

흔획저감장치 소음에 의한 상괭이(*Neophocaena asiaeorientalis*) 명음 반응 연구

김형태 · 박근창¹ · 최석관¹ · 이유원² · 이경훈^{2*}

국토해양환경기술단, ¹국립부경대학교 어업기술안전연구소, ²국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

Study on the Vocal Response of Finless Porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* to the Noise from Acoustic Deterrent Devices (ADDs)

Hyungtae Kim, Geunchang Park¹, Seokgwan Choi¹, Yoo-won Lee² and Kyounghoon Lee^{2*}

Land&Ocean Environmental Eng., Suwon 16690, Republic of Korea

¹Institute of Low-Carbon Marine Production Technology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

²Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

This study investigated the occurrence and behavioral responses of finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* in Hadong, Gyeongsangnam-do, South Korea, to the operation of acoustic deterrent devices (ADDs). Passive acoustic monitoring was conducted from November 2023 to January 2024 to compare porpoise click patterns and behaviors before and after ADDs deployment. The results showed that porpoise presence and click activity decreased following ADDs operation, accompanied by an increase in inter-click intervals. Before deployment, click activity peaked shortly after sunrise, likely reflecting foraging behavior. The overlap between ADDs' acoustic emissions and the primary echolocation frequencies of porpoises may have interfered with their detection efficiency and altered their acoustic activity patterns. These findings suggest that ADDs influence the acoustic behavior and occurrence of finless porpoises, providing baseline information for evaluating their potential role in bycatch mitigation.

Keywords: Finless porpoises, *Neophocaena asiaeorientalis*, ADDs, Clicks, Passive acoustic

서 론

상괭이(*Neophocaena asiaeorientalis*)는 우리나라 연안을 비롯한 아시아 연안에 널리 분포하는 대표적 연안성 해양포유류로, 서해·남해·동해 연안에서 주년 관찰된다(Kim et al., 2007). 우리나라에서는 1999–2009년 동안 총 607마리가 흔획·좌초된 것으로 보고되었으며, 이 중 대다수가 어구에 흔획된 사례로 나타나 연안 어업과의 충돌이 심각하다는 점을 보여준다(Choi et al., 2010). 또한, 상괭이는 생태계의 최상위 포식자로서 어업 대상종과 먹이가 중복되기 때문에 보전뿐 아니라 어업 관리 측면에서도 중요한 의미를 갖는다(Park, 2006). 따라서 상괭이는 국내에서 보전 관리가 시급한 주요 해양포유류로 인식되고 있다. 국제적으로도 흔획은 주요한 해양포유류 보전 과제로 다루어지고 있으며, 특히 미국은 해양포유류보호법(Marine Mammal

Protection Act)을 통해 모든 어업에서 흔획 최소화를 의무화하고 있다(Young and Iudicello, 1997; Roman et al., 2013). 이러한 규제는 국제 수산물 교역과 직결되며, 국내 어업에도 직접적인 영향을 미치고 있다. 해양포유류의 흔획 문제를 해결하기 위한 다양한 기술적 접근법이 전 세계적으로 연구되고 있으며, 음향 펍어, 발광다이오드(LED), 에어벌브 차단막, 방지망, 해양포유류 탈출장치 등이 대표적인 사례로 보고되고 있다(Cox et al., 2005; Lee et al., 2021). 이 중에서도 흔획저감장치(acoustic deterrent devices, ADDs)는 고주파 소음을 이용하여 해양포유류의 접근을 억제하는 장치로, 음향을 기반으로 먹이를 탐지하고 의사소통을 수행하는 상괭이에게 특히 효과적인 방법으로 주목받고 있다(Götz and Janik, 2013). ADDs의 효과성을 과학적으로 검증하고 상恹이의 행동 반응을 평가하기 위해서는 상恹이의 생태적·음향학적 특성을 고려한 수동음향모니터링(passive

*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.2025.0805>

Korean J Fish Aquat Sci 58(6), 805-815, December 2025

Received 5 July 2025; Revised 15 September 2025; Accepted 12 November 2025

저자 직위: 김형태(대리), 박근창(전임연구원), 최석관(전임연구원), 이유원(교수), 이경훈(교수)

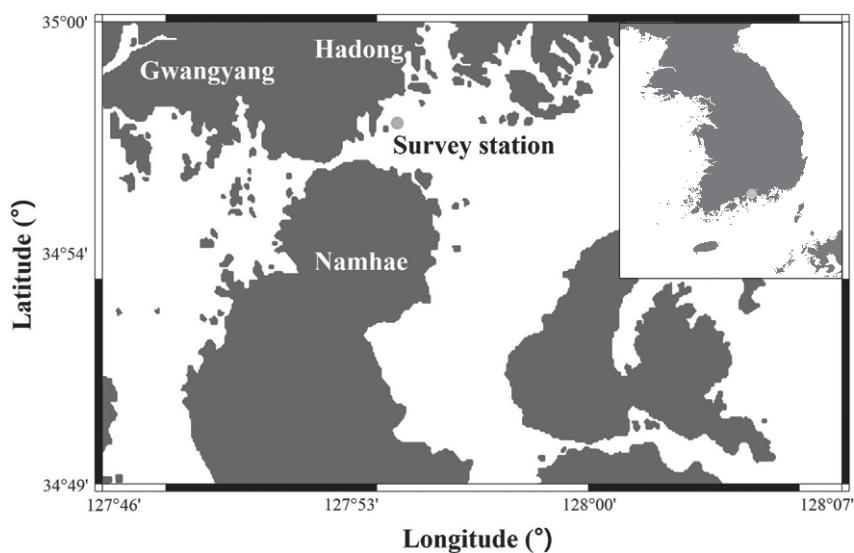


Fig. 1. Survey station of PAM in Hadong. PAM, Passive acoustic monitoring.

acoustic monitoring, PAM) 기법의 활용이 필수적이다. 상괭이는 에코로케이션을 통해 먹이를 탐지하고 의사소통 신호를 발산하는 연안성 해양포유류로, 이들의 클리 특성 분석은 행동 생태 이해와 혼획 저감장치의 효과 평가에 핵심적이다. PAM은 수중청음기(hydrophone)를 이용하여 상괭이의 음향 신호와 주변 소음을 기록·분석하는 방법으로, 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서도 권장하는 표준화된 조사 기법이다. 이러한 분석을 통해 ADDs가 상괭이의 출현 빈도와 음향 행동에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있으며, 국내 어업 환경에 적합한 혼획 저감 전략 수립을 위한 과학적 자료를 제공할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 상괭이의 출현 빈도가 높은 하동·홍합 양식장을 중심으로 PAM 조사를 수행하였으며, ADDs 투입 전후 상恹이의 출현 빈도와 음향 특성 변화를 비교·분석하였다. 이를 통해 ADDs 작동이 상恹이의 음향 행동에 미치는 영향을 평가하고, 향후 혼획 저감 연구를 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

음향장비 시스템 및 자료 수집

본 조사 해역은 하동과 남해 그리고 사천에 인접한 해역으로, 주변에 홍합양식장과 해상 낚시터가 있으며, 상恹이의 주요 서식지로서 주·야간에 자주 출몰하며 계절별 지속적으로 출현하는 해역이다(Choi et al., 2021; Fig. 1). 음향자료 취득은 차수 별로 진행되었으며, 조사 기간은 23년 11월 23일~23년 12월 7일(1차 조사), 23년 12월 7일~12월 15일 및 23년 12월 27일~23년 12월 28일(2차 조사), 23년 12월 28일~24년 1월 5일(3차 조사), 24년 1월 5일~24년 1월 11일(4차 조사)로 약 42일간 수집되었다(Table 1).

수중청음기(ST600HF; Ocean Instruments NZ, Warkworth, New Zealand)는 조사 해역의 양식장 외곽 관측 정점 수심 5 m에 밧줄로 계류하였으며, 측정 간격은 10분 단위로 설정해 자료를 연속적으로 기록하였다. 샘플링 주파수는 384 kHz로 설정하였고, 모든 기록은 WAV 파일 형식으로 저장되었다(Table 1).

Table 1. Survey period

Survey No.	Acoustic survey	ADDs deployment (in/out) time	ADDs deployment status
1st	23 November 2023–07 December	-	X
2nd	07 December 2023–15 December 27 December 2023–28 December	-	X
3rd	28 December 2023–05 January 2024	in 28 December 07:17 out 05 January 07:18	O
4th	05 January 2024–11 January 2024	in 05 January 07:21 out 11 January 07:22	O

ADDs, Acoustic deterrent devices.

2). 음향자료의 안정성을 보장하기 위해 한 달 또는 일주일 간격으로 수중청음기를 교체하였으며, 이때 ADDs를 수중청음기 계류 뱃줄에 묶어 수심 3 m에 설치하고, 수중청음기와의 수직거리는 약 2 m로 유지하여 음향자료를 수집하였다. 상괭이에 대한 ADDs 반응을 평가하기 위해 3차 조사부터 4차 음향조사까지 미국과 유럽에서 사용 규정이 인증된 ADDs (Dolphin pinger; Future Ocean, Noosa Heads, Australia)를 사용하였으며, 출력은 145 dB, 주파수 대역은 60–120 kHz였다(Table 3). ADDs는 설치 후 일주일 동안 지속적으로 운영하였다.

음향자료 분석

본 연구에서는 수집한 음향자료를 분석하여 해양포유류 발성음으로 추정되는 음원 구간을 식별하였다. 조사 해역은 홍합양식장이 위치한 지역으로, 양식장 자체의 잡음과 선박 소음이 주요 배경 잡음으로 관측되었으며, 쇠돌고래과로 추정되는 고주파 대역의 클릭음이 확인되었다. ADDs에 의한 소음은 ADDs를 수중 청음기와 근접하게 설치하여 높은 출력으로 인해 고조파 구조로 나타났으며, 신호 발생간격 4.7초에 지속시간은 0.4 초로 나타났다. ADDs 소음과 상괭이 클릭음간의 주파수 간섭은 나타나지 않았다(Fig. 2).

잡음은 해양포유류 발성음 탐지에 방해 요소가 될 수 있으므로, 탐지 정확도를 높이기 위해 효과적인 잡음 제거가 필수적이다. 상괭이 클릭음 탐지를 위해 PAMGuard (V2.02.10; www.pamguard.org) 소프트웨어를 사용하여 음향자료를 분석하였고, 잡음을 제거하거나 감쇠시키기 위해 PAMGuard의 음향 신호 처리 필터를 활용하여 수집된 자료를 필터링하였다. 필터링 과정은 두 단계로 구성되었으며, 각 단계에서 IIR Chebyshev (Chebyshev Infinite Impulse Response)필터를 사용하였다. Chebyshev 필터는 특정 주파수 대역을 강조하거나 감쇠하는데 효과적이며, 주파수 경계에서 빠르게 응답을 감소시키는 특

성으로 잡음 억제에 유리하다. 필터 차수가 낮더라도 높은 경사도를 제공하기 위해 주파수 대역에서 신호 감쇠 속도를 조절하는 중요한 요소인 리플(ripple)을 허용하였다(Parks and Burrus, 1987).

첫 번째 단계의 디지털 프리 필터는 신호의 품질을 개선하고, 해양포유류 탐지에 필요한 주요 주파수 대역 이외의 잡음을 감쇠시키기 위해 적용되었다(PAMGuard, 2025). 본 연구에서는 상恹이의 클릭음 주파수 대역인 100–160 kHz에 해당하는 대역 통과(band pass)를 IIR Chebyshev를 적용하였으며, 4차에 리플 1을 설정하여 필터를 사용하였다(Fig. 3). 이를 통해 필터링 과정에서 목표 주파수 대역에 포함된 신호를 통과시키면서도,

Table 2. About hydrophone specifications and settings (SoundTrap ST600HF)

Parameters	Values
Bandwidth	20 Hz–150 kHz±3 dB
Sample rate	384, 192, 128, 96, 64 and 32 kHz
Self-noise	Better than sea-state 0 (100 Hz–2 kHz) Less than 37 dB re 1 μPa above 2 kHz
Gain	Max level before clipping: 173 dB re 1 μPa
Manufacturer	Ocean instruments (New Zealand)

Table 3. Specification of marine mammal acoustic deterrent devices

Type	Parameter
Dolphin pinger, Future Ocean, Australia (Certified pinger)	Frequency (kHz) 60–120
	SPL (dB) 145
	Effect range (m) 100

SPL, Sound pressure level.

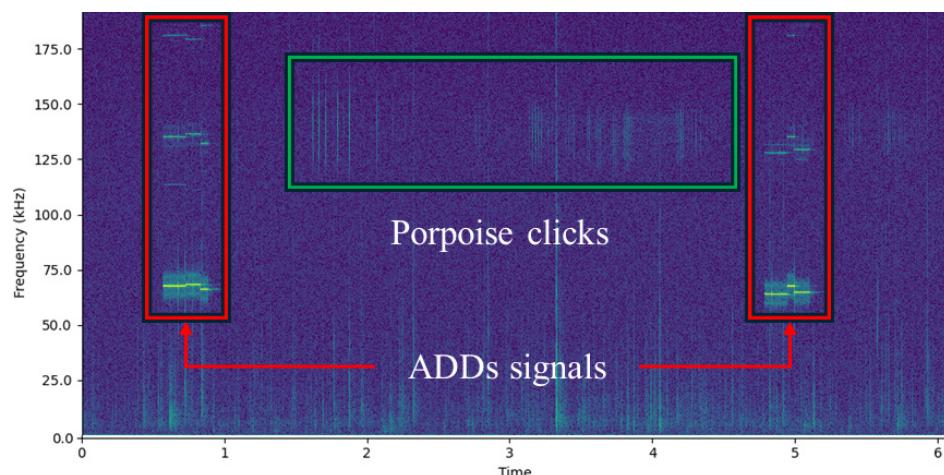


Fig. 2. Comparison of ADDs noise and finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* click frequencies. The red border indicates the signals of the ADDs, while the green border indicates the vocalizations of the finless porpoise. ADDs, Acoustic deterrent devices.

저주파 잡음이 영향을 미치는 대역을 감쇠시켰다.

두 번째 단계로 적용된 디지털 트리거 필터는 잡음 구간보다 높은 50 kHz 이상의 고역통과(high pass)를 IIR Chebyshev에 적용하였으며, 2차에 리플 2를 설정하여 필터를 사용하였다 (Fig. 4) 이를 통해 50 kHz 이상의 대역만을 통과시켜 상팽이 클릭음의 특정 고주파 대역을 더욱 강조하였고, 저주파 잡음을 감쇠시켜 상팽이의 발성음 탐지 민감도를 높여 상팽이의 신호를 더욱 명확하게 탐지할 수 있게 한다.

클릭 탐지 및 종식별

수집한 음향자료를 바탕으로 잡음을 제거한 뒤, 해양포유류의 클릭음을 탐지하고자 탐지 파라미터를 설정하였다. 클릭 탐지 파라미터 설정을 위해 수집한 자료의 샘플링 주파수를 바탕으로 bin의 크기를 추정한다. Bin을 구하는 계산식은 식 (1)과 같다.

$$\text{Bin (ms)} = \frac{1}{\text{Sampling rate (Hz)}} \times 1,000 \dots\dots\dots (1)$$

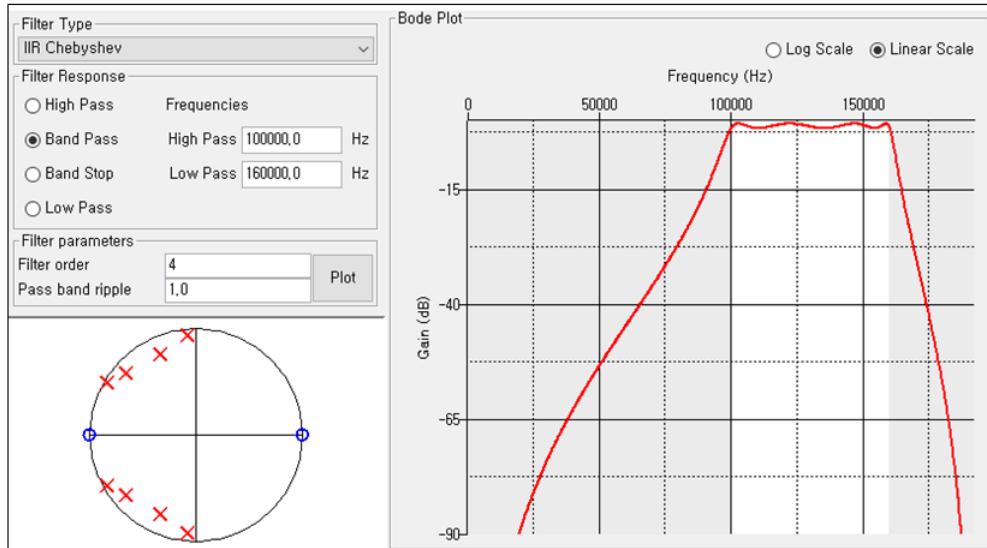


Fig. 3. Digital pre filter settings.

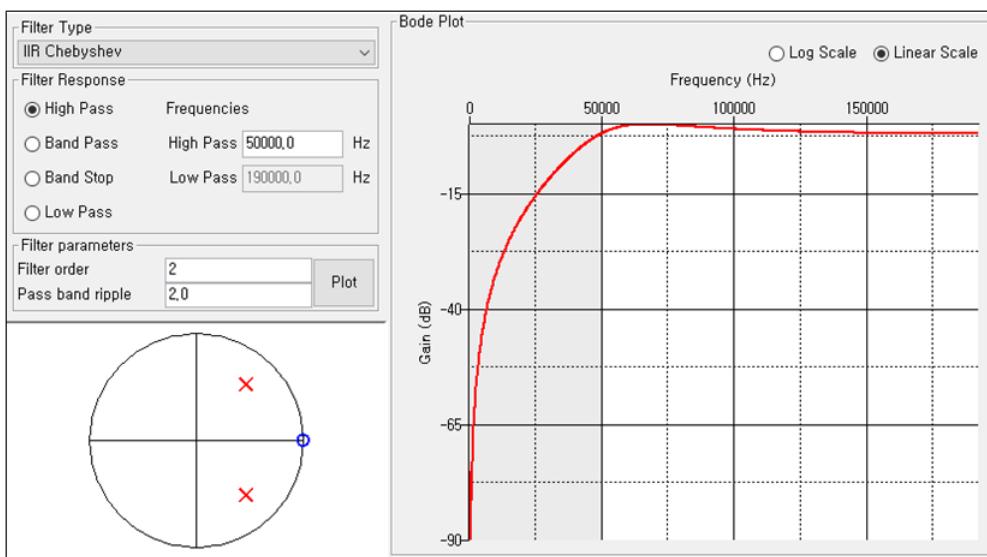


Fig. 4. Digital trigger filter settings.

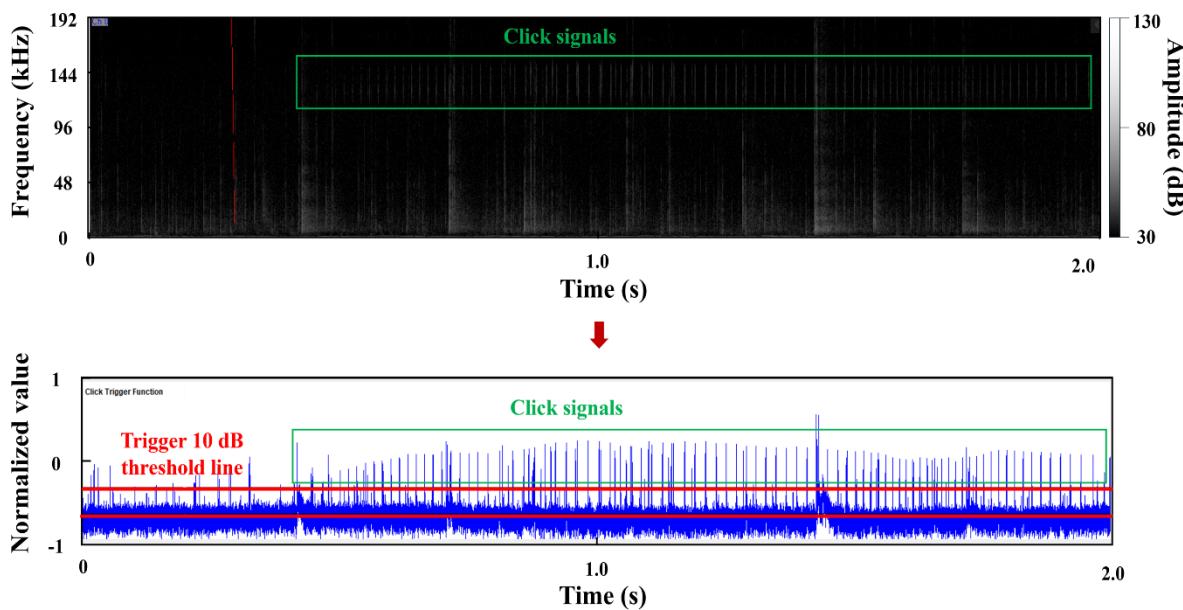


Fig. 5. Click signal segments were identified using spectrograms, and signals exceeding the click trigger threshold were classified as finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* clicks.

자료 수집 시 설정한 샘플링 주파수는 384 kHz로 bin의 크기는 0.0026 ms이다(Table 4). 또한, 클릭 탐지기의 세부 파라미터 값 설정 시 선행 연구를 참고하여 클릭 탐지기의 클릭 길이는 1,024 sample로 설정하였으며, 클릭 간 최소 간격은 100 sample로 설정하였다(Jacobson et al., 2013; Gillespie et al., 2020; Griffiths et al., 2020). 또한, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 기반으로 작동하는 클릭 트리거 값을 10 dB로 설정하였다. 클릭 트리거 값을 10 dB보다 낮게 설정할 경우, 과탐지가 발생하였으며, 반대로 높게 설정할 경우, 탐지 기

Table 4. Click detection settings used in PAMguard software to post-process all survey recordings

Menu Item	Field	Value
Source	Raw data source	Raw input data from sound acquisition
	Auto grouping	One group
	Channel	Channel 1
Trigger	Threshold	10 dB
	Long filter	0.00001000
	Long filter 2	0.00000100
	Short filter	0.10000000
Click length	Min click separation	100 samples
	Max click length	1,024 samples
	Pre sample	40 samples
	Post sample	40 samples

준선 간격이 넓어져 스펙트로그램에 나타난 클릭 신호가 탐지되지 않는 문제가 확인되었다. Fig. 5에서 나타낸 것처럼, 클릭 트리거 기준선을 초과하는 짧은 펄스를 클릭 신호로 인식하도록 하여 잡음으로 인한 오탐지를 줄였다.

기계적 소음 및 전기적 소음을 포함한 다양한 소리들이 1차로 클릭음으로 탐지되며, 이후 클릭 식별 단계를 통해 1차로 탐지된 전체 클릭음 중에서 상괭이 클릭음을 식별한다. 본 연구에서는 상괭이의 클릭음을 식별하기 위해 시험대역(test band)과 제어대역(control band)을 설정하였다. 시험대역은 주요 식별 범위를 나타내며, 본 연구에서는 우리나라 남해 연안에 서식하는 상괭이의 클릭음 주파수 대역인 100–160 kHz로 설정하였다 (Choi et al., 2021).

제어대역은 시험대역 이외의 주파수 대역을 설정하여 탐지 신호의 클릭 여부를 평가하고, 배경 소음이나 잡음 신호를 제거하는 역할을 한다. 상괭이의 클릭 주파수 대역이 아닌 40–90 kHz와 170–190 kHz의 두 구간을 제어대역으로 설정하였으며, 식별 임계값은 6 dB로 지정하였다. 식별 임계값은 클릭 식별의 주요 기준으로 작용한다. 설정된 임계값은 시험대역에서 탐지한 클릭 신호가 제어대역보다 최소 6 dB 이상 강할 때 상괭이 클릭 음으로 식별한다. 또한, 상괭이 클릭음의 길이는 0.07–0.1 ms로 제한하였으며, 클릭의 최대 진폭보다 6 dB 낮은 값을 추가적인 임계값으로 설정하였다(Table 4).

본 연구에서는 PAMGuard의 MHT 클릭 트레인 탐지기(Macaulay, 2020)를 사용하여 상괭이 클릭 트레인을 탐지하고 분석하였다. 탐지된 상괭이 클릭음 중 일정한 시간 간격으로 반복되는 신호를 클릭 트레인으로 정의하였으며, 이러한 신호의

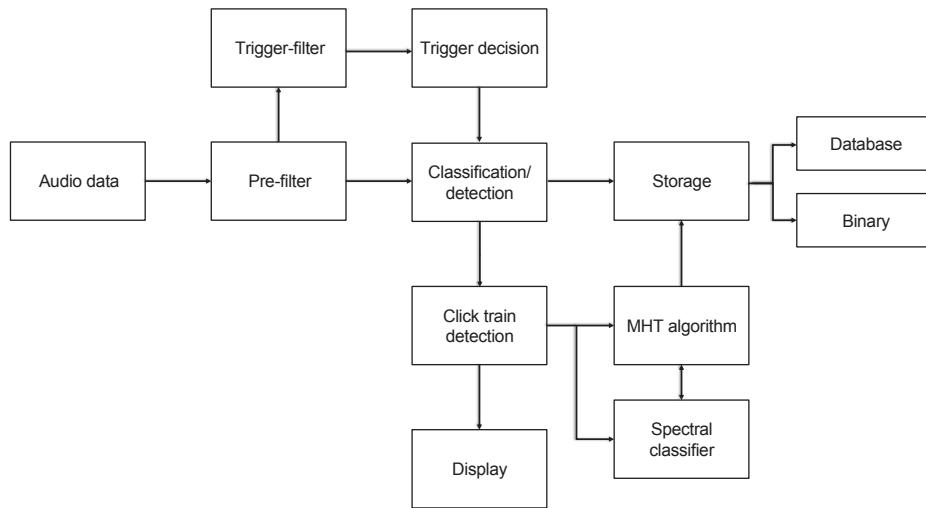


Fig. 6. A comprehensive schematic diagram of click detection, including the click detector and click train detector.

ICI (inter-click interval) 변화를 분석하여 상괭이의 행동적 특성을 이해하고, 서식지 관리에 활용할 수 있다(Gillespie and Caillat, 2008; Soldevilla et al., 2008). 클릭 트레인 분석에는 다중 가설 추적(multi-hypothesis tracking, MHT) 기법을 적용하였다. MHT 탐지기는 Macaulay (2020)가 제안한 기본값을 바탕으로 연구 자료에 맞추어 조정하였다. 주요 설정값은 Prune-back=7, Max no. coasts=7, Max no. trains=40, Max ICI=0.5 s, ICI=200 ms, Amplitude=30 dB, Click length=0.2 ms로 설정하였고, 탐지 정확성을 높이기 위해 스펙트럼 분류기를 사용하여 0–90 kHz 주파수 대역에서 에너지가 높게 나타난 클릭은 제외하고 고주파수 협대역(narrow band high frequency, NBHF) 클릭을 구별하였다. 0–90 kHz 대역의 클릭음이 제거된 음향자료를 후처리하여 해양포유류의 클릭음을 탐지하고 상괭이 클릭으로 식별하였다. 상괭이 클릭으로 식별된 클릭음은 MHT 알고리즘을 통해 클릭 트레인으로 구성하였으며, 스펙트럼 식

별을 통해 NBHF 클릭으로 구성된 클릭 트레인을 구별하였다. 결과 자료는 database (SQLite3)와 binary (postgreSQL dump format) 파일로 저장된 후 CSV (comma-separated values) 형식으로 추출하였다(Fig. 6). 추출한 자료는 개별 작성한 R 스크립트(V4.4.0, R, 2024)와 SQLiteStudio (version 3.3.4)를 이용하여 ICI 및 클릭 수와 탐지된 시간(UTC) 그리고 peak 주파수 값 등을 계산하였다.

결과 및 고찰

상괭이의 클릭음 탐지 빈도

1차와 2차 조사(ADDS 장비 투입 전)에서 상괭이의 클릭음은 오전 7시부터 10시까지 증가하였다가 이후 점차 감소하였다. 이후 13시부터는 다시 증가하였다가 17시부터 감소하였으며, 일몰 이후에는 급격히 줄어드는 경향을 나타내었다(Fig. 7).

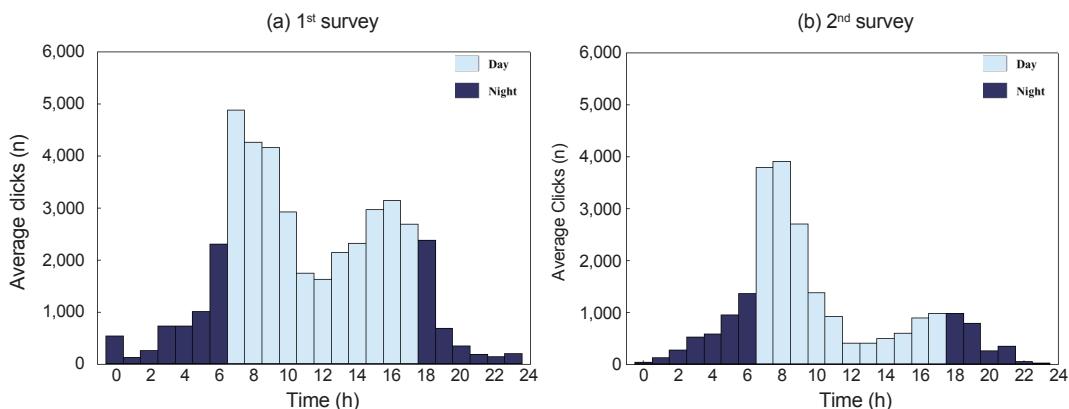


Fig. 7. Diel variation in the number of finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* clicks detected. a, 1st survey; b, 2nd survey.

ADDS를 투입한 3차 조사에서 상괭이의 클릭음은 1차와 2차 조사와 비슷하게 오전 7시부터 9시까지는 증가하였지만, 그 이후로 상괭이의 클릭음 빈도는 계속 낮아지는 경향을 나타내었다. ADDS 투입 일주일 후인 4차 조사에서 상恹이의 클릭음은 3차 조사에 비해 절반정도 클릭음 빈도가 낮아졌으나, 오전 7시부터 11시까지 상恹이의 클릭음은 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만, 오전 11시 이후 상恹이의 클릭음은 점점 감소하는 경향을 나타내었으며, 상恹이의 클릭음이 탐지되지 않은 시간대도 나타나 ADDS가 단기적으로 상恹이의 활동을 억제했을 가능성이 있다(Fig. 8). ADDS 투입 전과 후의 상恹이 클릭 수는 모든 조사에서 일출 이후인 7시부터 9시 사이에 클릭 수가 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 상恹이의 활동이 일출 이후 주간 시간대에 집중된다는 것을 나타낸다. 또한, 모든 조사에서 야간 시간대에는 클릭 수가 낮았으며, 특히 ADDS 투입 이후 급격히 감소하였다. 이는 야간에 상恹이의 활동이 주간보다 제한적이고 ADDS 소음에 따른 단기적 회피 행동이 복합적으로 작용한 결과로 보인다. 기존에 관측된 상恹이 클릭음의 빈도는 일 평균 약 1,000회 이상이었다. 하지만, ADDS를 투입한 3차 음향조사에서 일 평균 약 500회 이하로 클릭 빈도가 절반 이상 감소하였다. 또한, ADDS 투입 이후 일주일 이상 지난 4차 음향조사에서 클릭 빈도가 일 평균 약 100회 이하로 3차 음향조사보다 급격히 감소하였다 따라서, ADDS는 투입 직후에는 효과가 미미하나 투입 이후 시간이 지남에 따라 효과가 나타나는 걸로 추정된다. 이러한 클릭 음 빈도 변화는 평상시 주간 시간대에 집중되던 상恹이 활동 패턴이 ADDS 소음으로 인해 변했음을 시사하며, Koschinski et al. (2008)과 Götz and Janik (2013)이 보고한 ADDS 투입 시 돌고래류의 단기적 회피 반응과 일치한다.

상恹이의 클릭 트레인 빈도

1차 음향조사에서 상恹이 클릭 트레인의 ICI 값은 주로 0~400 ms 사이에 집중되었다. 0~50 ms 구간에서 4,718회, 50~200 ms 구간에서 5,240회, 200~300 ms 구간에서 4,251회, 300~400

ms 구간에서 4,912회가 기록되었다. 400~500 ms 구간에서는 2,030회로 관측 빈도가 감소하였으며, 500 ms 이상의 구간에서는 탐지 수가 228회로 상대적으로 낮게 나타났다. 2차 음향조사에서 상恹이 클릭 트레인의 ICI 값은 주로 0~400 ms 사이에 집중되었다. 0~50 ms 구간에서는 1,574회, 50~200 ms 구간에서는 2,387회, 200~300 ms 구간에서는 2,109회, 300~400 ms 구간에서는 2,327회가 기록되었다. 400~500 ms 구간에서는 957회로 관측 빈도가 감소하였으며, 500 ms 이상의 구간에서는 탐지 수가 106회로 상대적으로 적게 나타났다. 3차 음향조사에서 상恹이 클릭 트레인의 ICI 값은 주로 0~400 ms 사이에 집중되었다. 0~50 ms 구간에서 총 275회 탐지되었으며, 50~200 ms 구간에서는 총 1,351회가 기록되었다. 200~400 ms 구간에서는 총 3,020회로 가장 높은 탐지수를 기록하였다. 400~500 ms 구간에서는 총 599회로 관측 빈도가 감소하였으며, 500 ms 이상의 구간에서는 80회 탐지되었다. 4차 음향조사에서 상恹이 클릭 트레인의 ICI 값은 주로 50~400 ms 사이에 집중되었다. 세부적으로, 0~50 ms 구간에서는 32회, 50~200 ms 구간에서는 279회, 200~300 ms 구간과 300~400 ms 구간에서는 각각 384회로 가장 많은 탐지수가 기록되었다. 400~500 ms 구간에서는 159회로 빈도가 감소하였으며, 500 ms 이상의 구간에서는 18회로 나타나 현저히 낮았다(Fig. 9).

선행연구인 Clausen et al. (2011), Castellote et al. (2015), Villadsgaard et al. (2007)에 의하면 고래의 클릭패턴은 행동 유형에 따라 변화한다고 보고하였다. 상恹이는 목표물에 접근할 때 ICI가 점점 줄어 드는데, 짧은 ICI (5~25 ms) 구간에서 주로 먹이 사냥 및 근접 탐색 행동을 나타냈다. 목표물과의 거리가 가까워지면서 ICI가 1 ms까지 크게 감소하는데, 이는 먹이 사냥 중임을 나타낸다(Koschinski et al., 2008; Verfuß et al., 2009). 중간 ICI (50~150 ms)는 먹이 탐색이나 사냥 직전 단계 가능성이 높으며, 이러한 패턴은 상恹이가 서식지 내에서 먹이 탐색 활동과 먹이 사냥을 유지하고 있음을 보여준다. 상恹이의 클릭 음 구간이 긴 ICI (150 ms 이상)을 나타낼 시 주변 환경 감지나

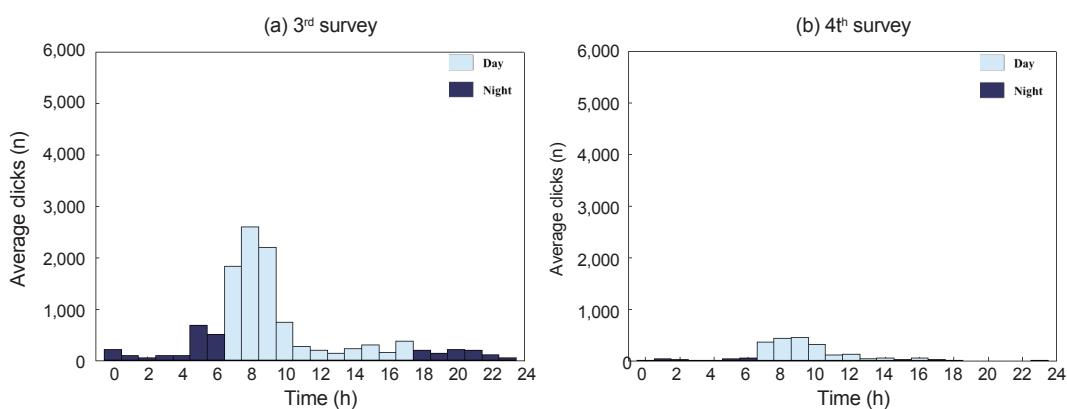


Fig. 8. Diel variation in the number of finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* clicks detected. a, 3rd survey; b, 4th survey.

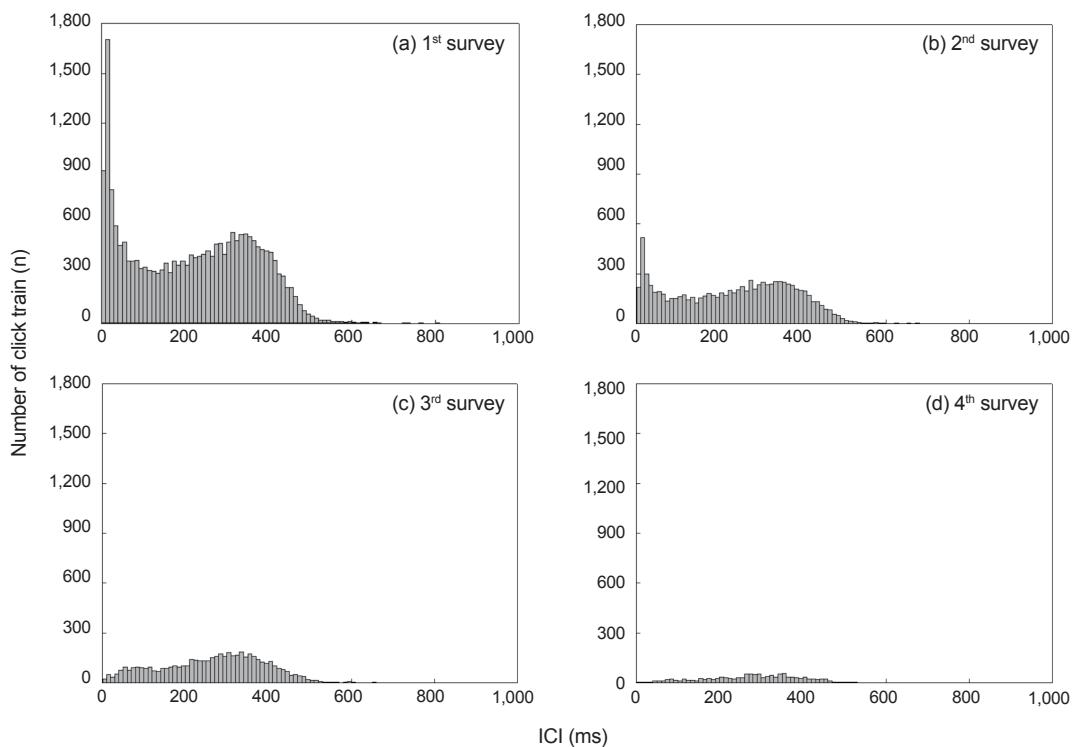


Fig. 9. Histogram of average inter-click intervals (ICI) for click train of finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* during the survey. a, 1st survey; b, 2nd survey; c, 3rd survey; d, 4th survey.

탐색 중심 행동을 보인다. 또한, 선행 연구인 Villadsgaard et al. (2007)과 Castellote et al. (2015)에서 인간 활동과 소음으로 인해 긴 ICI가 더 자주 나타난 것으로 판단된다.

본 연구에서 평상시 상괭이 클릭 트레인의 ICI 값은 주로 0–50 ms와 200–400 ms 구간에 집중되었으며, 짧은 ICI 빈도가 다른 ICI 구간보다 높게 나타나 조사 지역에서 먹이 사냥을 주로 하는 것으로 보인다. 또한, ICI 변화는 단순 회피 행동인지 장기적인 서식지 이탈인지 본 조사만으로는 판단하기 어려워 ADDs 투입 후 나타난 ICI 변화와 클릭 빈도의 감소를 ‘단기적 행동 변화’로 제한하여 해석하였다.

Villadsgaard et al. (2007)과 Castellote et al. (2015)의 연구에서는 긴 ICI가 소음 환경에서의 적응적 반응으로 나타난다고 보고하였다. 본 연구에서도 ADDs를 투입한 3차에서 5차 음향조사 기간에 상괭이의 클릭 빈도가 평상시보다 크게 감소했으며, 짧은 ICI의 빈도 줄어든 반면 긴 ICI의 빈도는 증가하였다. ADDs 투입 직후에는 목시조사에서 상괭이가 관측되었으나, 일주일 이상 경과 후에는 관측되지 않았고, 클릭 빈도 또한 투입 직후보다 일주일 이후에 급격히 감소하였다. 또한, ADDs 투입 전에는 7–10시와 16–17시에 높은 클릭 활동이 관측되었으나, 투입 후 7–10시를 제외한 시간대에서 주·야간 활동이 거의 나타나지 않았다. 이러한 결과는 ADDs 소음이 상괭이의 활동 시간대와 공간적 분포에 변화를 일으켜, 양식장 지역 회피 및

활동 감소로 이어졌다고 판단된다.

ADDS 투입 이후, 0–50 ms의 짧은 ICI의 빈도가 감소하고, 200 ms 이상인 긴 ICI 빈도의 증가는 소음으로 인한 상괭이의 먹이 사냥 행동을 방해하거나 양식장으로부터의 회피 행동으로 판단된다. Koschinski et al. (2008)은 ADDs 소음이 쇠돌고래 (*Phocoena phocoena*)의 서식지 회피 행동을 유발한다고 보고하였으며, 본 연구에서 ADDs 소음이 상괭이 출현 감소에 영향을 미쳤다고 판단된다. Zhao et al. (2023)은 소음 환경에서 해양포유류가 신호 간격을 조정하여 탐지 효율성을 높인다고 보고한 바 있으며, Götz and Janik (2013)의 선행 연구에서 ADDs 소음이 상괭이의 주요 반향정위 주파수 대역과 중첩될 경우, 신호 혼선을 일으킬 수 있어 ADDs의 장기적 사용이 생태적 영향을 미칠 가능성을 논의하였다. 미국과 유럽 연안에서 ADDs 사용 시 관찰된 돌고래 및 상괭이의 활동 감소 사례와 비교하여 (Koschinski et al., 2008; Götz and Janik, 2013), 이는 ADDs 효과가 지역적·환경적 조건에 따라 달라질 수 있음을 나타내며, 본 연구 결과는 어업 현장에서 혼획 저감 효과를 평가하는데 활용될 수 있다.

클릭 파리미터 분석

탐지한 상괭이의 클릭음 자료를 활용하여 클릭 파라미터를 분석하였다. 분석한 파라미터는 클릭의 피크 주파수(peak), 클릭

간 간격(ICI), 주파수 대역폭, 중심 주파수(centerkHz)이다. 1차 조사에서는 peak는 132 ± 15 kHz였으며, 주파수 범위는 91–163 kHz로 관측되었다. CenterkHz_{3dB}은 132 ± 15 kHz로 91에서 163 kHz 사이였고, ICI는 212 ± 148 ms, 범위는 0.07에서 881 ms로 관측되었다. 2차 조사에서는 peak는 133 ± 14 kHz였으며, 주파수 범위는 90–162 kHz로 나타났다. CenterkHz_{3dB}은 133 ± 14 kHz로 90에서 162 kHz 사이였고, ICI는 228 ± 142 ms, 범위는 0.80에서 759 ms로 나타났다. 3차 조사에서는 ADDs 투입 후 peak는 134 ± 12 kHz로, 주파수 범위는 92–162 kHz로 나타났다. CenterkHz_{3dB}은 134 ± 12 kHz로 92에서 161 kHz 사이였고, ICI는 262 ± 124 ms, 범위는 1.06에서 779 ms로 나타났다. 4차 조사에서는 ADDs 투입 후 Peak는 135 ± 13 kHz로, 주파수 범위는 64–161 kHz로 나타났다. CenterkHz_{3dB}은 135 ± 13 kHz로 64에서 161 kHz 사이였고, ICI는 277 ± 115 ms, 범위는 2.82에서 813 ms로 나타났다(Table 5). ADDs 투입 전후를 비교하면, 피크 주파수와 중심 주파수, 대역폭은 큰 차이가 없었으나, 평균 ICI는 212–228 ms에서 262–277 ms로 뚜렷이 증가하였다. 이는 단순한 단기 회피 행동이라기보다는, 소음 간섭을 최소화하거나 원거리 탐지를 강화하기 위한 적응적 반응일 가능성이 있다. 그러나, 본 조사만으로는 이러한 변화가 일시적 회피에 그치는지, 장기적인 서식지 이탈로 이어지는지를 단정하기 어렵다.

또한, Villadsgaard et al. (2007)과 Castellote et al. (2015)는 긴 ICI가 소음 환경에서의 적응 반응으로 자주 나타난다고 보고 하였는데, 본 연구의 결과 역시 이러한 패턴과 일치한다. 일부 연구에서는 ADDs 신호가 반향정위 주파수 대역과 중첩될 경우 장기적 회피 가능성을 제기하였으나(Götz and Janik, 2013), 본 연구의 스펙트로그램에서는 사용된 ADDs (출력 145 dB re 1 μPa)의 소음 대역과 상괭이 클릭 주파수 대역이 분리되어 직접적인 중첩은 확인되지 않았다. 그럼에도 ADDs 투입 후 클릭 빈도 감소와 평균 ICI 증가가 동반되었고, 이는 SNR 저하에 대한 단기적 행동 조정으로 해석될 수 있다.

스코틀랜드 서부 해역 등 양식장 밀집 수역에서는 ADDs 소음

이 강한 구간에서 쇠돌고래/상괭이류의 음향 탐지 감소·서식지 이탈이 보고되어 왔으며, 특정 수신 음압 수준 이상에서 반응이 뚜렷해지는 경향이 제시되었다(Findlay et al., 2024). 본 연구에서 나타난 클릭 감소와 ICI 연장 패턴은 이러한 해외 사례와 유사하며, ADDs의 혼획 저감 효과는 해역별 소음 환경과 장치 운용 조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 실제 어업 활동에 적용하기 위해서는 장기적인 모니터링과 다양한 환경 조건을 고려한 추가 연구가 필요하다.

국내 연구와 비교

Choi et al. (2021)은 남해 연안 상괭이가 일출 직후(06–09시)에 탐지 빈도가 가장 높다고 보고하였다. 본 연구에서도 ADDs 투입 전후를 막론하고 07–09시 구간에서 클릭 수가 증가하였으며, 이는 남해 연안 전반의 보편적 활동 패턴과 일치한다. 그러나 ADDs 투입 이후에는 오전 활동 이후 클릭 수가 급격히 감소하여, 기존 연구에서 확인된 일일 주기적 활동성이 왜곡된 양상을 보였다. Kim et al. (2024)은 하동 중평항에서 상괭이 클릭의 중심 주파수를 약 126 kHz, 클릭 지속시간을 127 μs로 보고하였다. 본 연구에서도 ADDs 투입 전후 평균 피크 주파수는 132–135 kHz 범위로 나타나, 주파수 특성은 기존 보고와 거의 동일하였다. 이는 ADDs 투입이 상괭이의 주파수 특성에는 직접적 영향을 주지 않았음을 시사한다. 반면, 평균 ICI는 212–228 ms에서 262–277 ms로 증가하여, 주파수 안정성은 유지되면서도 시간적 패턴에서 변화가 발생했음을 보여준다. Yoon et al. (2021)은 서남해 해상 풍력단지에서 상괭이가 매일 출현하며 평균 40.7 clicks/min을 기록했다고 보고하였다. 본 연구에서는 ADDs 투입 전 일평균 약 1,000회 이상 탐지되던 클릭 수가, 투입 직후(3차) 500회 이하, 투입 1주일 후(4차)에는 100 회 이하로 급격히 감소하였다. 이는 상괭이가 단기간에는 여전히 탐지되더라도, 시간이 지남에 따라 활동 밀도가 현저히 줄어드는 패턴을 보여주며, 인위적 소음원이 회피 행동을 유발할 수 있음을 뒷받침한다. 국내 연구들은 상괭이의 일출 직후 활동 집중, 120–135 kHz 주파수 범위, 일관된 출현 패턴을 공통적으로

Table 5. Comparison of acoustic characteristics of finless porpoise *Neophocaena asiaeorientalis* before and after ADDs deployment

Parameter	Before ADDs deployment		After ADDs deployment		
	1 st	2 nd	3 rd	4 th	
Peak (kHz)	Avg.±SD	132 ± 15	133 ± 14	134 ± 12	135 ± 13
	Range	91–163	90–162	92–162	64–161
ICI (ms)	Avg.±SD	212 ± 148	228 ± 142	262 ± 124	277 ± 115
	Range	0.07–881	0.80–759	1.06–779	2.82–813
BW (kHz)	Avg.±SD	12 ± 6	12 ± 6	12 ± 6	12 ± 6
	Range	1–76	1–85	1–71	1–55
CenterkHz (kHz)	Avg.±SD	132 ± 15	133 ± 14	134 ± 12	135 ± 13
	Range	88–166	88–165	92–162	64–161

ADDs, Acoustic deterrent devices; ICI, Inter-click interval; BW, Bandwidth.

보고하였으나, 본 연구에서는 ADDs 소음으로 인해 출현 빈도의 급격한 감소와 ICI 증가가 나타났다. 이는 국내 상괭이 개체군이 일정한 주파수 특성을 유지하면서도, 소음 환경에서는 행동 시간대와 활동 강도가 크게 변할 수 있음을 보여준다.

본 연구에서는 하동 연안 흥합양식장에서 ADDs 투입 전후 상괭이(*Neophocaena asiaeorientalis*)의 출현 빈도와 음향 특성을 비교하였다. PAM 결과, ADDs 투입 이후 상괭이의 클릭 빈도는 현저히 감소하였으며, 평균 ICI는 유의하게 증가하였다. 이는 ADDs 소음이 상괭이의 탐색 및 사냥 행동에 영향을 미쳐 단기적 회피 반응을 유발했을 가능성을 시사한다. 반면, 클릭의 피크 주파수와 중심 주파수 등 음향 파라미터는 큰 변화를 보이지 않아, 주파수 특성 자체는 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 ADDs가 상괭이의 활동 강도와 시간적 행동 패턴에 영향을 미칠 수 있음을 보여주며, 향후 실제 혼획 저감 효과를 평가하기 위해서는 장기적 모니터링과 다양한 해역 조건에서의 추가 검증이 필요하다.

사 사

본 연구는 2025년도 교육부 및 부산시의 제원으로 부산RISE 혁신원의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISC)의 결과입니다(2025-RISE-02-001-006). 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

- Castellote M, Stafford KM, Neff AD and Lucey W. 2015. Acoustic monitoring and prey association for beluga whale (*Delphinapterus leucas*) and harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) off two river mouths in Yakutat Bay, Alaska. Mar Fish Rev 77, 1-10. <https://doi.org/10.7755/MFR.77.1.1>.
- Choi S, Kim E and Sohn H. 2021. Emergence characteristics of narrow-ridged finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis*) using passive acoustic survey in the South Sea of South Korea. Korean J Fish Aquat Sci 54, 989-999. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0989>.
- Choi SG, Park KJ, Kim HW, Lee YR, Park JE, Moon DY and An YR. 2010. Finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides* distribution in the South Sea of Korea. Korean J Fish Aquat Sci 43, 665-669. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2010.43.6.665>.
- Clausen KT, Wahlberg M, Beedholm K, Deruiter S and Madsen PT. 2011. Click communication in harbour porpoises *Phocoena phocoena*. Bioacoustics 20, 1-28. <https://doi.org/10.1080/09524622.2011.9753630>.
- Cox TM, Ragen TJ, Read AJ, Vos E, Baird RW, Balcomb K and Benner L. 2005. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. J Cetacean Res Manage 7, 177-187. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v7i3.729>.
- Findlay CR, Coomber FG, Dudley R, Bland L, Calderan SV, Hartny-Mills L, Leaper R, Tougaard J, Merchant ND, Risch D and Wilson B. 2024. Harbour porpoises respond to chronic acoustic deterrent device noise from aquaculture. Biol Conserv 293, 110569. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110569>.
- Gillespie D and Caillat M. 2008. Statistical classification of odontocete clicks. Can Acoust 36, 20-26.
- Gillespie D, Palmer L, Macaulay J, Sparling C and Hastie G. 2020. Passive acoustic methods for tracking the 3D movements of small cetaceans around marine structures. PLoS One 15, e0229058. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229058>.
- Götz T and Janik VM. 2013. Acoustic deterrent devices to prevent pinniped depredation: Efficiency, conservation concerns and possible solutions. Mar Ecol Prog Ser 492, 285-302. <https://doi.org/10.3354/meps10482>.
- Griffiths ET, Archer F, Rankin S, Keating JL, Keen E, Barlow J and Moore JE. 2020. Detection and classification of narrow-band high frequency echolocation clicks from drifting recorders. J Acoust Soc Am 147, 3511-3522. <https://doi.org/10.1121/10.0001229>.
- Kim HY, Jung JH, Kang DH, Simanungkalit F and Kang MH. 2024. Occurrence and acoustic characteristics of finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis*) off the south coast of Korea using hydrophone and visual surveys. J Korean Soc Fish Ocean Technol 60, 258-268. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2024.60.3.258>.
- Kim ZG, Choi SG, An YR, Kim HW and Park KJ. 2007. Whales, Dolphins and Porpoises off Korean Peninsula. Kim SG, Ha SR and Kim SH, eds. Hanguel Graphics Press, Busan, Korea, 100-101.
- Koschinski S, Diederichs A and Amundin M. 2008. Click train patterns of free-ranging harbour porpoises acquired using T-PODs may be useful as indicators of their behaviour. J Cetacean Res Manage 10, 147-155. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v10i2.649>.
- Lee GH, Kim HY and Song DH. 2021. The opening efficiency difference of guide net in finless porpoise escape device by the type of extension net in stow net. J Korean Soc Fish Ocean Technol 57, 271-282. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2021.57.3.271>.
- Macaulay JDJ. 2020. Passive acoustic monitoring of harbour porpoise behaviour, distribution and density in tidal rapid habitats. Ph. D. Thesis, University of St Andrews, Scotland.
- PAMGuard. 2025. PAMGuard Training Tutor 2025. Retrieved from <https://www.pamguard.org/tutorials/getstarted.html> on May 12, 2025.
- Park KJ. 2006. Population ecological characteristics and stock assessment of finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, in the western sea of Korea. Ph. D. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea, 174.

- Roman J, Altman I, Dunphy-Daly MM, Campbell C, Jasny M and Read AJ. 2013. The marine mammal protection act at 40: Status, recovery, and future of US marine mammals. Ann N Y Acad Sci 1286, 29-49. <https://doi.org/10.1111/nyas.12040>.
- Soldevilla MS, Henderson EE, Campbell GS, Wiggins SM, Hildebrand JA and Roch MA. 2008. Classification of Risso's and Pacific white-sided dolphins using spectral properties of echolocation clicks. J Acoust Soc Am 124, 609-624. <https://doi.org/10.1121/1.2932059>.
- Verfuß UK, Miller LA, Pilz PK and Schnitzler HU. 2009. Echolocation by two foraging harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). J Exp Biol 212, 823-834. <https://doi.org/10.1242/jeb.022137>.
- Villadsgaard A, Wahlberg M and Tougaard J. 2007. Echolocation signals of wild harbour porpoises, *Phocoena phocoena*. J Exp Biol 210, 56-64. <https://doi.org/10.1242/jeb.02618>.
- Yoon YG, Yang WJ and Choi JW. 2021. Preliminary study of passive acoustic monitoring of finless porpoises *Neophocaena asiaeorientalis* around the Southwest offshore wind farm in Korea. J Acoust Soc Korea 40, 537-545. <https://doi.org/10.7776/ASK.2021.40.6.537>.
- Young NM and Iudicello S. 1997. Blueprint for whale conservation: Implementing the marine mammal protection act. Ocean Coastal Law J 3, 149-174.
- Zhao L, Giorli G, Caruso F, Dong L, Gong Z, Lin M and Li S. 2023. Echolocation clicks of free-ranging Indo-Pacific finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides*) in Hainan waters. J Acoust Soc Am 153, 1934-1942. <https://doi.org/10.1121/10.0017655>.