수직 및 공간 분포 특성을 파악하고, 어획자료 기반 체장-체중 관계식(L-W relationship) 및 반사 강도(target strength) 함수를 적용하여 우점 종을 대상으로 단위 면적당 밀도와 총 현존량을 추정하였다. 이러한 연구 방법 및 결과는 현재 국내 여러 연안 해역에 건설 혹은 운영하거나 향후 건설 예정인 연안 해상풍력 단지 해역에서의 수산자원 관리를 위한 중요 자

료로 활용이 가능할 것이다.

재료 및 방법

조사 해역

조사 해역은 제주도 북서쪽 연안에 제주 한림 해상 풍력단지가 위치한 해역이다. 해당 해역은 수중 암반이 잘 발달되어 있고 상대적으로 수온이 높아 아열대 해역의 특성을 보인다. 계절적으로는 외해 저층에서 용승이 발생하여 수산 생물이 풍부하고 다양하게 출현하는 해역으로 여러 수산 생물이 서식하는 자원 생물학적 가치가 높은 해역이다(Ko et al., 2003). 조사 해역은 연안 인근의 암반부가 발달해 있으며, 수심 분포는 연안부에서는 약 10 m 외해는 최대 약 50 m까지로 형성되어 있다(Kang et al., 2008; Kwun et al., 2017).

조사 정선

풍력 단지 주변 해역의 수산 음향 조사를 위하여 Aglen (1983)이 제안한 조사면적 범위(degree of coverage, DOC) 식을 이용하였다. 이 식은 수산 음향 조사에서 조사 정선의 밀도를 결정하는 공식으로 주어진 면적을 얼마나 촘촘하게 조사했는지를 나타내는 지표로 활용되고 있다.

$$DOC = \frac{N}{\sqrt{A}} \dots \dots \dots (1)$$

위 식에서 N은 총 조사 정선 길이, A는 총 조사 면적을 의미하며, 조사 정선은 연안선과 해상풍력 구조물과의 안정성을 고려하여 수산 음향 조사 기법에서 많이 활용하고 있는 systematic parallel grid의 조사 정선을 적용하였다(Simmonds and MacLennan, 2005). Fig. 1과 같이 조사 해역에서 총 13개의 음향 정선을 구성하였으며, 조사 면적과 거리를 고려할 때 DOC는 약 7.4로 계산되었다. 4월 춘계 시기에는 총 13개 정선을 조사하였고, 10월 추계 시기에는 총 12개 정선을 조사하였다(10월 transect 12 제외). 이 때, 총 정선 길이는 4월 주간 103 n-mile, 야간 106 n-mile, 10월 주간 94 n-mile, 야간 91 n-mile이었다. 어류 현존량 분석을 위한 조사 해역의 조사 시기별 및 주/야간별 자료의 균형이 양호하여 평균값의 대표성이 확보되었다(Table 1).

수산 자원의 수직 및 공간 분포 파악을 위한 음향 조사는 2025년 4월(춘계) 및 10월(추계) 시기에 수행되었으며, 사전에 계획한 동-서 방향 및 북서-남동 방향의 정선에 대해 주간 및 야간 시기에 조사를 수행하였다. 춘계와 추계 음향 조사 시, 바람이 많이 불었으며 조사 해역이 상대적으로 천해역이므로 전 수층이 혼합되어 수온이 일정하게 분포하는 특성을 보였다. 주간 및 야간 조사 시기, 평균 수온은 춘계 시기에 약 15.4°C, 추계 시기에 약 25.6°C로 나타났다.

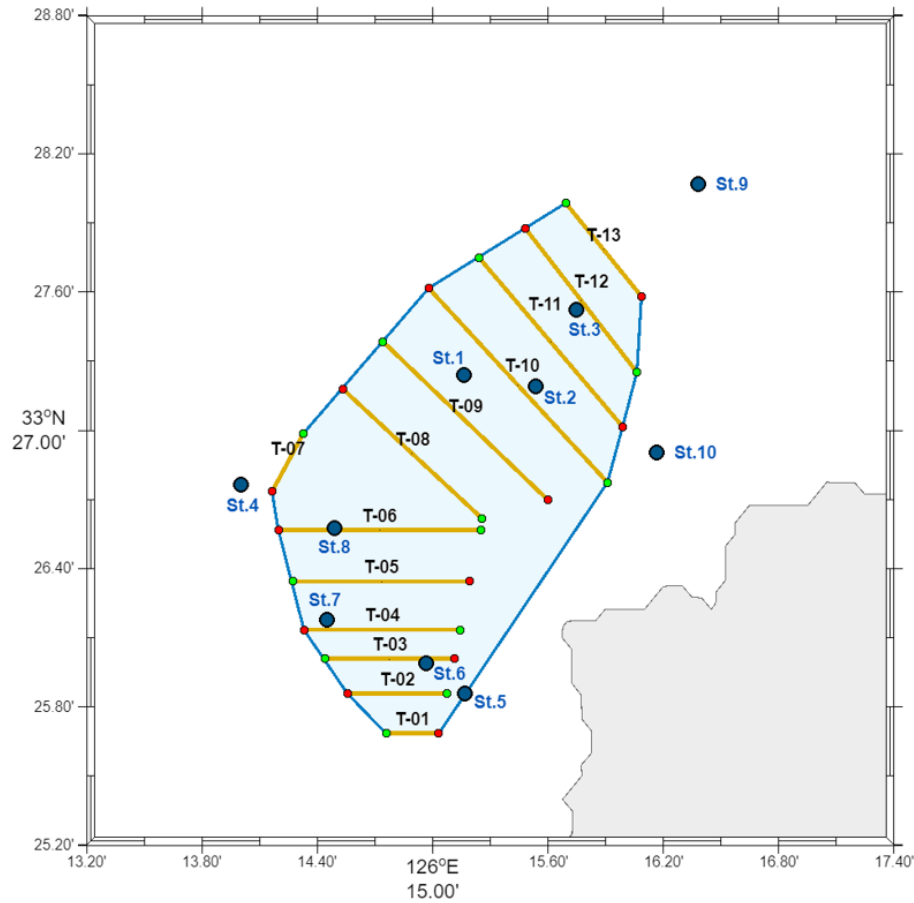


Fig. 1. Map of the study area around the Jeju Hanlim offshore wind farm, showing the 13 acoustic survey transects (yellow line and red and green dots) and 10 sampling survey stations (blue circles).

Table 1. Acoustic survey transects, including start and end positions and cruise-track length, in the Jeju Hanlim offshore wind farm area

Transect #	Start position		End position		Survey track (km)
	Latitude (N)	Longitude (E)	Latitude (N)	Longitude (E)	
1	33° 25.685'	126° 15.032'	33° 25.685'	126° 14.757'	0.5
2	33° 25.858'	126° 14.556'	33° 25.858'	126° 15.074'	1.0
3	33° 26.009'	126° 15.114'	33° 26.009'	126° 14.438'	1.2
4	33° 26.135'	126° 14.330'	33° 26.135'	126° 15.143'	1.4
5	33° 26.345'	126° 15.193'	33° 26.345'	126° 14.274'	1.6
6	33° 26.568'	126° 14.197'	33° 26.568'	126° 15.252'	1.8
7	33° 26.734'	126° 14.164'	33° 26.986'	126° 14.327'	1.7
8	33° 27.179'	126° 14.533'	33° 26.618'	126° 15.256'	1.7
9	33° 26.697'	126° 15.600'	33° 27.385'	126° 14.741'	1.9
10	33° 27.617'	126° 14.979'	33° 26.774'	126° 15.909'	2.2
11	33° 27.016'	126° 15.988'	33° 27.749'	126° 15.241'	2.0
12	33° 27.877'	126° 15.481'	33° 27.252'	126° 16.062'	1.6
13	33° 27.581'	126° 16.086'	33° 27.986'	126° 15.692'	1.1
Total length of cruise track (km)					19.7

음향 자료 수집

수산 음향 조사를 위하여 사용한 과학어군탐지기는 시스템 제어부, 센서부 및 예인체로 구성된 통합 시스템(DT-X Extreme; BioSonics Inc., Seattle, WA, USA)을 사용하였다(BioSonics, 2005). 상대적으로 수심이 얇은 연안 해역임을 고려하여 고주파수 대역인 200 kHz 분할빔 트랜스듀서를 예인체에 부착하여 선박의 후미에서 예인하여 조사를 수행하였다. 해당 센서는 split-beam 방식의 디지털 센서이며, 수심이 얇은 천해에서 해저면 신호 및 어류 신호의 수신 값에 큰 영향을 주기 때문에 조사에 사용한 센서 내부에 방위 및 기울기를 측정할 수 있다. 따라서, 해저면 신호 형태 및 강도와 센서 기울기 자료를 실시간으로 확인하면서 선박의 예인 속도를 4-6 knots로 가변하면서 관측을 수행하였다.

음향 자료 수신을 위한 pulse rate는 수심이 얇은 천해역이고 탐지 어군의 분해능을 증가시킬 수 있는 장점을 고려하여 초당 2 pings으로 설정하였다. 음향 자료에 필수적인 음향 센서의 위치 정보는 조사 주변의 섬과 육지에 근접하여 음향 조사를 실시하므로 통합 시스템 내부에 있는 DGPS를 사용하였다. 음향 센서로부터의 수중으로 발사되는 송신 신호의 길이를 나타내는 펄스 길이(pulse length)는 일반적으로 원양 조사에서는 약 1 ms를 사용한다. 그러나 제주 연안 해역에 분포하는 어류 종은 크기가 작고 수심이 얇은 것을 고려하여 상대적으로 고분해능의 수층 자료를 얻기 위하여 0.3 ms로 설정하였다. 춘계와 추계 시기 각각 주/야간에 수행된 음향 조사로부터 층별 어군의 분포 특성 및 강도를 나타내는 체적 후방산란 강도(volume backscattering strength, Sv) 값과 음향 반사강도(target strength; dB) 값을 저장하였다. 설정한 음향 시스템 변수는 Table 2와 같다.

음향 반사강도(Target strength)

조사 해역에서 서식하는 어류는 대부분 경골 어류이며 체내에

부레를 가지고 있는 특징이 있다. 조사 해역에서 우점하여 분포하고 있는 어종은 음향 조사와 동일한 시기에 자망 및 통발 조사를 통해 분석 결과 다양한 어종이 채집되었다. 이 때, 현존량 도출을 위하여 중요한 요소 중 하나인 음향 반사강도 값은 현장 조사에서 획득한 체적 Sv를 현존량으로 계산하는 과정에서 중요한 변수 중 하나로 사용된다. 어획 조사 기반 자료로부터 획득한 출현 어류 종에 대하여 음향 반사강도를 측정하는 것은 이상적인 방법론이나 현실적으로 모든 어종에 대한 음향 특성을 반영하는 것은 상대적으로 어려운 일이다. 따라서, 어류의 음향 반사강도 함수는 체내의 부레가 존재하는 경골어류의 일반적인 음향 반사강도 함수를 사용하였다(Foote, 1987; Simmonds and MacLennan, 2005; Kang et al., 2008). 기존 연구에 따르면 체내에 부레를 가진 경골 어류의 음향 반사강도 식은 아래와 같은 식으로 알려져 있다.

$$TS=20 \times \log_{10} L (cm) - 72.0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

음향 자료 처리 및 현존량 산출 방법

음향 자료는 고해상도 시간 및 공간에 따라 연속적으로 취득하므로 대용량 형태로 저장된다. 자료 분석 및 전처리에 사용한 프로그램은 수산음향 자료 처리를 위해 전 세계적으로 활용하고 있는 Echoview 소프트웨어를 사용하였다(Ver.16; Echoview Pty Ltd, Australia, 2008). 먼저 획득한 자료에서 표층, 해저면 및 불필요한 잡음 등을 제거한 에코그램을 대상으로 수층 자료를 분석하였다.

2025년 4월과 10월 주간 및 야간 시기 각각의 음향 조사를 통해서 해수면과 해저면 사이의 수층에 대한 생물의 분포 특성 및 강도를 나타내는 체적 Sv를 위치 자료와 함께 저장하지만, 음향 산란체의 분포 정도를 음향학적 표현으로 나타내는 체적 Sv는 상용로그 표현 형태인 데시벨 단위로 표시하므로 비선형 값으로 표시된다. 이러한 비선형 값인 체적 Sv를 선형적으로 표시한 것이 후방산란 단면적 계수, NASC (nautical area scattering coefficient, NASC; m²/n·mile²)이다. 아래의 변환식을 거쳐 체적 Sv 값을 NASC 값으로 변환하여 사용한다(Simmonds and MacLennan, 2005).

$$NASC=4\pi \times 1,852^2 \times 10^{\frac{Sv}{10}} \times T \quad \dots\dots\dots (3)$$

음향 산란신호에 대하여 어군의 시/공간적인 분포 특성 및 현존량 분석을 위해 선형값인 NASC로 변환하여 추출하였다. 여기서 1,852는 1 nautical mile의 미터 환산 값이다. 한편, 분리된 가상 에코그램에서 NASC는 음향 정선의 거리를 고려하여 정량 비교를 위하여 정선 자료는 0.1 마일의 EDSU (elementary distance sampling unit) 간격으로 전체 수층에 대해 음향 자료를 추출하였고, 각 EDSU에서 추출된 NASC 자료를 대상 어군의 시/공간 분포 특성 및 현존량 계산에 이용하였다.

Table 2. Scientific echosounder parameters and settings applied during the hydroacoustic surveys in April and October 2025

Parameters	Unit	2025	
		April	October
Frequency	kHz	200	200
Source level	dB/μPa	221.6	221.6
Beam width	degree	6.6	6.6
Data threshold	dB	-130	-130
Ping rate	pps	2.0	2.0
Pulse width	ms	0.3	0.3
Absorption coefficient	dB/m	0.0649	0.0597
Sound speed	m/s	1,520.96	1,505.63
Collection range	m	1-70	1-50

어획 자료와 음향 반사강도 자료에 근거하여 음향 변환계수 (conversion factor)를 산출하였다. 변환계수는 대상 종의 체장-체중 관계식, 체장 조성, 음향 반사강도 함수로 구성되어 있으며, NASC에 대한 단위 현존량 밀도를 계산할 수 있다. 변환 계수 계산 결과, 4월 조사에서는 0.1946, 10월 조사에서는 0.1345로 계산되었다.

$$\rho = m \times \sum_{i=1}^n f_i L_i^n \times \text{NASC} \dots\dots\dots (4)$$

위 식에서 m , n 은 길이 및 무게 함수, 체장 조성, 음향 반사강도 함수의 관계식으로부터 계산되는 변환 상수, f_i 는 체장 빈도수, L_i 는 대상 종의 체장이다. 우점 어종 별로 분리한 가상 에코그램에서 NASC 값은 해수 체적 내의 신호로부터 수신되는 신호의 선형적인 합이므로, 음향 변환 계수를 이용하여 밀도(ρ)를 계산한다(Hewitt and Demer, 1993). 추출한 NASC 값과 음향 변환 계수로부터 계산된 어류의 단위 밀도 자료를 이용하여 각 정선별 평균 현존량 밀도($\bar{\rho}$)를 계산하였으며, 전체 조사 해역의 평균 어군 밀도는 정선별 평균 밀도의 가중 평균(weighted mean)을 계산하는 식을 이용하였다.

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\rho}_i n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \dots\dots\dots (5)$$

위 식에서, $\bar{\rho}_i$ 는 i 번째 정선의 평균 밀도이며, n_i 은 i 번째 정선을 1마일로 환산한 거리의 수이다. 평균 현존량 밀도의 변량(Var)과 전체 조사 면적(A)을 적용하여 전체 현존량(B)을 식으로 표현하였다.

$$\text{VAR}(\bar{\rho}) = \frac{N}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\rho}_i - \bar{\rho})^2 \cdot n_i^2}{(\sum_{i=1}^n n_i)^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$B = A \times \bar{\rho} \dots\dots\dots (7)$$

위 식에서, A는 전체 조사 면적(m^2)에 평균 현존량 밀도($\bar{\rho}$)를 곱하여 산출하였다. 각 정선의 평균 밀도와 전체 조사 지역의 평균 밀도로부터 변동과 현존량 변동 계수(coefficient of variance, CV)는 아래 관계식으로부터 계산하였다. CV 값이 작을수록 정선간 밀도 편차가 작아 어류 분포가 고르게 나타남을 의미한다.

$$\text{Var}(B) = A^2 \times \text{var}(\bar{\rho}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{CV} = \frac{\sqrt{\text{var}(B)}}{B} \dots\dots\dots (9)$$

어획 자료 분석 결과, 우점 어류는 쏨뱅이(*Sebastiscus marmoratus*), 호박돔(*Choerodon azurio*), 참돔(*Pagrus major*), 쏨

중개(*Plotosus lineatus*)로 나타났으며, 해당 해역에서 서식하는 우점 어류의 현존량 분석을 위하여 추출된 NASC 자료로부터 별도로 과정을 통해 음향 값을 분리해야 한다. 이를 위하여 여러 어류들이 혼재되어 존재하는 경우 적용하는 음향 적분치인 NASC 값을 배분하는 partitioning echo integral 기법을 사용하였다. 즉 어류에 의해 적분되는 음향 에너지의 총합에 대해 각각의 우점 종 수(n)에 대한 에너지 배분을 의미하므로 본 연구에서 어류로 추출된 NASC 값에서 최우점 어류와 기타 어류의 비율을 배분하였다.

$$\text{NASC}_i = \frac{w_i < \sigma_i > \text{NASC}_{\text{fish total}}}{\sum_i^n w_i < \sigma_i >} \dots\dots (10)$$

위 식에서 $\text{NASC}_{\text{fish total}}$ 어류에 의한 NASC 전체 합, w_i 는 각 우점 종 무게의 점유 비율이며, $< \sigma_i >$ 는 우점 어류의 음향 산란 단면적이다. 위 식의 우변에서 NASC를 제외한 부분을 우점 종에 대한 NASC partitioning coefficient라 하며 각각의 종에 대한 계수의 합은 1이다. 따라서, 어획 조사에서 어획된 자료를 기반으로 상위 3종과 기타 어류로 분리하여 각각의 partitioning coefficient를 계산하였으며, 이를 이용하여 어류만의 가상 에코그램에서 추출한 어류의 전체 NASC fish total 값으로부터 4월 상위 3종(쏨뱅이, 호박돔, 참돔)과 기타 어류, 10월 상위 3종(쏨뱅이, 쏨중개, 참돔)과 기타 어류에 대한 각각의 NASC 값을 계산하였다. Partitioning coefficient로부터 계산된 NASC 우점 종1, NASC 우점 종2, NASC 우점 종3, NASC 기타 어류 값을 이용하여 본 연구 결과에서는 대표적으로 총 어류 현존량과 우점 3종에 대한 계절별 현존량을 도출하였다.

결 과

어군의 수직 분포 특성

계절별 음향 조사를 토대로 획득한 Sv 자료 분석 결과, 4월 춘계 시기에는 어군이 수심 20–30 m 부근의 해저면 부근에 밀집하여 분포하는 특성을 보였다. 일부 구간에서는 해저면에서 상대적으로 크기가 작은 어군 형태가 관찰되지만, 전반적으로 저층 부근에 밀집하여 나타나는 특성을 보였다. 특히 주간 시간에 Sv 값 분포를 보면 상대적으로 저층 부근인 20–35 m 이내의 Sv 값이 야간 시간보다 상대적으로 높게 나타남을 확인하였다(Fig. 2). 주간 시간에는 주로 해저면 부근에 분포하는 형태를 보였으나 야간 시간에는 주로 표층 또는 중층에 분포하는 형태를 보여 조사 해역 내 시간별 어류 분포 변화가 달라지는 특성을 확인하였다. 10월 추계 시기에도 4월과 유사하게 주간 시간에는 저층 부근에서 밀집하여 분포하는 특성을 가지며, 야간 시간에는 동일하게 표층 또는 중층에 분포하는 특성을 보였다. Fig. 2의 Sv 값을 보면 4월과 10월 주간 시간에는 주로 음향 레벨이 수심 20–30 m 부근에서 상대적으로 높게 나타났으며, 야간 시간에는 상대적으로 표층이 높게 나타났고 중층 부근에서 분포

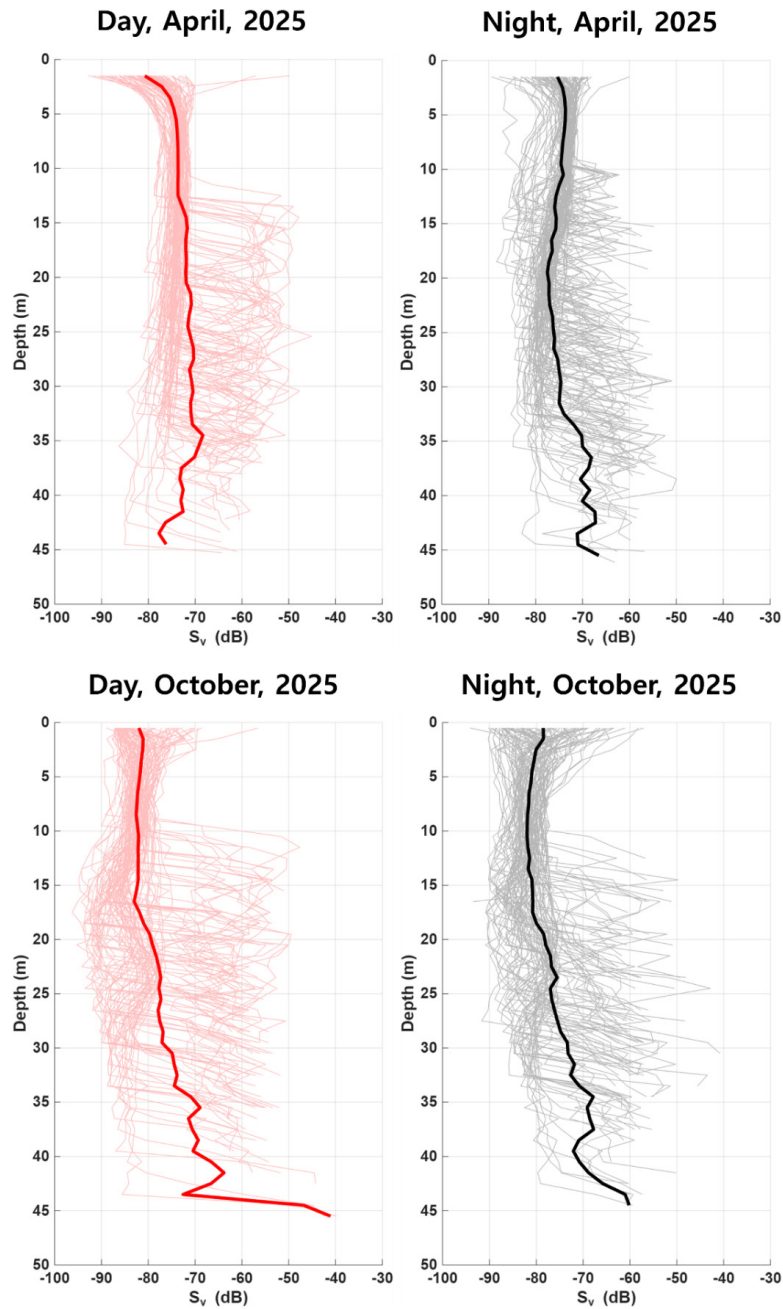


Fig. 2. Vertical distribution of volume backscattering strength (S_v) during daytime and nighttime was conducted in April and October 2025. The thin lines represent S_v profiles calculated at 1-nautical-mile intervals, while bold lines indicate the mean S_v . The red profiles show daytime observations, and the black profiles show nighttime observations.

하는 결과를 보였다. 종합적으로 4월과 10월 모두 주간 시간에는 저층에 밀집해서 나타나는 특성을 보였고, 야간 시간에는 주로 표층 또는 중층에 어군이 분포하는 특성을 보였다.

어군의 공간 분포 특성

어군의 공간 분포는 주간 및 야간 시간대에 뚜렷한 차이가 나

타남을 확인하였다. 4월 주간 시간에 NASC 값은 $2.4\text{--}177.0\text{ m}^2/\text{n}\cdot\text{mile}^2$ 범위로 나타났으며, 야간 시간에는 NASC 값이 $0.9\text{--}114.1\text{ m}^2/\text{n}\cdot\text{mile}^2$ 범위로 나타났다(Fig. 3). 반면, 10월 주간 시간에는 $1.5\text{--}56.3\text{ m}^2/\text{n}\cdot\text{mile}^2$ 범위로 나타났으며, 야간 시간에는 $1.8\text{--}231.1\text{ m}^2/\text{n}\cdot\text{mile}^2$ 범위로 나타났다(Fig. 4). 공간 분포 특성 분석 결과, 4월과 10월 주간 시간에는 상대적으로 어군

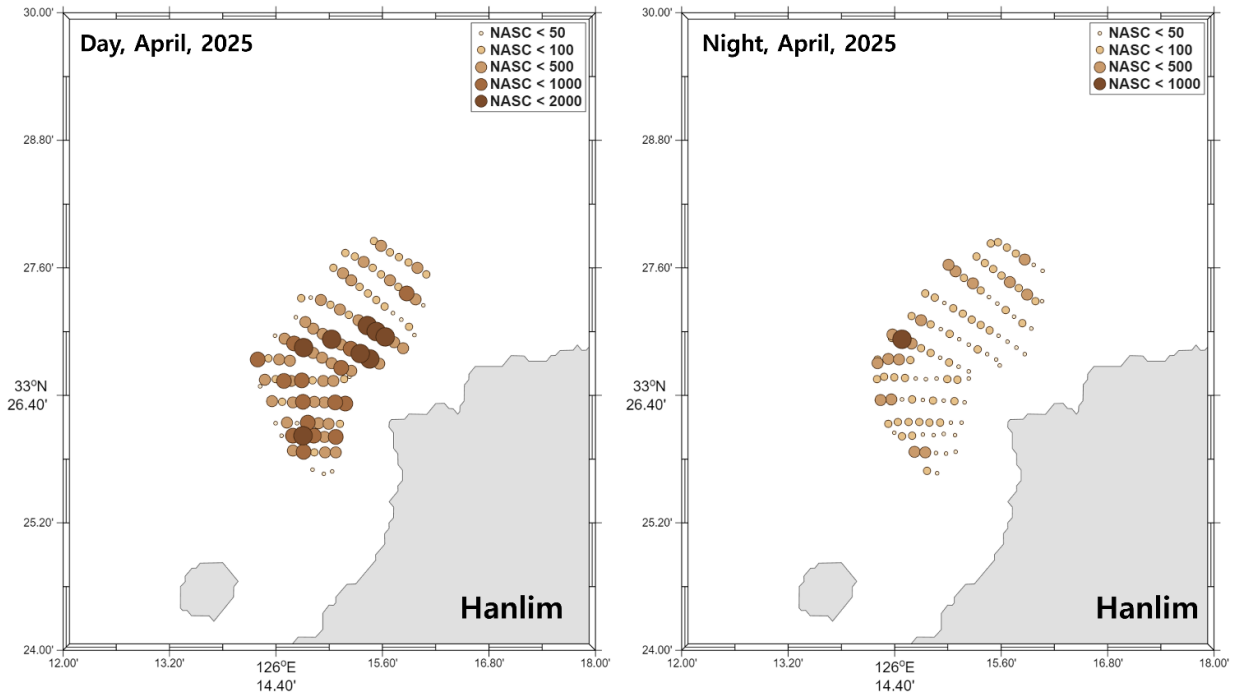


Fig. 3. Spatial distribution of NASC during daytime and nighttime surveys in April 2025 around the Jeju Hanlim offshore wind farm. Circle size indicates the magnitude of NASC at the 0.1 EDSU. NASC, Nautical area scattering coefficient; EDSU, Elementary distance sampling unit.

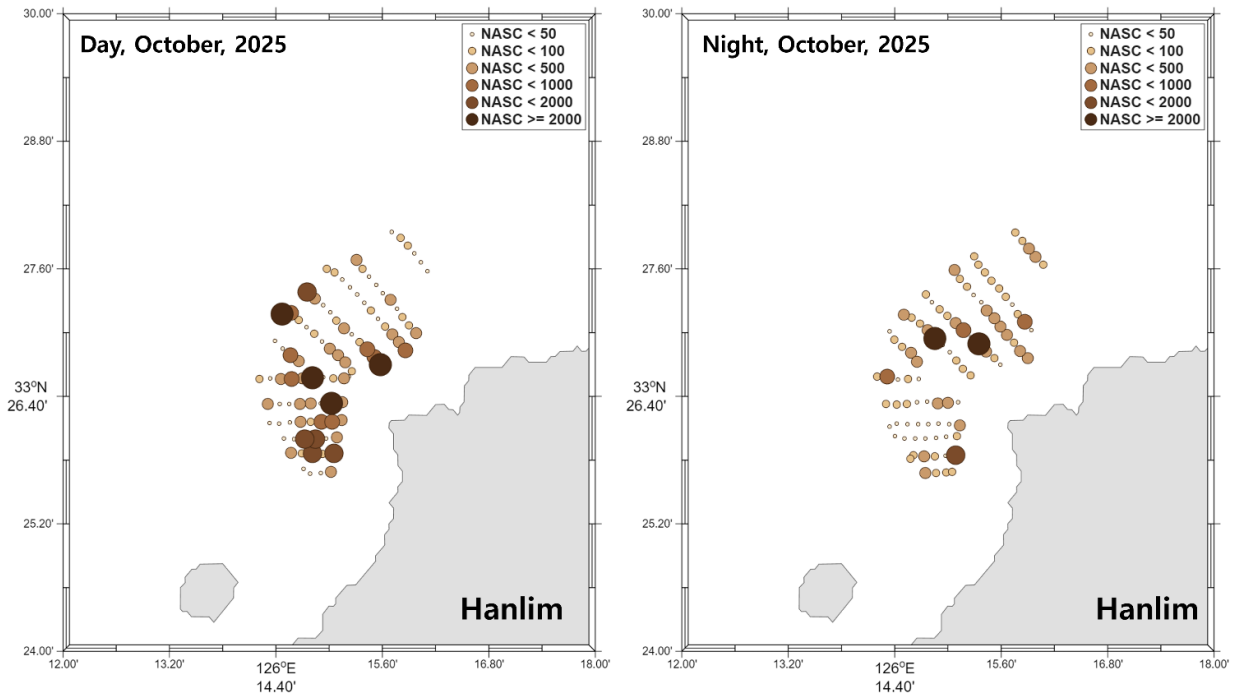


Fig. 4. Spatial distribution of NASC during daytime and nighttime surveys in October 2025 around the Jeju Hanlim offshore wind farm. Circle size indicates the magnitude of NASC at the 0.1 EDSU. NASC, Nautical area scattering coefficient; EDSU, Elementary distance sampling unit.

이 가장 많이 분포하는 지역이 연안에 근접한 해역 또는 해상 풍력기가 설치된 위치 주변으로 확인되었다. 4월 야간 시간에는 조사 해역 전반적으로 낮은 NASC 값을 보였으며, 10월 야간 시간에도 상대적으로 연안 가까운 해역에서 상대적으로 높은 NASC 값을 보였다. 전체적으로 어군은 주간 시간에는 연안 저층에서 주로 활동하지만, 야간 시간에는 표층 또는 중층으로 이동하여 먹이 활동을 하거나 외해로 이동하는 것으로 판단된다.

총 어류의 현존량 추정

평균 어군 밀도는 4월 주간 6.52 g/m²으로 가장 높게 나타났으며, 야간 시간에는 1.63 g/m²으로 가장 낮은 값을 보였다(Table 3). 또한, 10월에는 주간 5.15 g/m², 야간 2.29 g/m²로 계산되었다(Table 4). 종합적으로 야간 시간보다 주간 시간에 어군 밀도가 높게 나타났다. 평균 어군 밀도로부터 면적 적분을 통해 추정 한 주, 야간 현존량 분석 결과 4월 주간 44.1톤, 야간 11톤, 10월 주간 34.85톤, 야간 15.49톤으로 추정되어 4월 주간 기간에 가장 많은 어군이 존재함을 보여주고 있다. 이 때, 현존량 추정 CV

는 4월 주간 16.83%, 4월 야간 14.63%, 10월 주간 21.02%, 야간 20.88%로, 전반적으로 중간 수준(약 15–21%)으로 나타났다. 수산음향 연구에서 CV 값이 25% 미만이면 정선 간 밀도 편차가 비교적 작아 공간 분포가 균일함을 의미하며, 본 조사 결과에서는 CV가 25%를 넘지 않으므로 조사 해역에서 수산 자원의 공간 편차가 크지 않음을 간접적으로 확인하였다.

우점 종에 대한 변환 계수 기반 현존량 추정

어획 자료로부터 획득한 4월 상위 3종(솜뱅이, 호박돔, 참돔)과 기타 어류, 10월 상위 3종(솜뱅이, 쓸종개, 참돔)과 기타 어류의 밀도와 현존량 추정을 수행하였다. 먼저, 획득한 우점 종에 대한 체장 및 체중 자료 기반 변환 계수를 계산하였다. 그 결과, 변환 계수는 4월 솜뱅이 0.1198, 호박돔 0.1814, 참돔 0.1379, 기타 어류 0.2671로 계산되었으며, 10월 솜뱅이 0.1261, 쓸종개 0.0589, 참돔 0.1466, 기타 어류 0.1044로 계산되었다. 4월과 10월 기타 어류에서 CF 값이 차이를 보인건 4월 어획 조사에서 일부 노랑가오리 및 광어가 포획되어 높은 체중 값이 나타난

Table 3. Transect-based NASC values and estimated total fish biomass during daytime and nighttime surveys in April 2025

	Total fish biomass			
	April (Day)		April (Night)	
	n_i	Mean NASC	n_i	Mean NASC
Transect 1	3	3.26	2	5.10
Transect 2	5	33.03	5	9.09
Transect 3	6	59.54	7	4.83
Transect 4	7	22.46	8	5.41
Transect 5	8	42.70	9	7.99
Transect 6	11	27.69	10	5.86
Transect 7	4	26.38	5	10.65
Transect 8	9	43.75	10	18.51
Transect 9	10	59.44	11	5.55
Transect 10	11	56.90	12	5.38
Transect 11	12	11.33	11	8.87
Transect 12	10	16.51	9	11.75
Transect 13	7	13.18	7	7.86
Total transect (n·mile)	103		106	
Conversion factor	0.1946			
Mean biomass density (g/m ²)	6.52		1.63	
Survey area (A, m ²)	6,767,033			
Biomass (M/T)	44.10		11.00	
CV (%)	16.83		14.63	

NASC, Nautical area scattering coefficient; CV, Coefficient of variance.

Table 4. Transect-based NASC values and estimated total fish biomass during daytime and nighttime surveys in October 2025

	Total fish biomass			
	October (Day)		October (Night)	
	n_i	Mean NASC	n_i	Mean NASC
Transect 1	4	6.78	4	8.11
Transect 2	5	66.80	6	28.86
Transect 3	6	56.11	7	4.32
Transect 4	8	27.16	8	4.47
Transect 5	8	55.54	8	9.74
Transect 6	10	44.76	5	18.22
Transect 7	4	27.34	5	12.32
Transect 8	10	55.69	10	30.24
Transect 9	11	78.06	11	36.40
Transect 10	12	12.80	12	15.00
Transect 11	10	8.43	10	11.86
Transect 12	-	-	-	-
Transect 13	6	5.06	5	9.12
Total transect (n-mile)	94		91	
Conversion factor	0.1345			
Mean biomass density (g/m ²)	5.15		2.29	
Survey area (A, m ²)	6,767,033			
Biomass (M/T)	34.85		15.49	
CV (%)	21.02		20.88	

NASC, Nautical area scattering coefficient; CV, Coefficient of variance.

것으로 판단된다. 음향 조사를 통해 관측한 NASC 값에서 echo partitioning 기법을 적용하였으며 대표적으로 4월과 10월에 모두 최우점하여 나타난 쏜뱅이에 대하여 밀도 및 현존량을 추정하였다(Table 5, Table 6).

상위 3종 및 기타 어류에 대한 어군 밀도 분석 결과, 4월 주간 시간 평균 어군 밀도는 쏜뱅이 1.88 g/m^2 , 호박돔 0.42 g/m^2 , 참돔 0.27 g/m^2 , 기타 어류 3.95 g/m^2 로 계산되었다. 반면, 야간 시간 평균 어군 밀도는 쏜뱅이 0.47 g/m^2 , 호박돔 0.11 g/m^2 , 참돔 0.07 g/m^2 , 기타 어류 0.98 g/m^2 로 계산되었다. 10월 상위 3종 및 기타 어류에 대한 주간 시간 평균 어군 밀도는 쏜뱅이 1.11 g/m^2 , 쏜중개 0.47 g/m^2 , 참돔 0.67 g/m^2 , 기타 어류 2.90 g/m^2 로 계산되었으며, 야간 시간 평균 어군 밀도는 쏜뱅이 0.49 g/m^2 , 쏜중개 0.21 g/m^2 , 참돔 0.30 g/m^2 , 기타 어류 1.29 g/m^2 로 계산되었다. 현존량 분석 결과 4월 주간 쏜뱅이 12.75톤, 호박

돔 2.88톤, 참돔 1.87톤, 기타 어류 26.60톤이었으며, 야간 쏜뱅이 3.18톤, 호박돔 0.72톤, 참돔 0.47톤, 기타 어류 6.63톤으로 추정되었다. 반면 10월 주간 쏜뱅이 7.52톤, 쏜중개 3.20톤, 참돔 4.56톤, 기타 어류 19.57톤이었으며, 야간 쏜뱅이 3.34톤, 쏜중개 1.42톤, 참돔 2.03톤, 기타 어류 8.7톤으로 추정되어 종합적으로 4월 주간 시간에 가장 많은 어군이 존재함을 보여주고 있다(Table 7).

고 찰

본 연구에서는 제주 북서쪽의 한림읍 수원리 해상 풍력 발전 단지가 조성된 해역을 대상으로 2025년 4월과 10월에 각각 주간 및 야간 시기에 수산음향 조사를 수행하였고 어군의 수직 및 공간 분포 특성과 현존량을 추정하였다. 조사 해역의 어군은 계절에 관계없이 주간 및 야간 시간에 따라 분포 차이를 나타내었

Table 5. Transect-based NASC values and estimated the top dominant fish biomass (*Sebastiscus marmoratus*) during daytime and nighttime surveys in April 2025

	Dominant fish species (<i>Sebastiscus marmoratus</i>)			
	April (Day)		April (Night)	
	n_i	Mean NASC partitioning	n_i	Mean NASC partitioning
Transect 1	3	1.53	2	2.40
Transect 2	5	15.52	5	4.27
Transect 3	6	27.98	7	2.27
Transect 4	7	10.55	8	2.54
Transect 5	8	20.07	9	3.75
Transect 6	11	13.02	10	2.75
Transect 7	4	12.40	5	5.00
Transect 8	9	20.56	10	8.70
Transect 9	10	27.93	11	2.61
Transect 10	11	26.74	12	2.53
Transect 11	12	5.32	11	4.17
Transect 12	10	7.76	9	5.52
Transect 13	7	6.20	7	3.69
Total transect (n-mile)	103		106	
Conversion factor	0.1198			
Mean biomass density (g/m ²)	1.88		0.47	
Survey area (A, m ²)	6,767,033			
Biomass (M/T)	12.75		3.18	
CV (%)	16.83		14.63	

NASC, Nautical area scattering coefficient; CV, Coefficient of variance.

Table 6. Transect-based NASC values and estimated the top dominant fish biomass (*Sebastiscus marmoratus*) during daytime and nighttime surveys in October 2025

	Dominant fish species (<i>Sebastiscus marmoratus</i>)			
	October (Day)		October (Night)	
	n_i	Mean NASC partitioning	n_i	Mean NASC partitioning
Transect 1	4	1.56	4	1.87
Transect 2	5	15.36	6	6.64
Transect 3	6	12.91	7	0.99
Transect 4	8	6.25	8	1.03
Transect 5	8	12.77	8	2.24
Transect 6	10	10.29	5	4.19
Transect 7	4	6.29	5	2.83
Transect 8	10	12.81	10	6.95
Transect 9	11	17.95	11	8.37
Transect 10	12	2.94	12	3.45
Transect 11	10	1.94	10	2.73
Transect 12	-	-	-	-
Transect 13	6	1.16	5	2.10
Total transect (n·mile)	94		91	
Conversion factor	0.1261			
Mean biomass density (g/m ²)	1.11		0.49	
Survey area (A, m ²)	6,767,033			
Biomass (M/T)	7.52		3.34	
CV (%)	21.02		20.88	

NASC, Nautical area scattering coefficient; CV, Coefficient of variance.

Table 7. Estimated mean biomass density and total biomass of the 3 dominant fish species and other fishes in the Jeju Hanlim offshore wind farm area

Period	Day/Night	Fish Species	Mean biomass density (g/m ²)	Total biomass (M/T)
April 2025	Day	<i>Sebastiscus marmoratus</i>	1.88	12.75
		<i>Choerodon azurio</i>	0.42	2.88
		<i>Pagrus major</i>	0.27	1.87
		Other fish species	3.95	26.60
	Night	<i>S. marmoratus</i>	0.47	3.18
		<i>C. azurio</i>	0.11	0.72
		<i>P. major</i>	0.07	0.47
		Other fish species	0.98	6.63
October 2025	Day	<i>S. marmoratus</i>	1.11	7.52
		<i>Plotosus lineatus</i>	0.47	3.20
		<i>P. major</i>	0.67	4.56
		Other fish species	2.90	19.57
	Night	<i>S. marmoratus</i>	0.49	3.34
		<i>P. lineatus</i>	0.21	1.42
		<i>P. major</i>	0.30	2.03
		Other fish species	1.29	8.70

으며, 특히 주간에는 해저면 부근에 밀집하여 나타났으며, 야간 시간에는 표층 및 중층에 확산하여 나타나는 특성을 보였다.

어군의 수직 분포 분석 결과, 주간에는 어군이 주로 수심 20–30 m 내외의 저층에 밀집하였고, 야간에는 표층 또는 중층으로 이동하는 일주 수직 이동 패턴이 나타났다. 일반적으로 어류의 일주 수직 이동은 포식 회피, 먹이생물의 수직 이동, 광환경 변화 등에 의해 발생하였으며, 본 조사에서도 일반적인 일주 수직 운동 패턴이 발생함을 확인하였다(Brierley, 2014). 특히 본 조사 해역은 연안 암반대가 잘 발달한 지역으로, 주간에는 저서성 어류가 암반 구조 주변에 은신하거나 정착하는 경향을 보이고, 야간에는 먹이 활동을 위해 표층 또는 중층으로 이동했을 것으로 판단된다. 본 연구에서 관찰된 어군의 주간 및 야간 분포 차이는 단순한 물리적 서식처 이용과 포식, 섭식 등에 의한 영향이 복합적으로 반영된 결과로 해석할 수 있다(Amaral et al., 2023).

어군의 공간 분포 분석 결과, 조사 해역에서 서식하는 어군은 제주도 연안과 가까운 지역과 해상 풍력 발전 단지 구조물 주변에서 상대적으로 높은 NASC 값을 보였다. 이는 조사 해역의 암반 지형과 해상 풍력 발전 단지의 하부 구조물이 어류 서식처로 기능하고 있을 가능성을 보여준다(Kang et al., 2008; Watson et al., 2025). 제주 한림 해역은 암반성 서식처가 우세한 해역으로 알려져 있으며, 저서성 어류가 분포하기에 유리한 특성을 보인다(Kang et al., 2008; Ribas-Deulofeu et al., 2023). 여기에 해상 풍력 기초 구조물 등이 추가되면 부착 생물 군집 형성, 먹이 생물 증가, 은신처 제공 등의 효과가 발생할 수 있어 결과적으로

어류 집군 효과가 강화될 수 있다(Werner et al., 2024). 일반적으로 해저에 설치된 구조물은 주변 해역보다 높은 구조 복잡성을 제공하여 부착생물과 저서생물의 정착을 유도하고, 상위 영양단계의 어류 유입을 촉진하는 것으로 알려져 있다(Wilhelmsen and Malm, 2008). 해상 풍력 구조물 또한 장기적으로는 단순한 에너지 생산 시설을 넘어 국지적인 어류 서식처 또는 집군 장 역할을 수행할 가능성이 있다(Reubens et al., 2014). 해상 풍력 구조물이 어류의 일시적인 집군 기능이나 서식처 확장에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다고 사료된다. 다만, 이러한 해상 풍력 구조물에 의한 어류 밀도 증가가 구조물 자체의 생태학적 집군 효과에 의한 것인지, 혹은 일시적인 이동 경로상의 집중인지를 파악하기 위해서는 장기적인 모니터링과 물리, 생물학적 환경 요인을 포함한 대조구 기반의 비교 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 종합적으로 조사 해역에서 관찰된 어군 집중 분포는 자연 암반과 인공 구조물이 결합된 복합 서식 환경으로 인한 결과로 보인다.

계절별 현존량 분석 결과, 총 어류 현존량은 4월 주간에 44.1톤으로 가장 높았고, 10월 주간에는 34.85톤으로 계산되었다. 반면 야간 현존량은 4월 11.0톤, 10월 15.49톤으로 전체적으로 주간 시간보다 야간 시간이 낮은 현존량이 도출되었다. 어획 자료 기반 우점종 분석 결과, 솜뱅이(*S. marmoratus*)가 4월과 10월 모두 가장 높은 현존량 비율을 차지하였으며, 음향 자료 분석을 토대로 추정된 솜뱅이 현존량은 4월 주간에는 12.75톤, 야간 3.18톤으로 추정되었다. 반면 10월 주간에는 7.52톤, 야간에는 3.34톤으로 나타났다. 솜뱅이는 암반성 저층 서식처에 대한

선호도가 높은 대표적인 저서성 경골어류로서 제주도 주변 해역의 자연 암반대 및 풍력 구조물 주변 환경과 높은 적합성을 가지는 종이므로 솜뱅이가 우점하는 해역으로 볼 수 있다(Wang et al., 2025). 이는 주간 및 야간 시기에 발생한 현존량 차이는 야간 시간에 어군이 표층 또는 중층으로 확산되면서 단위 면적당 음향 에너지가 상대적으로 낮게 관측된 결과로 볼 수 있다.

본 연구에서 현존량 산출을 위해 적용한 경골어류에 대한 일반 음향 반사강도 함수는 제주 연안과 같이 종 다양성이 높고 복합 어종이 혼재하여 출현하는 해역에서 개별 어종별의 음향 반사강도 함수 부재에 따른 계산 오류를 최소화할 수 있는 실효적인 방안이다. 어획 조사 결과 최우점종으로 채집된 솜뱅이를 비롯하여 호박돔, 참돔, 쓸종개 등은 모두 체내에 뚜렷한 부레를 가진 경골어류로서 본 표준 함수의 생물학적 범주에 부합한다. 특히, 연안 해역에서 복합 어종이 존재하는 해역에서 검증되지 않은 단일종 고유의 음향 반사강도 함수를 적용할 경우에는 오히려 현존량 산출 과정에서 과소 또는 과대 추정 오류가 발생할 수도 있다. 어종별로 부레 형태가 다르기 때문에 향후에는 어종별 음향 반사강도 함수를 적용하여 현존량을 산정할 필요가 있다.

다만, 본 조사 중 4월 어획 데이터에서 대형 저서성 연골어류(노랑가오리 등) 및 부레가 없는 광어 등이 일부 포획됨에 따라, 기타 어류의 변환 계수 값이 0.2671로 상대적으로 높게 산출된 점은 자원량 평가의 잠재적 오차 요인이 될 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 echo partitioning 기법을 통해 생량 점유 비율을 정밀 배분하여 최우점종인 솜뱅이의 순수 음향 에너지 값만을 분리·추정함으로써 오차를 통제하고자 노력하였다. 향후 한림 해상풍력단지 해역의 장기 모니터링에서는 주요 우점종을 대상으로 수조 또는 현장 가두리 실험을 통해 해역 고유의 단일종 음향 반사강도 함수를 도출하고, 고주파 다중 주파수 분석(multi-frequency separation method) 및 eDNA 분석 기법을 융합 적용하여 종 판별 및 현존량 추정의 정확도를 지속적으로 고도화해야 할 것이다.

동시에 4월과 10월 간의 차이는 계절적 수온 환경, 회유성 어종의 출현 시기, 먹이생물 분포, 그리고 연안 정착성 어종의 변화가 복합적으로 작용한 결과일 가능성이 있다. 특히 4월은 봄철 생산력이 증가하는 시기로서 저층과 연안부에 어류가 집중될 가능성이 높고, 10월은 수온이 높은 상태에서 일부 회유성 또는 아열대성 어종의 활동 범위가 확대될 수 있는 시기이므로 동일 해역에서도 자원 분포 양상이 달라질 수 있다고 추정된다.

본 연구에서 추정된 현존량 값은 조사 해역의 수산 자원을 정량적으로 파악했다는 점에서 의미가 크다. 특히 DOC 약 7.4 수준의 조사 정선 설계와 주간, 야간 및 계절별 조사를 통해 공간적 대표성을 일정 수준 확보하였고, CV 또한 약 15~21% 범위로 나타나 비교적 안정적인 추정 결과를 제공하였다. 일반적으로 수산음향 조사에서 CV 값이 25% 미만이면 정선 간 변동성이 과도하지 않은 것으로 해석할 수 있으므로, 본 연구의 현존

량 추정치는 한림 해역 어류 분포의 전반적 특성을 설명하는 데 유효한 자료로 판단된다. 이는 향후 동일 해역에서 반복 관측을 수행할 경우 연도별 변동, 운영 단계 장기 변화, 특정 구조물 주변의 변화 등을 비교할 수 있는 기준선 자료로 활용될 수 있다.

향후에는 다중 주파수 기반 음향 조사, eDNA, 저층 트롤 또는 정치성 어구 자료와의 연계 분석을 통해 종 판별 정확도와 생태학적 해석력을 높일 필요가 있다. 또한, 장기 모니터링에서는 단순한 현존량 추정에 그치지 않고, 구조물과의 거리별 분포, 계절별 종 조성 변화, 주·야간 행동 차이, 수온 및 유속 변화와의 상관성 등을 통합적으로 검토할 필요가 있다. 특히 해상 풍력 단지는 설치 초기, 운영 안정화 단계, 장기 운영 단계에 따라 주변 생물 군집 반응이 다르게 나타날 수 있으므로, 동일 조사 체계를 유지한 시계열 관측이 중요하다. 이러한 장기 자료가 축적될 경우, 해상풍력단지가 수산자원에 미치는 영향을 객관적으로 평가할 수 있으며, 어업 관리 및 해양공간계획 측면에서도 실질적인 중요 자료를 제공할 수 있을 것이다.

종합적으로 본 연구에서는 제주 한림 해상풍력단지 주변 해역의 어군은 주간에는 저층에 밀집하고 야간에는 표·중층으로 이동하는 뚜렷한 일주 변동을 보였으며 공간적으로는 연안 암반대와 해상 풍력 구조물 주변에서 높은 밀집 양상을 나타냈다. 총 현존량과 우점종 분석 결과, 본 연구는 국내 해상 풍력 운영 해역에서 수산음향 기법을 적용하여 어류 분포와 현존량을 정량적으로 제시한 연구 방법으로 과학적 의미가 있으며, 향후 장기·반복 조사와 다중 자료 융합 분석을 통해 해상풍력단지의 생태적 기능과 수산자원 관리 가치를 보다 정밀하게 평가할 필요가 있다.

사 사

본 논문은 한국수산자원공단 제주본부에서 발주한 용역명 "2025년 제주도 어초어장 관리사업 한림수원해역 수산자원량 추정조사"에서 지원을 받아 (주)제주오션과 함께 수행되었습니다.

References

- Aglen A. 1983. Random errors of acoustic fish abundance estimates in relation to the survey grid density applied. *FAO Fisheries Report*, 300, 293-298.
- Amaral LSSA, Bastoas ASA, Carvalho-Junior L, Maciel MDR, Teixeira-Neves TP, Araujo FG and Neves LM. 2023. Diel changes in fish assemblages of Southwest Atlantic rocky reefs. *Environ Biol Fish* 106, 627-639. <https://doi.org/10.1007/s10641-023-01400-6>.
- Brierley AS. 2014. Diel vertical migration. *Curr Biol* 24, R1074-R1076. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.08.054>.
- BioSonics. 2005. X-Series Echosounder and Visual Acquisition 5.0 User Guide. BioSonics Inc., Seattle, WA, U.S.A.

- Footte KG. 1987. Fish target strength for use in echo integrator surveys. *J Acoust Soc Am* 82, 981-987. <https://doi.org/10.1121/1.395298>.
- Hewitt RP and Demer DA. 1993. Dispersion and abundance of Antarctic krill in the vicinity of Elephant Island in the 1992 austral summer. *Mar Ecol Prog Ser* 99, 29-39. <https://doi.org/10.3354/meps099029>.
- Moon JH, Pang IC and Yoon JH. 2009. Response of the Changjiang diluted water around Jeju Island to external forcings: A modeling study of 2002 and 2006. *Cont Shelf Res* 29, 1549-1564. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.04.007>.
- Kang D, Lim Y, Lee C, Yoo J and Myoung J. 2008. Spatiotemporal distribution of demersal fish aggregations in the western coastal waters of Jeju Island estimated by hydroacoustic survey. *Ocean Polar Res* 30, 181-191.
- Kang M, Min E, Kim BY, Lee C, Kang T, Oh T, Lim B and Hwang D. 2022. A pilot study on estimating the biomass of chub mackerel and jack mackerel in the northwestern sea of Jeju Island using trawl survey and frequency characteristics. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 58, 49-58. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.1.049>.
- Ko JC, Kim JT, Kim SH and Rho HK. 2003. Fluctuation characteristic of temperature and salinity in coastal waters around Jeju Island. *J Korean Fish Soc* 36, 306-316. <https://doi.org/10.5657/kfas.2003.36.3.306>.
- Ko JC, Kim BY, Kim MJ, Park SE, Kim JB and Cha HK. 2015. A seasonal characteristic of marine environment and fish assemblage in the coastal waters Jeju Island, Korea from 2012 to 2013. *J Fish Mar Sci Educ* 27, 319-344.
- Kim J, Hong S, Yang KM, Macias D and Kim JH. 2021. Post-disturbance recovery pattern in the soft corals-macroalgae mixed habitat in Jeju Island, Korea. *J Mar Life Sci* 6, 117-123. <https://doi.org/10.23005/ksmls.2021.6.2.117>.
- Kim MJ, Lee JH, Lee CH and Kim BY. 2014. Species composition and variation of catches by a set net in the coastal waters of Gyudeok, Jeju island. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 50, 407-415. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2014.50.3.407>.
- Kwun HJ, Park J, Kim HS, Kim JH and Park HS. 2017. Checklist of the tidal pool fishes of Jeju Island, Korea. *ZooKeys* 709, 135-154. <https://doi.org/10.3897/zookeys.709.14711>.
- Ministry of Climate, Energy and Environment. 2025. Jeju Hanlim Offshore Wind Power Completion Ceremony Held. Ministry of Climate, Energy and Environment, Sejong, Korea.
- Williams KA, Popper AN, Hice-Dunton L, Higgs DM, Jenkins E, Krebs JM, Mooney TA, Rice AN, Roberts L, Thomsen F, Vigness-Raposa KJ and Zeddies DG. 2023. Sound-related effects of offshore wind energy on fishes and aquatic invertebrates: Research recommendations. In: *The Effects of Noise on Aquatic Life*. Popper AN, Sisneros J, Hawkins AD and Thomsen F, eds. Springer, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_164-1.
- Perrois G, Jost AB, Lee KT, Pons LMT, Yang HS, Son YB, Park HS, Kang DH and Kim T. 2024. Environmental impact on marginal coastal benthic communities within the Jeju Island, South Korea temperate transition zone. *Front Mar Sci* 11, 1345518. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1345518>.
- Reubens JT, Degraer S and Vincx M. 2014. The ecology of benthopelagic fishes at offshore wind farms. *Hydrobiologia* 727, 121-136. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1793-1>.
- Ribas-Deulofeu L, Loubeyres M, Denis V, De Palmas S, Hwang SJ, Woo S, Song JI and Chen CA. 2023. Jeju Island: A sentinel for tracking ocean warming impacts on high-latitude benthic communities. *Coral Reefs* 42, 1097-1112. <https://doi.org/10.1007/s00338-023-02400-9>.
- Simmonds EJ and MacLennan DN. 2005. *Fisheries Acoustics*, 2nd ed. Blackwell Science Ltd., Oxford, U.K., 437.
- Son YB and Choi JK. 2022. Mapping the Changjiang diluted water in the East China Sea during summer over a 10-year period using GOCI satellite sensor data. *Front Mar Sci* 9, 1024306. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1024306>.
- Watson SCL, Szostek CL, Edwards-Jones A, Wills B, Watson GJ and Beaumont NJ. 2025. Assessing, monitoring and mitigating the effects of offshore wind farms on biodiversity. *Nat Rev Biodivers* 1, 581-596. <https://doi.org/10.1038/s44358-025-00074-5>.
- Wang K, Sun J, Wang Y, Zhang S, Zhou Y and Feng M. 2025. 18S rRNA gene sequences of intestinal contents of *Sebastes marmoratus* in the coastal waters of the Ma'an Archipelago in the East China Sea. *Reg Stud Mar Sci* 90, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104421>.
- Werner KM, Haslob H, Reichel AF, Gimpel A and Stelzenmuller V. 2024. Offshore wind farm foundations as artificial reefs: The devil is in the detail. *Fish Res* 272, 106937. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.106937>.
- Wilhelmsson D and Malm T. 2008. Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuar Coast Shelf Sci* 79, 459-466. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.020>.
- Zhu P, Hu Z, Li H, Dai M, Chen J, Hu Z and Xu X. 2026. Underwater noise in offshore wind farms: Monitoring technologies, acoustic characteristics, and long-term adaptive management. *J Mar Sci Eng* 14, 274. <https://doi.org/10.3390/jmse14030274>.