

참조기(*Larimichthys polyactis*)와 민어(*Miichthys miiuy*)의 산란기 코러스 특성 및 일주기 발성 패턴 분석

김한수 · 조성호 · 김선호 · 강돈혁 · 김병권¹ · 윤영글*

한국해양과학기술원 해양력강화 · 방위연구부, ¹주시스코어

Analysis of Spawning-Season Chorus Characteristics and Diel Vocalization Patterns of Small Yellow Croaker *Larimichthys polyactis* and Brown Croaker *Miichthys miiuy*

Hansoo Kim, Sungho Cho, Sunhyo Kim, Donhyug Kang, Byeong Kweon Kim¹ and Young Geul Yoon*

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

¹Syscore Inc., Yongin 16897, Republic of Korea

This study quantified the chorus characteristics of two sciaenid species, small yellow croaker *Larimichthys polyactis* and brown croaker *Miichthys miiuy*, during their spawning seasons using passive acoustic monitoring. Continuous recordings were collected using an autonomous recorder at a sea-cage facility in Tongyeong, Korea. The small yellow croaker was monitored from 15–30 June 2025, and brown croaker from 15–30 September 2025. Power spectral density (PSD) and empirical probability density (EPD) analysis revealed that both species showed strong energy below 1 kHz, but with distinct chorus formations and diel rhythms. Small yellow croaker produced long-lasting nocturnal choruses spanning 0.3–1.2 kHz from evening to dawn, with daily maximum sound pressure levels (SPL) of approximately 135–140 dB re 1 μPa. Brown croaker produced shorter, temporally focused choruses after sunset within 0.2–1.0 kHz, with maximum SPL of 125–140 dB re 1 μPa. EPD results indicated enhanced mean PSD and higher percentiles during high-activity periods for both species. These findings demonstrate species-specific diel vocal strategies, highlighting spawning choruses as key biological components of the marine soundscape and useful acoustic indicators for soundscape-based monitoring of coastal fish populations.

Keywords: Fish chorus, Small yellow croaker, Brown croaker, Diel pattern, Passive acoustic monitoring

서론

해양은 다양한 물리적, 생물학적, 인위적 소리가 상호 작용하며 복합적인 수중음향 체계를 형성한다(Hildebrand, 2009; Duarte et al., 2021; El-Dairi et al., 2024). 이와 같이 바다에서 존재하는 모든 소리의 총체적 환경을 해양 사운드스케이프(ocean soundscape)라고 하며, 해양 생태계에서 발생하는 다양한 과정의 변동과 상호 작용을 반영하는 중요한 생태 지표로 활용되고 있다(Bertucci et al., 2016; Lindseth and Lobel, 2018; Duarte et al., 2021; McKenna et al., 2021; Minello et al., 2021). 특정

해역의 물리적 소음(geophony), 생물 소음(biophony), 인위적 소음(anthropophony)을 정량적으로 측정·해석함으로써, 해양 생태계의 상태, 생물의 행동, 환경 변화 및 인간 활동의 영향을 평가하는 연구가 해양 사운드스케이프 연구이다(Pijanowski et al., 2011; Duarte et al., 2021). 특히 해양 포유류·어류·무척추 동물 등 생물체가 발생시키는 생물음은 생물의 분포, 행동 및 생태적 상태를 나타내는 핵심 정보로 인식되고 있다(Lindseth and Lobel, 2018; Parsons et al., 2022). 최근에는 이러한 음향 정보가 해양 생태계의 구조와 기능을 이해하는 데 필수적인 요소로 주목받으면서, 해양 사운드스케이프 분석은 해양 생태

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 664. 3122 Fax: +82. 51. 719. 9591

E-mail address: ygmoon@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.2026.0065>

Korean J Fish Aquat Sci 59(1), 65-74, February 2026

Received 12 December 2025; Revised 13 January 2026; Accepted 14 January 2026

저자 직위: 김한수(선임연구원), 조성호(책임연구원), 김선호(책임연구원), 강돈혁(책임연구원), 김병권(대표이사), 윤영글(선임기술원)

계 모니터링의 중요한 연구 분야로 부상하고 있다(Pieretti and Danovaro, 2020; Minello et al., 2021).

수중음향 관측 기술의 발전은 해양 사운드스케이프 연구의 확장에 큰 기여를 해왔다. 대용량 디지털 저장 장치와 저전력 전자 소자, 배터리 기술의 발달로 장기간의 대용량 고해상도 수중 음향을 연속적으로 측정하는 것이 가능해졌다(Sousa-Lima et al., 2013; Caldas-Morgan et al., 2015; Gibbs et al., 2019). 또한 장비 가격 감소와 다양한 수중 음향 관측 플랫폼의 개발로 관측 정점 수의 확대와 다수 지점의 동시 운용 등의 광범위한 공간 범위와 다양한 환경 조건에서 음향 자료를 수집할 수 있게 되었다(Van Parijs et al., 2021; Galanos et al., 2025). 이러한 기술적 혁신은 특정 지역의 음향환경을 계절·조석·일주 변화까지 포함하여 연속적으로 기록할 수 있게 하였으며, 과거에는 제한적이었던 생물음 데이터의 축적과 분석을 가능하게 하였다. 그 결과 최근 전 세계적으로 해양 사운드스케이프 연구가 빠르게 확대되고 있으며, 해양 생물 다양성 평가, 서식지 건강성 모니터링, 그리고 어류의 산란기 및 행동 양식 규명 등 다양한 생태·수산 분야로의 연구에 활발하게 적용되고 있는 추세이다(Ricci et al., 2017; Gibbs et al., 2019; Pieretti and Danovaro, 2020).

해양 생태계에서 어류는 음향 다양성이 매우 높은 분류군으로, 현재까지 전 세계적으로 980종 이상, 133 과의 어류가 소리를 낼 수 있는 것으로 보고되었다(Lindseth and Lobel, 2018; Looby et al., 2022; Rice et al., 2022). 어류는 부레(sonic swim-bladder) 진동, 치아 마찰, 근육 수축 등 다양한 메커니즘을 통해 소리를 발생시키며, 단순한 잡음이 아닌 의사소통 목적을 가진 음향 신호를 방출한다(Fine and Parmentier, 2015). 이러한 발성은 구애(courtship), 산란(spawning), 사회적 상호작용, 영역성 방어, 포식자 회피 등 다양한 생태적 기능을 수행한다(Amorim, 2006; Ladich, 2022). 특히 많은 어종이 특정 계절 또는 산란기에 예측 가능한 패턴의 소리를 반복적으로 발생시키기 때문에, 어류 생물음은 해양 사운드스케이프의 시간적 변동을 이해하는 중요한 구성 요소일 뿐 아니라 산란기 탐지의 효과적인 도구로 활용될 수 있다.

어류의 산란기 동안 나타나는 특징적 발성 패턴은 특정 서식지에서의 산란행동을 간접적으로 확인할 수 있는 신뢰도 높은 지표이다(Lobel, 2002; Ricci et al., 2017). 주파수 대역, 하모닉 구조, 반복률 호출(call rate) 등은 산란행동과 밀접하게 연결되어 있으며, 이를 기반으로 산란장(spawning ground) 위치를 파악하거나 산란 시기의 도래를 추정할 수 있다. 이러한 이유로 수동 음향 모니터링(passive acoustic monitoring, PAM)은 최근 어류 생태 연구에서 중요한 기법으로 활용되는 추세이다(Rountree et al., 2006; Stratoudakis et al., 2024; González-Correa et al., 2025). PAM 기법은 비침습적이며, 밤낮을 포함한 장기간의 자료 수집이 가능하고, 어획 기반 조사와 달리 실제 행동 과정에 영향을 미치지 않으며, 거친 환경이나 깊은 수심에서도 동일한 품질의 자료를 확보할 수 있다는 장점이 있다(Van

Parijs et al., 2009; Baumgartner et al., 2014; Yoon et al., 2017).

국내 연안에서는 어류 생물음에 기반한 산란기 연구가 아직 초기 단계에 머물러 있다. 현재까지 국내 해역에서 소리를 발생시키는 어종에 대한 연구는 주로 특정 어종의 음향학적 특성을 기술하는 데 초점이 맞춰져 왔으며, 개체 단위의 발성 특성(call)에 대한 연구 결과가 한정적으로 보고되고 있다(Lee et al., 2007; Choi et al., 2024; Kim et al., 2024a, 2025a, 2025b; Cho et al., 2025; Im et al., 2025; Yoon et al., 2025). 이러한 어류의 생물음 정보는 어종 분류나 자동 탐지 알고리즘 개발에 필수적인 기초 자료이지만, 개체 또는 군집 수준의 발성이 시간적으로 중첩되어 형성되는 코러스(chorus) 특성에 대한 연구는 상대적으로 매우 부족한 실정이다. 한편, 해양 사운드스케이프나 생태학적 관점에서 볼 때에는 개별 생물음 신호보다는 다수 개체의 동시 발성이 만들어내는 코러스가 실제 수중 음향 환경을 지배하는 경우가 많으며, 이는 서식지 이용, 산란기 도래, 군집 구조 등의 변화를 반영하는 중요한 지표가 된다. 따라서 어류 코러스의 시·공간적 특성과 변동 양상을 규명하는 연구는 한국 연안 주요 어종의 산란 생태를 이해하고, 장기적인 자원 관리에 활용할 수 있는 음향 기반 지표를 마련하기 위해 반드시 수행되어야 할 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 국내 연안에 서식하는 참조기(small yellow croaker *Larimichthys polyactis*)와 민어(brown croaker *Miichthys miiuy*)의 산란 시기에 발생하는 생물음을 연속적으로 관측하고, 시간적·주파수적 특성을 분석함으로써 어류 생태 연구의 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 측정된 생물음 자료를 기반으로 산란 시기 동안 나타나는 특징적인 발성 패턴을 규명하고자 한다. 본 연구의 결과는 국내 어류 생물음에 대한 데이터베이스 구축과 해양 사운드스케이프 기반의 생태 모니터링 연구를 위한 과학적 근거를 제공한다.

재료 및 방법

대상 어종

본 연구의 대상 어종인 참조기와 민어는 민어과(Sciaenidae)에 속하며, 한국 황해, 남해, 동중국해, 발해만 및 일본 중부 등 북서 태평양 해역에 서식하는 상업적으로 매우 중요한 자원 어종이다(Lee et al., 2017; Kang et al., 2020; Kim et al., 2024a, 2024b; Yoon et al., 2025). 참조기는 수심 90 m 이내의 연안 해역에서 주로 서식하며, 수온은 약 7–25°C 범위에서 분포하는 것으로 알려져 있다(Song et al., 2024). 본격적인 산란 시기는 5–6월로, 주요 산란장은 황해와 동중국해에 위치한다(Lee et al., 2017; Jang et al., 2020; Kim et al., 2024a, 2024b; Liu et al., 2024). 산란 시기 동안 참조기는 무리를 지어 이동하며, 비교적 넓은 주파수 대역의 펄스형 코러스 소리를 발생시키는 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2025a; Yoon et al., 2025). 민어는 국내 연안에서 소리를 발생시키는 대표적인 어종으로, 자산

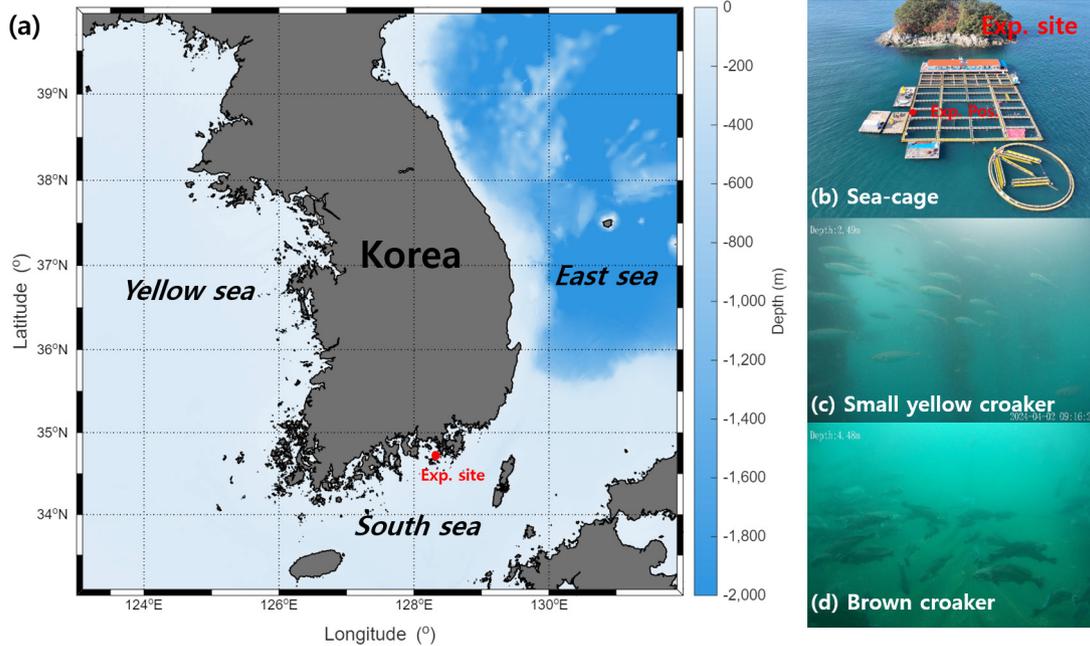


Fig. 1. Experimental site and sea-cage observations of small yellow croaker *Larimichthys polyactis* and the brown croaker *Miichthys miiuy*. a, Map of the Korean Peninsula showing the acoustic experimental site (red dot) located off Tongyeong in the South Sea of Korea; b, Overview of the sea-cage at the experimental site; the red mark (Exp. Pos.) indicates the position of the hydrophone; c, Underwater image of schooling small yellow croaker inside the sea-cage; d, Underwater image of brown croaker aggregated in the sea-cage during the recording period.

어보에서도 민어의 소리를 찾아다니며 어획했다는 기록이 전해진다. 체장은 최대 1 m 이상까지 성장하는 대형 어종이며, 산란 시기는 8–10월 여름철에 해당한다(Moon et al., 2024). 이 시기 수컷 민어는 암컷에게 자신의 존재를 알리기 위해 1 kHz 이하의 중심 주파수를 가지는 소리를 발생한다고 알려져 있다(Kim et al., 2024a, 2025b).

연구 해역

참조기와 민어의 음향 자료는 경상남도 통영 연안에 위치한 한국해양과학기술원 통영해상실증기지 내 해상 가두리에서 수집하였다(Fig. 1a, 1b). 관측에 사용된 참조기는 2024년도에 서남해 해역에서 2,000여마리를 구입하여 약 1년 이상 가두리 내에서 순치하였다(Fig. 1). 음향 자료 관측을 위해 개체 수 확인 결과 약 1,900마리로 확인되었으며, 체장은 약 25–30 cm범위였다. 민어는 2023년에 남해 해역에서 약 2년 이상 가두리 내에서 순치하였으며, 음향 자료 관측을 위해 민어 개체 수 확인 결과 약 123마리로 확인되었으며 체장은 약 70–90 cm범위로 나타났다. 참조기 및 민어를 보관한 해상 가두리가 위치한 해역의 수심은 약 20 m이며, 측정이 수행된 가두리의 크기는 길이 12 m, 폭 6 m, 깊이 6 m였다.

음향 자료 수집

선행 연구에서 보고된 산란 시기 정보를 바탕으로 각 어종의

산란 특성을 대표할 수 있는 시기를 선정하고, 참조기는 2025년 6월 15–30일, 민어는 9월 15–30일 기간의 생물음 자료를 분석 대상으로 하였다. 생물음 관측은 보유하고 있는 자동 기록식 수중청음기(SM3M; Wildlife Acoustics Inc., Maynard, MA, USA)를 가두리 내 중앙부 수심 3 m에 설치하였다. 이 때, 사용한 수중청음기의 수신 전압 감도는 -164.6 dB V/ μ Pa, 이득은 0 dB, 샘플링 주파수는 48 kHz로 설정하였다. 참조기 음향 자료는 10분마다 1개의 디지털 Wav 파일로 저장되었다(duty cycle, 99%). 어류 상태를 확인하기 위하여 음향 자료 측정과 동시에 수중카메라를 이용하여 참조기와 민어의 상태를 확인하였다(Fig. 1c, 1d).

음향 자료 분석

수집된 음향 자료는 MATLAB R2025a (The MathWorks Inc., Natick, MA, USA)를 이용하여 분석하였다. 어류 코러스를 정량화하기 위해 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)를 계산하였으며, 세그먼트 기반 스펙트럼 평균 기법을 적용하였다(Welch, 2003). 전체 자료에 대해 1초 길이의 세그먼트에 해밍(Hamming) 윈도우를 적용하고, 세그먼트 간 50% 오버랩을 설정하여 PSD를 산출한 뒤, 이를 음향 강도(intensity) 영역에서 평균하여 1분 간격의 PSD 시계열을 구성하였다(Table 1). 또한 연속된 PSD 데이터를 일 단위로 구분한 후

Table 1. Summary of acoustic processing steps used for PSD calculation

Parameter	Description
Segmentation	1 sec
Window function	Hamming
Overlapping	50%
Averaging domain	Intensity
Output time interval	1 min

양상블 평균을 수행하여 각 어종이 생성하는 생물음의 피크 시간대와 일주기 패턴을 분석하였다. 생물음 발생이 활발한 시간대와 상대적으로 활동이 낮은 시간대의 스펙트럼 차이 및 변동성을 비교하기 위해, 고활성 구간과 저활성 구간에서의 PSD 결과를 이용하여 경험적 확률 밀도(empirical probability density, EPD)를 추정하였으며, 각 주파수 구간에 대해 평균 PSD와 함께 백분위수(percentile) 통계값(1%, 5%, 50%, 95%, 99%)을 계산하였다.

결 과

참조기와 민어의 코러스 형성과 일주기적 변동 특성

참조기의 일주기 발생 변화를 파악하기 위해 2025년 6월 15일부터 30일까지 약 2주간 연속 생물음 자료를 분석하였다. 스펙트로그램 분석 결과, 참조기 생물음은 6월 20일 신호를 제외하고 전체 관측 기간 동안 일관된 일주기적 패턴을 보였다(Fig. 2a). 이 때, 참조기의 생물음 에너지는 주로 0.3–1.2 kHz의 저주파 대역에 집중되어 나타나는 특성을 보였다. 특히, 하루 중 발생이 나타나는 시간이 비교적 길어, 고에너지 구간이 수 시간 이상 연속적으로 지속되는 코러스 형태를 보였다. 시간 평균 음압 레벨(sound pressure levels, SPL)의 변동 또한 이러한 일주기적 리듬을 뚜렷하게 반영하였다(Fig. 2b). SPL 시계열은 하루 주기로 약 15–20 dB 범위의 규칙적인 상승-하강을 반복하였으며, 일일 최대값은 대체로 135–140 dB re 1 μ Pa, 최소값은 115–120 dB re 1 μ Pa 부근에서 나타났다.

반면, 민어 생물음은 9월 15일부터 30일까지 약 2주간 매일 일

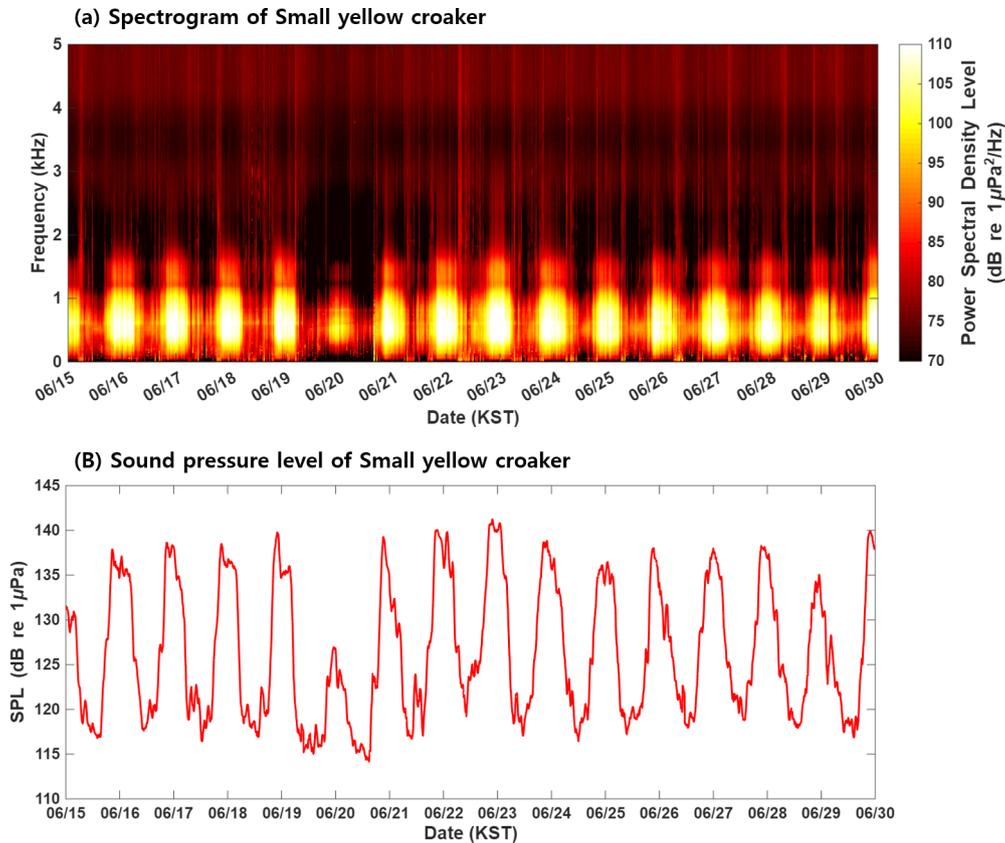


Fig. 2. Passive acoustic observations during the total monitoring period (15–30 June) of small yellow croaker *Larimichthys polyactis*. a, Spectrogram showing diel vocalization patterns dominated by low-frequency biological sounds below 1 kHz over the entire observation window; b, Corresponding sound pressure level (SPL) time series for the same period, illustrating pronounced daily cycles in acoustic activity.

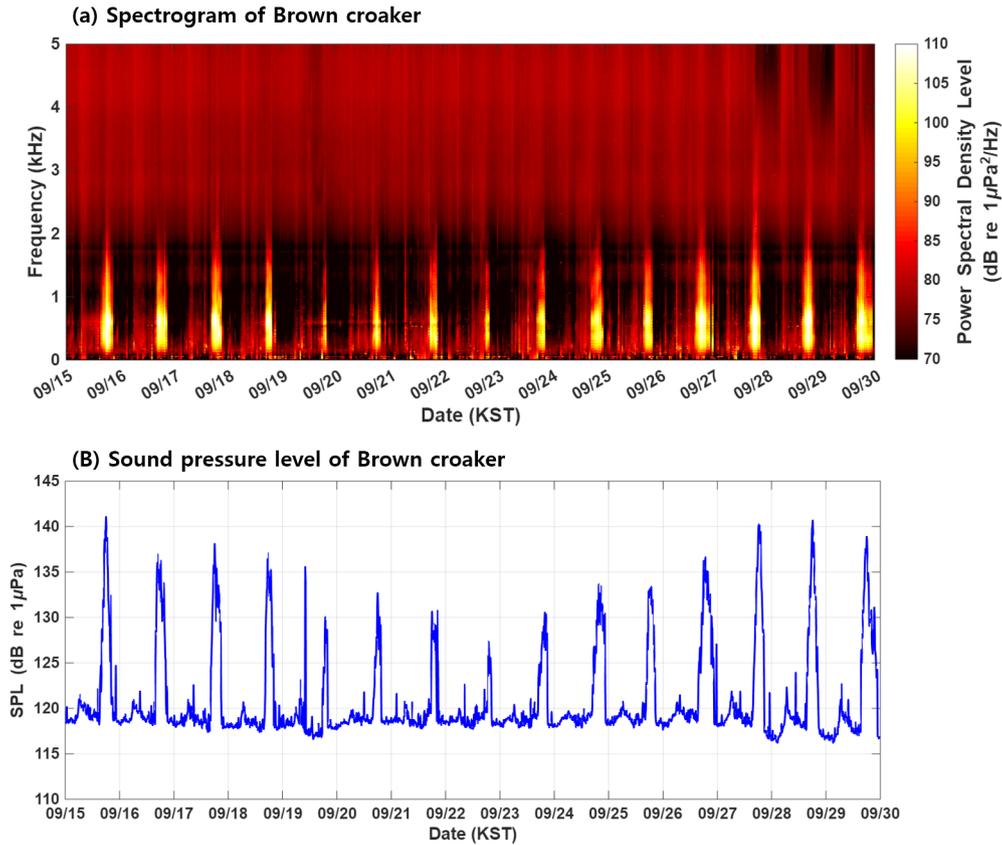


Fig. 3. Passive acoustic observations during the total monitoring period (15–30 September) of brown croaker *Miichthys miiuy*. a, Spectrogram showing diel vocalization patterns dominated by low-frequency biological sounds below 1 kHz over the entire observation window; b, Corresponding sound pressure level (SPL) time series for the same period, illustrating pronounced daily cycles in acoustic activity.

물 직후부터 약 5시간 이내로 0.2–1.0 kHz에서 강한 발성이 반복적으로 나타났다(Fig. 3a). 참조기와 마찬가지로 민어에서도 뚜렷한 일주기적 발생 패턴이 형성되어 있었으나, 발생 지속 시간이 짧고 특정 시간대에 집중된 양상이 나타났다. SPL의 변동 역시 일주기적 패턴을 잘 반영하였다(Fig. 3b). 일일 최대 SPL은 약 125–140 dB re 1 μPa 범위에서 나타났으며, 발성이 종료된 이후에는 약 120 dB re 1 μPa 수준의 배경 레벨로 빠르게 감소하였다. 9월 20–24일에는 최대 SPL 피크가 상대적으로 낮게 나타나, 생물음 발생에 변동성이 있음을 확인할 수 있었다.

참조기와 민어의 일일 발생 패턴 및 주파수 특성 분석

생물음의 일주기 패턴을 파악하기 위해, 일 단위로 양상을 평균한 스펙트로그램을 이용하여 생물음의 최대 활동 시간대와 시간적 변동 특성을 분석하였다(Fig. 4). 참조기 스펙트로그램에서는 에너지는 약 0.3–1 kHz 이내의 주파수 대역에서 뚜렷한 고에너지 밴드가 집중되어 나타났으며, 최대 1.6 kHz 대역까지 영향이 나타났다. 음향 활동은 일몰 전후인 17시부터 급격히 증가하여 일출 시간 전후인 06시까지 야간 전 시간대에 걸쳐 지속적으로 나타나는 특징을 보였다(Fig. 4a). 낮 시간대에는 동

일 주파수 대역에서 에너지 수준이 감소하여, 코러스 활동이 현저히 약화되는 양상을 보인다. 이는 참조기가 새벽과 야간에 집중적인 발성을 보이는 뚜렷한 일주기(diel) 패턴을 가지며, 해당 주파수 대역의 생물음이 해당 시간대의 수중 음향 환경을 우세하게 지배하고 있음을 시사한다. 반면 민어의 스펙트로그램에서는 주로 0.2–0.9 kHz 범위에서 에너지가 집중되었으며, 그 영향은 최대 약 1.5 kHz 대역까지 확장되는 양상을 보였다. 약 16:00–23:00 사이에 PSD 수준이 급격히 증가하여 이 시간대에 강한 코러스가 형성되는 것으로 확인되었다(Fig. 4b). 민어의 음향 활동은 참조기와 달리 저녁의 특정 시간 구간에 짧게 집중되어 나타났으며, 새벽 및 낮 시간대에는 전반적으로 에너지 수준이 낮아 발성 활동이 제한적인 것으로 나타났다.

도출한 생물음 일주기 패턴 등을 바탕으로 참조기와 민어의 생물음 신호에 대한 주파수별 음향 특성을 정량적으로 비교하기 위하여, 음향 활동이 활발한 고향성 구간과 미약한 저향성 구간에 관측된 PSD를 각각 분리하여 EPD 비교 분석을 수행하였다(Fig. 5). 각 그림에는 PSD의 확률 밀도, 평균 PSD, 그리고 백분위수(1%, 5%, 50%, 95%, 99%) 곡선을 함께 표현하였다. 백

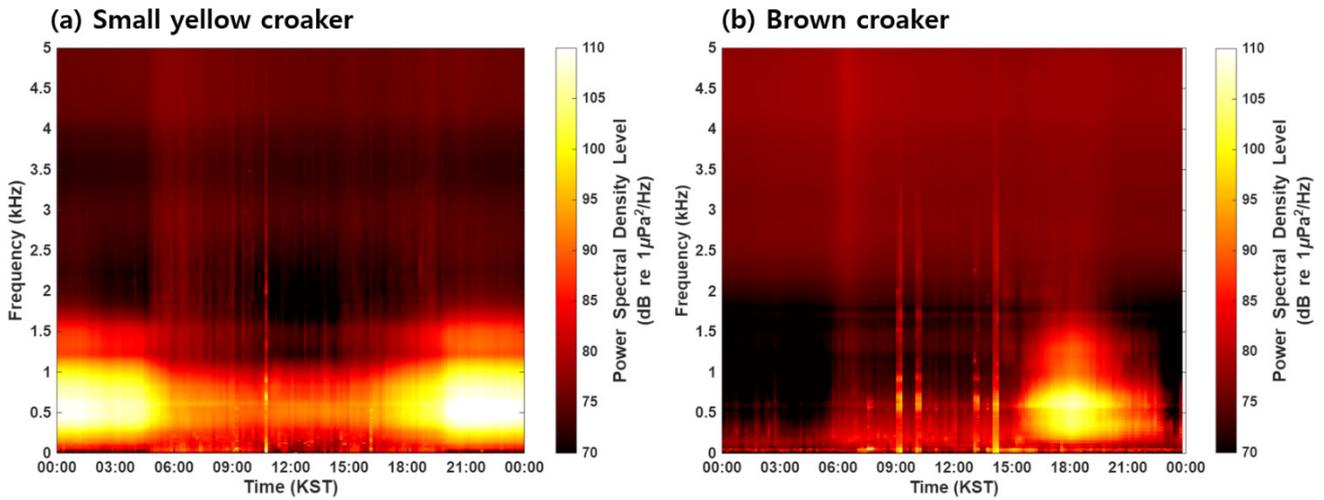


Fig. 4. Daily ensemble-averaged spectrogram showing the diel vocal activity of (a) small yellow croaker *Larimichthys polyactis* and (b) brown croaker *Miichthys miuy*.

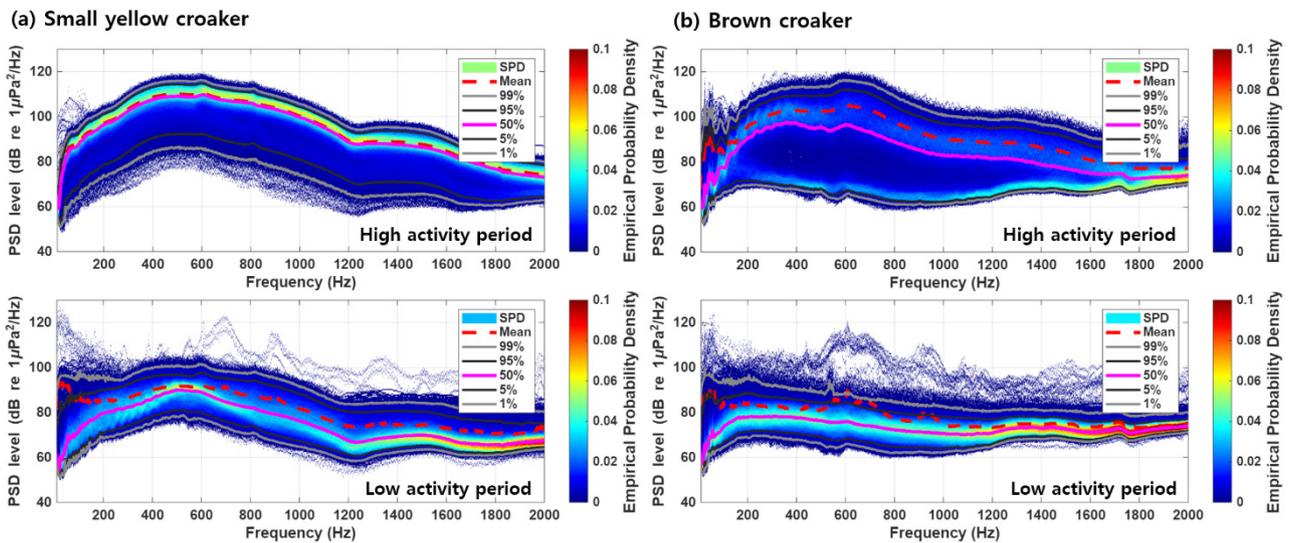


Fig. 5. Empirical probability density distributions of power spectral density (PSD) levels for high-activity (top) and low-activity (bottom) periods of (a) small yellow croaker *Larimichthys polyactis* and (b) brown croaker *Miichthys miuy*. The color map indicates the empirical probability density of PSD levels at each frequency, and the overlaid lines represent the mean spectrum and selected percentiles (1, 5, 50, 95, and 99%).

분위수는 주파수별 음향 에너지의 분포와 변동성을 함께 표현 함으로써, 평균값만으로는 파악하기 어려운 산란기 코러스와 같은 생물음의 특성을 보다 효과적으로 해석하고자 하였다. 각각의 구간은 Fig. 4에서 도출된 분포 패턴 결과를 기반으로 참조기의 고활성 및 저활성 시간은 22–02시, 10–14시 자료를 분석하였으며, 민어는 18–22시, 10–14시로 설정하여 각각의 시간별 자료를 분석하였다.

고활성 구간인 야간에서의 참조기 음향 신호는 200–1,100 Hz 사이에 에너지가 집중되어 분포가 넓은 저주파 대역에서 어류

코러스가 집중적으로 발생했음을 확인할 수 있었다. 99% 백분위수는 600 Hz 주변에서 약 120 dB까지 상승하였으며 이를 통해 군집 발성 또는 강한 산란 행동이 반영됨을 확인할 수 있다. 평균값과 중앙값은 거의 일치하였으며, 확률 밀도가 가장 높은 구간이 평균보다 약간 높게 위치하고 평균값 이하의 영역의 분포 폭이 넓게 나타났다. 이러한 통계적 특성은 코러스 발성이 시간 전반에 걸쳐 통상적으로 평균보다 다소 높은 수준으로 일정하게 지속되었음을 의미한다. 저활성 구간인 낮에는 고활성 구간에 비해 전 주파수 범위에서 PSD 수준이 전반적으로 낮

계 분포하였으며, 야간에 음향 신호가 집중되었던 100–1,100 Hz 대역에서도 중앙값 기준 약 70–90 dB 범위에 머물렀다. 평균값이 중앙값보다 다소 높게 나타난 것은, 일부 비교적 높은 PSD 값이 분포 상단을 완만하게 끌어올렸기 때문으로 해석된다. 400–600 Hz 대역에서 PSD의 확률 밀도 분포가 다른 주파수 대역보다 상대적으로 높게 나타난 것은 낮 시간에도 일부 음향 활동이 계속되었기 때문으로 보인다. 이는 낮에도 참조기의 발성이 일부 유지되는 것으로 유추할 수 있다.

민어의 고탈성 구간 PSD 분포는 참조기와 마찬가지로 200–1,000 Hz 저주파 대역에서 강한 에너지 집중을 보였으며, 99% 백분위수도 약 120 dB까지 상승하였다. 그러나 Fig. 4에서 나타난 것처럼 민어는 참조기와 달리 짧은 시간에 고강도 발성이 집중되는 발성 전략을 가지기 때문에, 발성 시간이 길게 유지되지 않고 확률 밀도 분포에서도 두 어종 간 뚜렷한 차이가 나타났다. 저주파 대역에서 참조기는 100 dB 이상 구간에 단일한 고밀도 영역이 형성된 반면, 민어는 60–70 dB 부근과 100 dB 부근에 두 개의 최대 확률 밀도 영역이 형성되어 중앙값이 약 90 dB 수준에 위치하였다. 그러나 일부 시간대에 짧고 강한 코러스가 발생하여 평균값을 끌어올리기 때문에 평균 PSD는 중앙값보다 높은 값으로 나타났다. 저활성 시간대의 PSD 분포는 중앙값 기준으로 80 dB 이하 수준에서 형성되었으며, 전 주파수 대역에서 에너지 수준이 뚜렷히 감소하였다. 일부 주파수에서 소수의 단발 신호가 관측되어 평균값을 다소 끌어올렸으나, 전체 분포에 미치는 영향은 제한적이었다. 한편 참조기의 저활성 구간이 400–600 Hz에서 PSD가 국지적으로 집중되는 양상을 보인 것과 달리, 민어의 저활성 구간에서는 주파수 전반에 걸쳐 PSD가 비교적 평탄하게 분포하여 특정 대역의 에너지 집중이 나타나지 않았다. 이는 낮 시간대 민어의 코러스 활동이 거의 발생하지 않았을 가능성을 시사한다.

고 찰

본 연구에서는 참조기와 민어의 생물음을 장기간 수집하여 스펙트로그램 기반 일주기 분석과 EPD를 활용한 주파수 특성 비교를 수행함으로써, 고탈성기와 저활성기에서 나타나는 발성 특성의 차이를 정량적으로 규명하였다. 조사 기간 동안의 일출·일몰 시각은 약 10분 이내의 매우 작은 범위에서만 변화하였기 때문에 두 종의 코러스 형성이 비교적 안정된 시간대에 반복적으로 나타난 것으로 생각된다. 두 어종 모두 공통적으로 1 kHz 이하 저주파 대역에서 강한 에너지 집중을 나타냈으며, 고탈성기에는 발성 강도, PSD 분포, 백분위수 값이 저활성기 대비 뚜렷하게 증가하였다.

주파수·강도 특성은 발성 메커니즘과 종 특이적 행동 리듬과 밀접하게 연관된다. 저주파 대역 중심의 발성은 부레를 이용한 발성 메커니즘에서 기인한 것으로 알려져 있다(Amorim, 2006; Fine and Parmentier, 2015; Fine and Parmentier, 2022). 참조기는 저녁부터 새벽까지 걸쳐 장시간 코러스를 형성한 반면, 민

어는 오후·초저녁의 특정 시간대에 짧고 집중된 코러스를 형성하여 두 종이 다른 발성 전략을 보였다. 이는 산란 행동 방식, 사회적 상호작용 구조, 집단 활동 패턴에서의 차이를 반영하는 것으로 이해된다. 특히 본 연구에서 기록된 코러스는 가두리 내 다수 개체의 동시 발성을 반영하므로, PSD가 매우 높게 나타난 구간은 개체당 발성 강도의 증가라기보다 집단 수준의 발성 빈도와 참여 개체 수가 증가한 결과로 해석할 수 있다. 다만, 본 연구는 두 종이 배치된 가두리의 개체 수 구성에 차이가 존재하였으므로, 동일 조건에서의 발성 강도 또는 코러스 규모를 절대적으로 비교하기에는 한계가 있다. 즉, PSD 차이는 종 고유의 발성 특성뿐 아니라 집단 규모의 차이에 의해서도 영향을 받을 수 있으며, 이는 향후 음향 비교 시 고려해야 할 중요한 요인이다. 또한 본 연구는 가두리 내 집단 발성에 의해 형성되는 코러스의 특성을 중심으로 분석을 수행되었기 때문에 실험 종료 후 개체의 체중 및 성숙 상태 등에 대한 확인이 이루어지지 않았다. 향후 연구에서는 음향 분석과 개체 생물학적 정보를 함께 확보하여, PAM 기반의 코러스 분석의 생태학적 해석을 보완할 필요가 있다.

본 연구의 중요한 의의는 기존의 개체 단위의 발성 특성이 아닌, 코러스의 시간·주파수 구조를 정량적 지표로 제시하였다는 점이다. 코러스는 개체 발성과 달리 발성 빈도·강도·시간적 분포가 집합적으로 반영된 신호로, 집단 행동의 활성화도 변화, 산란 행동의 개시·종료 시점, 집단 규모의 변화를 민감하게 포착할 수 있다(Parsons et al., 2016; Picciulin et al., 2020; Hawkins et al., 2025). 참조기와 민어에서 관찰된 상이한 코러스 양상은 코러스가 종 특이적 행동 리듬 및 산란 전략을 이해하는 데 매우 효과적인 지표임을 뚜렷하게 보여준다.

한편, 어류의 산란을 발생은 수온, 염분, 유속, 달의 위상 등 다양한 해양환경 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Aalbers, 2008; Tellechea et al., 2011; Fournet et al., 2019; Kim et al., 2025b). 그러나 본 연구에서는 생물음 자체의 특성 분석에 초점을 두었기 때문에, 환경자료와의 직접적인 연계 해석은 수행되지 않았다. 이는 생물음 패턴의 원인을 환경적 요인과 연결하여 해석하는 데 한계가 있으며, 향후 장기 PAM 자료와 CTD, ADCP, 기상 자료 등을 통합한 다변량 분석이 필요하다. 이러한 접근은 산란 시기 예측, 산란장 환경 특성 규명, 기후변화에 따른 발성 패턴 변화 평가 등으로 확장될 수 있다.

최근 해양 활동 증가와 선박 운항의 확대에 의해 인위적 수중 소음이 꾸준히 증가하고 있다는 점도 향후 생물음 해석에서 고려해야 할 사항이다. 인위적 소음은 어류의 음향 의사소통을 방해하거나 행동을 교란하고, 서식지 이용 패턴 변화를 가져올 수 있는 요인으로 인식되고 있다(Radford et al., 2014; Popper and Hawkins, 2019; Barcelo-Serra et al., 2021; Pieniazek et al., 2023). 또한 배경소음 수준의 상승은 생물음 탐지 민감도를 저하시켜, 코러스의 상대적 비중을 감소시키고 해양 사운드스케이프 기반 생태 평가의 불확실성을 증가시킬 수 있다. 이러한 상

황에서 생물음이 해양 사운드스케이프 내에서 차지하는 기능적 역할을 파악하고, 장기 변화를 모니터링하는 연구의 중요성은 더욱 커질 것으로 보인다.

전통적인 어류 산란기 연구는 체장·체중 및 생식소 중량을 이용한 GSI 분석, 생식소 조직학에 기반한 성숙 단계 판별, 어란·자어 조사 등 표본 기반 방법에 주로 의존해 왔다(Lowerre-Barbieri et al., 2011; Oozeki, 2018; Flores et al., 2024; Ma et al., 2025). 그러나 이러한 방법은 개체 채집이 필요하고, 야간 또는 악천후 조건에서의 장기 연속 관찰이 어렵다는 점에서 한계가 있다. 또한, 산란기의 존재 여부와 대략적인 기간을 파악하는 데에는 유효하지만, 개체 채집이 필요하고 야간 또는 악천후 조건에서의 장기 연속 관찰이 어렵다는 제약을 가진다. 본 연구에서 적용한 PAM 기반 코러스 분석은 산란 행동이 실제로 발현되는 시간대·주파수 대역·발성 강도 정보를 비침습적으로 제공할 수 있다는 점에서, 기존 생식소·어란 기반 접근을 효과적으로 보완할 수 있는 도구로 평가된다(Ricci et al., 2017; Van Hoeck et al., 2021; Hawkins et al., 2025).

종합적으로, 본 연구는 참조기와 민어의 산란 시기에 형성되는 코러스 특성을 정량적으로 규명하였으며, 분석 결과 이들의 저주파 중심의 발성 전략과 뚜렷한 일주기적 행동 리듬이 확인되었다. 이는 산란기에 형성되는 어류 코러스가 해양 사운드스케이프를 구성하는 주요 생물학적 요소임을 시사한다. 또한 도출된 종 특이적 발성 패턴 정보는 어류의 행동 및 산란 생태에 대한 이해를 심화시키는데 기여하며, 향후 PAM을 활용한 실질적인 산란장 탐지 및 발성 활성화도 평가에 활용될 수 있다. 나아가 이러한 음향 지표는 해양 사운드스케이프 기반의 생태 모니터링 체계를 구축하고, 지속 가능한 수산자원 관리 전략을 수립하는 데 있어 핵심적인 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소(KRIT)의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-056, 과제명: 해양생물음 기반 음향센서 탐지기술 특화 연구실).

References

- Aalbers SA. 2008. Seasonal, diel, and lunar spawning periodicities and associated sound production of white seabass *Atractoscion nobilis*. *Fish Bull* 106, 143-151.
- Amorim MCP. 2006. Diversity of sound production in fish. In: *Communication in Fishes*. Ladich F, Collin SP, Moller P and Kapoor BG, eds. Science Publishers, Enfield, NH, U.S.A., 71-104.
- Barcelo-Serra M, Cabanellas S, Palmer M, Bolgan M and Alós J. 2021. A state-space model to derive motorboat noise effects on fish movement from acoustic tracking data. *Sci Rep* 11, 4765. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84261-2>.
- Baumgartner MF, Stafford KM, Winsor P, Statscewich H and Fratantoni DM. 2014. Glider-based passive acoustic monitoring in the Arctic. *Mar Technol Soc J* 48, 40-51. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.48.5.2>.
- Bertucci F, Parmentier E, Lecellier G, Hawkins AD and Lecchini D. 2016. Acoustic indices provide information on the status of coral reefs: An example from Moorea Island in the South Pacific. *Sci Rep* 6, 33326. <https://doi.org/10.1038/srep33326>.
- Caldas-Morgan M, Alvarez-Rosario A and Rodrigues Padovese L. 2015. An autonomous underwater recorder based on a single board computer. *PLoS One* 10, e0130297. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130297>.
- Cho S, Kang D, Kim H, Kim M and Kim S. 2025. Evaluating the sounds produced by Pacific cod *Gadus macrocephalus* (Gadidae) during the spawning season. *J Mar Sci Eng* 13, 378. <https://doi.org/10.3390/jmse13020378>.
- Choi JW, Yoon YG, Kim S, Kim H, Cho S, Kang D and Choi JW. 2024. A study on reproduction algorithm of croaker sounds for sonar signals based on marine biological sounds. *J Acoust Soc Korea* 43, 494-501. <https://doi.org/10.7776/ASK.2024.43.5.494>.
- Duarte CM, Chapuis L, Collin SP, Costa DP, Devassy RP, Eguiluz VM, Erbe C, Gordon TAC, Halpern BS, Harding HR, Havlik MN, Meekan M, Merchant ND, Miksis-Olds JL, Parsons M, Predragovic M, Radford AN, Radford CA, Simpson SD, Slabbekoorn H, Staaterman E, Van Opzeeland IC, Winderen J, Zhang X and Juanes F. 2021. The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* 371, eaba4658. <https://doi.org/10.1126/science.aba4658>.
- El-Dairi R, Outinen O and Kankaanpää H. 2024. Anthropogenic underwater noise: A review on physiological and molecular responses of marine biota. *Mar Pollut Bull* 199, 115978. <https://doi.org/10.1016/j.marpollbul.2023.115978>.
- Fine ML and Parmentier E. 2015. Mechanisms of sound production. In: *Sound Communication in Fishes*. Ladich F, ed. Springer, Vienna, Austria, 77-126. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1846-7_3.
- Fine ML and Parmentier E. 2022. Fish sound production: The swim bladder. *Acoust Today* 18, 13-21. <https://doi.org/10.1121/AT.2022.18.3.13>.
- Flores A, Wiff R, Donovan CR and Gálvez P. 2024. Applying machine learning to predict reproductive condition in fish. *Ecol Inform* 80, 102481. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102481>.
- Fournet MEH, Stabenau E and Rice AN. 2019. Relationship between salinity and sonic fish advertisement behavior in a managed sub-tropical estuary: Making the case for an acoustic indicator species. *Ecol Indic* 106, 105531. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105531>.
- Galanos V, Trygonis V, Mazaris AD and Katsanevakis S. 2025.

- A low-cost passive acoustic toolkit for underwater recordings. *Sensors* 25, 7306. <https://doi.org/10.3390/s25237306>.
- Gibb R, Browning E, Glover-Kapfer P and Jones KE. 2019. Emerging opportunities and challenges for passive acoustics in ecological assessment and monitoring. *Methods Ecol Evol* 10, 169-185. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13101>.
- González-Correa JM, Poveda Martínez P, Juanes F and Bayle-Sempere JT. 2025. Passive acoustics reveals environmental drivers of dusky grouper reproductive activity to inform MPA planning. *ICES J Mar Sci* 82, fsaf081. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaf081>.
- Hawkins LA, Parsons MJG, McCauley RD, Parnum IM and Erbe C. 2025. Passive acoustic monitoring of fish choruses: A review to inform the development of a monitoring and management tool. *Rev Fish Biol Fish* 35, 847-874. <https://doi.org/10.1007/s11160-025-09936-9>.
- Hildebrand JA. 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser* 395, 5-20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>.
- Im SU, Yoon YG, Cho S, Kim S, Kang D, Jung YH and Kim H. 2025. Examining acoustic characteristics of bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu* sounds with passive acoustic monitoring (PAM). *Korean J Fish Aquat Sci* 58, 581-587. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0581>.
- Jang SH, Kim JK and Ryu JH. 2020. First report on the occurrence of eggs of the small yellow croaker *Larimichthys polyactis* from Chilsan-do Island, Jeollanam-do, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 650-655. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0650>.
- Kang H, Ma JY, Kim HJ and Kim HJ. 2020. Estimating length at sexual maturity of the small yellow croaker *Larimichthys polyactis* in the Yellow Sea of Korea using visual and GSI methods. *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 50-56. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0050>.
- Kim B, Choi J, Yoon YG, Kim S, Kim H, Cho S, Kang D and Choi JW. 2025a. Acoustic characteristic analysis of small yellow croaker *Larimichthys polyactis* sounds. *J Acoust Soc Korea* 44, 440-449. <https://doi.org/10.7776/ASK.2025.44.5.440>.
- Kim H, Yoon YG, Cho S, Kim S, Kim M and Kang D. 2024a. Acoustic characteristics of spawning biological sounds of brown croaker (*Miichthys miiuy*). *Fishes* 9, 251. <https://doi.org/10.3390/fishes9070251>.
- Kim H, Yoon YG, Cho S, Kim S, Kim M and Kang D. 2025b. Passive acoustic monitoring of sound characteristics and vocalization patterns of the brown croaker. *Biol Lett* 21, 20250314. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2025.0314>.
- Kim MJ, Kang H and Yoon SC. 2024b. Analysis of ecological characteristic variations of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in Korea using long-term time series data. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 60, 235-243. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.3.235>.
- Ladich F. 2022. Shut up or shout loudly: Predation threat and sound production in fishes. *Fish Fish* 23, 227-238. <https://doi.org/10.1111/faf.12612>.
- Lee KH, Yang YS, Kim JK, An HC and Shin JK. 2007. Characterization of sounds produced by 3 sciaenid species. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 43, 206-211. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2007.43.3.206>.
- Lee SH, Chung SD, Kim YH and Yoo JT. 2017. Maturity and spawning of brown croaker *Miichthys miiuy* in the southwestern water of Korea. *Korean J Ichthyol* 29, 109-116. <https://doi.org/10.5657/KJIS.2017.0292>.
- Lindseth AV and Lobel PS. 2018. Underwater soundscape monitoring and fish bioacoustics: A review. *Fishes* 3, 36. <https://doi.org/10.3390/fishes3030036>.
- Liu Z, Jin Y, Yang L, Yuan X, Yan L, Zhang Y, Zhang H, Xu M, Song X, Tang J, Zhou Y, Hu F and Cheng J. 2024. Improving prediction for potential spawning areas from a two-step perspective: A comparison of multi-model approaches for sparse egg distribution. *J Sea Res* 197, 102460. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2023.102460>.
- Lobel PS. 2002. Diversity of fish spawning sounds and the application of passive acoustic monitoring. *Bioacoustics* 12, 286-289. <https://doi.org/10.1080/09524622.2002.9753724>.
- Looby A, Cox K, Bravo S, Rountree R, Juanes F, Reynolds LK and Martin CW. 2022. A quantitative inventory of global soniferous fish diversity. *Rev Fish Biol Fisheries* 32, 581-595. <https://doi.org/10.1007/s11160-022-09702-1>.
- Lowerre-Barbieri SK, Ganas K, Saborido-Rey F, Murua H and Hunter JR. 2011. Reproductive timing in marine fishes: Variability, temporal scales, and methods. *Mar Coast Fish* 3, 71-91. <https://doi.org/10.1080/19425120.2011.556932>.
- Ma Y, Zhang C, Xue Y, Ji Y, Ren Y and Xu B. 2025. Effects of sampling design on population abundance estimation of ichthyoplankton in coastal waters. *Fishes* 10, 39. <https://doi.org/10.3390/fishes10020039>.
- McKenna MF, Baumann-Pickering S, Kok ACM, Oestreich WK, Adams JD, Barkowski J, Frstrup KM, Goldbogen JA, Joseph J, Kim EB, Kügler A, Lammers MO, Margolina T, Peavey Reeves LE, Rowell TJ, Stanley JA, Stimpert AK, Zang EJ, Southall BL, Wall CC, Van Parijs SV and Hatch LT. 2021. Advancing the interpretation of shallow water marine soundscapes. *Front Mar Sci* 8, 719258. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.719258>.
- Minello M, Calado L and Xavier FC. 2021. Ecoacoustic indices in marine ecosystems: A review on recent developments, challenges, and future directions. *ICES J Mar Sci* 78, 3066-3074. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab193>.
- Moon SY, Baeck GW, Jung JH, Choi H, Kim C, Koo MS and Park JH. 2024. Spatiotemporal distribution and reproductive biology of the brown croaker (*Miichthys miiuy*) in the southwestern waters of Korea. *Front Mar Sci* 11, 1416771. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1416771>.

- doi.org/10.3389/fmars.2024.1416771.
- Oozeki Y. 2018. Biological monitoring: Fish eggs, fish larvae, and zooplankton. In: Fish Population Dynamics, Monitoring, and Management. Aoki I, Yamakawa T and Takasuka A, eds. Fisheries Science Series, Springer, Tokyo, Japan, 111-138. https://doi.org/10.1007/978-4-431-56621-2_7.
- Parsons MJG, Lin T-H, Mooney TA, Erbe C, Juanes F, Lammers M, Li S, Linke S, Looby A, Nedelec SL, Van Opzeeland I, Radford C, Rice AN, Sayigh L, Stanley J, Urban E and Di Iorio L. 2022. Sounding the call for a global library of underwater biological sounds. *Front Ecol Evol* 10, 810156. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.810156>.
- Parsons MJG, Salgado-Kent CP, Marley SA, Gavrilov AN and McCauley RD. 2016. Characterizing diversity and variation in fish choruses in Darwin Harbour. *ICES J Mar Sci* 73, 2058-2074. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw037>.
- Picciulin M, Fiorin R, Facca C and Malavasi S. 2020. Sound features and vocal rhythms as a proxy for locating the spawning ground of *Sciaena umbra* in the wild. *Aquat Conserv Mar Freshw Ecosyst* 30, 1299-1312. <https://doi.org/10.1002/aqc.3340>.
- Pieniazek RH, Beach RK, Dycha GM, Mickle MF and Higgs DM. 2023. Navigating noisy waters: A review of field studies examining anthropogenic noise effects on wild fish. *J Acoust Soc Am* 154, 2828-2842. <https://doi.org/10.1121/10.0022254>.
- Pieretti N and Danovaro R. 2020. Acoustic indexes for marine biodiversity trends and ecosystem health. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 375, 20190447. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0447>.
- Pijanowski BC, Villanueva-Rivera LJ, Dumyahn SL, Farina A, Krause BL, Napoletano BM, Gage SH and Pieretti N. 2011. Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience* 61, 203-216. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.6>.
- Popper AN and Hawkins AD. 2019. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J Fish Biol* 94, 692-713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>.
- Radford AN, Kerridge E and Simpson SD. 2014. Acoustic communication in a noisy world: Can fish compete with anthropogenic noise?. *Behav Ecol* 25, 1022-1030. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru029>.
- Ricci SW, Eggleston DB and Bohnenstiehl DR. 2017. Use of passive acoustic monitoring to characterize fish spawning behavior and habitat use within a complex mosaic of estuarine habitats. *Bull Mar Sci* 93, 439-453. <https://doi.org/10.5343/bms.2016.1037>.
- Rice AN, Farina SC, Makowski AJ, Kaatz IM, Lobel PS, Bemis WE and Bass AH. 2022. Evolutionary patterns in sound production across fishes. *Ichthyol Herpetol* 110, 1-12. <https://doi.org/10.1643/i2020172>.
- Rountree RA, Gilmore RG, Goudey CA, Hawkins AD, Luczkovich JJ and Mann DA. 2006. Listening to fish: Applications of passive acoustics to fisheries science. *Fisheries* 31, 433-446. [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(2006\)31\[433:LTF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(2006)31[433:LTF]2.0.CO;2).
- Sousa-Lima RS, Norris TF, Oswald JN and Fernandes DP. 2013. A review and inventory of fixed autonomous recorders for passive acoustic monitoring of marine mammals. *Aquat Mamm* 39, 23-53. <https://doi.org/10.1578/AM.39.1.2013.23>.
- Stratoudakis Y, Vieira M, Marques JP, Amorim MCP, Fonseca PJ and Quintella BR. 2024. Long-term passive acoustic monitoring to support adaptive management in a sciaenid fishery (Tagus Estuary, Portugal). *Rev Fish Biol Fisheries* 34, 491-510. <https://doi.org/10.1007/s11160-023-09825-z>.
- Tellechea JS, Bouvier D and Norbis W. 2011. Spawning sounds in whitemouth croaker (*Sciaenidae*): Seasonal and daily cycles. *Bioacoustics* 20, 159-168. <https://doi.org/10.1080/09524622.2011.9753641>.
- Van Hoeck RV, Paxton AB, Bohnenstiehl DR, Taylor JC, Fodrie FJ and Peterson CH. 2021. Passive acoustic monitoring complements traditional methods for assessing marine habitat enhancement outcomes. *Ecosphere* 12, e03840. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3840>.
- Van Parijs SM, Baker K, Carduner J, Daly J, Davis GE, Esch C, Guan S, Scholik-Schlomer A, Sisson NB and Staatterman E. 2021. NOAA and BOEM minimum recommendations for use of passive acoustic listening systems in offshore wind energy development monitoring and mitigation programs. *Front Mar Sci* 8, 760840. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.760840>.
- Van Parijs SM, Clark CW, Sousa-Lima RS, Parks SE, Rankin S, Risch D and Van Opzeeland I. 2009. Management and research applications of real-time and archival passive acoustic sensors over varying temporal and spatial scales. *Mar Ecol Prog Ser* 395, 21-36. <https://doi.org/10.3354/meps08123>.
- Welch P. 2003. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans Audio Electroacoust* 15, 70-73. <https://doi.org/10.1109/TAU.1967.1161901>.
- Yoon YG, Sohn H, Park KJ, Choi YM, Kim S and Choi JW. 2017. Study of acoustic characteristics of common dolphins *Delphinus delphis* in the East Sea. *Korean J Fish Aquat Sci* 50, 406-412. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0406>.
- Yoon YG, Kim H, Cho S, Kim S, Jung YH and Kang D. 2025. Sound production characteristics of the chorus produced by small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in coastal cage aquaculture. *J Mar Sci Eng* 13, 1380. <https://doi.org/10.3390/jmse13071380>.