

수동 음향 모니터링 기법을 이용한 성대(*Chelidonichthys kumu*) 생물음 특성 연구

임승욱 · 윤영글 · 조성호 · 김선호 · 강돈혁 · 정윤환¹ · 김한수*

한국해양과학기술원 해양력강화 · 방위연구부, ¹한국해양과학기술원 통영해상실증기지

Examining Acoustic Characteristics of Bluefin Gurnard *Chelidonichthys kumu* Sounds with Passive Acoustic Monitoring (PAM)

Seung-Uk Im, Young Geul Yoon, Sungho Cho, Sunhyo Kim, Donhyug Kang, Yun-Hwan Jung¹ and Hansoo Kim*

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

¹Tongyeong Maritime Test and Evaluation Station, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), Tongyeong 53087, Republic of Korea

Recent advances in passive acoustic monitoring (PAM) have substantially improved our ability to investigate ocean soundscapes, enabling the non-invasive detection of biological sounds. Among marine organisms, fish are key contributors to the biophony of ocean soundscapes as they produce sounds associated with feeding, reproduction, and social interactions. In this study, we examined the acoustic signature of the bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu* based on continuous recordings obtained from a sea cage in the Korean coastal ocean. The grunt sounds had a mean signal duration of 89.8 ms and contained approximately 24.2 pulses, which were regularly spaced with mean inter-pulse intervals of approximately 3.3 ms. They had a mean peak frequency near 308.4 Hz, often accompanied by distinct harmonic structures and a downward frequency modulation. The signal energy was concentrated within 100-1,000 Hz frequency band, which is consistent with the harmonic structures typical of many fish species. The grunt signals also had high sound pressure levels, with mean peak-to-peak values of 160.6 dB re 1 μ Pa. These results provided baseline data for estimating the spatiotemporal distribution of bluefin gurnards and interpreting their seasonal activity patterns using PAM.

Keywords: Underwater acoustics, Biological sound, Acoustic characteristic, Bluefin gurnard, Passive acoustic monitoring

서론

해양 생태계에서 어류가 발생하는 소리는 수중에서 서식하는 생물들 간의 상호 작용뿐만 아니라, 생리적 및 행동적 상태를 반영하는 중요한 수단으로 작용한다(Bass and McKibben, 2003; Fay, 2009). 현재까지 약 800종 이상의 어류가 소리를 생성하는 것으로 보고되었으며(Kaatz, 2002), 이들은 포식자 회피, 먹이 탐지, 산란 활동, 사회적 의사소통 등 다양한 생리적 및 행동적

목적들을 위하여 소리를 활용한다(Collin and Marshall, 2003). 수동 음향 모니터링(passive acoustic monitoring, PAM)은 어류의 소리를 파악할 수 있는 비침습적인 생태 연구 기법으로, 어류의 시공간 분포, 행동 패턴, 계절적 활동성 등 다양한 생태적 특성을 분석하는 데 유용하다(Rice et al., 2022; Aaron et al., 2023). PAM 기법은 반복적이고 장기간에 걸쳐 수중 환경 내 생물음을 연속적으로 기록할 수 있으며, 시각적 조사가 어려운 야간, 혼탁한 해역, 심해 등에서도 적용 가능하여 기존 시각적인

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 664. 3654 Fax: +82. 51. 719. 9591

E-mail address: hskim@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.2025.0581>

Korean J Fish Aquat Sci 58(5), 581-587, October 2025

Received 12 August 2025; Revised 27 August 2025; Accepted 8 September 2025

저자 직위: 임승욱(전임기술원), 윤영글(선임기술원), 조성호(책임연구원), 김선호(책임연구원), 강돈혁(책임연구원), 정윤환(책임기술원), 김한수(선임연구원)

방법의 한계를 보완한다. 특히, 펄스 구조가 명확하고 반복적인 어류 생물음은 선박 소음, 해양 포유류 소리, 딱총새우 소리 등과 같은 수중 잡음 환경에서도 비교적 쉽게 식별될 수 있다. 이러한 특성으로 인해 PAM 기법은 보호 종 모니터링, 군집 변화 분석, 서식지 변화 감지 등 보존 생물학 및 자원 관리 분야에서도 활용 가능하며, 수중 생태계 해석을 위한 자료를 제공한다(Radford et al., 2008; Kim et al., 2024, 2025; Cho et al., 2025; Yoon et al., 2025).

성대(bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu*)는 Triglidae 과의 저서성 중형 포식자로서 해양 먹이망의 중요한 구성 요소이며(Cabral et al., 2025), 소리를 내는 대표적인 어종 중 하나이다. 큰 가슴지느러미와 독특한 체색을 특징으로 하며, 바닥무척추동물을 섭식하는 저서성 어종이다(Smith and Heemstra, 1986). 성대의 체장은 일반적으로 20–40 cm 범위이며, 최대 체장은 60 cm, 수명은 약 15년으로 보고되었다(Clearwater and Pankhurst, 1994; Stewart et al., 2022). 성대는 수심 약 200 m 이내의 모래 또는 패각질 해저에서 주로 서식하며, 한국, 일본, 뉴질랜드, 호주 등 온대-아열대 해역에서 널리 분포하는 특성이 있다(Smith and Heemstra, 1986; Kendrick and Walker, 2004). 국내에서는 주로 남해와 황해 연안 인근 해역에서 서식하며, 대륙붕 인근까지도 분포하는 것으로 알려져 있다(Stewart et al., 2022). 산란기에 얇은 만이나 하구역으로 이동하는 행동도 관찰된 바 있으며, 산란기의 특성이 생물음 발생 양상과도 연관 있을 가능성이 있다고 보고되었다(Radford et al., 2016).

성대는 그룬트(grunt)라 불리는 펄스 기반의 소리를 발생하는 것으로 알려져 있으며, 성대 소리는 반복성과 주파수 특성이 뚜렷하게 나타나 음향 특성 분석이 용이하다. 기존 연구에서는 수조 환경에서 압력 성대 3마리를 대상으로 측정된 결과, grunt 신호가 명확한 반복 구조와 좁은 대역폭의 주파수 특성을 가진다고 보고하였다(Radford et al., 2016). 성대는 반복적인 발생 패턴을 가지고 있어 국내 연안에서 생태적 특성을 모니터링하기 위한 장기 음향 모니터링 대상 종으로 적합하다고 판단된다. 그러나 국내에서는 성대가 발생하는 grunt 신호의 음향 특성에 대한 연구가 보고된 바 없다. 일반적으로 동일한 종이라 하더라도 개체 크기, 생리적 상태, 계절적 조건 등에 따라 발생 구조나 음향 특성이 다르게 나타날 수 있다고 보고된 바 있다(Kasumyan, 2008; Radford et al., 2010). 따라서, PAM 기법을 활용한 해양 생태계 모니터링을 위해 해상 환경에서 성대 음향 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 통영 연안 해역에서 연속적으로 수집된 성대 생물음 데이터를 활용하여, 성대가 발생하는 grunt 신호의 음향 특성을 분석하였다. 이를 통해 성대 생물음의 음향학적 특성을 파악하고, 기존 연구와의 비교 분석을 수행하였다. 본 연구 결과는 성대의 시·공간적 분포 추정, 계절적 활동성 해석, 생태 모니터링 등과 같은 목적을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 국내에서 해양 사운드스케이프(ocean sound-

scape) 개념을 통해 수중 생태 환경을 해석할 수 있는 기초 자료를 제공할 수 있다.

재료 및 방법

성대 음원 자료 수집

성대 음원 자료 수집을 위해 경상남도 통영 연안에 위치한 한국해양과학기술원 통영해상실증기지 내 해상 가두리에서 생물음 관측을 수행하였다(Fig. 1a, 1b). 관측에 사용된 성대는 통영에서 구입하여 약 2주간 가두리 내에서 순치하여 적응시켰다. 생물음 관측에 활용한 성대는 체장 20–25 cm 범위의 20마리였으며, 가두리 내 원통형 그물망에 보관한 후 수심 약 2–3 m에서 위치시켰다. 성대의 생물음을 연속적으로 측정하기 위해 자기기록식 수중청음기(SM3M; Wildlife Acoustics Inc., Maynard, MA, USA)를 가두리 내 원통형 그물망 옆 1 m 떨어진 지점에 설치하였다(Fig. 1c). 음향 관측은 2024년 7월 2일부터 7월 15일까지 약 2주간 수행하였으며, 조사 기간 동안 수온-수심 센서(RBR duet T.D; RBR, Kanata, Canada)를 이용하여 관측한 수온 범위는 18.8–29.1°C로 나타났으며, 평균 수온은 23.6°C였다. 수중청음기의 수신 전압 감도(receiving voltage sensitivity)는 -164.6 dB re 1 V/ μ Pa, 이득(gain)은 0 dB, 샘플링 주파수(sampling frequency)는 48 kHz로 설정하였다. 성대의 생물음은 10분마다 1개의 디지털 파일(wav)로 저장되었다.

자료 처리 방법

수집된 음향 자료는 MATLAB R2025a (MathWorks, Natick, MA, USA)를 사용하여 분석하였다. 먼저, 원시 음향 신호(raw data)에서 수중청음기의 수신 전압 감도를 적용해 압력 단위(μ Pa)로 환산한 뒤 분석을 수행하였으며, 성대의 주요 발생 대역과 비표적 소음을 제거하기 위하여 주파수 100 Hz–2 kHz 사이에 대역 통과 필터(band-pass filter)를 적용하였다. 이후 기존 연구(Urazghildiiev and Van Parijs, 2016; Cho et al., 2025)에서 제안한 대구(Pacific cod)의 grunt 신호를 자동 검출하는 알고리즘을 성대의 펄스 구조에 맞게 일부 수정하여 성대의 grunt 생물음만을 추출하였다. 분석에는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio)가 충분히 확보되고 명확한 grunt 파형 구조가 나타난 총 290개의 신호만을 이용하였으며, 각 음향 변수를 계산하였다.

성대의 음향 특성 분석은 ISO 18405 (ISO, 2017) 및 NPL 가이드라인(Robinson et al., 2014)에 따라 수행하였다. 성대의 시간 특성은 신호 길이(signal duration), 펄스 수(number of pulses), 펄스 간 간격(inter-pulse interval, IPI)을 추출하였다. Fig. 2a에서는 획득한 성대 음향 신호 중 1초의 자료를 예시로 나타냈으며, 해당 신호에서 2개의 grunt 신호가 확인되었다. Fig. 2b에는 Fig. 2a에서 빨간색으로 표시한 부분을 확대하였다.

신호 길이와 펄스 간 간격 계산은 Fig. 2c의 스펙트로그램 X

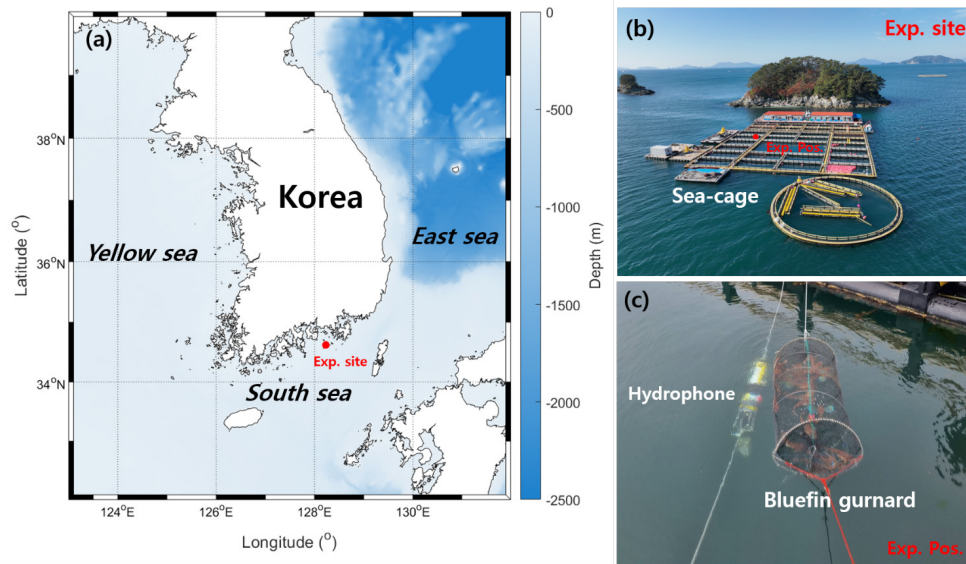


Fig. 1. Location of the experimental site and setup for acoustic measurements of bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu* sounds. a, Map showing the location of the acoustic experiment site (red dot) in Tongyeong, South Sea of Korea; b, Aerial view of the fish farm sea-cage facility operated by KIOST at the experimental site; c, The experimental position (Exp. Pos.) for bluefin gurnard sound recording is marked in red, deployment of a self-recording hydrophone inside the sea-cage containing bluefin gurnards. The experimental position is indicated in red, and the hydrophone is positioned to capture sounds from within the cage.

(f, t)에서 추출된 성대 grunt 패턴 신호 $P(f, \tau)$ 를 기준 신호로 정의하고 시간-주파수에 대한 2차원 정합 필터 응답으로 계산한 검출 포락선(envelope) $z(t)$ 를 이용해 신호 길이와 펄스 간 간격을 정의하였다. 먼저 $z(t)$ 의 값들에서 배경 수준을 대표하는 중앙값 z_{med} 을 구하고, 이 값을 기준선으로 선형 척도에서 임계 값을 $C=100 \times z_{med}$ 로 정하였다. 같은 뜻을 에너지 측면으로 보면 $C_{dB}=10 \times \log_{10}(C)+20$ dB이며, 임계 값을 중앙값보다 20 dB 높은 수준이 된다. 이때, 임계 값을 넘고 60 ms 이상의 신호를 grunt로 인식하며 시간 축에서 $z(t)$ 가 임계 값 이상이 되는 시간을 t_{min} , 다시 임계 값 이하가 되는 시간을 t_{max} 로 두고, 두 시점의 차($T=t_{max}-t_{min}$)를 grunt의 신호 길이로 계산하였다. 펄스 간 간격은 grunt 신호 내에서 연속된 펄스 피크 간의 시간 차로 정의하였다(Cho et al., 2025).

주파수 특성 분석을 위해 추출된 grunt 신호는 50 ms 길이의 사각 윈도우(rectangular window)를 사용하여 분할하고, 90% 오버랩(overlap)을 적용한 2,048포인트의 FFT (fast fourier transform)를 수행하였다. 이를 통해 시간-주파수 스펙트로그램 $S(f, t)$ 을 계산하였으며(Fig. 2c), 전체 grunt 신호에 대해 경험적 스펙트럼 밀도(empirical spectral density, ESD)를 분석하였다(Fig. 2d). 주파수 특성은 피크 주파수(peak frequency), 진폭이 피크 주파수보다 3 dB 큰 최대 주파수(max frequency) 및 3 dB 작은 최소 주파수(min frequency), -3 dB 대역폭(-3 dB bandwidth) 등을 도출하였다. 음향 에너지 특성은 0-peak 음압 레벨(sound pressure level, SPL_0-p, dB re 1 μ Pa), peak-peak

음압 레벨(SPL_p-p, dB re 1 μ Pa), RMS 음압 레벨(SPL_rms, dB re 1 μ Pa), 음향 폭로 레벨(sound exposure level, SEL, dB re 1 μ Pa²·s)을 계산하였다.

결 과

성대의 grunt 신호를 분석한 결과, 짧고 반복적인 펄스 형태의 특성이 뚜렷하게 관찰되었다. 개별 펄스는 규칙적인 IPI를 가지며, 신호 전체 발생 시간 동안 일정하게 반복적으로 발생하는 특성을 보였다. 스펙트로그램에서는 뚜렷한 하모닉(harmonic) 특성이 나타났으며, 시간 경과에 따라 주파수가 감소하는 경향을 보였다. 스펙트럼 밀도 분석에서는 피크 주파수 부근에서 높은 밀도를 보여 grunt 신호의 주파수 특성이 일관되게 나타남을 보였다. 또한, 하모닉 특성을 포함하여 에너지가 주파수 100–1,000 Hz 대역에 분포했고, 약 300 Hz 주파수 대역에서 가장 높은 에너지가 집중되었다(Fig. 2).

성대의 음향 특성 결과는 바이올린 플롯(violin plot)을 통해 시각적으로 분석하였다. 각 바이올린은 시간 특성(신호 길이, IPI, 펄스 수), 주파수 특성(피크 주파수, 최대 주파수, 최소 주파수, -3 dB 대역폭), 음향 에너지 특성(SPL_0-p, SPL_p-p, SPL_rms, SEL)에 대한 데이터의 밀도 분포를 나타내며, 중앙에 위치한 검은 점은 해당 파라미터의 중앙값을 표시한다(Fig. 3). 시간 특성 분석 결과, 평균 신호 길이는 89.8 ± 13.3 ms, 평균 펄스 수는 24.2 ± 3.9 개로 확인되었으며, 평균 IPI는 3.3 ± 0.1 ms 로

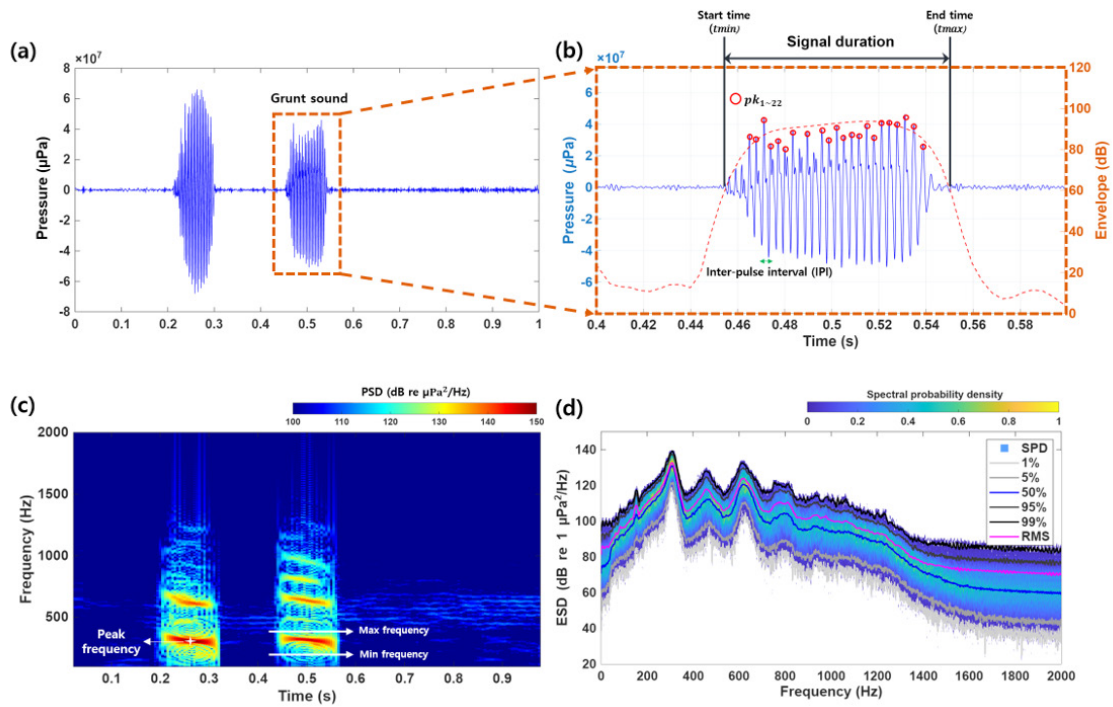


Fig. 2. Acoustic analysis of a grunt sound produced by bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu*. a, Example of raw waveform showing vocalizations, with highlighted by a red dashed box identified as the grunt sound; b, Zoomed-in waveform of the grunt sounds. The black arrows indicate the start (t_{min}) and end (t_{max}) times of the signal, defining the signal (grunt) duration (T), and the green arrows show the inter-pulse interval (IPI). The red dashed line represents the signal energy envelope $z(t)$ and red circles mark the detected pulse peaks; c, Time-frequency spectrogram representation showing concentrated energy in the low-frequency band (100–1,000 Hz); color indicates the power spectral density (PSD, dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$); d, The empirical spectral density (ESD, dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) computed from 300 grunt sounds, with empirical confidence intervals (1%, 5%, 50%, 95%, 99%) and RMS spectrum.

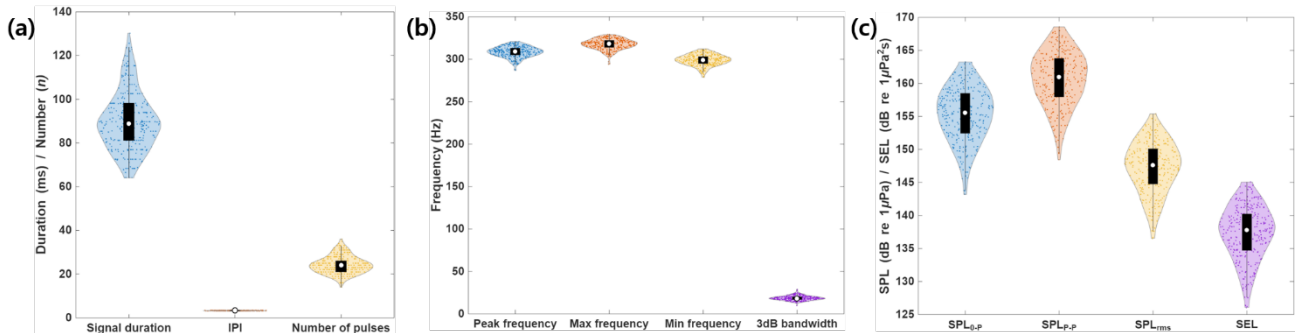


Fig. 3. Violin plots showing the distribution of the time, frequency, acoustic characteristic parameters extracted from grunt sounds produced by the bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu*. The plot represent the (a) time characteristic parameters: Signal duration, inter-pulse interval (IPI) and number of pulses, (b) frequency characteristic parameters: peak, maximum, and minimum frequencies and -3 dB bandwidth, (c) acoustic energy characteristic parameters: sound pressure levels (SPLs) (SPL_{0-p}, SPL_{p-p}, SPL_{rms}) and sound exposure level (SEL).

계산되었다. 신호 길이는 변동이 있는 반면에 IPI는 상대적으로 일정하게 보였다. 주파수 특성 중 하나인 피크 주파수는 좁은 분포를 보이며 평균 값이 308.4 ± 6.3 Hz로 나타났다. 최대 주파수는 피크 주파수와 비슷한 분포를 보이며 평균 값은 317.6 ± 6.1

Hz로 나타났으며, 최소 주파수의 평균 값은 298.9 ± 6.5 Hz로 계산되었다. -3 dB 대역폭의 분포는 상대적으로 좁고 집중적인 형태를 보였으며, 평균 약 18.6 ± 2.7 Hz로 계산되었다. 음향 에너지 특성 분석 결과, 평균 음압 레벨 SPL_{0-p}는 155.3 ± 4.1

dB re 1 μ Pa, SPL_{p-p}는 160.6 ± 4.1 dB re 1 μ Pa, SPL_{rms}은 147.3 ± 3.9 dB re 1 μ Pa, 그리고 SEL은 137.3 ± 4.0 dB re 1 μ Pa²·s로 계산되었다. 이러한 음향 특성은 성대의 grunt 신호가 상대적으로 높은 음향 에너지와 명확한 구분 가능성을 가진다는 것을 의미한다. Table 1에는 성대의 grunt 신호의 시간, 주파수, 음향 에너지 특성 결과에 대한 평균값(mean) 및 표준 편차(standard deviation, SD), 중간값(median), 최소-최대값(min-max), 변동 계수(coefficient of variation, CV)을 계산하여 나타내었다.

고 찰

최근에는 해양 생태계 파악을 목적으로 PAM 기법을 활용하여 대용량 수중음향 자료를 수집하고 이를 분석에 적용하고 있다. 본 연구에서는 해상 환경에서 약 2주간 성대의 생물음을 측정하고, 이 중 grunt 신호를 추출하여 그 음향학적 특성을 도출하였다. 성대가 발생하는 grunt 신호는 주로 의사소통을 위한 소리로 알려져 있으며, 다양한 행동적·생리적 목적을 위해 발생하는 것으로 보고되어 왔다(Collin and Marshall, 2003; Amorim, 2006; Kasumyan, 2008). 특히, grunt 신호는 산란 활동, 영역 방어, 포식자 회피, 군집 행동 등과 같은 생태적 특성과 밀접하게 관련되어 있으며, 이러한 생태적 요인에 따라 grunt 신호의 발생 여부가 달라질 수 있다(Radford et al., 2016; Banse et al., 2024). 본 연구에서 분석된 grunt 신호는 짧고 반복적인 특성을 보였으며, 이는 의사소통 및 경고 신호로서 기능할 가능성이 높은 것으로 해석된다(Collin and Marshall, 2003).

Table 2에는 본 연구에서 도출한 성대 생물음의 음향 특성과 기존 연구 결과를 비교하였다. 기존 연구인 Radford et al. (2016)은 실내 수조 환경에서 암컷 성대 3마리를 대상으로 grunt 신호를 타입별(Gru1, Gru2)로 측정 및 분석하였다. 그 결과, Gru1과 Gru2의 신호 길이는 각각 84 ms, 56 ms였으며, 펄스 수는 각각 11회, 11.1회, 피크 주파수는 각각 129 Hz, 144

Hz로 보고되었다. 반면, 본 연구에서 도출된 grunt 신호의 평균 길이는 89.8 ms, 평균 펄스 수는 24.2개, 평균 피크 주파수는 308.4 Hz로 기존 연구에 비해 신호 길이, 펄스 수, 피크 주파수가 모두 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 측정된 성대의 체장(약 20–25 cm)이 기존 연구에서 관측한 성대보다 체장이 작기 때문에 부레 크기도 동일하게 작으므로 상대적으로 주파수 특성이 높게 나타난 것으로 판단된다(Matsubara et al., 2023). 신호 길이는 이전 연구에서 첫 피크 신호와 마지막 피크 신호로 계산된 반면 본 연구에서는 분석 방법(Urazghildiiev and Van Parijs, 2016; Cho et al., 2025)에 제안한대로 에너지 궤적 함수 $z(t)$ 에 대한 적응 임계 값 기준을 적용하여 계산하였기 때문에 일부 차이가 발생하였다고 판단된다. 그러나 대표적으로 Fig. 2b의 Grunt 신호 길이를 피크 신호를 기준으로 계산하면 약 73 ms로 나타나 기존 연구의 Gru1, Gru2 평균 값의 중간 범위로 나타났다. 펄스 수는 기존 연구의 개수가 높게 나타난 결과에 대하여 정량적인 비교는 어려웠다. 기존 연구는 실내 수조에서 실험이 이루어졌으나 본 연구에서는 일조량, 일주기, 수온 등이 자연 환경과 동일한 해상 조건에서 수행되었으나 상대적으로 좁은 원통형 그물망 안에서 많은 개체를 대상으로 측정하였다. 따라서, 성대가 발생하는 grunt 신호가 성대 개체의 체장, 실험 환경 등 다양한 요인들에 의하여 변동이 발생할 수 있다고 추정된다.

성대는 grunt 신호 외에도 그로울(growl) 신호를 발생한다고 알려져 있다(Radford et al., 2016). Growl 신호는 긴 신호 길이와 불규칙한 진폭 특성을 가지며, grunt 신호와 다른 에너지 분포와 주파수 특징을 보인다(Radford et al., 2016). 본 연구에서는 해상에서 관측하여 여러 주변 소음들이 신호에 포함되어 있으므로 growl 신호가 따로 구분이 되지 않았기 때문에 성대의 grunt 신호만을 분석하였다. 그러나, 성대의 생태적 특성과 어류가 소리를 발생시키는 다양한 원인(먹이 탐색, 짝짓기, 산란, 포식자 회피 및 사회적 의사소통 등)을 종합적으로 이해하기 위해서는 성대가 발생하는 growl에 대한 음향 특성 연구도 필요할

Table 1. Acoustic characteristics of grunt signals of bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu*

Grunt signals	<i>n</i>	Mean \pm SD	Median	Min–Max	CV (%)
Signal duration (ms)		89.8 \pm 13.3	88.9	64.1–130.2	14.8
Number of pulses (<i>n</i>)		24.2 \pm 3.9	24.0	14.0–36.0	16.1
Inter-pulse interval (IPI; ms)		3.3 \pm 0.1	3.3	3.1–3.8	3.5
Peak frequency (Hz)		308.4 \pm 6.3	309.0	287.0–321.0	2.0
Max frequency (Hz)		317.6 \pm 6.1	318.0	294.0–329.0	1.9
Min frequency (Hz)	290	298.9 \pm 6.5	299.0	279.0–312.0	2.2
-3 dB bandwidth (Hz)		18.7 \pm 2.7	18.0	10.0–29.0	14.3
Sound pressure level (SPL _{0-p} ; dB re 1 μ Pa)		155.3 \pm 4.1	155.6	143.2–163.2	2.6
Sound pressure level (SPL _{p-p} ; dB re 1 μ Pa)		160.6 \pm 4.1	161.0	148.5–168.5	2.6
Sound pressure level (SPL _{rms} ; dB re 1 μ Pa)		147.3 \pm 3.9	147.6	136.5–155.4	2.6
Sound exposure level (SEL; dB re 1 μ Pa ² ·s)		137.3 \pm 4.0	137.8	126.1–145.1	2.9

Table 2. Comparative summary of ecological and acoustic characteristics of bluefin gurnard *Chelidonichthys kumu* recorded in the sea-cage of Korean coastal ocean and the sea-tank environment of New Zealand

Information on Triglidae family		
Common name	Bluefin gurnard	
Scientific name	<i>Chelidonichthys kumu</i>	
Experiment location	Sea-cage in coastal ocean(Tongyeong, Korea)	Sea-tank in laboratory facility(Leigh marine lab)
Fish size used	20–25 cm (measured)	Approx. 40 cm (from 3 adult females)
Recording duration	10-min segments, continuously recorded for –2 weeks without intermission	24 h repeated sessions for each individual
No. of individuals	20 individuals	3 identified adult females
Acoustic parameters	Mean±STD	Mean±STD
Signal duration (ms)	89.8±13.3	84±3 (Gru1), 56±1 (Gru2)
Number of pulses (<i>n</i>)	24.2±3.9	11.0±0.5 (Gru1), 11.1±0.6 (Gru2),
Peak frequency (Hz)	308.4±6.3	129±1.3 (Gru1), 144±1.4 (Gru2)
Max frequency (Hz)	317.6±6.1	163±1.0 (Gru1), 177±0.9 (Gru2)
Min frequency (Hz)	298.8±6.5	96±1.5 (Gru1), 110±0.9 (Gru2)
-3 dB bandwidth (Hz)	18.7±2.7	67±0.8 (Gru1), 67±0.6 (Gru2)
Reference	This study	Radford et al. (2016)

것으로 생각된다(Amorim and Hawkins, 2000; Connaughton, 2004; Kasumyan, 2009; Amorim et al., 2015).

본 연구는 통영 해역의 실향역 환경에서 성대의 생물음을 측정하였으나, 수온, 염분, 조석, 광량, 일주기 등 다양한 해양 환경 요인이 음향 특성에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 기존 연구에서 Kim et al. (2024)과 Kim et al. (2025)는 민어 생물음이 수온 및 일주기와 상관성이 있음을 보고하였으며, Yoon et al. (2025)은 참조기 생물음이 일주기에 따라 변화를 보인다고 보고하였다. 이에 따라 향후 연구에서는 성대 생물음과 다양한 해양 환경 변수 간의 상관관계 분석이 필요하며, 이는 성대의 생태 및 생리적 특성을 이해하는 데 중요한 기초 자료가 될 것으로 기대된다. 또한, 성대는 저서성 어종이지만 본 연구는 여름철(7월)이라는 특정 기간 및 실향역 환경이지만 원통형 그물망이라는 제한된 공간에서 성대 생물음을 측정한 제한점이 있다. 향후에는 성대의 서식 환경을 고려하여 실향역 조건에서 장기간 음향 연속 관측 통해 일주기, 체장, 계절 등의 차이를 파악하기 위하여 성대의 음향 특성을 비교하려 한다. 이러한 관측 및 분석을 통해 해양 환경 요인에 따른 신호 패턴과 음향 특성 변화, 발생 빈도를 정량화하고, 그 결과를 성대의 시·공간 분포 추정, 계절적 활동성 해석, 장기 생태 모니터링에 직접 활용하여 특정 시기 또는 해역에서 활동 변화를 파악해 자원 관리학적 판단(예: 보호 시기 설정, 서식지 상태 파악)을 지원하는 기초 자료로 제시하고자 한다.

본 연구에서는 성대가 발생하는 생물음 중 하나인 grunt 신호에 대한 시간, 주파수, 음향 특성을 분석하였으며, 기존 연구와의 비교 분석을 통해 성대 생물음의 음향 특성의 차이를 파악하였다. 향후에는 PAM 기법을 이용하여 성대의 시·공간 분포 추

정, 계절적 활동성 및 서식지 추정, 서식 환경 모니터링 등 적용 등에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

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

References

- 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.
- Amorim MCP and Hawkins AD. 2000. Growling for food: Acoustic emissions during competitive feeding of the streaked gurnard. J Fish Biol 57, 895-907. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2000.tb02200.x>.
- Amorim MCP, Vasconcelos RO and Fonseca PJ. 2015. Fish sounds and mate choice. In: Sound Communication in Fishes. Ladich F, ed. Springer, Vienna, Austria, 1-33. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1846-7_1.
- Aaron NR, Garcia ML, Symes LB and Klinck H. 2023. Conservation bioacoustics: Listening to the heartbeat of the Earth. Acoust Today 19, 46-53. <https://doi.org/10.1121/AT.2023.19.3.46>.
- Bass AH and McKibben JR. 2003. Neural mechanisms and

- behaviors for acoustic communication in teleost fish. *Prog Neurobiol* 69, 1-26. [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(03\)00004-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(03)00004-2).
- Banse M, Minier L, Lecchini D and Parmentier E. 2024. Acoustic mobbing behaviour: Vocal fish responses to predation risk through sound communication. *Mar Biol* 171, 141. <https://doi.org/10.1007/s00227-024-04455-w>.
- Collin SP and Marshall NJ. 2003. *Sensory Processing in Aquatic Environments*. Springer, New York, NY, U.S.A. <https://doi.org/10.1007/b97656>.
- Cabral H, LePage M, Lobry J and Le Pape O. 2025. *Ecology of Marine Fish*. Academic Press Elsevier, London, U.K.
- 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>.
- Clearwater SJ and Pankhurst NW. 1994. Reproductive biology and endocrinology of female red gurnard, *Chelidonichthys kumu* (Lesson and Garnot) (famil Triglidae), from the Hauraki Gulf, New Zealand. *Aust J Mar Freshw Res* 45, 131-139. <https://doi.org/10.1071/MF9940131>.
- Connaughton MA. 2004. Sound generation in the searobin (*Prionotus carolinus*), a fish with alternate sonic muscle contraction. *J Exp Biol* 207, 1643-1654. <https://doi.org/10.1242/jeb.00928>.
- Fay RR. 2009. Soundscapes and the sense of hearing of fishes. *Integr Zool* 4, 26-32. <https://doi.org/10.1111/j.1749-4877.2008.00132.x>.
- Smith MM and Heemstra PC. 1986. *Smiths' Sea Fishes*. Springer Berlin, Heidelberg, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-82858-4>.
- ISO (International Organization for Standardization). 2017. ISO 18405: Underwater Acoustics-Terminology. ISO, Geneva, Switzerland.
- Kaatz IM. 2002. Multiple sound-producing mechanisms in teleost fishes and hypotheses regarding their behavioral significance. *Bioacoustics* 12, 230-233. <https://doi.org/10.1080/09524622.2002.9753705>.
- Kasumyan AO. 2008. Sounds and sound production in fishes. *J Ichthyol* 48, 981-1030. <https://doi.org/10.1134/S0032945208110039>.
- Kasumyan AO. 2009. Acoustic signaling in fish. *J Ichthyol* 49, 963-1020. <https://doi.org/10.1134/S0032945209110010>.
- Kendrick TH and Walker NA. 2004. Characterisation of the GUR 2 red gurnard (*Chelidonichthys kumu*) and associated inshore trawl fisheries. New Zealand Fisheries Assessment Report 2004/21, Trophic Ltd., Kaikoura, New Zealand, 1-83.
- Kim H, Yoon YG, Cho S, Kim S, Kim M and Kang D. 2024. 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. 2025. 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>.
- Matsubara N, Katakura S, Takahashi R, Akamatsu T and Yasuma H. 2023. Sound properties produced by white-edged rockfish (*Sebastes taczanowskii*) in relation to body and swim bladder size. *J Acoust Soc Am* 153, 1703-1709. <https://doi.org/10.1121/10.0017424>.
- Radford CA, Ghazali SM, Montgomery JC and Jeffs AG. 2016. Vocalisation repertoire of female bluefin gurnard (*Chelidonichthys kumu*) in captivity: Sound structure, context and vocal activity. *PLoS One* 11, e0149338. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149338>.
- Radford CA, Jeffs AG, Tindle CT and Montgomery JC. 2008. Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef. *Oecologia* 156, 921-929. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-1041-y>.
- Radford CA, Stanley JA, Tindle CT, Montgomery JC and Jeffs AG. 2010. Localised coastal habitats have distinct underwater sound signatures. *Mar Ecol Prog Ser* 401, 21-29. <https://doi.org/10.3354/meps08451>.
- 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>.
- Robinson SP, Lepper PA and Hazelwood RA. 2014. Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement (NPL Good Practice Guide No. 133). National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, Teddington, England, 95. <https://doi.org/10.25607/OBP-21>.
- Stewart J, Fowler AM, Meadows NM and Johnson DD. 2022. Life-history traits and commercial catch composition of *Chelidonichthys kumu* in south-eastern Australia. *Reg Stud Mar Sci* 56, 102720. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102720>.
- Urazghildiiev IR and Van Parijs SM. 2016. Automatic grunt detector and recognizer for Atlantic cod (*Gadus morhua*). *J Acoust Soc Am* 139, 2532-2540. <https://doi.org/10.1121/1.4948569>.
- 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>.