KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 59(5), 630-644, 2026

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 59(5),630-644,2026

과학어탐과 환경 DNA를 활용한 서해 수산자원의 분포와 현존량 추정

임태호 · 최상준[1] · 김원교[1] · 오우석[2] · 박근창[2] · 황두진[3] · 이경훈[2]*

해양환경공단 해양보전본부, [1]한국수산자원공단 수산자원본부, [2]국립부경대학교 해양생산시스템관리학부, [3]전남대학교 해양생산관리학과

Distribution and Biomass Estimation of Fisheries Resources in the Yellow Sea Using Scientific Echosounders and Environmental DNA (eDNA)

Taeho Im, Sangjoon Choi[1], Wonkyo Kim[1], Wooseok Oh[2], Geunchang Park[2], Doojin Hwang[3] and Kyounghoon Lee[2]*

Marine Conservation Division, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 05718, Republic of Korea
[1]Division of Aquatic Living Resources, Korea Fisheries Resources Agency (FIRA), Busan 46041, Republic of Korea
[2]Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
[3]Division of Marine Production Management, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

This study evaluated the spatiotemporal distribution and species-specific acoustic standing stock of fishery resources in the Current Fishing Maintenance Area and the Korea–China Provisional Measures Zone of the Yellow Sea using fisheries acoustics and environmental DNA (eDNA) data collected in 2022 and 2023. Fish echoes were separated using 38 and 120 kHz data, and nautical area scattering coefficient (NASC) values were integrated at 1 nmi elementary distance sampling units. eDNA metabarcoding was used to identify major taxa, whereas eDNA read counts were not converted directly to biomass. Major taxa were selected by survey period, total NASC was partitioned among taxa, and species-specific target strength and length–weight information were applied for biomass conversion. Mean NASC in the Current Fishing Maintenance Area was higher in 2023 than in 2022 for April, August, and November, with 2023/2022 ratios of 3.59, 2.88, and 4.63, respectively. Species-specific standing stocks varied markedly among surveys; the largest 2023 estimates were 5,008.5 ton for *Thunnus orientalis* in April and 2,491.6 ton for *Larimichthys polyactis* in November. These results indicate that acoustic and eDNA data can provide complementary information on fish distribution, species composition, and standing stock in the Yellow Sea.

Keywords: Yellow Sea, Fisheries acoustics, Environmental DNA, NASC, Standing stock

서 론

황해는 다양한 어류가 서식·회유하며, 계절에 따른 해양환경 변화와 어류의 이동에 따라 종조성과 공간적 분포가 달라지는 특성을 나타낸다. 남부 황해를 대상으로 한 연구에서도 봄과 가을의 어류 군집구조와 종조성이 서로 다르게 나타나는 것으로 보고되었다(Jin et al., 2003). 이와 같이 어류의 분포와 군집구조는 조사시기에 따라 달라질 수 있으므로, 수산자원의 시·공간적 분포 특성을 파악하기 위해서는 특정 시기의 조사뿐만 아니라 동일한 해역에서 반복적인 자료를 축적할 필요가 있다. 또한 수산생물의 분포 변화를 파악하기 위해서는 지속적인 시계열 자료가 중요하며, 최근 수중음향 연구에서도 종 분포와 어군 밀집해역의 변화를 파악하기 위해 일관된 반복조사의 필요성이 강조되고 있다(Dornan et al., 2026).

수산자원의 분포와 종조성을 파악하기 위해 트롤과 같은 어구를 이용한 직접적인 어획조사가 널리 활용되고 있다. 어획조사는 출현종과 개체수, 체장 및 체중 등의 생물학적 정보를 직접 확보할 수 있다는 장점이 있으나, 조사정점과 어구의 채집범위 및 선택성에 따라 조사결과가 영향을 받을 수 있다. 반면 과학어군탐지기를 이용한 수중음향조사는 조사선의 이동에 따라 수층 내 생물의 음향산란신호를 연속적으로 수집할 수 있어 넓은 해역에서 어류의 수평·수직 분포를 파악하는 데 유용하다

***Corresponding author:** Tel: +82. 51. 629. 5889 Fax: +82. 51. 629. 5886
E-mail address: klee71@pknu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0630
Korean J Fish Aquat Sci 59(5), 630-644, October 2026
Received 29 August 2026; **Revised** 6 October 2026; **Accepted** 7 October 2026
저자 직위: 임태호(본부장), 최상준(센터장), 김원교(주임), 오우석(대학원생), 박근창(시간강사), 황두진(교수), 이경훈(교수)

(Simmonds and MacLennan, 2005). 최근 연구에서도 수중음향조사는 수백 km 규모의 수층을 조사할 수 있으며, 어류의 분포와 어군의 공간적 변화를 파악하는 데 활용되고 있다(Dornan et al., 2026). 특히 면적산란계수(nautical area scattering coefficient, NASC)는 일정한 공간범위의 음향산란량을 나타내는 지표로, 조사시기와 해역에 따른 상대적인 음향산란량의 차이를 비교하는 데 활용할 수 있다(MacLennan et al., 2002). 또한 여러 주파수에서 나타나는 생물의 음향산란 특성 차이를 이용하는 다중주파수 분석은 어류와 동물플랑크톤 등 서로 다른 생물군의 음향신호를 구분하는 데 활용되고 있다(Kang et al., 2002; Korneliussen and Ona, 2002).

그러나 수중음향조사는 어류의 공간적 분포와 정량적인 에코에너지에 대한 절대량을 연속적으로 파악할 수 있는 반면, 음향자료만으로 조사해역에 출현하는 어종의 구성을 명확하게 확인하는 데에는 한계가 있다. 특히 여러 어종이 혼재하는 해역에서는 서로 다른 생물이 유사한 음향산란 특성을 나타낼 수 있어 어획조사 등의 생물학적 자료를 이용한 검증이 필요하다(Dornan et al., 2026). 최근에는 이러한 한계를 보완하기 위해 환경 DNA(environmental DNA, eDNA)를 기존 어획 및 음향조사와 함께 활용하는 연구가 증가하고 있다. 해수 eDNA 분석은 수중에 존재하는 생물 유래 DNA를 이용하여 어류의 출현과 종조성을 파악할 수 있으며, 트롤조사와 비교한 연구에서도 eDNA가 기존 어획조사와 상호보완적인 종 정보를 제공하는 것으로 나타났다(Thomsen et al., 2016; He et al., 2023). 또한 Tibone et al. (2024)은 음향으로 확인한 어류층을 대상으로 어획조사와 eDNA를 함께 활용하여 종조성을 분석하였으며, eDNA가 음향조사의 생물학적 검증을 보완할 수 있음을 제시하였다. 최근에는 acoustic-trawl 자료와 eDNA 자료를 직접 통합하여 어류의 분포와 자원량을 평가하려는 연구도 수행되고 있다(Claver et al., 2026). 따라서 수중음향자료가 제공하는 연속적인 공간분포 정보와 어획 및 eDNA 자료가 제공하는 종조성 정보를 함께 활용하면 조사해역의 어류 분포 특성을 보다 종합적으로 해석할 수 있다.

본 연구에서는 2022년과 2023년 황해의 현행조업유지수역과 한·중 잠정조치수역에서 수집된 수중음향자료를 이용하여 어류의 시·공간적 분포 특성을 분석하고자 하였다. 조사시기 및 해역별 NASC의 공간적 분포와 평균값을 분석하여 상대적인 음향산란 분포 특성을 파악하고, 두 연도에 동일한 월에 조사가 수행된 자료를 중심으로 연도 간 차이를 비교하였다. 또한 eDNA 분석을 통해 조사시기별 주요 어류의 출현과 종조성을 확인하고, 동시기 어획자료에서 확보된 체장·체중 등 생물학적 정보를 음향자료의 생체량 변환에 활용하였다. 이를 통해 황해 주요 조업해역에서 어류의 계절 및 연도별 시·공간적 분포 특성을 파악하고, 수중음향자료와 eDNA 및 어획자료를 상호보완적으로 활용한 수산자원 모니터링을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

조사해역 및 조사시기

본 연구에서는 2022년과 2023년에 황해의 현행조업유지수역과 한·중 잠정조치수역에서 수행된 수산자원 조사자료를 이용하였다. 현행조업유지수역 조사는 전남대학교 새동백호(T/V 2,996 ton)를 이용하여 10개 정점을 조사하였으며, 2022년에는 4월, 7월, 8월 및 11월, 2023년에는 4월, 6월, 8월 및 11월에 조사를 수행하였다(Fig. 1). 한·중 잠정조치수역 조사는 제주대학교 아라호(2,996 ton)를 이용하여 20개 정점을 조사하였으며, 2022년과 2023년 모두 5월과 11월에 조사를 수행하였다. 연도 간 정량적 비교는 두 연도에 동일한 월에 조사가 수행된 자료를 기준으로 하였다(Table 1).

과학어군탐지기 자료 수집

수중음향자료는 새동백호와 아라호에 설치된 split-beam 방식의 과학어군탐지기(EK80; Kongsberg Maritime AS, Horten, Norway)를 이용하여 수집하였다. 조사를 시작하기 전 직경 25 mm의 탄화 텅스텐 구(tungsten carbide sphere)를 사용하여 주

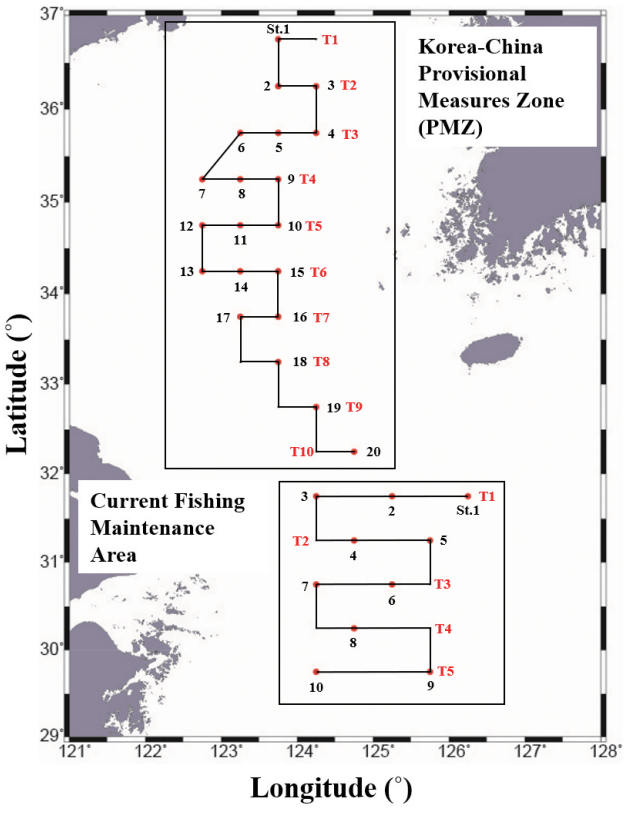


Fig. 1. Study area and acoustic survey transects in the Current Fishing Maintenance Area and the Korea–China Provisional Measures Zone in the Yellow Sea.

파수 18–200 kHz에 대한 교정을 진행하였다. 조사에는 18, 38, 70, 120, 200 kHz의 다중주파수를 이용하였으며, 조사선은 계획된 조사정선을 따라 약 7–10 knots의 속력으로 항주하면서 음향자료를 연속적으로 수집하였다. 조사 중 위치정보는 위성항법보정시스템(differential global positioning system)을 통해 음향자료와 함께 기록하였다. 수집된 음향자료는 음향분석 프로그램(Echoview ver. 8.0; Echoview Software Pty Ltd, Hobart, Australia)을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 다중주파수 자료 중 어류 음향신호의 분리 및 NASC 산출을 위해 38 및 120 kHz 자료를 이용하였다.

음향자료 전처리 및 어류 음향신호 분리

수집된 음향자료에는 조사선의 운항이나 주변 선박의 음향장비 등으로 인해 발생하는 잡음이 포함될 수 있으므로, 분석에 앞서 배경잡음(background noise)과 임펄스잡음(impulse noise)을 제거하였다. 잡음 제거 전, 표층 및 저층 분석 구간을 각각 3 m shadow zone과 해저면 상부 1 m의 bottom exclusion으로 설정하였다. 배경잡음은 신호와 잡음의 크기를 비교하여 잡음성 신호를 제거하는 time-varied threshold 방법을 이용하여 처리하였다(De Robertis and Higginbottom, 2007). 분석범위는 수평 20 pings, 수직 5 samples로 설정하였으며, maximum noise level은 38 kHz에서 -125 dB, 120 kHz에서 -120 dB로 설정하였다. 두 주파수 모두 minimum signal-to-noise ratio는 10 dB를 적용하였다.

임펄스잡음은 인접한 ping 사이에서 갑작스럽게 증가하는 음향신호를 비교하여 제거하는 two-sided comparison 방법을 이용하였다(Ryan et al., 2015). 이때 수직 분석범위는 5 samples, 수평 분석범위는 5 pings로 설정하였으며, 잡음 판별을 위한 threshold는 10 dB로 적용하였다. 잡음으로 판단된 신호는 주변 음향신호의 평균값으로 대체하였다.

잡음 제거가 완료된 38 및 120 kHz 음향자료는 두 주파수에서 나타나는 평균체적후방산란강도(mean volume backscattering strength, MVBS)의 차이를 이용하여 어류 음향신호를 구분하였다(Kang et al., 2002; Korneliussen and Ona, 2002). 분석을 위해 음향자료를 5 pings × 5 m 크기의 동일한 셀로 구성하고, 각 셀에서 38 kHz와 120 kHz의 MVBS 차이(ΔMVBS)를 계산하였다. 이후 설정된 ΔMVBS 범위에 해당하는 영역을 어류 음향신호로 구분하고, 이를 잡음이 제거된 38 kHz 자료에 적용하여 최종 분석에 사용할 어류 음향신호를 추출하였다. 본 연구에서는 주파수차 범위를 -2 dB<$\Delta MVBS_{38-120}$<18 dB로 설정하였다. 추출된 음향자료는 이후 NASC 산출과 어류의 공간적 분포 분석에 이용하였다(Fig. 2).

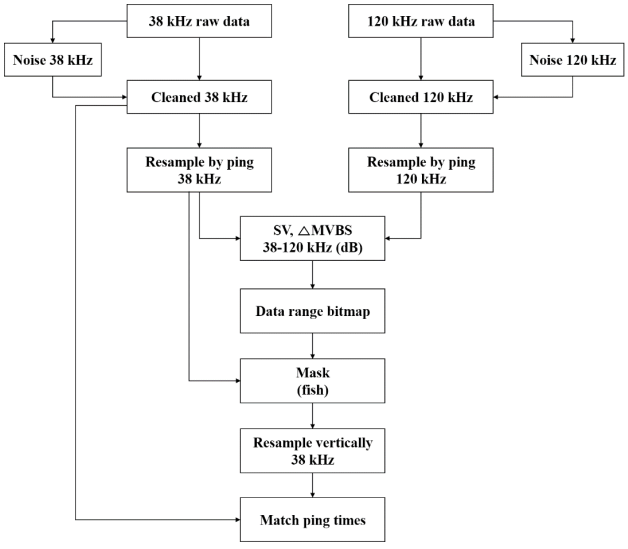


Fig. 2. Flowchart of acoustic data processing for extraction of fish echoes and calculation of the nautical area scattering coefficient.

NASC 산출 및 공간분포 분석

어류의 상대적인 음향산란 분포를 비교하기 위해 잡음과 비대상 음향신호가 제거된 38 kHz 자료를 이용하여 NASC를 산출하였다. 음향자료는 조사정선을 따라 1 nautical mile (nmi) 간격의 elementary distance sampling unit (EDSU)으로 구분하여 적분하였다. NASC는 선형 체적후방산란계수(volume backscattering coefficient)를 수심에 대해 적분하여 계산하였다(MacLennan et al., 2002). 각 조사시기의 NASC 자료는 위치정보와 결합하여 조사정선에 따른 공간적 분포를 나타내었으며, 조사시기별 평균 NASC를 산출하여 계절에 따른 상대적인 음향산란량을 비교하였다. 또한 2022년과 2023년의 연도 간 비교는 조사월이 동일한 자료를 대상으로 수행하였다. 현행조업 유지수역에서는 4월, 8월 및 11월을 비교하였으며, 한·중 잠정조치수역에서는 5월과 11월을 비교하였다.

Table 1. Summary of acoustic surveys conducted in 2022 and 2023

Year	Survey area	Research vessel	Station	Period
2022	Current Fishing Maintenance Area	Sae DongBaek	10	Apr., Jul., Aug., Nov.
	Korea–China Provisional Measures Zone	A-ra	20	May, Nov.
2023	Current Fishing Maintenance Area	Sae DongBaek	10	Apr., Jun., Aug., Nov.
	Korea–China Provisional Measures Zone	A-ra	20	May, Nov.

환경 DNA 분석

조사해역에 출현하는 어류의 종조성을 확인하기 위하여 eDNA 분석을 수행하였다. eDNA 분석을 위해 현행조업유지수역과 한·중 잠정조치수역의 조사정점에서 해수를 채수하였다. 2022년과 2023년에 각각 71개와 80개의 해수시료를 확보하였으며, 각 정점에서 채수한 해수 2 L를 Sterivex filter (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)를 이용하여 여과한 후 RNAlater (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)로 보존하여 DNA 추출에 사용하였다.

여과가 완료된 Sterivex filter 카트리지에서 RNAlater를 제거하기 위하여 카트리지를 2 mL tube와 연결한 후 50 mL tube에 넣고 3,515 × *g*에서 1분간 2회 원심분리하였다. 이후 DNA 추출 키트(DNeasy Blood & Tissue Kit; QIAGEN GmbH, Hilden, Germany)를 이용하여 eDNA를 추출하였다. DNA 추출을 위해 proteinase K 20 μL, AL buffer 200 μL 및 phosphate-buffered saline (PBS(-)) 220 μL로 구성된 premix를 Sterivex filter 카트리지에 주입하고 밀봉한 후, 56℃에서 20 rpm으로 1시간 반응시켰다. 반응이 완료된 카트리지는 1.5 mL tube에 연결하여 6,000 × *g*에서 1분간 원심분리하여 DNA를 회수하였다. 회수된 DNA에 100% ethanol 200 μL를 첨가하여 혼합한 후 column에 주입하고 6,000 × *g*에서 1분간 원심분리하였다. 이후 AW1 및 AW2 buffer를 각각 500 μL씩 이용하여 세척한 후, AE buffer 200 μL를 첨가하여 실온에서 1분간 반응시키고 6,000 × *g*에서 1분간 원심분리하여 최종 eDNA를 확보하였다. 추출된 DNA는 분석 전까지 -20℃에서 보관하였다.

추출된 eDNA는 염기서열 분석에 앞서 PicoGreen (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)을 이용하여 농도를 정량화하였다. 어류의 종조성 분석에는 미토콘드리아 12S rDNA 영역을 대상으로 하는 MiFish metabarcoding 기법을 적용하였다(Miya et al., 2015). 중합효소연쇄반응(polymerase chain reaction, PCR) 증폭에는 MiFish-U-F2와 MiFish-U-R2 primer를 이용하였으며, 각 시료에 대해 1차 PCR을 3회 반복 수행하였다. PCR은 touch-down 방식으로 수행하였으며, 증폭산물은 1.5% agarose gel 전기영동을 통해 목표 영역의 증폭 여부를 확인하였다.

1차 PCR에서 확보된 증폭산물은 pooling 및 정제한 후 index와 sequencing adapter를 부착하기 위한 2차 PCR을 수행하여 library를 제작하였다. 제작된 library의 품질을 확인한 후 염기서열 분석기(MiSeq System; Illumina Inc., San Diego, CA, USA)의 sequencing-by-synthesis 방식으로 염기서열을 분석하였다. 각 시료당 100,000 reads 이상의 자료 생산을 목표로 하였으며, 생성된 원시 염기서열 자료(raw sequence data)는 후속 분석에 이용하였다.

염기서열 자료는 분석에 앞서 품질관리를 수행하였다. 시료별 demultiplexing은 bcl2fastq2를 이용하여 수행하였으며, adapter sequence는 Cutadapt를 이용하여 제거하였다(Martin, 2011). 평균 quality score가 20 미만인 염기서열은 분석에서 제외하였으며, PCR 과정에서 생성될 수 있는 chimera sequence는 ChimeraSlayer를 이용하여 제거하였다. 또한 각 시료의 read 수와 guanine-cytosine (GC) content 등 기초적인 품질정보를 확인하였다. 본 연구에서는 paired-end reads를 병합하지 않고 forward read를 이용하여 후속 분석을 수행하였다. 품질관리가 완료된 염기서열은 NCBI nucleotide database와 MiFish database를 이용하여 분류학적 정보를 확인하였으며, 이를 바탕으로 조사정점 및 조사시기별 어류의 출현종과 종조성을 분석하였다. 또한, 조사시기별 eDNA read의 상대적 우점도와 조사정점별 검출 여부를 종합하여 주요·우점어종을 선정하였다(Fig. 3). 다만 조사시기의 체장·체중 정보가 확보되지 않은 종은 현존량 산정에서 제외하였으며, eDNA read count는 종의 출현과 주요 어종 선정에만 활용하였다.

자료 비교 및 분석

조사시기와 해역에 따른 어류의 음향분포 특성을 파악하기 위해 1 nmi EDSU별 NASC를 이용하여 공간적 분포와 평균값을 비교하였다. 현행조업유지수역과 한·중 잠정조치수역은 조사시기와 조사정점의 구성이 서로 다르므로 각 수역을 구분하여 분석하였다.

조사시기에 따른 변화는 각 연도에서 수행된 조사시기별 NASC의 공간적 분포와 평균값을 비교하여 분석하였다. 연도간 정량적 비교는 두 연도에 동일한 월에 조사가 수행된 자료를 대상으로 하였다. 이에 따라 현행조업유지수역은 4월, 8월 및 11월, 한·중 잠정조치수역은 5월과 11월 자료를 비교하였다. 현행조업유지수역의 2022년 7월과 2023년 6월 자료는 모두 여름철 조사자료이지만 조사월이 서로 다르므로, 계절적 분포 특성을 파악하기 위한 참고자료로만 제시하고 연도 간 비율 계산에서는 제외하였다.

한·중 잠정조치수역은 2022년과 2023년 모두 5월과 11월에 조사가 수행되었으므로, 두 조사월의 NASC 공간분포와 평균값을 각각 동일 월 기준으로 비교하였다.

음향자료에서 나타난 NASC의 변화와 어류 출현 특성을 함께 해석하기 위해 eDNA 분석결과와 동시기 어획자료를 보조적으로 검토하였다. eDNA 자료는 조사시기 및 해역별 종조성과 주요·우점어종의 선정에 이용하였으며, 어획자료는 현존량 산정에 필요한 체장·체중 및 종별 음향학적 변환정보를 적용하는 데 활용하였다.

음향자료를 이용한 어류의 생체량 밀도 및 현존량 추정

음향자료를 이용하여 어류의 생체량 밀도와 현존량을 추정하였다. 과학어군탐지기로부터 수집된 음향자료는 1 nmi 간격으로 구분하여 분석하였으며, 체적후방산란강도(volume backscattering strength, S_v) 자료를 NASC로 변환하여 이용하였다. NASC는 다음 식을 이용하여 산출하였다.

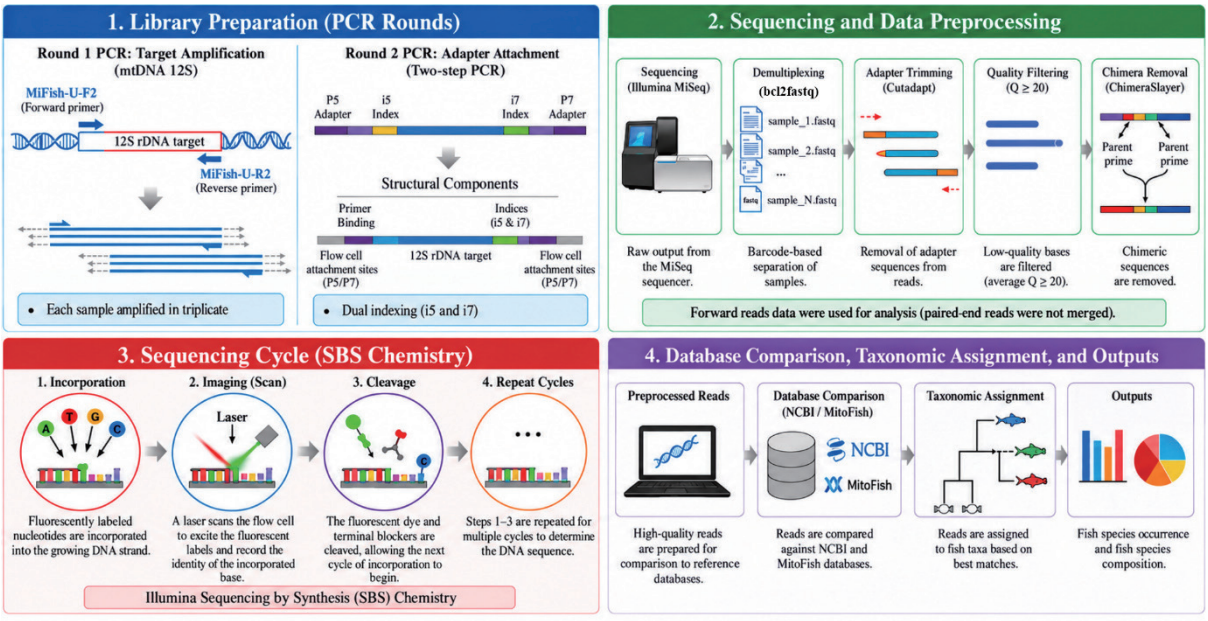


Fig. 3. Workflow of environmental DNA metabarcoding for analysis of fish species occurrence and community composition, including 12S rDNA amplification using MiFish primers, two-step polymerase chain reaction, Illumina MiSeq sequencing, sequence preprocessing, and taxonomic assignment using the NCBI and MitoFish databases.

$$NASC=4\pi(1852)^2 \int_{z_1}^{z_2} s_v \, dz \cdots\cdots (1)$$

여기서, NASC는 면적산란계수(m^2/nmi^2), s_v는 체적후방산란계수(m^{-1}), z_1과 z_2는 음향적분을 수행한 수심 범위를 나타낸다. 대상 어류의 체장에 따른 표적강도(target strength, TS)는 어종별 TS 관계식을 적용하였으며, 다음과 같이 나타내었다.

$$TS=20\log_{10}(L)+b \cdots\cdots (2)$$

여기서, TS는 대상 어류의 표적강도(dB), L은 대상 어류의 체장(TL, cm)이며, b는 어종별 TS 관계식의 상수이다. 대상 어류의 TS 관계식은 조사시기별 주요 출현종에 따라 기존 연구에서 제시된 관계식을 적용하였다. 대상 어류의 표적강도는 다음 식을 이용하여 산란단면적(σ)으로 변환하였다.

$$\sigma=4\pi\times10^{TS/10} \cdots\cdots (3)$$

여기서, σ는 대상 어류의 산란단면적을 나타낸다. 또한 대상 어류의 체장과 체중 관계는 다음 식과 같이 나타내었다.

$$W=aL^C \cdots\cdots (4)$$

여기서, W는 대상 어류의 체중, L은 체장이며, a와 C는 체장-체중 관계식의 계수이다. 대상 어류의 산란단면적과 체장-체중 관계식에는 음향조사와 유사한 시기에 어획조사를 통해 확보된 생물학적 자료를 이용하였다. 1 nmi 간격으로 산출된 평균 NASC와 대상 어류의 산란단면적 및 평균 체중을 이용하여 대상 어류의 생체량 밀도(ρ)를 산출하였다.

$$\rho=NASC\times\frac{W}{\sigma} \cdots\cdots (5)$$

여기서, NASC를 제외한 W/σ 부분은 음향자료로부터 대상 어류의 생체량 밀도를 산출하기 위한 변환계수(conversion factor)로 사용하였다. 대상 어류의 산란단면적과 체중에는 평균값을 적용하였다. 전체 조사해역의 평균 생체량 밀도는 정선별 평균 생체량 밀도와 각 정선의 EDSU 수를 이용하여 가중평균(weighted mean)하였다.

$$\bar{\rho}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\bar{\rho}_i \, n_i}{\sum_{i=1}^{N} n_i} \cdots\cdots (6)$$

여기서, $\bar{\rho}$는 전체 조사해역의 평균 생체량 밀도, $\bar{\rho}_i$는 i번째 조사정선의 평균 생체량 밀도, n_i는 i번째 조사정선의 EDSU 수, N은 전체 조사정선 수를 나타낸다.

현존량 산정 대상종은 eDNA 분석에서 확인된 어종 가운데 조사시기별 주요·우점어종을 선별하여 적용하였다. 선정된 각 어종의 총중량과 산란단면적의 곱을 상대적인 음향기여도로 이용하고, 이를 모든 대상종의 합으로 나누어 종별 NASC partitioning 비율을 산정하였다. 이후 전체 NASC에 종별 partitioning 비율을 적용하여 종별 NASC를 구하고(식 (7)), 각 어종의 TS 관계식과 체장-체중 자료로 산출한 변환계수를 이용하여 생체

량 밀도로 변환하였다. 종별 현존량은 조사시기별 생체량 밀도와 조사해역 면적을 이용하여 산정하였으며, eDNA read count는 NASC partitioning 또는 생체량 환산에 직접 사용하지 않았다.

$$NASC_i = \frac{\omega_i \langle \sigma_i \rangle NASC}{\sum_{k=1}^{n} \omega_k \langle \sigma_k \rangle} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

결 과

eDNA 분석 및 주요 어종 선정

2022년 현행조업유지수역에서 eDNA 분석을 통해 나타난 주요 검출종은 4월에 멸치(*Engraulis japonicus*, 64.9%), 망치고등어(*Scomber australasicus*, 6.3%), 날개다랑어(*Thunnus alalunga*, 6.2%) 및 쥐노래미(*Hexagrammos otakii*, 5.7%)로 나타났으며, 7월에는 멸치(68.6%), 매퉁이(*Saurida macrolepis*, 15.5%), 날개다랑어(11.9%)로 나타났다. 8월에는 참다랑어(*Thunnus orientalis*, 63.3%), 멸치(18.5%), 날치류(*Cypselurus oligolepis*, 5.5%)가 주요 검출종으로 나타났으며, 11월에는 날개다랑어(84.0%)가 주요 우점종으로 나타났다(Fig. 4). 2022년 한·중 잠정조치수역에서 eDNA 분석을 통해 나타난 주요 검출종은 5월에 참다랑어(24.5%), 멸치(24.1%)로 나타났으며, 11월에는 날개다랑어(89.6%)가 주요 검출종으로 나타났다(Fig. 5).

2023년 현행조업유지수역에서 eDNA 분석을 통해 주요 검출종을 파악한 결과, 4월에는 참다랑어(70.5%)가 가장 우점하였고, 등가시치류(*Lycodes ygreknotatus*, 20.1%), 멸치(9.2%), 참조기(*Larimichthys polyactis*, 0.2%)의 순으로 나타났다. 6월에는 등가시치류(45.5%)와 멸치(44.5%)가 주요 검출종으로 나타났으며, 8월에는 정어리(*Sardinops melanostictus*, 26.5%), 참조기(20.2%), 고등어(*Scomber japonicus*, 15.8%)가 주요 검출종으로 나타났다. 11월에는 멸치(53.9%)와 등가시치류

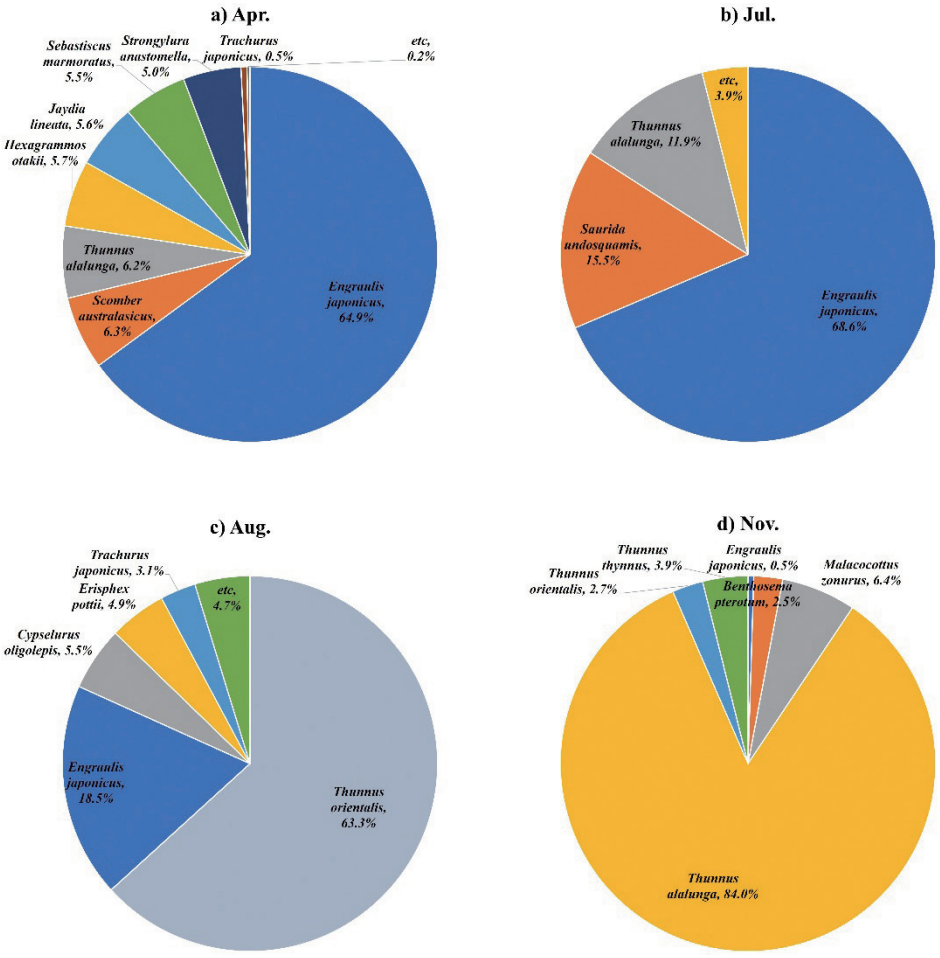


Fig. 4. Species composition identified through environmental DNA analysis in the Current Fishing Maintenance Area in 2022; a) Apr., b) Jul., c) Aug., d) Nov.

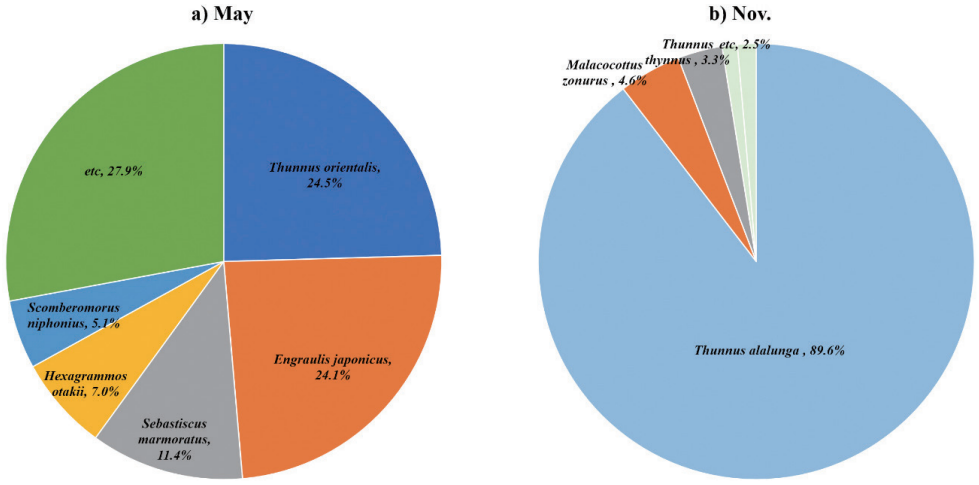


Fig. 5. Species composition identified through environmental DNA analysis in the Korea–China Provisional Measures Zone in 2022; a) May, b) Nov.

(25.3%)가 주요 검출종으로 나타났다(Fig. 6). 2023년 한·중 잠정조치수역에서 eDNA 분석을 통해 나타난 주요 검출종은 5월에 멸치(51.6%), 등가시치류(44.2%)로 나타났으며, 11월에는 멸치(49.9%), 황아귀(*Lophius litulon*, 21.2%)로 나타났다(Fig. 7). eDNA 분석 결과와 종별 음향학적 적용 가능성을 종합하여 조사시기별 현존량 산정 대상종을 선정하였다.

어류의 시 · 공간적 분포

2022년 현행조업유지수역의 조사시기별 평균 NASC 값은 4월 6.62 m²/nmi², 7월 34.17 m²/nmi², 8월 41.12 m²/nmi² 및 11월 70.10 m²/nmi²로 나타났다. 4월에는 정선 2와 4에서 상대적으로 높은 음향산란이 나타났으나, 그 외 정선에서는 전반적으로 낮은 분포를 나타내었다. 7월에 평균 NASC 값이 34.17 m²/nmi²로 나타났으며, 정선 5를 제외한 대부분의 정선에서 비교적 고른 음향산란 분포가 나타났다. 8월에는 평균 NASC 값이 41.12 m²/nmi²로 나타났으며, 특히 정선 1과 2에서 상대적으로 높은 음향산란이 확인되었다. 11월에는 평균 NASC가 70.10 m²/nmi²로 조사기간 중 가장 높았으며, 특히 정선 3에서 높은 음향산란이 집중적으로 나타났다. 전체적으로 2022년의 평균 NASC는 4월 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 11월의 평균 NASC는 4월에 비해 약 10.6배 높은 것으로 나타났다(Fig. 8).

2023년 현행조업유지수역의 조사시기별 평균 NASC 값은 4월 23.8 m²/nmi², 6월 14.9 m²/nmi², 8월 118.5 m²/nmi² 및 11월 324.7 m²/nmi²로 나타났다. 4월에는 정선 1과 5에서 상대적으로 높은 음향산란이 나타난 반면, 나머지 정선에서는 비교적 낮은 값을 보여 정선별 차이가 확인되었다. 6월에는 대부분의 정선에서 낮은 음향산란이 나타났으며, 평균 NASC는 14.9 m²/nmi²로 조사기간 중 가장 낮았다. 8월에 평균 NASC 값이 118.5 m²/nmi²로 나타났으며, 특히 정선 2와 3을 중심으로 높은 음향산란이 나타났다. 11월에 평균 NASC 값이 324.7 m²/nmi²로 조사기간 중 가장 높았으며, 정선 3에서 특히 높은 음향산란이 확인되었다. 전체적으로 2023년에는 6월까지 비교적 낮은 평균 NASC가 나타났으나, 8월 이후 급격하게 증가하는 경향을 보였으며, 11월의 평균 NASC는 6월에 비해 약 21.8배 높은 것으로 나타났다(Fig. 9).

한·중 잠정조치수역에서 2022년 조사시기별 평균 NASC 값은 5월 37.71 m²/nmi², 11월 20.05 m²/nmi²로 나타났다. 5월에는 조사해역 내 일부 정점에서 상대적으로 높은 음향산란이 집중적으로 나타났다. 11월에도 일부 정점에서 높은 음향산란이 나타났으며, 조사해역 전체의 평균 NASC는 20.05 m²/nmi²로 5월보다 낮게 나타났다(Fig. 10). 2023년 한·중 잠정조치수역의 조사시기별 평균 NASC 값은 5월 11.8 m²/nmi², 11월 27.4 m²/nmi²로 나타났다. 5월에는 일부 정선에서 상대적으로 높은 음향산란이 나타났다. 11월에는 5월과 비교하여 조사해역 내 음향산란량이 전반적으로 증가하는 양상이 나타났다(Fig. 11).

연도별 변화 양상을 비교하면, 2022년에는 평균 NASC 값이 5월 37.71 m²/nmi²에서 11월 20.05 m²/nmi²로 감소한 반면, 2023년에는 5월 11.8 m²/nmi²에서 11월 27.4 m²/nmi²로 증가하여 조사시기에 따른 변화 방향이 서로 다르게 나타났다. 이러한 결과는 한·중 잠정조치수역의 음향산란 분포가 조사시기뿐만 아니라 연도에 따라서도 차이를 보이며, 특히 5월과 11월 사이의 계절적 변화 양상이 연도별로 상반되게 나타났음을 보여준다.

동일한 조사월을 기준으로 연도 간 평균 NASC를 비교하면, 현행조업유지수역의 2023년 값은 2022년보다 모두 높았다(Table 2). 2023년/2022년의 비율은 4월 3.59, 8월 2.88, 11월 4.63으로 나타났으며, 특히 11월의 연도 차이가 가장 컸다.

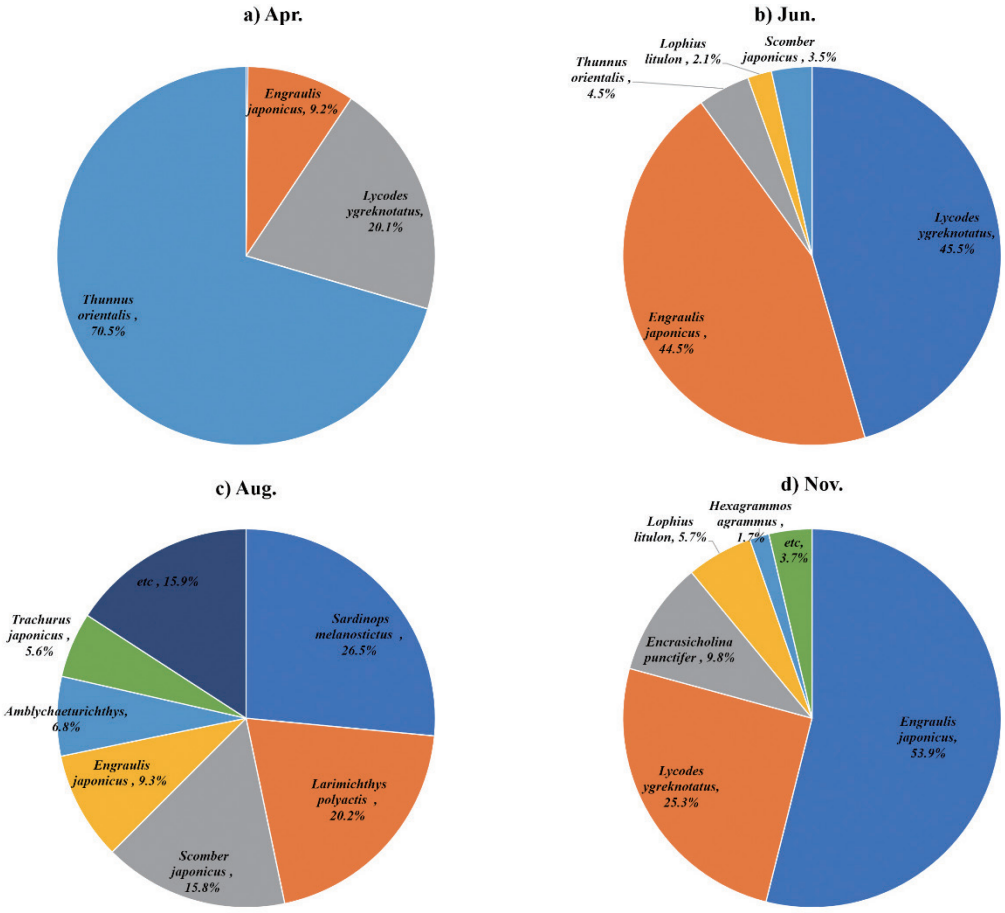


Fig. 6. Species composition identified through environmental DNA analysis in the Current Fishing Maintenance Area in 2023; a) Apr., b) Jun., c) Aug., d) Nov.

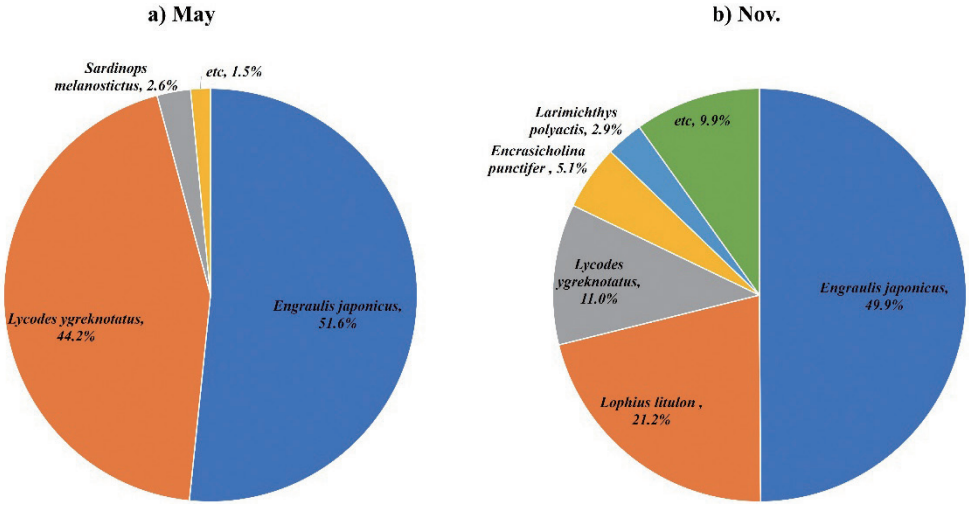


Fig. 7. Species composition identified through environmental DNA analysis in the Korea–China Provisional Measures Zone in 2023; a) May, b) Nov.

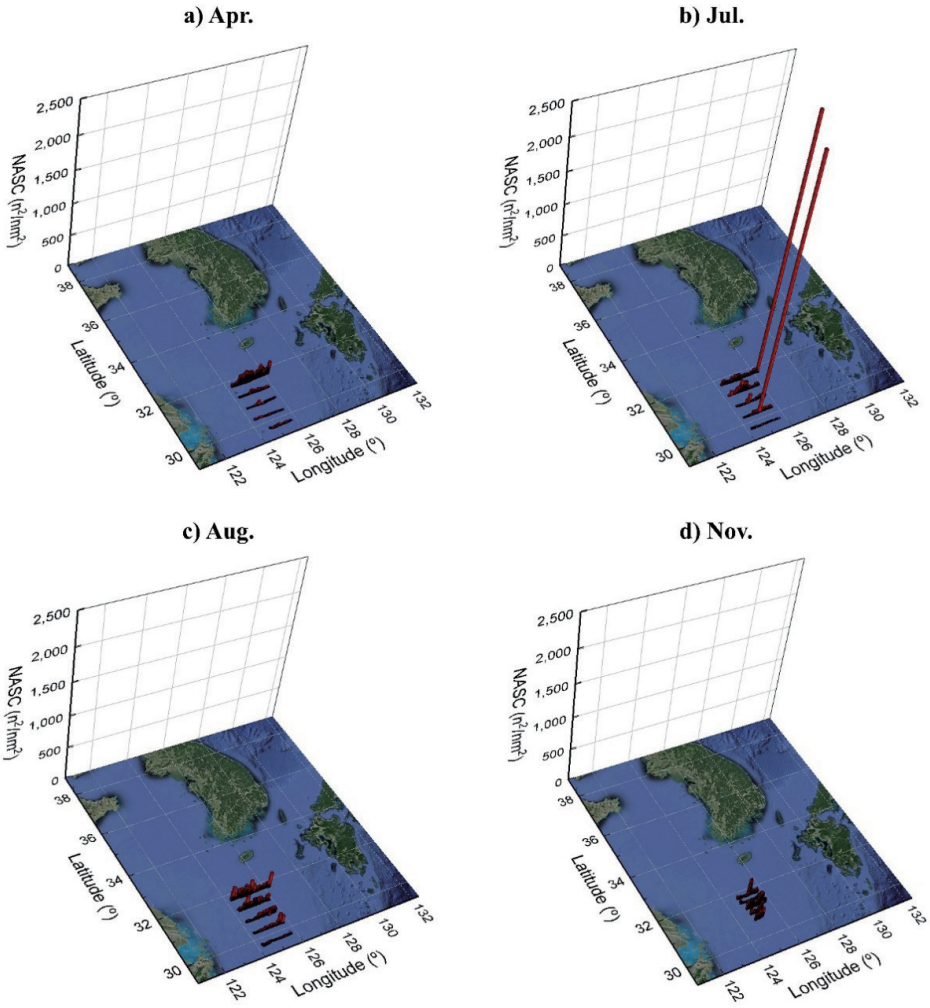


Fig. 8. Spatial distributions of the nautical area scattering coefficient of fish in the Current Fishing Maintenance Area in 2022; a) Apr., b) Jul., c) Aug., d) Nov.

반면, 한·중 잠정조치수역에서 2023년/2022년의 비율은 5월 0.31, 11월 1.37로 나타나 조사월에 따라 변화 방향이 달랐다. 현행조업유지수역의 2022년 7월 평균 NASC (34.17 m²/nmi²)와 2023년 6월 평균 NASC (14.9 m²/nmi²)는 조사월이 서로 달라 직접적인 연도 간 비율 비교에서는 제외하였다. NASC는 조사 수층에서 관측된 총 음향산란량을 나타내며 개체수뿐 아니라 어종, 체장 및 종별 음향산란 특성의 영향을 함께 받으므로 (MacLennan et al., 2002), 연도 간 차이는 특정 어종의 절대 자원량 변화보다는 상대적인 음향산란량과 공간적 집적의 변화로 해석하였다.

주요 어종별 생체량 밀도 및 현존량

eDNA 분석으로부터 검출된 주요 어종에 대한 생물학적 정보와 TS를 활용하여 월별 주요 어류의 밀도와 현존량을 산정하였다. 시기별 주요 검출종에 대한 생물학적 정보는 트롤조사를 통해 채집된 자료를 참고하였으며, 다랑어에 대한 정보는 Boyra et al. (2019) 자료와 기존에 가진 채집자료를 활용하였다(Table 3, Table 4). 또한, 선행연구를 통해 나타난 어류의 TS를 인용하여 어군의 밀도를 추정하였다. 멸치는 Kang et al. (2015)의 결과인 -65.8 dB, 고등어는 Park et al. (2022)의 결과인 -66.0 dB, 날개다랑어와 참다랑어는 Boyra et al. (2019)의 결과인 -64.0 dB, 쥐노래미는 Hwang et al. (1990)의 결과인 -69.8 dB, 정어리는 Yoon et al. (2021)의 결과인 -70.1 dB, TS의 선행연구 결과가 없는 어종은 일반적으로 경골어류에 적용하는 TS 값인 -72.0 dB을 적용하였다(Lee and Shin, 2005).

2022년 현행조업유지수역에서 주요 어종의 합산 현존량은 4월 1,813.0 ton, 7월 592.0 ton, 8월 592.0 ton, 11월 657.0 ton으로 나타났다(Table 5). 4월에는 쥐노래미가 978.0 ton으로 가장 높았으며, 7월과 8월에는 날개다랑어가 각각 479.0 ton, 11

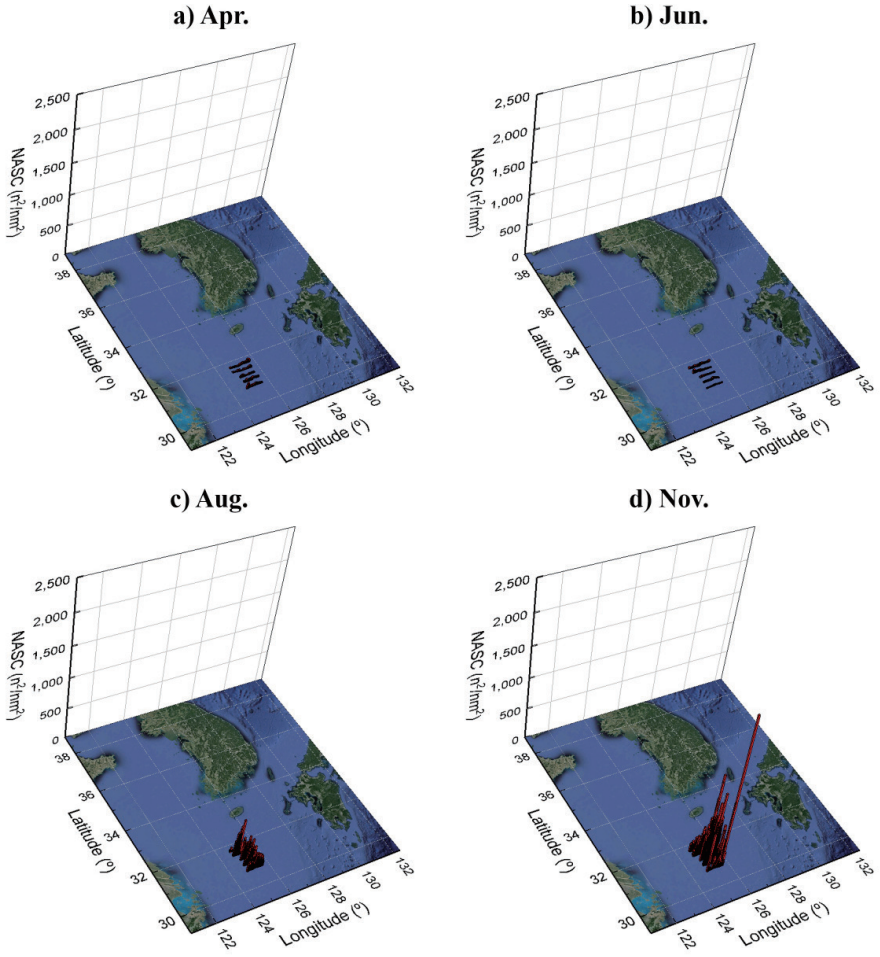


Fig. 9. Spatial distributions of the nautical area scattering coefficient of fish in the Current Fishing Maintenance Area in 2023; a) Apr., b) Jun., c) Aug., d) Nov.

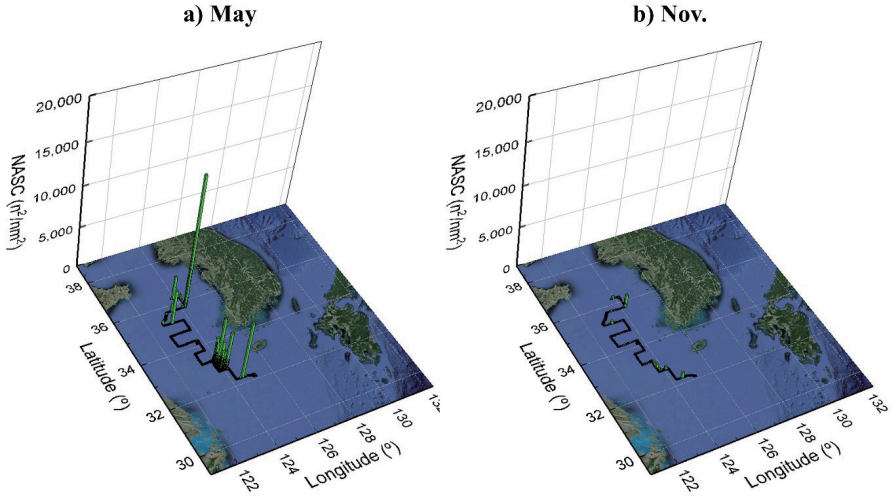


Fig. 10. Spatial distributions of the nautical area scattering coefficient of fish in the Korea–China Provisional Measures Zone in 2022; a) May, b) Nov.

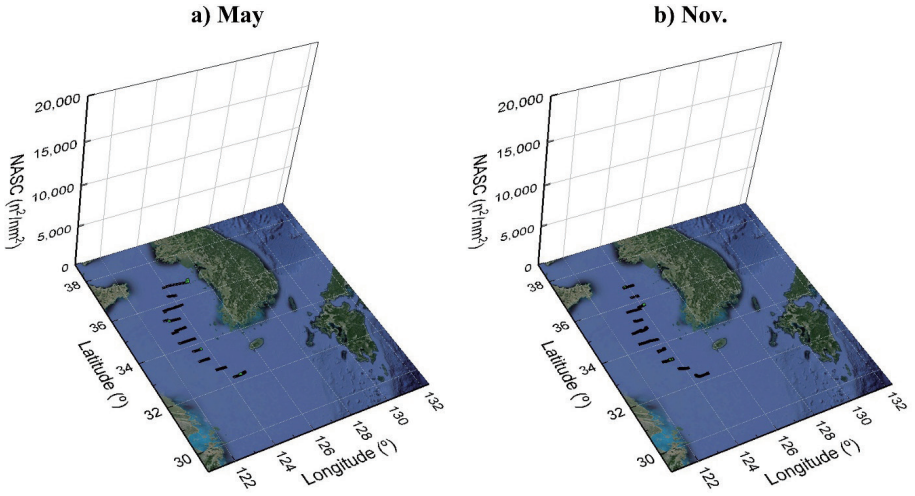


Fig. 11. Spatial distributions of the nautical area scattering coefficient of fish in the Korea–China Provisional Measures Zone in 2023; a) May, b) Nov.

월에는 참다랑어와 날개다랑어가 각각 295.0 ton으로 나타났다. 한·중 잠정조치수역에서는 5월 주요 어종의 합산 현존량이 2,263.0 ton으로 쥐노래미가 1,410.0 ton으로 가장 높았고, 11월에는 참다랑어와 날개다랑어가 각각 654.0 ton으로 나타나 주요 어종의 합산 현존량은 1,349.0 ton이었다.

2023년 현행조업유지수역의 주요 어종 합산 현존량은 4월 5,011.2 ton, 6월 223.4 ton, 8월 239.5 ton, 11월 2,808.9 ton으로 나타났다(Table 6). 4월에는 참다랑어가 5,008.5 ton으로 대부분을 차지하였고, 6월에는 정어리 215.8 ton, 8월에는 정어리 122.9 ton, 11월에는 참조기 2,491.6 ton이 가장 높은 값을 나타냈다. 한·중 잠정조치수역의 주요 어종 합산 현존량은 5월 171.9 ton, 11월 1,676.7 ton으로 나타났으며, 5월에는 보구치(*Pennahia argentata*)가 169.5 ton, 11월에는 참조기가 1,566.1 ton으로 가장 높았다.

고 찰

eDNA와 음향자료를 이용한 현존량 산정

본 연구에서 eDNA는 조사해역의 어류 종조성을 파악하고 조사시기별 주요·우점어종을 선정하는 생물학적 정보로 활용하였다. 종별 NASC에 각 어종의 TS 관계식과 체장-체중 자료로 산출한 변환계수를 적용하였으므로, 동일한 평균 NASC라도 조사시기별 주요 어종의 구성, 평균 체장과 체중, 산란단면적 및 partitioning 비율에 따라 최종 현존량은 크게 달라질 수 있다. 특히 특정 어종이 전체 추정치의 대부분을 차지하는 경우 적용된 TS 관계식과 partitioning 비율의 영향이 크므로, 절대적인 자원량으로 단정하기보다는 적용된 음향학적·생물학적 조건을 함께 고려해 해석해야 한다.

2022년에는 현행조업유지수역 4월과 한·중 잠정조치수역 5월에서 쥐노래미가 상대적으로 높은 현존량을 나타낸 반면, 2023년에는 현행조업유지수역 4월의 참다랑어와 11월의 참조기, 한·중 잠정조치수역 11월의 참조기가 현존량 추정치를 주도하였다.

연도 간 NASC 비교에서는 현행조업유지수역의 2023년 4월, 8월 및 11월 값이 2022년보다 높았고, 한·중 잠정조치수역에서는 5월에 감소하고 11월에 증가하였다. 주요 어종의 현존량도 일부 조사시기에서는 NASC 변화와 같은 방향을 보였으나, 그 변화폭은 일치하지 않았다. 이는 음향자료가 넓은 조사정선을

Table 2. Mean NASC by survey period and area in 2022 and 2023

Area	Survey period	2022 (m²/nmi²)	2023 (m²/nmi²)	Ratio (2023/2022)
Current Fishing Maintenance Area	Apr.	6.62	23.8	3.59
	Aug.	41.12	118.5	2.88
	Nov.	70.10	324.7	4.63
Korea–China Provisional Measures Zone	May	37.71	11.8	0.31
	Nov.	20.05	27.4	1.37

NASC, Nautical area scattering coefficient.

따라 연속적인 분포와 산란량을 제공하는 반면 eDNA는 조사 정점에서 종조성 정보를 제공하며, 현존량 산정 과정에는 종별 변환계수가 추가로 적용되기 때문이다. 따라서 두 자료를 결합하면 단일 조사방법만으로는 설명하기 어려운 어류의 공간적 분포와 주요 어종의 자원량 변화를 상호보완적으로 해석할 수 있다(Tibone et al., 2024; Claver et al., 2026).

Table 3. Length–weight relationships and target strength of the major fish species detected in 2022

Survey area	Month	Species	Length–weight relationship	Target strength (TS)	References
Current Fishing Maintenance Area	Apr.	*Scomber japonicus*	$W=0.0050L^{3.3541}$	$TS=20\log_{10}(TL)-66.0$	Park et al., 2022
		Thunnus alalunga	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Engraulis japonicus	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Hexagrammos otakii	$W=0.0129L^{3.0500}$	$TS=20\log_{10}(TL)-69.8$	Hwang et al., 1990
	Jul.	*Thunnus alalunga*	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Engraulis japonicus	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
	Aug.	*Thunnus alalunga*	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Engraulis japonicus	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
	Nov.	*Thunnus orientalis*	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Thunnus alalunga	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Engraulis japonicus	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
Korea–China Provisional Measures Zone	May	*Engraulis japonicus*	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Hexagrammos otakii	$W=0.0129L^{3.0500}$	$TS=20\log_{10}(TL)-69.8$	Hwang et al., 1990
		Thunnus orientalis	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
	Nov.	*Thunnus orientalis*	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Thunnus alalunga	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Engraulis japonicus	$W=0.0104L^{3.0200}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015

W, Weight (g); L, Length (cm); TL, Total length (cm).

Table 4. Length–weight relationships and target strength of the major fish species detected in 2023

Survey area	Month	Species	Length–weight relationship	Target strength (TS)	References
Current Fishing Maintenance Area	Apr.	*Thunnus orientalis*	$W=0.0569L^{2.7514}$	$TS=20\log_{10}(TL)-64.0$	Boyra et al., 2019
		Larimichthys polyactis	$W=0.0035L^{3.3121}$	$TS=20\log_{10}(TL)-72.0$	Lee and Shin, 2005
		Engraulis japonicus	$W=0.0033L^{3.3407}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
	Jun.	*Engraulis japonicus*	$W=0.0033L^{3.3407}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Sardinops melanostictus	$W=0.0151L^{2.7088}$	$TS=20\log_{10}(TL)-70.1$	Yoon et al., 2021
	Aug.	*Scomber japonicus*	$W=0.0050L^{3.3541}$	$TS=20\log_{10}(TL)-66.0$	Park et al., 2022
		Larimichthys polyactis	$W=0.0035L^{3.3121}$	$TS=20\log_{10}(TL)-72.0$	Lee and Shin, 2005
		Sardinops melanostictus	$W=0.0151L^{2.7088}$	$TS=20\log_{10}(TL)-70.1$	Yoon et al., 2021
	Nov.	*Engraulis japonicus*	$W=0.0033L^{3.3407}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Trachurus japonicus	$W=0.0074L^{3.1423}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.3$	Hwang et al., 2015
		Larimichthys polyactis	$W=0.0035L^{3.3121}$	$TS=20\log_{10}(TL)-72.0$	Lee and Shin, 2005
Korea–China Provisional Measures Zone	May	*Engraulis japonicus*	$W=0.0033L^{3.3407}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Pennahia argentata	$W=0.0035L^{3.1212}$	$TS=20\log_{10}(TL)-72.0$	Lee and Shin, 2005
		Sardinops melanostictus	$W=0.0151L^{2.7088}$	$TS=20\log_{10}(TL)-70.1$	Yoon et al., 2021
	Nov.	*Engraulis japonicus*	$W=0.0033L^{3.3407}$	$TS=20\log_{10}(TL)-65.8$	Kang et al., 2015
		Sardinops melanostictus	$W=0.0151L^{2.7088}$	$TS=20\log_{10}(TL)-70.1$	Yoon et al., 2021
		Larimichthys polyactis	$W=0.0035L^{3.3121}$	$TS=20\log_{10}(TL)-72.0$	Lee and Shin, 2005

W, Weight (g); L, Length (cm); TL, Total length (cm).

본 연구를 통해 현행조업유지수역과 한·중 잠정조치수역의 NASC와 eDNA 주요 검출종이 조사시기와 연도에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 수중음향은 넓은 해역에서 어류의 연속적인 분포와 음향산란량을 파악하는 데 유용하였고, eDNA는 음향자료만으로 확인하기 어려운 종 정보를 보완하였다. 다만, 본 연구에서 산정된 종별 현존량은 조사해역의 절대적인 자원량을 의미하기보다는 음향자료와 eDNA 기반 종조성 자료를 결합하여 주요 어종의 상대적인 분포와 현존 수준을 추정한 결

Table 5. Species-specific biomass density and standing stock of major taxa selected using environmental DNA information in 2022

Survey area	Month	Species	Density (g/m²)	Standing stock (ton)
Current Fishing Maintenance Area	Apr.	*Scomber japonicus*	0.04300	243.0
		Thunnus alalunga	0.08500	479.0
		Engraulis japonicus	0.02000	113.0
		Hexagrammos otakii	0.17300	978.0
	Jul.	*T. alalunga*	0.08500	479.0
		Engraulis japonicus	0.02000	113.0
	Aug.	*T. alalunga*	0.08500	479.0
		Engraulis japonicus	0.02000	113.0
	Nov.	*Thunnus orientalis*	0.05700	295.0
		Thunnus alalunga	0.05700	295.0
		Engraulis japonicus	0.01300	67.0
Korea–China Provisional Measures Zone	May	*Engraulis japonicus*	0.02000	163.0
		Hexagrammos otakii	0.17300	1,410.0
		Thunnus orientalis	0.08500	690.0
	Nov.	*Thunnus orientalis*	0.10100	654.0
		Thunnus alalunga	0.10100	654.0
		Engraulis japonicus	0.00600	41.0

Table 6. Species-specific biomass density and standing stock of major taxa selected using environmental DNA information in 2023

Survey area	Month	Species	Density (g/m²)	Standing stock (ton)
Current Fishing Maintenance Area	Apr.	*Thunnus orientalis*	0.88818	5,008.5
		Larimichthys polyactis	0.00057	2.3
		Engraulis japonicus	0.00006	0.3
	Jun.	*Engraulis japonicus*	0.00135	7.6
		Sardinops melanostictus	0.03827	215.8
	Aug.	*Scomber japonicus*	0.00636	35.9
		Larimichthys polyactis	0.01432	80.7
		Sardinops melanostictus	0.02179	122.9
	Nov.	*Engraulis japonicus*	0.03728	210.2
		Trachurus japonicus	0.01898	107.0
		Larimichthys polyactis	0.44185	2,491.6
Korea–China Provisional Measures Zone	May	*Engraulis japonicus*	0.00001	0.1
		Sardinops melanostictus	0.00027	2.2
		Pennahia argentata	0.02084	169.5
	Nov.	*Engraulis japonicus*	0.00423	34.4
		Sardinops melanostictus	0.00935	76.1
		Larimichthys polyactis	0.19255	1,566.1

과로 해석할 필요가 있다. 특히 종별 현존량은 주요 어종의 선정 기준과 NASC partitioning 비율에 따라 달라질 수 있으며, 각 어종에 적용되는 TS 관계식과 체장-체중 관계식 등의 파라미터 값이 중요하다. 따라서 본 연구에서 제시한 현존량은 이러한 가정과 변환과정을 기반으로 산정된 추정치로서 해석되어야 한다. 향후에는 음향조사와 동일한 시기 및 해역에서 수행된 트롤, 정치망 등의 어획자료를 활용하여 실제 종조성과 체장조성을 검증하고, 어종별 TS 관계식 및 체장-체중 관계식의 변동성을 반영한 민감도 및 불확실성 분석을 수행함으로써 종별 현존량 추정의 신뢰도를 높일 필요가 있다.

사 사

이 논문은 한국수산자원공단 수산자원본부 생명자원실의 재원 "2026년 민간어업협력사업 수산자원조사 및 경제적 가치 추정" 및 2026년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원(KIMST, RS-2025-02307389/RS-2025-03329912)의 지원으로 수행되었으며, 본 논문을 사려 깊게 검토하여 주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다.

References

Boyra G, Moreno G, Orue B, Sobradillo B and Sancristobal I. 2019. In situ target strength of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) associated with fish aggregating devices. ICES J Mar Sci 76, 2446-2458. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz131.

Claver C, Sobradillo B, Mendibil I, Canals O, Boyra G, Ibaibarriaga L, Kelly RP and Rodríguez-Ezpeleta N. 2026. Integrating eDNA and acoustic-trawl data to provide small pelagic biomass estimates for fish stock assessment. ICES J Mar Sci 83, fsag005. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsag005.

De Robertis A and Higginbottom I. 2007. A post-processing technique to estimate the signal-to-noise ratio and remove echosounder background noise. ICES J Mar Sci 64, 1282-1291. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm112.

Dornan T, Smith AJR, Bahlburg D, Cariou T, Christiansen S, Demer DA, Fernandes PG, Haase S, Hastie G, Hornsby RL, Isaksson N, Liszka CM, Sepp E, Suter L, Thorvaldsen KG, Westergerling T and Wieczorek A. 2026. Applications of active-acoustic and complementary technologies in marine ecosystem science. ICES J Mar Sci 83, fsag044. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsag044.

He X, Jeffery NW, Stanley RRE, Hamilton LC, Rubidge EM and Abbott CL. 2023. eDNA metabarcoding enriches traditional trawl survey data for monitoring biodiversity in the marine environment. ICES J Mar Sci 80, 1529-1538. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad083.

Hwang DJ, Sin HI and Lee DJ. 1990. Target strength for the *Mugil cephalus*, *Pleuronichthys cornutus* and *Hexagrammos otarii*. J Korean Soc Fish Ocean Technol 26, 34-44.

Hwang KS, Yoon EA, Lee KH, Lee HB and Hwang DJ. 2015. Multifrequency acoustic scattering characteristics of jack mackerel by KRM model. J Korean Soc Fish Ocean Technol 51, 424-431. https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.3.424.

Jin XS, Xu B and Tang QS. 2003. Fish assemblage structure in the East China Sea and southern Yellow Sea during autumn and spring. J Fish Biol 62, 1194-1205. https://doi.org/10.1046/j.1095-8649.2003.00116.x.

Kang M, Furusawa M and Miyashita K. 2002. Effective and accurate use of difference in mean volume backscattering strength to identify fish and plankton. ICES J Mar Sci 59, 794-804. https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1229.

Kang MH, Seo YI, Oh TY, Lee KH and Jang CS. 2015. Estimating the biomass of anchovy species off the coast of Tongyeong and Yeosu in South Korea in the spring and winter of 2013 and 2014. J Korean Soc Fish Ocean Technol 51, 86-93. https://doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.1.086.

Korneliussen RJ and Ona E. 2002. An operational system for processing and visualizing multi-frequency acoustic data. ICES J Mar Sci 59, 293-313. https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1168.

Lee DJ and Shin HI. 2005. Construction of a data bank for acoustic target strength with fish species, length and acoustic frequency for measuring fish size distribution. J Korean Fish Soc 38, 265-275. https://doi.org/10.5657/KFAS.2005.38.4.265.

MacLennan DN, Fernandes PG and Dalen J. 2002. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics. ICES J Mar Sci 59, 365-369. https://doi.org/10.1006/jmsc.2001.1158.

Martin M. 2011. Cutadapt removes adapter sequences from high-throughput sequencing reads. EMBnet.journal 17, 10-12. https://doi.org/10.14806/ej.17.1.200.

Miya M, Sato Y, Fukunaga T, Sado T, Poulsen JY, Sato K, Minamoto T, Yamamoto S, Yamanaka H, Araki H, Kondoh M and Iwasaki W. 2015. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. R Soc Open Sci 2, 150088. https://doi.org/10.1098/rsos.150088.

Park GC, Oh WS, Oh SY and Lee KH. 2022. Acoustic scattering characteristics of chub mackerel (*Scomber japonicus*) by KRM model. J Korean Soc Fish Ocean Technol 58, 32-38. https://doi.org/10.3796/KSFOT.2022.58.1.032.

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

Simmonds EJ and MacLennan DN. 2005. Fisheries Acoustics: Theory and Practice. 2nd ed. Blackwell Science, Oxford, U.K., 1-437.

Thomsen PF, Møller PR, Sigsgaard EE, Knudsen SW, Jørgensen OA and Willerslev E. 2016. Environmental DNA

from seawater samples correlate with trawl catches of subarctic, deepwater fishes. PLoS One 11, e0165252. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165252.

Tibone M, Cariou T, O'Donnell C, Stefanni S, Aguzzi J, O'Neill B, Reid D and Mirimin L. 2024. Towards the integration of environmental DNA analysis to profile the upper mesopelagic fish layer in the Northeast Atlantic Ocean. ICES J Mar Sci 81, 2065-2078. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae152.

Yoon EA, Oh WS, Lee HB, Hwang KS, Kim DN and Lee KH. 2021. Comparison of target strength of Pacific herring (*Clupea pallasii* Valenciennes, 1847) from ex-situ measurements and a theoretical model. Water 13, 3009. https://doi.org/10.3390/w13213009.