

2024년 한반도 주변 해역 어란 및 자치어 공간 분포의 계절적 양상

변서연 · 김상일 · 주희태 · 최희찬 · 오광석¹ · 심정희 · 윤석현*

국립수산과학원 기후변화연구과, ¹해온부유생태연구소

Seasonal Patterns in Spatial Distribution of Fish Eggs and Larvae around Korean Waters in 2024

Seo Yeon Byeon, Sangil Kim, Hui-Tae Joo, Hee Chan Choi, Kwang-Seok O¹, Jeong-Hee Shim and Seok-Hyun Yoon*

Ocean Climate and Ecology Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

¹Hae On Plankton Ecology Research Institute, Busan 48106, Republic of Korea

This study investigated seasonal spatial patterns of fish eggs and larvae around Korean waters at 65 stations in 2024. Fish larvae were identified morphologically, whereas unidentified eggs were analyzed using DNA barcoding and metabarcoding. Assemblages were classified by hierarchical clustering of Hellinger-transformed species composition, and hydrography was evaluated using temperature and salinity. In summer and autumn, *Maurolicus japonicus* eggs strongly dominated the East Sea, where salinity remained high. In the Yellow Sea, *Engraulis japonicus* eggs and larvae dominated in summer, indicating spawning and larval occurrence. Multiple assemblages and high diversity occurred in waters south of the Korean Peninsula and the northern East China Sea. Coastal, shelf, Kuroshio-derived, and Changjiang Diluted Water also occurred there. *Trichiurus japonicus* eggs were concentrated in the eastern East China Sea in spring and became widely distributed across waters south of the Korean Peninsula and the northern East China Sea in summer. Winter assemblages were characterized by widespread flatfish eggs and dominant *Ammodytes japonicus* larvae in the Yellow Sea. These patterns suggest that hydrography and species-specific spawning may contribute to assemblage differentiation. Molecular identification improved species-level resolution and revealed otherwise unresolved spawning patterns, providing a baseline for assessing future changes around the Korean Peninsula.

Keywords: Ichthyoplankton, Korean waters, Fish eggs, Fish larvae, DNA barcoding

서 론

어류의 초기생활사 단계인 어란 및 자치어는 해양 환경 변화에 민감하게 반응하며, 수산자원 변동과 해양생태계 변화를 이해하는 데 중요한 지표로 활용된다(Houde, 2008). 특히 이 시기의 생존과 가입량은 자원량 변동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Houde, 2008; Hare, 2014). 이러한 초기생활사 단계의 공간 분포는 해류, 수온, 염분 등 해양환경 변화뿐만 아니라 먹이 환경과 포식 압력 등 다양한 요인의 영향을 받는다(Checkley et al., 2009; Brodeur et al., 2019). 따라서 어란 및 자치어의 시·공간적 분포를 이해하는 것은 수산자원 변동과 해양

생태계 구조를 이해하는 데 필수적이며, 이들의 출현 시기와 공간 분포, 종 조성 변화를 파악하는 것은 향후 수산자원 변동을 조기에 진단하고 산란장 및 초기 성육장의 변화를 평가하는 데 중요한 기초자료가 된다.

북서태평양 연해(marginal sea)에 위치한 한국, 일본, 중국 해역은 공통적으로 쿠로시오해류(Kuroshio Current)의 영향을 받고 있으며, 다양한 해류의 복합적인 상호작용에 의해 다양한 어류의 산란 및 성육장이 형성되는 중요한 해양생태계로 알려져 있다(Saito, 2019). 특히 한반도 주변 해역은 온대와 아열대 수괴가 교차하는 지역으로, 계절적 환경 변동성이 크고 다양한 해양생물이 분포하는 특성을 나타낸다(Rebstock and Kang,

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2240 Fax: +82. 51. 720. 2239

E-mail address: younsh@korea.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.2026.0325>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 325-348, August 2026

Received 29 May 2026; Revised 8 July 2026; Accepted 14 August 2026

저자 직위: 변서연(박사후연구원), 김상일(해양수산연구사), 주희태(해양수산연구사), 최희찬(해양수산연구사), 오광석(연구소장), 심정희(해양수산연구관), 윤석현(해양수산연구관)

2003). 최근 북서태평양에서는 지구온난화와 같은 기후변화에 따른 해양환경 변화가 지속적으로 보고되고 있으며(Han et al., 2023), 이는 어류의 산란 시기, 초기생활사 시기 생존 및 분포 변동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Pankhurst and Munday, 2011).

한반도 주변 해역은 동해와 황해, 동중국해 북부해역이 이어져 있는 복합적인 해양환경으로, 다양한 수괴와 해류의 상호작용에 의해 뚜렷한 환경 구배를 형성한다(Lee et al., 2019). 동해안은 대한해협을 통해 유입되는 대마난류(Tsushima Warm Current)와 동한난류(East Korea Warm Current), 북한한류(North Korean Cold Current)의 영향을 받고, 황해와 접해있는 서해안은 황해저층냉수(Yellow Sea Cold Water)와 황해혼합수(Yellow Sea Mixed Water)의 영향을 받으며 천해성 환경과 계절적 혼합이 강한 특성을 보인다(Lie and Cho, 2016). 남해안과 동중국해 북부 해역은 양쯔강 희석수(Changjiang Diluted Water)와 쿠로시오해류의 영향을 동시에 받으며, 계절에 따라 수온 및 염분 구조가 크게 변동한다(Ichikawa and Beardsley, 2002). 따라서 한반도 주변 해역에서 나타나는 계절적 환경 변화와 해역별 수괴 특성은 어류 초기생활사 단계의 공간 분포와 종 조성에 중요한 영향을 미친다. 이러한 해역별 환경 구배는 어종별 산란 적지, 난·자치어의 수송 경로, 초기 생존 가능성을 결정하는 주요 요인으로 작용할 수 있으므로, 한반도 주변 해역에서 어란 및 자치어 분포를 계절별로 파악하는 것은 수산자원 관리에 있어 중요하다.

기존의 국내 어류 초기생활사 연구는 대부분 형태학적 동정을 기반으로 자치어의 출현 양상과 군집 특성이 주로 보고되어 왔다(Kim et al., 2005; Moon et al., 2022). 또한 다수의 연구가 특정 해역이나 특정 계절에 국한되어 수행되었기 때문에, 한반도 주변 전체 해역을 동일한 조사 체계 안에서 비교하는 데에는 한계가 있었다(Han et al., 2017; Baek et al., 2021). 특히 어란은 형태적 동정이 어려워 멸치(*Engraulis japonicus*)와 앨통이(*Maurollicus japonicus*)와 같은 일부 형태적 구분이 가능한 종을 제외한 어란을 미동정으로 처리하여 정확한 종조성과 분포 특성을 해석하는 데 한계가 있었다(Kim et al., 2005). 이러한 형태학적 동정의 한계를 보완하기 위해 최근에는 DNA barcoding 및 metabarcoding과 같은 분자유전학적 기법이 어류 초기생활사 연구에 적용되고 있다. 대서양 연구에서도 개별 어란의 cytochrome c oxidase subunit I (COI) DNA barcoding을 통해 형태적으로 동정하기 어려운 어란을 종 수준으로 식별하고, 이를 장기 난자치어 모니터링에 활용할 수 있음을 제시하였다(Lewis et al., 2016). DNA barcoding은 개별 어란 또는 자치어의 염기서열을 분석함으로써 형태적 형질이 충분히 발달하지 않은 초기생활사 단계의 종 동정 정확도를 높일 수 있지만, 각 개체를 구분하여 분석해야 하므로 대량 시료를 처리할 때 시간과 비용이 증가하며, 정확한 종 동정을 위해서는 대상 종의 신뢰할 수 있는 reference sequence가 확보되어 있어야 한다(Lewis

et al., 2016; Duke and Burton, 2020). DNA metabarcoding은 혼합시료에서 다수의 분류군을 동시에 검출할 수 있어 대량의 어란 시료를 효율적으로 분석할 수 있다. 그러나 primer-template mismatch, DNA 추출 및 중합효소연쇄반응(polymerase chain reaction, PCR) 증폭 효율의 중간 차이, 난의 발생 단계에 따른 mitochondrial DNA 양의 차이 및 reference database의 불완전성에 의해 검출 결과가 영향을 받을 수 있다(Elbrecht and Leese, 2015; Piñol et al., 2019). 이러한 분석 방법은 한계점이 존재하지만, 형태적 형질 동정이 어려운 어란을 식별하기 위해서는 분자유전학적 분석이 필요하다.

이 연구는 국립수산물과학원의 정선조사 해역인 동해, 서해, 남해 및 동중국해 북부 해역을 포함하여 한반도 주변 해역에서 계절별로 조사된 어란 및 자치어의 연간 공간 분포 특성을 분석하였다. 미동정 어란은 분자유전학적 기법을 적용하고, 자치어의 형태학적 종 동정 결과와 통합하여 한반도 주변 해역 어란 및 자치어의 종조성과 계절별·해역별 공간분포 특성을 비교하였다. 이 연구 결과는 한반도 주변 해역에서 어류 초기생활사 단계의 계절적 공간 분포 양상을 통합적으로 이해하고, 향후 수산자원 변동과 해양환경 변화에 따른 어란 및 자치어의 분포 변화를 평가하기 위한 기초자료가 될 것이다.

재료 및 방법

환경자료 분석

각 조사 정점의 수온과 염분은 conductivity-temperature-depth (CTD) 장비(SBE 911plus; Sea-Bird Electronics Inc., Bellevue, WA, USA)를 이용하여 표준 수심별로 관측하였다(Fig. 1, Table S1). 수온과 염분 자료는 정점별 수직분포 자료로 정리하였으며, 계절별·해역별 수온 및 염분 특성을 분석하였다. 어란 및 자치어 시료는 경사 예인으로 채집되었으므로, 생물자료와 환경자료의 수층 대응성을 고려하기 위해 각 정점에서 표층부터 최대 예인수심까지의 CTD 관측값의 정점별 수층 평균 수온 및 염분을 산출하였다. 수온과 염분의 계절별·해역별 차이는 평균 수온 및 염분 값을 이용하여 boxplot으로 시각화하였다. 통계적 차이는 Kruskal-Wallis 검정으로 확인하였고, 유의한 차이가 나타난 경우 Dunn 사후검정을 수행하였다. 정점별 모든 조사 수심의 수온 및 염분은 temperature-salinity (T-S) diagram으로 나타내어 계절별·해역별 수괴 특성을 검토하였다. T-S diagram에는 관측값의 밀도 구조를 파악하기 위해 sigma-t 등밀도선을 함께 표시하였으며, 주요 수괴의 참고 범위는 기존 연구에서 제시된 수온·염분 특성을 바탕으로 설정하였다(Gong et al., 1996; Kim et al., 2008; Rho et al., 2022). 환경자료의 모든 분석은 R version 4.6.0을 이용하여 수행하였다.

시료 채집 및 어란·자치어 분류

어란 및 자치어 채집은 한반도 주변 해역의 국립수산물과학원

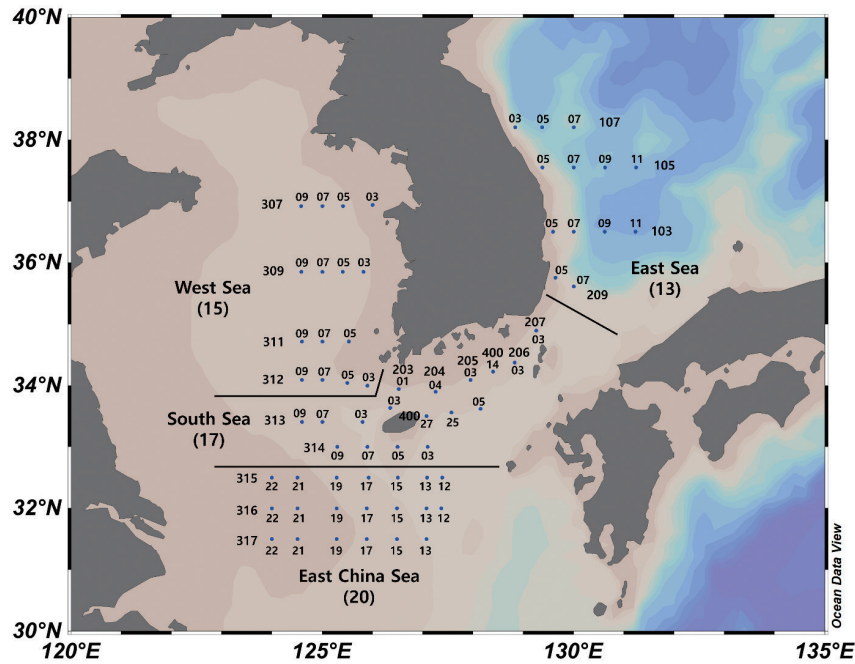


Fig. 1. Map of sampling stations around Korean waters in 2024. Blue dots indicate sampling stations, and adjacent numbers represent line and station numbers. The sea area was divided by solid lines, and the numbers in parentheses represent the total number of sampling points in each sea area.

정선 조사 정점 중 동해 13개, 남해 17개, 서해 15개, 동중국해 20개의 총 65개 정점(Fig. 1, Table S1)에서 2024년에 계절별로 4회(겨울: 1–2월, 봄: 4–5월, 여름: 8월, 가을: 10–11월) 조사를 수행하였다. 어란 자치어가 출현하지 않은 정점은 출현개체수를 0으로 처리하였고, 봄철 서해 해역은 현장 조사 장비 문제로 인해 시료를 채집하지 못해 결측치로 처리하였다. 따라서 봄철 자료는 서해 해역 15개 조사 정점을 제외한 총 조사 정점 50개로 데이터를 분석하였다. 채집을 위해 붕고 네트(직경 0.8 m; 망목 330 μ m)를 이용하였고 해저면으로부터 약 10 m 상층에서 2 knots의 속도로 약 10분간 경사 예인하였다. 출현밀도는 채집 시 네트 입구에 유량계(Mechanical Flowmeter; General Oceanics Inc., Miami, FL, USA)를 부착하여 측정된 여수량을 기준으로 ind./1,000 m^3 으로 환산하였다. 네트로 채집한 시료는 99% 에탄올로 고정한 후 실험실로 운반하고 해부현미경(SMZ18; Nikon Corp., Tokyo, Japan)을 이용하여 어란과 자치어를 분리하였다. 각 정점에서 채집된 어란의 총 개체수는 해부현미경에서 직접 계수하였으며, 네트에 부착된 유량계로 산정한 여과량을 이용하여 정점별 총 어란 밀도를 계산하였다. 분리된 자치어는 Okiyama (1988) 및 우리나라 난·자치어 도감(National Institute of Fisheries Science, 2020)에 따라 형태학적 동정을 수행하였다. 분리된 어란 중 형태 형질이 뚜렷한 타원형의 유구가 없는 멀치 어란, 구형의 단일 유구인 엘통이 어란은 현미경으로 중 수준의 동정을 통해 분류하였다. 나머지 어

란은 미동정 어란으로 구분하여 계수한 후 분자생물학적 중 동정을 수행하였다.

미동정 어란 DNA 추출

형태적으로 중 수준 동정이 어려운 미동정 어란은 정점별 출현개체수와 분석 효율을 고려하여 개별 DNA barcoding 또는 혼합 DNA metabarcoding 분석 대상으로 구분한 후 genomic DNA (gDNA) 추출을 수행하였다. DNA barcoding 분석 개체는 각 1개체의 어란을 1.5 mL microtube에 분리하였고, DNA metabarcoding 분석 시료는 동일 계절 내 동일 정점의 어란을 하나의 microtube에 혼합하였다. 어란이 담긴 microtube에 lysis buffer 200–600 μ L를 첨가하여 균질기(homogenizer)와 펠슬(pestle)을 이용해 분쇄하였다. gDNA 추출은 AccuPrep® Genomic DNA Extraction Kit (Bioneer Corp., Daejeon, Korea)를 이용해 매뉴얼에 따라 추출하였으며 60–100 μ L elution 하였다. 추출된 gDNA 농도는 spectrophotometer (NanoDrop 1000; Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, MA, USA)를 이용하여 측정하였고, 분석 전까지 -20°C 에 보관하였다.

개별 어란의 DNA barcoding 및 Sanger sequencing

개별 어란의 PCR 증폭은 COI 유전자 영역의 FishF1 (5'-TCAACCAACCACAAAGACATTGGCAC-3')과 FishR2 (5'-ACTTCAGGGTGACCGAAGAATCAGAA-3')를 이용하였다(Ward et al., 2005). PCR 반응액은 $10 \times$ Dream

Taq Green buffer (Thermo Fisher Scientific Inc.) 1.5 μ L, 2.5 mM dNTPs (Bio Basic Inc., Markham, Canada) 1.5 μ L, 10 pmol forward/reverse primers 0.5 μ L, Taq DNA polymerase (Thermo Fisher Scientific Inc.) 0.1 μ L, template genomic DNA 1 μ L 및 멸균된 증류수 9.9 μ L를 혼합하여 총 15 μ L의 부피로 thermal cycler (2720; Applied Biosystems, Foster City, CA, USA)를 이용하여 수행하였다. PCR은 95°C에서 2분간 초기 변성(denaturation) 반응 후, 94°C에서 30초 변성, 54°C에서 30초 결합(annealing), 72°C에서 1분 신장(extension) 반응을 35 cycles 수행하였으며, 이후 72°C에서 10분간 최종 신장 반응을 수행하였다. PCR 산물은 2% agarose gel에서 증폭 여부를 확인하였으며, 확인된 PCR 산물 8 μ L에 Exonuclease I (New England Biolabs Inc., Ipswich, MA, USA) 0.4 μ L와 shrimp alkaline phosphatase (New England Biolabs Inc.) 1.6 μ L를 혼합하여 37°C에서 15분, 85°C에서 15분 동안 정제(purification) 과정을 수행하였다. 염기서열 분석은 automated DNA sequencer (ABI PRISM 3730xl; Applied Biosystems)로 분석을 수행하였다.

Sanger sequencing으로 획득한 forward 및 reverse 염기서열은 저품질 영역을 제거한 후 양방향 read를 정렬하여 consensus sequence를 작성하였다. 작성된 consensus sequence는 NCBI GenBank database의 BLAST를 이용하여 등록된 유전정보들과 비교하였으며, query coverage, sequence identity 및 E-value를 기준으로 중 동정을 수행하였다.

혼합 어란의 DNA metabarcoding 분석

혼합 어란의 COI 유전자 metabarcoding 분석을 위해 2단계 PCR을 수행하였다. 1차 PCR에서는 COI 영역을 증폭하기 위해 mlCOIintF와 jgHCO2198의 5' 말단에 Illumina overhang adapter sequence가 부가된 primer를 이용하였다(Table 1).

1차 PCR은 10×Dream Taq Green buffer (Thermo Fisher Scientific Inc.) 1.5 μ L, 2.5 mM dNTPs (Bio Basic Inc.) 1.5 μ L, 10 pmol forward/reverse primers 0.5 μ L, Taq DNA polymerase (Thermo Fisher Scientific Inc.) 0.2 μ L, template genomic DNA 2 μ L 및 멸균된 증류수 13.8 μ L를 혼합하여 총 20 μ L의 부피로 조성하였고, 초기 변성을 95°C에서 5분 수행한 후, 변성 95°C 10초, 결합 62°C에서 시작하여 매 cycle마다 1°C씩 감소하며 30초, 신장 72°C 1분의 touchdown 조건으로 16 cycles 수행하였다. 이후 변성 95°C 10초, 결합 46°C 30초, 신장

72°C 60초 조건으로 25 cycles을 추가 수행하였으며, 최종 신장은 72°C에서 5분간 수행하였다. 1차 PCR 산물은 AccuPrep® PCR/Gel Purification Kit (Bioneer Corp.)의 매뉴얼에 따라 정제하였다. 정제된 1차 PCR 산물은 index sequence 부착을 위해 2차 PCR의 template로 사용하였다. 2차 PCR은 2×HiSense™ Taq Master mix (CellSafe Co., Ltd., Yongin, Korea) 25 μ L, 10 pmol forward/reverse primers 1 μ L, template 5.5 μ L 및 멸균된 증류수 17.5 μ L를 혼합하여 총 50 μ L의 부피로 조성하였고, 95°C에서 3분간 초기 변성 반응 후, 95°C에서 30초 변성, 55°C에서 30초 결합, 72°C에서 30초 신장(extension) 반응을 8 cycles 수행하였으며, 이후 72°C에서 5분간 최종 신장 반응을 수행하였다. 2차 PCR 산물은 1차 PCR 산물과 동일한 방법으로 정제한 후 NanoDrop을 이용해 농도를 측정하였고, 동일한 농도로 혼합하여 Illumina MiSeq platform (Illumina Inc., San Diego, CA, USA) 분석을 의뢰하였다.

총 41개 pooled metabarcoding 시료에서 총 19,241,350개의 paired-end raw reads가 생산되었고, Cutadapt v3.2를 이용하여 adapter 및 primer sequence를 제거하였다. Forward read와 reverse read는 각각 250 bp와 230 bp로 trimming하였다(Table S3). 이후 DADA2 v1.18.0을 이용하여 quality filtering, error correction, denoising 및 paired-end read merging을 수행하고, amplicon sequence variant (ASV)를 생성하였다. Expected error가 2 이상인 read는 분석에서 제외하였으며, 오류 보정 후 paired-end reads는 중첩 영역을 기준으로 병합하였다. Chimera sequence는 DADA2의 removeBimeraDenovo 함수를 이용하여 consensus method로 제거하였고, 100 bp 미만의 ASV는 R version 4.0.3에서 제거하였다. 시료 간 군집 비교를 위해 QIIME v1.9.0을 이용하여 normalization을 수행하였으며, 전체 시료 중 read 수가 가장 낮은 시료를 기준으로 subsampling하였다. 최종적으로 생성된 ASV는 downstream analysis에 이용하였다. 각 ASV의 분류군 동정은 NCBI NT database를 reference database로 사용하여 BLAST+ v2.9.0 (Camacho et al., 2009)으로 수행하였다. 분류군 검토를 위해 query coverage와 sequence identity 각각 85% 이상인 BLAST 결과를 선별하여 낮은 유사도의 hit을 제거하였다(Ransome et al., 2017). 최종 분류군은 sequence identity가 98% 이상이고 상위 BLAST hit이 동일한 종으로 확인된 경우에 중 수준으로 할당하였다. Sequence identity가 85% 이상 98% 미만이거나, 상위 hit 간 중 수준의 구분이 불명확한 경우에는 속 또는 과 수준으로 보수

Table 1. Illumina adapters and primers used in the metabarcoding analysis

Name	Sequence (5'-3')	Reference
Adapters	Forward overhang	TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAG
	Reverse overhang	GTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAG
Primers	mlCOIintF	GGWACWGGWTGAACWGTWTAYCCYCC
	jgHCO2198	TAIACYTCIGGRTGICCRARAAYCA

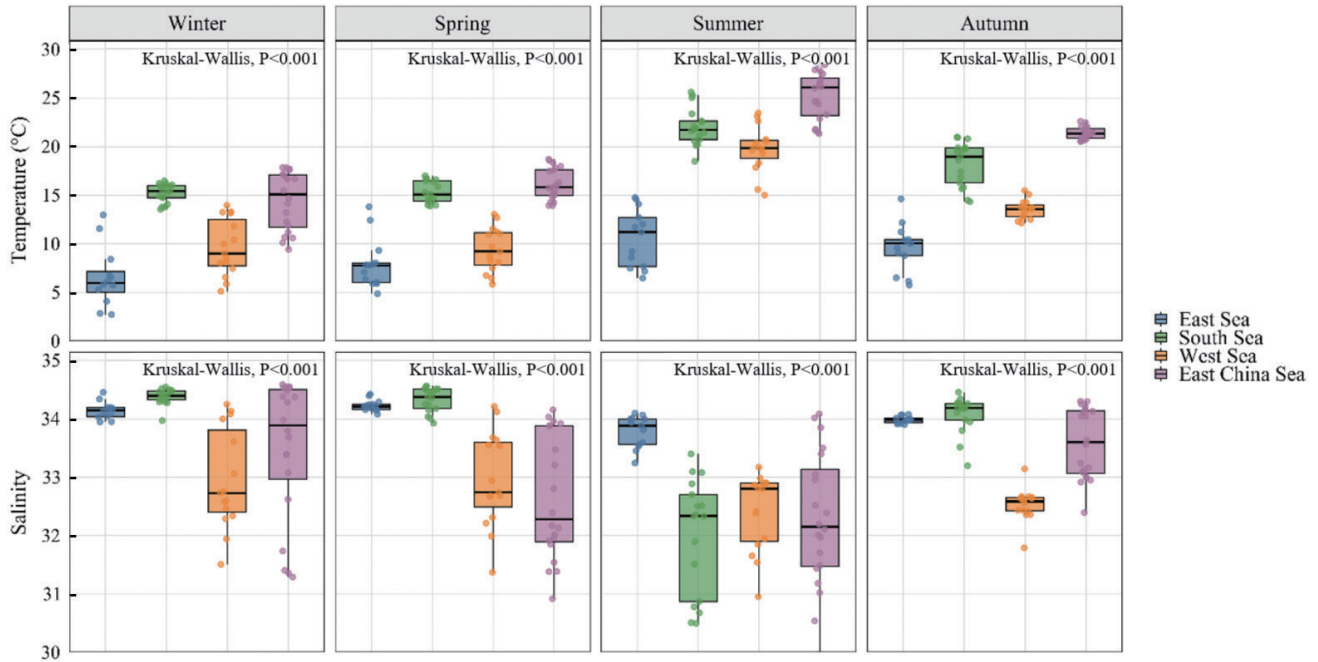


Fig. 2. Seasonal variation in station-averaged temperature and salinity by sea area around Korean waters in 2024. Boxes indicate the inter-quartile range, horizontal lines represent the median, and points represent individual station values.

적으로 판정하였다. 혼합 시료의 최종 정점별 밀도 산출은 계수된 총 개체수에 각 ASV의 상대 read 비율에 따라 추정치를 산출하였으며, 여수량을 계산해 분류군별 총 밀도를 산출하였다.

어란·자치어의 군집구조 및 공간분포 특성 분석

어란 및 자치어 군집의 공간적 분포 특성을 분석하기 위해 계층적 집괴분석(hierarchical cluster analysis)을 수행하였다. 특정 종의 대량 출현이나 정점별 총 개체수 차이 등 생물군집 자료의 이질적 영향을 완화하기 위해 Hellinger 변환 후 Euclidean distance에 기반하여 Ward의 최소분산법(Ward.D2)을 사용하였다(Legendre and Gallagher, 2001; Murtagh and Legendre, 2014). 모든 계절에 동일한 변환 및 거리 측정 방법을 적용하여 계절 간 분석의 일관성을 확보하였다. 그룹 수는 dendrogram의 분기 양상과 그룹별 정점 수, 평균 silhouette width 및 종조성의 생태학적 해석 가능성을 종합하여 결정하였으며, 최종적으로 어란은 겨울 3개, 봄 4개, 여름 4개, 가을 4개 그룹으로 구분되었고, 자치어는 겨울과 여름 4개, 봄과 가을 5개 그룹으로 구분되었다. 계층적 집괴분석 결과는 principal coordinates analysis(PCoA)를 통해 시각화하여 좌표공간에서 공간적 구분을 확인하였으며, 각 정점의 그룹은 지도에 표시하여 결과를 제시하였다. 미동정 자료는 생태학적 해석이 어려울 뿐만 아니라, 군집 간 차이에 과도한 영향을 줄 수 있어 분석에서 제외하였다.

각 계절과 그룹의 특성을 파악하기 위해 그룹 내 중별 상대밀도(%)와 출현빈도(%)를 산출하였다. 종 i 의 상대밀도는 해당

그룹에서 집계된 전체 어란과 자치어 밀도에 대한 종 i 의 밀도 비율로 계산하였으며, 출현빈도는 종 i 가 출현한 정점 수를 해당 그룹의 전체 정점 수로 나누어 산출하였다. 그룹 내 상대밀도가 가장 높은 종을 우점종으로 정의하고, 다음으로 상대밀도가 높은 주요 종을 수반종으로 제시하였다. 자료 분석은 R version 4.6.0 환경에서 vegan, stats, cluster 패키지를 사용하였다.

결 과

한반도 주변 해역의 계절별 평균 수온 및 염분

2024년 한반도 주변 해역의 정점별 평균 수온과 염분은 계절별로 해역 간 유의한 차이를 보였다(Kruskal-Wallis test, $P < 0.001$) (Fig. 2). 평균 수온은 모든 해역에서 여름에 가장 높고 겨울에 가장 낮았으며, 가을에는 여름보다 낮고 겨울보다 높게 나타났다(Dunn's test, $P < 0.05$). 여름에는 전 해역에서 수온이 상승하였으나, 염분은 동해를 제외한 서해, 남해 및 동중국해에서 낮아지는 양상이 나타났다. 이러한 계절별·해역별 수온·염분 차이는 T-S diagram에서도 확인되었다(Fig. 3). 겨울과 봄에는 동해와 서해가 상대적으로 저온 영역에 분포한 반면, 남해와 동중국해는 비교적 고온·고염 영역으로 확장되어 해역 간 수괴 특성이 구분되었다. 여름에는 한반도 주변 전 해역에서 고수온 분포가 확인되었으며, 수층별 수온 차이에 의해 해역별 수층 평균 수온은 유의한 차이가 나타났다(Dunn's test, $P < 0.05$). 서해, 남해 및 동중국해에서 뚜렷한 염분 저하가 관찰되었으며, 서

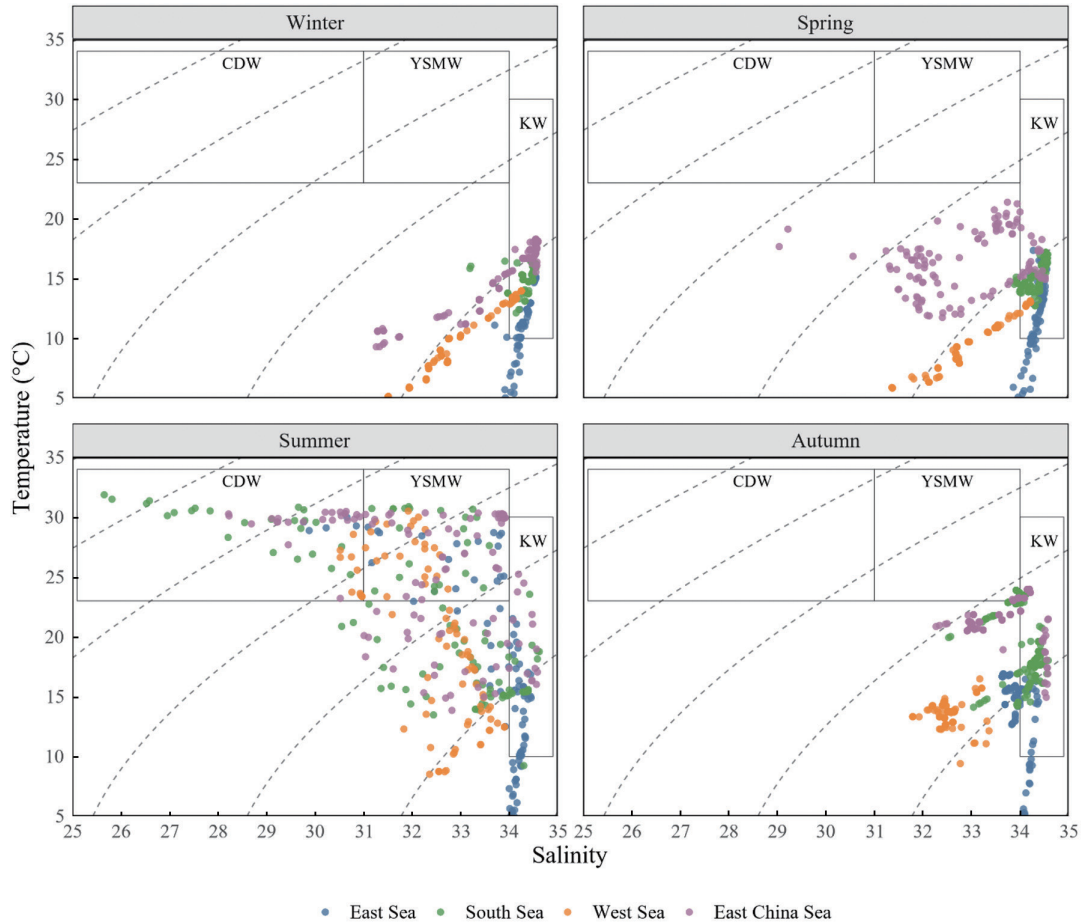


Fig. 3. Seasonal temperature-salinity (T-S) diagram of depth-specific water properties around Korean waters in 2024. Each point represents an observed T-S value at a given depth, with colors indicating each sea area. Dashed lines represent sigma-t contours. Solid rectangles indicate reference ranges of major water masses affecting Korean waters, including Changjiang Diluted Water (CDW), Yellow Sea Mixed Water (YSMW), and Kuroshio Water (KW), based on previously reported hydrographic characteristics (Gong et al., 1996; Kim et al., 2008; Rho et al., 2022).

해역 간 평균 염분은 유의한 차이를 보이지 않았다(Dunn's test, $P>0.05$). 반면 동해의 염분은 계절적 변동 폭이 상대적으로 낮게 나타났고, 여름에도 상대적으로 높은 염분을 유지하며 다른 해역과 구분되었다. 가을에는 여름보다 수온이 낮아지고 염분이 회복되는 경향을 보였으나, 서해는 상대적으로 낮은 염분이 지속되었다. 따라서 2024년 한반도 주변 해역은 계절적 수온 변화와 함께 여름철 저염수의 확장, 남해와 동중국해의 고온·고염수괴 영향, 동해의 상대적 고염 특성이 복합적으로 나타났다.

어란 · 자치어의 출현 양상

어란은 총 71개 분류군이 확인되었으며, 겨울 22분류군, 평균 밀도 18.69 ind./1,000 m³, 봄 27분류군, 33.69 ind./1,000 m³, 여름 30분류군, 248.47 ind./1,000 m³, 가을에 16분류군, 114.75 ind./1,000 m³가 출현하였다. 어란의 출현은 겨울에는 제주도를 중심으로 남해 및 동중국해와 동해 및 서해 남부해역 일부에 집

중되었다. 봄철은 조사 장비 문제로 결측 처리된 서해를 제외하면, 남해와 동중국해에서만 어란이 출현하였다. 여름과 가을에는 우리나라 주변 해역 전체에서 어란이 출현하였다(Fig. 4a).

자치어는 총 135개 분류군이 채집되었으며, 겨울 50분류군, 29.71 ind./1,000 m³, 봄 48분류군, 67.67 ind./1,000 m³, 여름 48분류군, 118.74 ind./1,000 m³, 가을에 63분류군, 39.10 ind./1,000 m³가 출현하였다. 자치어는 어란에 비해 계절에 관계없이 전 해역에 걸쳐 출현하였으며, 주로 서해와 남해, 동중국해에 밀도가 높은 경향을 보였다. 동해는 상대적으로 다른 해역에 비해 밀도가 낮았으며, 특히 겨울에는 출현 정점이 제한적이었다(Fig. 4b).

어란 공간분포의 계절 변동

어란의 겨울 군집은 25개 정점이 3개의 그룹으로 구분되었다(Table 2, Fig. 5a, Fig. S1). 그룹 1은 전 해역을 포함하는 16개

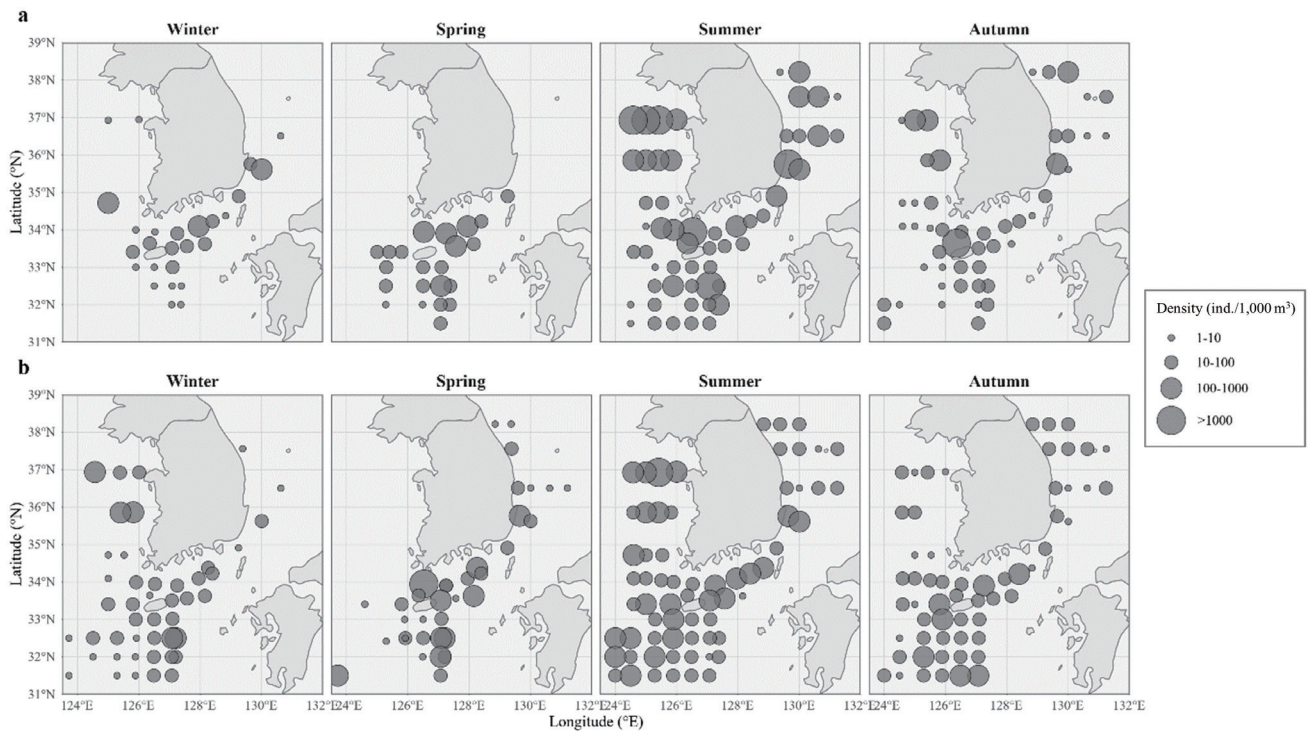


Fig. 4. Spatial distribution of fish eggs (a) and fish larvae (b) by season. Circle size represents density (ind./1,000 m³).

정점으로 가장 넓게 분포하였다. 그룹 1은 찰가자미(*Microstomus achne*)가 가장 우점하며, 대부분 가자미류가 수반종으로 출현하여 다양한 저서성 어류가 혼합되어 출현하는 특징을 보였다. 그룹 2는 제주도 주변과 남해를 중심으로 구성되었으며, 농어(*Lateolabrax japonicus*) 중심(우점률 87.0%)의 군집이 형성되었다. 그룹 3은 남해 2정점과 동중국해 1정점으로 구성되었고, 눈퉁멸(*Etrumeus teres*)이 모든 정점에서 출현하였으며, 난류성 또는 대륙붕 가장자리에 서식하는 노랑벤자리(*Callanthias japonicus*), 붉은벤자리(*Caprodon schlegelii*) 등이 수반종으로 출현하였다.

봄에는 21개 정점이 4개의 그룹으로 구분되었다(Table 2, Fig. 5a). 그룹 1은 남해와 동중국해에 걸쳐 분포하였으며, 용서대(*Cynoglossus abbreviatus*)와 만새기(*Coryphaena hippurus*), 고등어(*Scomber japonicus*), 방어(*Seriola quinqueradiata*) 등이 6.6–34.0%의 우점률로 산발적으로 출현하며 특정 종이 모든 정점을 대표하지 않는 혼합군집 특성을 보였다. 그룹 2는 남해, 그룹 3은 제주 서부 해역에 분포하며 가자미류 중심의 군집으로 구분되었다. 그룹 2에서는 모든 정점에서 출현한 용가자미(*Cleisthenes pinetorum*)로 대표되었으며, 그룹 3은 물가자미(*Eopsetta grigorjewi*)가 대부분의 정점에 출현하면서 우점률 70.9%를 나타내었다. 그룹 4는 동중국해 동부해역을 중심으로 형성되었고, 뚜렷한 갈치(*Trichiurus japonicus*) 우점 군집으로 분석되었다.

여름에는 55개 정점이 4개 그룹으로 구분되었다(Table 2, Fig. 5a). 그룹 1은 동해에서 엘통이(*M. japonicus*)가 우점하는 독립적인 동해 군집이 형성되었다. 그룹 2는 서해 8정점과 남해 1정점으로 구성되었으며, 멸치(*E. japonicus*)의 우점률이 91.9%에 달하는 그룹으로 구분되었다. 그룹 3과 4는 동중국해와 남해에 걸쳐 분포하였다. 그룹 3은 갈치가 모든 정점에서 출현하고 우점률 75.1%를 차지하는 갈치 중심의 군집이었다. 그룹 4는 갈치의 우점률(26.0%)이 가장 높았으나, 그룹 3에 비해 우점률과 출현빈도(63.2%)가 낮았다. 그룹 4에서는 만새기, 푸령통구멍(*Xenoccephalus elongatus*), 몽치다래(*Auxis rochei*), 악어치(*Champsodon snyderi*) 등이 비교적 높은 비율로 수반되어, 갈치가 주요 구성종이지만 난류성 또는 대륙붕 사면에 서식하는 어종이 함께 다양하게 출현하는 그룹으로 판단된다.

가을에는 44개 정점이 4개 그룹으로 구분되었다(Table 2, Fig. 5a). 그룹 1은 여름과 같이 엘통이가 우점하는 동해의 독립적인 군집이 나타났다. 그룹 2는 남해와 서해에 각각 2정점씩 분포하였으며, 도다리(*Pleuronichthys cornutus*)가 우점하며 갈치가 주요 수반종으로 출현하는 특성을 보였다. 그룹 3은 서해 남부에서 남해, 동중국해 북부에 걸친 가장 큰 그룹으로 갈치가 모든 정점에서 출현하는 군집으로 구분되었다. 그룹 4는 동중국해 4정점, 남해 2정점 및 서해 2정점으로 구성되었다. 그룹 4는 용가자미의 우점률이 73.3%로 가장 높았으나 서해 두 정점에서만 출현하였고, 동중국해 동부와 남해는 악어치와 노랑열동

가리(*Parapercis decemfasciata*), 동중국해 서부 해역은 물천구(*Harpadon nehereus*)가 출현하는 등 해역 및 정점별로 다양한 저서성 어류가 출현하는 군집으로 보인다.

자치어 공간분포의 계절 변동

자치어의 겨울 군집은 45개 정점이 4개의 그룹으로 구분되었으며, 서해를 제외한 모든 해역에서 망둑어과(*Gobiidae* sp.)의 자치어가 주요 수반종으로 출현하였다(Table 3, Fig. 5b, Fig. S2). 겨울철 그룹 1은 농어가 모든 정점에서 출현하면서 49.9%로 가장 높은 우점률을 보였으며, 망둑어과, 멸치, 쏨뱅이(*Sebastes marmoratus*) 등 연안성 자치어가 수반종으로 출현하였다. 그룹 2는 동중국해와 남해 서부 해역을 중심으로 가장 넓게 분포하였다. 쉬쉬망둑(*Chaeturichthys stigmatias*)의 우점률이 가장 높았으나 18.9%에 그쳤으며, 다른 수반종들이 여러 정점에서 산발적으로 출현하면서 특정 종이 절대적으로 우점하지 않는 특징을 보였다. 그룹 3은 동중국해 동부 해역을 중심으로

로 구성되었으며, 등점삿비늘치(*Notoscopelus japonicus*)와 멸치, 달강어(*Lepidotrigla microptera*)가 주요 구성종으로 나타났다. 그룹 4는 서해 6정점으로만 구성되었으며, 모든 정점에서 까나리(*Ammodytes japonicus*)만 출현한 독립적인 군집으로 구분되었다.

봄에는 35개 정점이 5개의 그룹으로 구분되었다(Table 3, Fig. 5b). 그룹 1은 동해 5정점을 중심으로 남해와 동중국해에 산발적으로 분포한 8개 정점으로 구성되었으며, 멸치가 모든 정점에서 출현하면서 80.0%의 높은 우점률을 나타내었다. 그룹 2는 남해와 제주 서부 해역을 중심으로 분포하였고, 물가자미와 볼볼락(*Sebastes thompsoni*), 쏨뱅이가 비슷한 비율로 출현하여 저서성 및 연안성 어류가 혼합된 군집 특성을 보였다. 그룹 3은 동해 3정점에서 엘통이만 출현한 독립적인 군집이었다. 그룹 4는 제주 동부해역을 중심으로 형성되었고, 노랑벤자리가 모든 정점에서 출현하면서 우점률 73.2%로 조사되었다. 그룹 5는 동

Table 2. Dominant and associated species, relative density, and frequency of occurrence within seasonal fish egg assemblage groups identified by hierarchical cluster analysis

Season	Group	Dominant species	Dominance (%)	Frequency (%)	Subdominant and associated species (%)
Winter	1	<i>Microstomus achne</i>	51.3	12.5	<i>Tanakius kitaharae</i> (18.9), <i>Cleisthenes pinetorum</i> (9.9), <i>Glyptocephalus stelleri</i> (5.1), <i>Dexistes rikuzenius</i> (2.4)
	2	<i>Lateolabrax japonicus</i>	87.0	100.0	<i>Hoplichthys langsdorfii</i> (8.9), <i>Cleisthenes pinetorum</i> (1.4), <i>Eopsetta grigorjewi</i> (1.4), <i>Microstomus achne</i> (1.4)
	3	<i>Etrumeus teres</i>	56.5	100.0	<i>Callanthis japonicus</i> (21.2), <i>Caprodon schlegelii</i> (9.4), <i>Pagrus major</i> (8.2), <i>Glossanodon semifasciatus</i> (4.7)
Spring	1	<i>Cynoglossus abbreviatus</i>	34.0	16.7	<i>Coryphaena hippurus</i> (25.8), <i>Scomber japonicus</i> (11.7), <i>Seriola quinqueradiata</i> (6.6), <i>Scomber colias</i> (4.5)
	2	<i>Cleisthenes pinetorum</i>	75.9	100.0	<i>Engraulis japonicus</i> (12.6), <i>Tanakius kitaharae</i> (8.5), <i>Eopsetta grigorjewi</i> (1.4), <i>Trichiurus japonicus</i> (0.8)
	3	<i>Eopsetta grigorjewi</i>	70.9	75.0	<i>Pleuronectes</i> sp. (15.4), <i>Tanakius kitaharae</i> (13.7)
	4	<i>Trichiurus japonicus</i>	88.0	100.0	<i>Lepidotrigla guentheri</i> (2.8), <i>Coryphaena hippurus</i> (2.2), <i>Champsodon snyderi</i> (1.5), <i>Fistularia petimba</i> (1.5)
Summer	1	<i>Maurolicus japonicus</i>	90.7	100.0	<i>Engraulis japonicus</i> (8.4), <i>Coryphaena hippurus</i> (1.0)
	2	<i>Engraulis japonicus</i>	91.9	100.0	<i>Euthynnus affinis</i> (6.9), <i>Trichiurus japonicus</i> (0.6), <i>Coryphaena hippurus</i> (0.1)
	3	<i>Trichiurus japonicus</i>	75.1	100.0	<i>Pennahia argentata</i> (5.0), <i>Auxis rochei</i> (4.7), <i>Saurida wanieso</i> (4.5), <i>Saurechelys taiwanensis</i> (4.4)
	4	<i>Trichiurus japonicus</i>	26.0	63.2	<i>Coryphaena hippurus</i> (13.3), <i>Xenoccephalus elongatus</i> (13.2), <i>Auxis rochei</i> (10.5), <i>Champsodon snyderi</i> (7.0)
Autumn	1	<i>Maurolicus japonicus</i>	96.6	100.0	<i>Champsodon snyderi</i> (2.1), <i>Trichiurus japonicus</i> (1.0), <i>Engraulis japonicus</i> (0.3)
	2	<i>Pleuronichthys cornutus</i>	65.3	100.0	<i>Trichiurus japonicus</i> (21.6), <i>Engraulis japonicus</i> (10.9), <i>Pseudorhombus cinnamomeus</i> (2.1)
	3	<i>Trichiurus japonicus</i>	49.4	100.0	<i>Xenoccephalus elongatus</i> (34.5), <i>Neobythites sivicola</i> (15.2), <i>Champsodon snyderi</i> (0.6), <i>Branchiostegus japonicus</i> (0.1)
	4	<i>Cleisthenes pinetorum</i>	73.3	25.0	<i>Champsodon snyderi</i> (8.5), <i>Harpadon nehereus</i> (8.1), <i>Engraulis japonicus</i> (4.6), <i>Parapercis decemfasciata</i> (2.4)

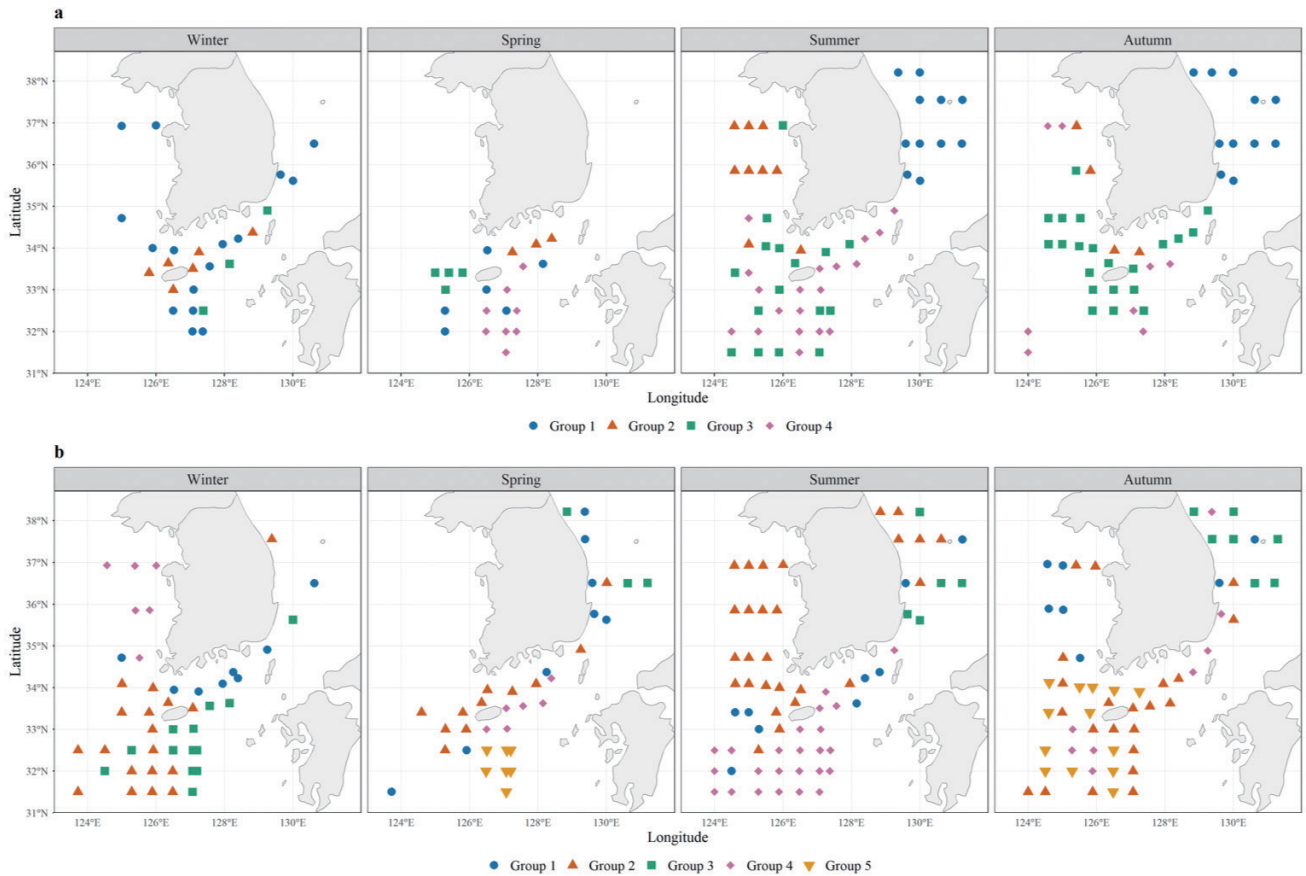


Fig. 5. Seasonal spatial distribution of fish egg (a) and larval fish (b) assemblage groups identified by hierarchical cluster analysis based on species abundance. Colors and symbols denote cluster groups within each developmental stage; group numbers are independent among seasons and between fish eggs and larvae.

중국해 동부해역으로 구성되었으며, 갈치가 모든 정점에서 출현하였으나 우점률은 19.6%로 낮았고, 방어와 고등어, 망둑어과 등이 고루 출현하는 군집으로 구분되었다.

여름에는 65개 정점이 4개의 그룹으로 구분되었다(Table 3, Fig. 5b). 그룹 1은 남해 6정점을 중심으로 동해 2정점과 동중국해 1정점을 포함하였으며, 난류성 회유어종인 뽕치다래(*A. rochei*)가 모든 정점에서 출현하면서 42.8%로 우점하였고 멸치가 33.2%로 수반되었다. 그룹 2는 서해 전 해역과 동해 및 남해에 정점을 포함하며 여름철 가장 넓은 분포를 나타내었다. 멸치가 모든 정점에서 출현하고 우점률 67.5%를 나타내는 광역적인 멸치 우점 군집이었다. 그룹 3은 동해 5정점으로만 구성되었으며, 봄과 같이 모든 정점에서 앨통이가 뚜렷하게 우점하는 군집을 형성하였다. 그룹 4는 동중국해 대부분 정점과 제주 동부 해역으로 구성되었다. 이 그룹은 망둑어과가 대부분의 정점에서 출현하며 우점하였으나, 우점률은 20.8%로 낮았으며, 보구치(*Pennahia argentata*)와 뽕치다래, 갯비늘치(*Benthosema pterotum*), 붉은메기(*Hoplobrotula armata*)와 같은 종들이 수

반되어 다양한 저층성 및 난류성 어류가 혼합된 군집 특성을 보였다.

가을에는 58개 정점이 5개의 그룹으로 구분되었다(Table 3, Fig. 5b). 그룹 1은 서해와 동해 일부 정점으로 구성되었으며, 멸치가 모든 정점에서 출현하고 80.4%로 우점하는 군집으로 구분되었다. 그룹 2는 남해와 동중국해에 폭넓게 분포하였다. 이 그룹은 망둑어과와 악어치, 갈치, 보구치, 갯비늘치 등이 함께 출현하여 특정 종의 우점성이 낮은 특징을 보였다. 그룹 3은 봄 및 여름과 유사하게 앨통이가 모든 정점에서 우점하였으며(우점률 61.1%), 멸치(우점률 23.1%)가 주요 수반종으로 출현하는 독립적인 동해 군집으로 나타났다. 그룹 4는 동중국해 일부와 대한해협, 동해 북부 정점으로 구성되었으며, 망둑어과가 모든 정점에서 우점하는 망둑어류 우점 군집이었다. 그룹 5는 그룹 2와 유사하게 남해와 동중국해에 폭넓게 분포하였다. 이 그룹은 갯비늘치가 모든 정점에서 출현하면서, 망둑어과와 그물메기(*Neobythites sivicola*), 갈치가 여러 정점에서 주요 수반종으로 출현하여 저서성, 외해성 어류 중심의 군집 특성을 보였다.

고 찰

이 연구에서 우리나라 주변해역의 어란과 자치어는 남해와 동중국해 북부 해역에서 밀도가 높고 다양한 분류군이 확인되었다(Table S2). 남해와 동중국해는 계절별로 몇몇 그룹이 동시에 혼합되어 공간분포를 형성하며 다양한 종들이 출현하였고, 서해와 동해는 계절에 따라 다른 해역과 뚜렷하게 구분되는 특징을 보였다(Fig. 5). 2024년 한반도 주변 해역의 계절별 수온·염분 분포는 해역 간 뚜렷한 차이를 보였으며, 어란 및 자치어의 출현밀도와 공간 분포가 이러한 물리환경 구배와 연관된 것

로 보인다. 상대적으로 높은 출현밀도와 다양한 분류군이 출현한 남해 및 제주 주변 해역과 동중국해 북부 해역은 쿠로시오 난류성 수괴를 기반으로 연안수와 양쯔강 유출수 등의 물덩어리가 만나는 전이지대이며, 대륙붕 저서 환경이 발달해 있다. 이와 같이 기원이 서로 다른 물덩어리의 혼합 해역에서는 수온·염분 전선, 층층, 먹이생물 분포 및 해류에 의한 수송 경로가 복합적으로 형성될 수 있으며, 이는 다양한 어종의 산란 및 초기 성육에 적합한 환경을 제공할 수 있다(Bakun, 2006). 특히 양쯔강 유출수는 주변 해수와 혼합되어 저염의 양쯔강 희석수를 형성하는데, 여름철 우세한 남풍과 조석 조건에 의해 제주 주변 해역

Table 3. Dominant and associated species, relative density, and frequency of occurrence within seasonal fish larvae assemblage groups identified by hierarchical cluster analysis

Season	Group	Dominant species	Dominance (%)	Frequency (%)	Subdominant and associated species (%)
Winter	1	<i>Lateolabrax japonicus</i>	49.9	100.0	Gobiidae sp. (23.7), <i>Engraulis japonicus</i> (8.9), <i>Sebastes marmoratus</i> (4.7), <i>Ammodytes japonicus</i> (2.1)
	2	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>	18.9	44.4	<i>Benthosema pterotum</i> (9.4), Gobiidae sp. (9.2), <i>Conger myriaster</i> (8.0), <i>Engraulis japonicus</i> (6.0)
	3	<i>Notoscopelus japonicus</i>	29.0	69.2	<i>Engraulis japonicus</i> (18.6), <i>Lepidotrigla microptera</i> (14.3), Gobiidae sp. (7.3), <i>Myctophum asperum</i> (4.7)
	4	<i>Ammodytes japonicus</i>	100.0	100.0	-
Spring	1	<i>Engraulis japonicus</i>	80.0	100.0	<i>Glossanodon semifasciatus</i> (2.6), <i>Pseudopleuronectes yokohamae</i> (2.3), <i>Suruga fundicola</i> (1.5), <i>Benthosema pterotum</i> (1.2)
	2	<i>Eopsetta grigorjewi</i>	30.3	63.6	<i>Sebastes thompsoni</i> (26.4), <i>Sebastes marmoratus</i> (25.8), <i>Engraulis japonicus</i> (7.3), <i>Tanakius kitaharae</i> (3.0)
	3	<i>Maurolicus japonicus</i>	100.0	100.0	-
	4	<i>Callanthias japonicus</i>	73.2	100.0	<i>Engraulis japonicus</i> (18.2), <i>Myctophum asperum</i> (1.4), <i>Trachurus japonicus</i> (1.2), Gobiidae sp. (0.9)
	5	<i>Trichiurus japonicus</i>	19.6	100.0	<i>Seriola quinqueradiata</i> (16.6), <i>Scomber japonicus</i> (10.3), Gobiidae sp. (8.6), <i>Sebastes marmoratus</i> (4.9)
Summer	1	<i>Auxis rochei</i>	42.8	100.0	<i>Engraulis japonicus</i> (33.2), <i>Erispex pottii</i> (4.9), <i>Opistognathidae</i> sp. (3.8), Gobiidae sp. (3.6)
	2	<i>Engraulis japonicus</i>	67.5	100.0	<i>Callionymus valenciennesi</i> (12.3), <i>Sciaenidae</i> sp. (4.4), <i>Cynoglossus joyneri</i> (3.6), <i>Sillago japonica</i> (3.4)
	3	<i>Maurolicus japonicus</i>	60.2	100.0	<i>Callionymus valenciennesi</i> (11.2), Gobiidae sp. (7.1), <i>Opistognathidae</i> sp. (4.7), <i>Engraulis japonicus</i> (2.6)
	4	Gobiidae sp.	20.8	70.8	<i>Pennahia argentata</i> (17.5), <i>Auxis rochei</i> (12.7), <i>Benthosema pterotum</i> (8.2), <i>Hoplobrotula armata</i> (7.1)
Autumn	1	<i>Engraulis japonicus</i>	80.4	100.0	Gobiidae sp. (5.7), <i>Myctophidae</i> sp. (5.0), <i>Trichiurus japonicus</i> (3.5), <i>Jaydia lineata</i> (1.9)
	2	Gobiidae sp.	19.7	40.9	<i>Champsodon snyderi</i> (14.0), <i>Trichiurus japonicus</i> (9.2), <i>Pennahia argentata</i> (9.0), <i>Benthosema pterotum</i> (7.1)
	3	<i>Maurolicus japonicus</i>	61.1	100.0	<i>Engraulis japonicus</i> (23.1), Gobiidae sp. (9.4), <i>Ophisurus macrorhynchus</i> (1.6), <i>Synodontidae</i> sp. (1.6)
	4	Gobiidae sp.	61.6	100.0	<i>Benthosema pterotum</i> (8.6), <i>Muraenesox cinereus</i> (6.5), <i>Trichiurus japonicus</i> (5.4), <i>Maurolicus japonicus</i> (2.4)
	5	<i>Benthosema pterotum</i>	54.6	100.0	Gobiidae sp. (14.0), <i>Neobythites sivicola</i> (10.2), <i>Trichiurus japonicus</i> (5.7), <i>Ophidiiformes</i> sp. (2.5)

및 남해안으로 확산될 수 있으며(Son and Choi, 2022), 이 해역의 순환 구조는 계절풍과 해류 조건에 따라 뚜렷한 계절 변화를 보인다(Lie and Cho, 2016). 이 연구의 T-S diagram에서도 여름에는 서해, 남해 및 동중국해에서 저염분 물덩어리의 영향이 뚜렷하게 나타났고, 동해는 상대적으로 높은 염분 특성을 유지하여 다른 해역과 구분되었다(Fig. 3). 이러한 결과는 한반도 주변 해역의 어란 및 자치어 분포가 단일한 수온 효과보다는 해역별 물덩어리 구조, 연안-외양 구배, 해류 수송 및 어종별 산란·성육 특성이 복합적으로 작용하여 형성됨을 시사한다.

어란 공간분포의 계절 변동

동해는 여름과 가을에 엘통이 어란이 극우점하는 독립적인 해역으로 구분되었다. 동해 해역은 상대적으로 높은 염분을 유지하며, 대마난류와 동한난류의 영향을 받는 중층성·외양성 물덩어리 환경을 형성한다. 엘통이는 중층성 어류로 어란과 자치어의 출현이 수온·염분 구조 및 저층냉수의 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Kim and Yoo, 1999). 또한 일본 Tosa Bay 연구에서도 엘통이의 초기생활사 단계 분포가 수층 구조와 관련될 수 있다고 보고하였다(Paraboles et al., 2019). 따라서 이 연구에서 동해 여름과 가을에 엘통이 어란이 극우점한 결과는 동해의 상대적 고염 환경과 외양성·중층성 물덩어리의 영향을 시사한다.

서해의 경우 여름에 멸치가 중부해역에서 극우점하였으며, 멸치 자치어 또한 같은 시기에 같은 해역에서 우점하는 결과를 보였다(Table 3, Fig. 5). 멸치가 산란 후 일주일 내에 초기 자어에 이르는 것을 고려하면, 2024년 여름은 이 해역이 주요한 산란 및 성육장이 된 것으로 생각된다. 과거 몇몇 연구에서도 서해에 멸치 어란이 집중 분포한 사례가 있었으며, 연안수와 외해수가 만나는 생산적인 전선역(frontal area)이 형성된 것이 중요한 요인인 것으로 보고되었다(Kim et al., 2020). 이번 연구 결과도 서해의 서로 다른 물덩어리에 의한 전선역 또는 조석전선, 물덩어리의 수직구조 등이 멸치의 무리 형성과 산란에 유리하게 작용하였을 수 있다. 그러나 멸치의 주요 어장인 남해에 비해 서해는 산란과 해양학적 관계에 대한 연구가 부족하여 추가적인 분석과 연구가 계속되어야 할 것이다.

겨울철 우리나라 주변해역에는 전반적으로 저어류인 가자미류 어란이 광범위하게 출현(그룹 1)하였다(Table 2). 그룹 1의 우점종인 찰가자미는 서해 남부와 제주 북부 정점에 출현하였으며, 여름에 서해 북부에 서식하다가 월동을 위해 가을에 제주 인근 해역까지 남하하여 겨울에 산란하는 특성이 반영된 것으로 보인다(Byun et al., 2011). 동중국해 일부를 포함한 남해 해역으로 구성된 겨울철 그룹 1과 2, 봄철 그룹 2와 3은 여러 가자미류가 우점하거나 수반종으로 출현하였다. 가자미류의 주 산란시기는 겨울부터 봄으로 알려져 있는데, 이 결과는 가자미류 산란 연구가 부족한 상황에서 의미있는 정보가 될 것으로 생각된다. 예를 들면, 용가자미(*C. pinetorum*)는 위도와 환경에 따라 산란시기가 달라지는 것으로 알려져 있다. 용가자미의 산란

시기는 동해 남부에서 1-3월, 강원도 연안에서는 5-7월, 서해 중부해역에서는 10-12월로 추정하고 있으며, 고위도로 갈수록 봄에서 여름으로 늦어지고, 같은 위도라도 환경에 따라 산란시기가 다를 것으로 보고되었다(Choi et al., 2022). 이번 연구에서는 가을에 그룹 4의 우점종으로(Table 2), 서해 중부 두 정점에서 높은 밀도로 출현하여 가을철 산란을 확인하였다. 남해에서는 겨울에 낮은 밀도로 출현하였다가 봄에 그룹 2의 모든 정점에서 우점하는 것으로 나타나 남해의 경우 겨울부터 봄에 산란이 일어나는 것으로 유추해 볼 수 있을 것이다.

겨울철 남해와 동중국해 외측 세 정점(그룹 3)은 대마난류의 이동 방향과 일치하며, 난류성 또는 대륙붕 가장자리에 분포하는 종들로 구성되어 대마난류의 영향을 받는 것으로 보인다. 이 그룹의 우점종은 눈통멸이었으며, 동중국해와 대마난류계 눈통멸의 산란기와 일치하는 것으로 보아(Ohshimo et al., 2011) 해당 해역에서 국지적인 산란 또는 서일본이나 동중국해 산란장에서 대마난류의 흐름을 통한 어란의 수송 가능성을 시사한다. 한편, 남해와 동중국해는 여름에 두 그룹(그룹 3과 4)으로 구분되었다. 주요 우점종은 우리나라 주요 어종인 갈치였으며, 갈치 어란은 봄에 동중국해 동부 해역에 집중적으로 분포하였다가 여름에 동중국해와 남해 전해역으로 확장되고, 남해에서는 가을까지 우점하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 여름철 남해와 동중국해는 분류군 조성의 차이를 보이며 두 그룹으로 구분되었으나, 두 그룹은 다양한 난류성 어종을 수반하면서 갈치 어란이 우점하는 공통된 특징을 나타내 하나의 광역적 그룹으로 구분될 수 있을 것으로 사료된다.

자치어 공간분포의 계절 변동

동해에서 자치어 분포는 여름과 가을에 엘통이 어란과 같이 극우점하는 양상을 보이지는 않았으나, 봄(그룹 3)부터 여름(그룹 3)과 가을(그룹 3)에 엘통이가 60% 이상 우점하는 독립적인 군집이 형성되었다(Table 3). 이 외에 동해 자치어 군집은 계절별로 3-4개의 그룹이 혼재하면서 멸치와 다양한 난류성, 저서성 어종이 출현하는 경향을 보였다. 이에 대한 시·공간 분포는 어종의 생물학적 특성 및 해양환경적 요인과 더불어 세부적인 연구가 필요하다.

서해는 겨울에 까나리, 여름에 멸치가 우점하고, 가을에는 외측해역에 멸치가 계속 우점하는 특징을 나타내었다(Table 3, Fig. 5b). 이전 연구에서도 서해에서 겨울철에 까나리 자치어가 우점하는 것이 확인되어 왔다(Hur and Yoo, 1984; Kim et al., 2015). 이는 저수온기에 산란하는 까나리의 생활사 특성과 일치한다. 까나리는 겨울철 사질 또는 자갈질 저층에 정착란을 산란하며, 부화 후 자어가 수층으로 이동한다. 따라서 이번 연구에서 확인된 겨울철 까나리의 우점 현상은 서해 중부 및 인접 대륙붕 산란장에서 겨울철 산란·부화가 집중적으로 이루어진 결과로 해석할 수 있다. 다만 정점별 밀도 차이에는 조석혼합과 수렴에 따른 자어의 물리적 집적도 일부 기여했을 가능성이 있다.

남해와 동중국해는 겨울에 제주해협에서 대한해협에 걸쳐 놓여 자치어가 우점하며 망둑어류가 수반종으로 출현하는 군집(그룹 1)이 형성되었다. 제주도 서쪽 해역(그룹 2)은 특정 종이 우점하기 보다 대륙붕에 서식하는 다양한 저어류와 멸치가 여러 정점에서 산발적으로 출현하였다. 이 그룹은 우점도는 낮지만 쉬쉬망둑이 우점하는 것으로 나타났다. 쉬쉬망둑은 중국과 우리나라 연안에서 주로 봄에 자치어가 출현하는 것으로 보고되었으나(Zhang et al., 2022), 주로 하구 및 내만에서 연구된 결과로 이번 조사와 직접적인 비교가 어렵다. 뿐만 아니라, 양쯔강 하구에서는 겨울철에도 쉬쉬망둑 자치어가 출현하는 것으로 보아 지역과 개체군에 따라 출현시기가 가을 또는 겨울까지 확장될 수 있을 것이다(Zhang et al., 2019). 그리고 겨울에 이 그룹에서 붕장어(*Conger myriaster*) 자치어가 수반종으로 출현한 것은, 해당 해역이 붕장이 초기 생활사와 관련된 중요한 해역일 가능성을 시사한다. 우리나라 주변 해역에서 붕장의 산란은 이석을 이용해 그 시기를 추정하고 있을 뿐, 회유성 어종 특성상 산란과 회유과정의 초기생활사 단계의 연구가 매우 부족하다(Kim et al., 2011). 이 결과는 향후 남해와 동중국해의 저서성 어류의 초기생활사 연구에 중요한 단서가 될 것이다.

동중국해 동부해역(그룹 5)은 봄에 갈치 자치어가 우점하였으며, 같은 시기에 갈치 어란도 우점하였다(Table 3, Fig. 5). 갈치는 산란 시 쿠로시오 기원의 대마난류와 동중국해 대륙붕수와 만나 형성되는 혼합대 및 전선역을 이용하는 성격이 강한 것으로 보고되었다(Kim et al., 2005). Kim et al. (2005)은 멸치 어란은 주로 동중국해 서부에, 갈치 어란은 동부 해역에 분포하는 양상을 보고하며, 어란 분포는 종별 산란이 물덩어리의 환경에 따라 달라질 수 있다고 하였다. 따라서 봄에 동중국해 동부에 대륙붕 혼합수가 발달하면서(Fig. 3) 갈치 산란이 유리한 환경이 조성된 것으로 보이며, 기존의 연구결과와 의미를 같이 하는 것으로 해석된다.

동중국해와 남해에는 여름에 망둑어과의 자치어가 광범위하게 출현하였으며, 가을에도 우점하거나 수반종으로 출현하는 경향이 지속되었다(Table 3). 망둑어과는 종류가 다양하여 특정한 산란 패턴을 설명하는데 어려움이 있다. 부화 후 수주간 부유생활을 하는 망둑어류의 특성을 고려하면, 이 시기에 해당 해역에서 직접 산란하였거나, 이번 연구의 채집 시기보다 이른 시기에 산란한 종들이 부화하여 수송되었을 가능성이 있다. 예를 들면, 검정망둑(*Tridentiger obscurus*)은 5월에서 9월이 산란기로 추정되는데(Jin et al., 2006), 제주 연안에서 점착란이 부화한 후 외측해역으로 수송되었을 수 있다. 또한 양쯔강 하구에는 6-8월 모치망둑(*Mugilogobius abei*) 자치어가 출현하는데, 이 시기는 양쯔강 유출수가 동중국해 북부해역으로 확장하는 시기로 양쯔강 유출수 확산과 함께 수송되었을 가능성이 있다. 추후 분자생물학적 연구를 통해 기원을 규명하는 연구가 수행된다면 보다 명확한 해석이 가능할 것으로 보인다.

한편, 가을에 남해 서부와 동중국해 중부 및 서부 해역에는 깃

비늘치 자치어가 우점하는 군집(그룹 5)이 나타났다. 깃비늘치는 동중국해에서 쿠로시오 외양수 영향 해역보다는 얕은 대륙붕 수역에서 높은 밀도로 분포한다(Sassa, 2019). Sassa et al. (2015)는 가을철 제주도 남부 수심 60-80 m의 대륙붕 해역에 많은 양의 자치어가 대륙붕단 염분전선의 연안 내측에 제한적으로 분포하는 것을 두고 염분전선과 소용돌이(eddy)가 자어의 외해 유출과 분산을 억제했을 가능성을 제안하였다. 이번 연구에서 염분의 수직 구조를 제시하지는 않았으나, 가을철 그룹 5가 포함된 해역은 가을에 염분이 낮은 물덩어리가 확인되었다(Fig. 3). 또한 같은 시기에 제주도 남부 및 서부 해역에서 제주해협과 대한해협에 걸쳐 수온 전선과 염분 경도대가 형성되었으며(National Institute of Fisheries Science, 2025), 동중국해 동부는 대마난류 영향권으로 구분된다. 따라서 북부 동중국해와 제주 남부 대륙붕에 발생한 자치어가 대륙붕 물덩어리를 따라 분산되고, 전선역과 소용돌이 같은 물덩어리 경계에서 체류·집적된 결과로 볼 수 있다.

분자생물학적 동정을 통한 어란 종조성 파악의 의의

어란은 발달 단계에 따라 형태 형질이 달라지고 공간 형태가 유사한 경우가 많아 형태학적 방법만으로는 종 수준 동정에 한계가 있다. DNA metabarcoding에서 산출되는 read 수 또는 read 비율은 primer 결합 효율, 종별 DNA량, 난 크기, 보존 상태, PCR 증폭 편향 및 reference database의 완성도에 영향을 받을 수 있다. 따라서 이를 실제 개체수 비율로 직접 해석하는 데에는 한계가 있다. 이러한 한계로 인해 이 연구에서도 모든 어란은 현미경으로 직접 계수하였지만, DNA metabarcoding을 통해 산출한 분류군별 밀도는 상대 read 비율에 따라 배분하여 추정하였다. 따라서 분류군별 개체수를 정량화하는 데에는 한계가 있으며, 분류군 간 밀도의 절대적인 크기를 직접 비교하기보다는 상대적인 공간분포 및 계절적 출현 양상을 파악하는 데 유용할 수 있다. 그럼에도 불구하고 이 연구는 형태학적 동정이 어려운 미동정 어란에 DNA barcoding 및 metabarcoding을 적용함으로써 어란의 불확실한 종 동정의 한계를 보완하여 어란의 출현 여부와 시·공간적 분포 현황 파악과 해석을 더욱 풍부하게 할 수 있음을 보여주었다(Lewis et al., 2016).

한반도 주변 해역은 최근 수십 년간 해수면 온도 상승과 해양 환경 변화가 지속적으로 관측되어 왔으며, 이는 어류의 산란 시기, 분포 범위, 초기생활사 단계의 생존에 영향을 미칠 수 있다. 2050년대 기후변화 시나리오에서는 서해 및 동중국해 멸치 산란지의 감소 가능성이 제시되었고(Bang et al., 2022), 수온 상승으로 난류성 어종의 서식·산란 범위가 북쪽으로 확장될 수 있을(Auth et al., 2018), 향후 우리나라 주변해역은 어류 군집의 시·공간적 분포가 현재와는 상당히 달라질 가능성이 농후하다. 이번 연구는 분자생물학적 동정을 통해 기존에 미동정으로 처리되던 어란의 종조성을 보다 구체적으로 파악하여, 비록 2024년 한 해의 조사결과이지만, 우리나라 근해 전반에 걸쳐 계절별

출현 양상을 제시한 점에 의미가 있으며, 향후 어류 초기생활사 분포 변화를 평가하는 데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 국립수산물과학원 수산연구사업 '생태계 구조변동 구명 및 평가기술 개발(R2026059)'의 지원으로 수행되었습니다.

생성형 AI 및 AI 지원 기술의 사용

이 논문의 작성 과정에서 영문 교정, R 코드의 검토와 수정을 위해 OpenAI의 ChatGPT를 사용하였다. 생성형 AI로 얻어진 문장과 코드는 저자들이 직접 검토 및 수정하여 사용하였으며, 수정된 코드 또한 직접 R software를 실행하여 분석 결과를 확인하였다. 이 외에 연구 설계와 분석 방법, 해석 및 고찰은 저자들의 과학적 판단에 따라 수행되었다.

References

- Auth TD, Daly EA, Brodeur RD and Fisher JL. 2018. Phenological and distributional shifts in ichthyoplankton associated with recent warming in the northeast Pacific Ocean. *Glob Change Biol* 24, 259-272. <https://doi.org/10.1111/gcb.13872>.
- Back J-I, Ji H-S, Yu H-J, Hwang K-S and Kim D-N. 2021. Distribution of eggs and larvae in coastal waters of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 467-479. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0467>.
- Bakun A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Sci Mar* 70, 105-122. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2105>.
- Bang M, Sohn D, Kim JJ, Choi W, Jang CJ and Kim C. 2022. Future changes in the seasonal habitat suitability for anchovy (*Engraulis japonicus*) in Korean waters projected by a maximum entropy model. *Front Mar Sci* 9, 922020. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.922020>.
- Brodeur RD, Hunsicker ME, Hann A and Miller TW. 2019. Effects of warming ocean conditions on feeding ecology of small pelagic fishes in a coastal upwelling ecosystem. *Mar Ecol Prog Ser* 617, 149-163. <https://doi.org/10.3354/meps12497>.
- Byun S-G, Kim S-Y, Kim J-D, Lee B-I, Lee J-H, Han K-H and Jeong M-H. 2011. Sexual maturity and gonadal development of slime flounder, *Microstomus achne*. *Korean J Ichthyol* 23, 179-186.
- Camacho C, Coulouris G, Avagyan V, Ma N, Papadopoulos J, Bealer K and Madden TL. 2009. BLAST+: architecture and applications. *BMC Bioinform* 10, 421. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-421>.
- Checkley DM, Alheit J, Oozeki Y and Roy C. 2009. Climate Change and Small Pelagic Fish. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 285-299.
- Choi DH, Youn BI, Lee SH, Kwon DH and Kim MJ. 2022. Maturity and spawning of the pointhead flounder *Cleisthenes pinetorum* in the West Sea of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 575-582. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0575>.
- Duke EM and Burton RS. 2020. Efficacy of metabarcoding for identification of fish eggs evaluated with mock communities. *Ecol Evol* 10, 3463-3476. <https://doi.org/10.1002/ece3.6144>.
- Elbrecht V and Leese F. 2015. Can DNA-based ecosystem assessments quantify species abundance? Testing primer bias and biomass-sequence relationships with an innovative metabarcoding protocol. *PLoS One* 10, e0130324. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130324>.
- Gong G-C, Chen Y-LL and Liu K-K. 1996. Chemical hydrography and chlorophyll a distribution in the East China Sea in summer: implications in nutrient dynamics. *Cont Shelf Res* 16, 1561-1590. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(96\)00005-2](https://doi.org/10.1016/0278-4343(96)00005-2).
- Han I-S, Lee J-S, Kim C and Yang J-Y. 2023. Impacts, projections and assessments related to climate change in ocean and fisheries. *J Clim Change Res* 14, 965-972. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.6.965>.
- Han S-H, Kim MJ, Kim JS and Song CB. 2017. Molecular identification and bimonthly abundance of fish eggs collected in the coastal waters of Sagye, Jeju Island. *Korean J Fish Aquat Sci* 50, 829-836. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0829>.
- Hare JA. 2014. The future of fisheries oceanography lies in the pursuit of multiple hypotheses. *ICES J Mar Sci* 71, 2343-2356. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu018>.
- Houde ED. 2008. Emerging from Hjort's shadow. *J Northwest Atl Fish Sci* 41, 53-70. <https://doi.org/10.2960/J.v41.m634>.
- Hur S-B and Yoo J-M. 1984. Distribution of fish eggs and larvae in the western waters of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 17, 536-542.
- Ichikawa H and Beardsley RC. 2002. The current system in the Yellow and East China Seas. *J Oceanogr* 58, 77-92. <https://doi.org/10.1023/A:1015876701363>.
- Illumina. 2015. 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation. Retrieved from https://support.illumina.com/documents/documentation/chemistry_documentation/16s/16s-metagenomic-library-prep-guide-15044223-b.pdf on May 29.
- Jin YS, Park CB, Kim HJ, Lee CH, Song YB, Kim BH and Lee YD. 2006. Reproductive cycle of dusky tripletooth goby *Tridentiger obscurus* in Jeju Island, Korea. *Korean J Ichthyol* 18, 184-192.
- Kim J-K, Lee SJ, Lee W-C, Kim JB and Kim HC. 2015. Restricted separation of the spawning areas of the two lineages of sand lance, *Ammodytes personatus*, in the Yellow and

- East Seas and taxonomic implications. *Biochem Syst Ecol* 61, 319-328. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.06.038>.
- Kim J-Y, Kang Y-S, Oh H-J, Suh Y-S and Hwang J-D. 2005. Spatial distribution of early life stages of anchovy (*Engraulis japonicus*) and hairtail (*Trichiurus lepturus*) and their relationship with oceanographic features of the East China Sea during the 1997-1998 El Niño event. *Estuar Coast Shelf Sci* 63, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.10.002>.
- Kim JY, Lee JB and Suh Y-S. 2020. Oceanographic indicators for the occurrence of anchovy eggs inferred from generalized additive models. *Fish Aquat Sci* 23, 19. <https://doi.org/10.1186/s41240-020-00161-y>.
- Kim K, Chang K-I, Kang D-J, Kim YH and Lee J-H. 2008. Review of recent findings on the water masses and circulation in the East Sea (Sea of Japan). *J Oceanogr* 64, 721-735. <https://doi.org/10.1007/s10872-008-0061-x>.
- Kim S and Yoo J-M. 1999. Distribution of eggs and larvae of *Maurollicus muelleri* in the thermal front of the Korea Strait. *Korean J Ichthyol* 11, 62-71.
- Kim Y-H, Lee E-H, Kim J-N, Choi J-H, Oh T-Y and Lee D-W. 2011. Age and growth of whitespotted conger *Conger myriaster* in the southern coastal waters of Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 44, 689-694. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2011.0689>.
- Lee EA, Kim SY and Min HS. 2019. Climatological descriptions on regional circulation around the Korean Peninsula. *Tellus A: Dyn Meteorol Oceanogr* 71, 1604058. <https://doi.org/10.1080/16000870.2019.1604058>.
- Legendre P and Gallagher ED. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s004420100716>.
- Leray M, Yang JY, Meyer CP, Mills SC, Agudelo N, Ranwez V, Boehm JT and Machida RJ. 2013. A new versatile primer set targeting a short fragment of the mitochondrial COI region for metabarcoding metazoan diversity: Application for characterizing coral reef fish gut contents. *Front Zool* 10, 34. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-10-34>.
- Lewis LA, Richardson DE, Zakharov EV and Hanner R. 2016. Integrating DNA barcoding of fish eggs into ichthyoplankton monitoring programs. *Fish Bull* 114, 153-165. <https://doi.org/10.7755/FB.114.2.3>.
- Lie H-J and Cho C-H. 2016. Seasonal circulation patterns of the Yellow and East China Seas derived from satellite-tracked drifter trajectories and hydrographic observations. *Prog Oceanogr* 146, 121-141. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.06.004>.
- Moon SY, Lee MH, Jung KM, Kim H and Jung JH. 2022. Spatial and temporal distribution of fish larvae in the southern coast of Korea from spring to summer. *Korean J Fish Aquat Sci* 55, 461-477. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0461>.
- Murtagh F and Legendre P. 2014. Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *J Classif* 31, 274-295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2020. Fish Eggs, Larvae and Juveniles of Korea. National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea, 1-442.
- National Institute of Fisheries Science (NIFS). 2025. Annual Report of Oceanographic Observations, Vol. 73. Retrieved from <https://www.nifs.go.kr/contents/actionContentsCons0150.do> on May 29.
- Ohshimo S, Gotoh T, Otsuka T and Gejima K. 2011. Age, growth and reproductive characteristics of round herring *Etrumeus teres* in the East China Sea. *Nippon Suisan Gakkaishi* 77, 15-22. <https://doi.org/10.2331/suisan.77.15>.
- Okiyama M. 1988. An Atlas of the Early Stage Fishes in Japan. Tokai University Press, Tokyo, Japan, 1-1154.
- Pankhurst NW and Munday PL. 2011. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Mar Freshw Res* 62, 1015-1026. <https://doi.org/10.1071/MF10269>.
- Paraboles LC, Guarte DM and Kinoshita I. 2019. Vertical distribution of eggs and larvae of *Maurollicus japonicus* (Sternopychidae, Pisces) in Tosa Bay, Japan. *Plankton Benthos Res* 14, 80-85. <https://doi.org/10.3800/pbr.14.80>.
- Piñol J, Senar MA and Symondson WOC. 2019. The choice of universal primers and the characteristics of the species mixture determine when DNA metabarcoding can be quantitative. *Mol Ecol* 28, 407-419. <https://doi.org/10.1111/mec.14776>.
- Ransome E, Geller JB, Timmers M, Leray M, Mahardini A, Sembiring A, Collins AG and Meyer CP. 2017. The importance of standardization for biodiversity comparisons: A case study using autonomous reef monitoring structures (ARMS) and metabarcoding to measure cryptic diversity on Mo'orea coral reefs, French Polynesia. *PLoS One* 12, e0175066. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175066>.
- Rebstock GA and Kang YS. 2003. A comparison of three marine ecosystems surrounding the Korean peninsula: Responses to climate change. *Prog Oceanogr* 59, 357-379. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2003.10.002>.
- Rho T, Choi S-H, Lee JY, Kwon S, Kang D-J, Song TY and Son P. 2022. Quality control of dissolved nutrient data in the Jurisdictional Ocean Information Sharing System (JOISS). *J Korean Soc Oceanogr* 27, 173-193. <https://doi.org/10.7850/jkso.2022.27.4.173>.
- Saito H. 2019. The Kuroshio: Its recognition, scientific activities and emerging issues. In: Kuroshio Current: Physical, Biogeochemical, and Ecosystem Dynamics. Nagai T, Saito H, Suzuki K and Takahashi M, eds. American Geophysical Union and John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, U.S.A., 1-11.
- Sassa C. 2019. Estimation of the spawning biomass of myctophids based on larval production and reproductive parameters: The case study of *Benthosema pterotum* in the

- East China Sea. ICES J Mar Sci 76, 743-754. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy051>.
- Sassa C, Takahashi M and Tsukamoto Y. 2015. Distribution, hatch-date, growth, and mortality of larval *Benthosema pterotum* (Pisces: Myctophidae) in the shelf region of the East China Sea. J Mar Biol Assoc UK 95, 161-174. <https://doi.org/10.1017/S0025315414001209>.
- Son YB and Choi J-K. 2022. Mapping the Changjiang Diluted Water in the East China Sea during summer over a 10-year period using GOCI satellite sensor data. Front Mar Sci 9, 1024306. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1024306>.
- Ward RD, Zemlak TS, Innes BH, Last PR and Hebert PDN. 2005. DNA barcoding Australia's fish species. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 360, 1847-1857. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1716>.
- Zhang H, Xian W and Liu S. 2019. Seasonal variations of the ichthyoplankton assemblage in the Yangtze Estuary and its relationship with environmental factors. PeerJ 7, e6482. <https://doi.org/10.7717/peerj.6482>.
- Zhang H, Yuan X, Ling J and Jiang Y. 2022. Larval ecology of gobiid fishes in a subtropical embayment: Environmental preferences and spatiotemporal habitat partitioning. Front Mar Sci 9, 929919. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.929919>.

Table S1. Station information including geographic coordinates and sampling depth for each survey sea area

Location	Station	Longitude	Latitude	Sampling depth (m)
East Sea	103-05	129.59	36.505	0,10,20,30,50,75,100,125,150
East Sea	103-07	130	36.505	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	103-09	130.622	36.505	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	103-11	131.233	36.505	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	105-05	129.377	37.553	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300
East Sea	105-07	130	37.553	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	105-09	130.625	37.553	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	105-11	131.243	37.553	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	107-03	128.843	38.21	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	107-05	129.372	38.21	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	107-07	130	38.21	0,10,20,30,50,75,100,125,150,200,250,300,400,500
East Sea	209-05	129.64	35.757	0,10,20,30,50,75,100
East Sea	209-07	130.005	35.613	0,10,20,30,50,75,100,200
South Sea	203-01	126.5233	33.9433	Winter, Spring: 0,10,20,30,50; Summer, Autumn: 0,10,20,30
South Sea	203-03	126.355	33.6383	0,10,20,30,50,75,100,125
South Sea	204-04	127.2533	33.9017	0,10,20,30,50,75
South Sea	205-03	127.9483	34.0917	0,10,20,30,50,75
South Sea	205-05	128.1531	33.6217	0,10,20,30,50,75,100
South Sea	206-03	128.8283	34.3733	Winter, Spring: 0,10,20,30,50,75,100; Summer, Autumn: 0,10,20,30,50,75
South Sea	207-03	129.2567	34.8983	0,10,20,30,50,75,100
South Sea	313-03	125.8	33.4067	0,10,20,30,50,75
South Sea	313-07	125	33.4067	Winter: 0,10,20,30,50,75; Spring, Summer, Autumn: 0,10,20,30,50
South Sea	313-09	124.6	33.4067	0,10,20,30,50
South Sea	314-03	127.1	33	0,10,20,30,50,75,100
South Sea	314-05	126.5	33	0,10,20,30,50,75,100
South Sea	314-07	125.9	33	0,10,20,30,50,75,100
South Sea	314-09	125.3	33	0,10,20,30,50,75
South Sea	400-14	128.4	34.225	0,10,20,30,50,75
South Sea	400-25	127.5667	33.56	Winter, Spring: 0,10,20,30,50,75,100; Summer, Autumn: 0,10,20,30,50,75
South Sea	400-27	127.075	33.505	0,10,20,30,50,75,100
West Sea	307-03	126	36.9417	0,10,20,30,50
West Sea	307-05	125.4167	36.925	0,10,20,30,50
West Sea	307-07	125	36.925	0,10,20,30,50
West Sea	307-09	124.58	36.925	0,10,20,30,50,75
West Sea	309-03	125.8217	35.855	0,10,20,30,50
West Sea	309-05	125.4067	35.855	0,10,20,30,50
West Sea	309-07	125	35.855	0,10,20,30,50,75
West Sea	309-09	124.585	35.855	0,10,20,30,50,75
West Sea	311-05	125.5317	34.7167	0,10,20,30,50,75
West Sea	311-07	125	34.7167	0,10,20,30,50,75
West Sea	311-09	124.5967	34.7167	0,10,20,30,50,75

West Sea	312-03	125.9	33.9967	0,10,20,30,50,75
West Sea	312-05	125.5	34.0433	0,10,20,30,50,75
West Sea	312-07	125	34.0917	0,10,20,30,50,75
West Sea	312-09	124.6	34.0917	0,10,20,30,50,75
East China Sea	315-12	127.385	32.5	Winter, Spring: 0,10,20,30,50,75,100,125; Summer, Autumn: 0,10,20,30,50,75,100
East China Sea	315-13	127.0873	32.5	0,10,20,30,50,75,100
East China Sea	315-15	126.504	32.5	Winter, Spring: 0,10,20,30,50,75,100; Summer: 0,10,20,30,50,75,95; Autumn: 0,10,20,30,50,75,90
East China Sea	315-17	125.9207	32.5	0,10,20,30,50,75
East China Sea	315-19	125.2873	32.5	0,10,20,30,50
East China Sea	315-21	124.504	32.5	0,10,20,30
East China Sea	315-22	124	32.5	0,10,20,30
East China Sea	316-12	127.37	32	Winter: 0,10,20,30,50,75,100,125; Spring, Summer, Autumn: 0,10,20,30,50,75,100
East China Sea	316-13	127.0707	32	0,10,20,30,50,75,100
East China Sea	316-15	126.4873	32	Winter: 0,10,20,30,50,75,100; Spring: 0,10,20,30,50,75,95; Summer: 0,10,20,30,50,75,90; Autumn: 0,10,20,30,50,75
East China Sea	316-17	125.8873	32	Winter, Summer: 0,10,20,30,50,75; Spring, Autumn: 0,10,20,30,50
East China Sea	316-19	125.2873	32	Winter, Spring: 0,10,20,30,50; Summer, Autumn: 0,10,20,30,45
East China Sea	316-21	124.504	32	0,10,20,30
East China Sea	316-22	124	32	0,10,20,30
East China Sea	317-13	127.0707	31.5	Winter, Spring: 0,10,20,30,50,75,100; Summer, Autumn: 0,10,20,30,50,75,95
East China Sea	317-15	126.4873	31.5	Winter, Spring, Summer: 0,10,20,30,50,75; Autumn: 0,10,20,30,50
East China Sea	317-17	125.8873	31.5	0,10,20,30,50
East China Sea	317-19	125.2873	31.5	Winter, Spring: 0,10,20,30,50; Summer, Autumn: 0,10,20,30,45
East China Sea	317-21	124.504	31.5	0,10,20,30
East China Sea	317-22	124	31.5	0,10,20,30

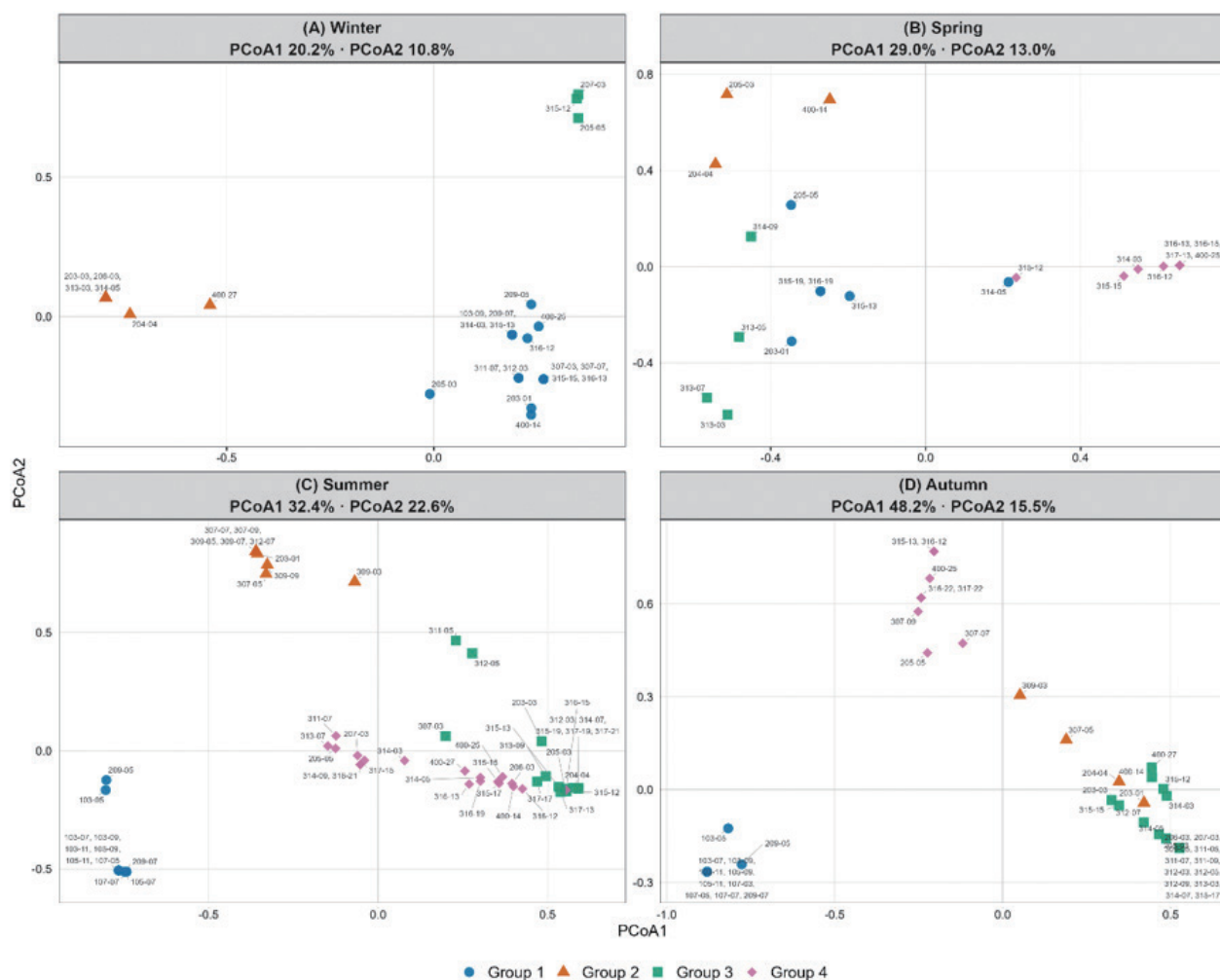


Fig. S1. Principal coordinates analysis (PCoA) ordination of fish egg assemblages in winter (A), spring (B), summer (C), and autumn (D). The ordination was based on Euclidean distances calculated from Hellinger-transformed species density data (ind./1,000 m³). Colors and symbols indicate the assemblage groups identified by Ward.D2 hierarchical cluster analysis using the same distance matrix; group assignments were not derived from the PCoA. The average silhouette widths for the final Ward.D2-based clustering solutions were 0.254 in winter, 0.303 in spring, 0.400 in summer, and 0.579 in autumn. The percentages shown for PCoA1 and PCoA2 indicate the proportions of total variation explained by the first and second axes, respectively.

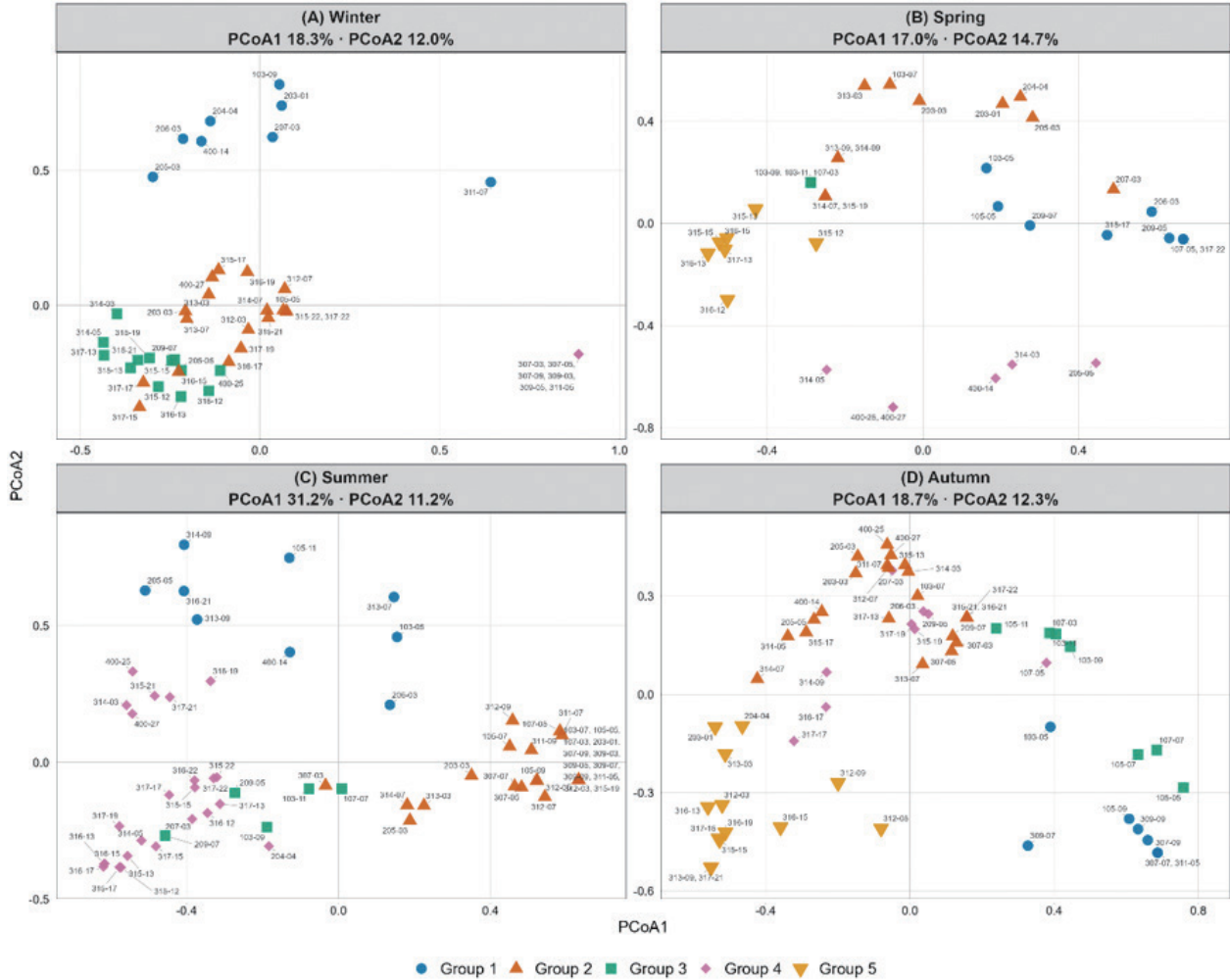


Fig. S2. Principal coordinates analysis (PCoA) ordination of fish larval assemblages in winter (A), spring (B), summer (C), and autumn (D). The ordination was based on Euclidean distances calculated from Hellinger-transformed species density data (ind./1,000 m³). Colors and symbols indicate the assemblage groups identified by Ward.D2 hierarchical cluster analysis using the same distance matrix; group assignments were not derived from the PCoA. The average silhouette widths for the final Ward.D2-based clustering solutions were 0.241 in winter, 0.299 in spring, 0.306 in summer, and 0.197 in autumn. The percentages shown for PCoA1 and PCoA2 indicate the proportions of total variation explained by the first and second axes, respectively.

Table S2. Taxon list of fish eggs and larvae identified from each sea area

Sea area	Sample type	Species identification
East Sea	Eggs	<i>Champsodon snyderi</i>
East Sea	Eggs	<i>Coryphaena hippurus</i>
East Sea	Eggs	<i>Engraulis japonicus</i>
East Sea	Eggs	<i>Glossanodon semifasciatus</i>
East Sea	Eggs	<i>Glyptocephalus stelleri</i>
East Sea	Eggs	<i>Maurollicus japonicus</i>
East Sea	Eggs	<i>Scomber japonicus</i>
East Sea	Eggs	<i>Trichiurus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Auxis rochei</i>
South Sea	Eggs	<i>Auxis thazard</i>
South Sea	Eggs	<i>Branchiostegus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Callanthias japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Caprodon schlegelii</i>
South Sea	Eggs	<i>Carangoides equula</i>
South Sea	Eggs	<i>Champsodon snyderi</i>
South Sea	Eggs	<i>Chelidonichthys spinosus</i>
South Sea	Eggs	<i>Chelidoperca santosi</i>
South Sea	Eggs	<i>Chelidoperca tosaensis</i>
South Sea	Eggs	<i>Cleisthenes pinetorum</i>
South Sea	Eggs	<i>Coryphaena hippurus</i>
South Sea	Eggs	<i>Cynoglossus abbreviatus</i>
South Sea	Eggs	<i>Cynoglossus joyneri</i>
South Sea	Eggs	<i>Dentex hypselosomus</i>
South Sea	Eggs	<i>Dexistes rikuzenius</i>
South Sea	Eggs	<i>Dinematichthys ilucoeteoides</i>
South Sea	Eggs	<i>Echelus uropterus</i>
South Sea	Eggs	<i>Engraulis japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Eopsetta grigorjewi</i>
South Sea	Eggs	<i>Erisphex pottii</i>
South Sea	Eggs	<i>Etrumeus teres</i>
South Sea	Eggs	<i>Euthynnus affinis</i>
South Sea	Eggs	<i>Evynnis tumifrons</i>
South Sea	Eggs	<i>Glossanodon semifasciatus</i>
South Sea	Eggs	<i>Gnathophis heterognathos</i>
South Sea	Eggs	<i>Hoplichthys langsdorfii</i>
South Sea	Eggs	<i>Hyperoglyphe japonica</i>
South Sea	Eggs	<i>Hypodytes rubripinnis</i>
South Sea	Eggs	<i>Inimicus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Lateolabrax japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Lepidotrigla guentheri</i>
South Sea	Eggs	<i>Lepidotrigla hime</i>

South Sea	Eggs	<i>Lepidotrigla kishinouyei</i>
South Sea	Eggs	<i>Microstomus achne</i>
South Sea	Eggs	<i>Neobythites sivicola</i>
South Sea	Eggs	<i>Ophichthus brevicaudatus</i>
South Sea	Eggs	<i>Ophisurus macrorhynchus</i>
South Sea	Eggs	<i>Pagrus major</i>
South Sea	Eggs	<i>Paralichthys olivaceus</i>
South Sea	Eggs	<i>Parapercis decemfasciata</i>
South Sea	Eggs	<i>Pleuronichthys cornutus</i>
South Sea	Eggs	<i>Saurida wanieso</i>
South Sea	Eggs	<i>Scomber australasicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Scomber japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Synodus macrops</i>
South Sea	Eggs	<i>Tanakius kitaharae</i>
South Sea	Eggs	<i>Thunnus albacares</i>
South Sea	Eggs	<i>Thunnus tonggol</i>
South Sea	Eggs	<i>Trachurus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Trichiurus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Uranoscopus japonicus</i>
South Sea	Eggs	<i>Xenocephalus elongatus</i>
South Sea	Eggs	<i>Zeus faber</i>
South Sea	Eggs	<i>Pleuronectidae</i> sp.
West Sea	Eggs	<i>Auxis rochei</i>
West Sea	Eggs	<i>Cleisthenes pinetorum</i>
West Sea	Eggs	<i>Coryphaena hippurus</i>
West Sea	Eggs	<i>Cynoglossus joyneri</i>
West Sea	Eggs	<i>Engraulis japonicus</i>
West Sea	Eggs	<i>Euthynnus affinis</i>
West Sea	Eggs	<i>Kareius bicoloratus</i>
West Sea	Eggs	<i>Microstomus achne</i>
West Sea	Eggs	<i>Paraplagusia japonica</i>
West Sea	Eggs	<i>Pennahia argentata</i>
West Sea	Eggs	<i>Pleuronichthys cornutus</i>
West Sea	Eggs	<i>Pseudorhombus cinnamoneus</i>
West Sea	Eggs	<i>Trichiurus japonicus</i>
West Sea	Eggs	<i>Xenocephalus elongatus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Auxis rochei</i>
East China Sea	Eggs	<i>Auxis thazard</i>
East China Sea	Eggs	<i>Champsodon snyderi</i>
East China Sea	Eggs	<i>Coryphaena hippurus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Cynoglossus joyneri</i>
East China Sea	Eggs	<i>Engraulis japonicus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Etrumeus teres</i>
East China Sea	Eggs	<i>Fistularia petimba</i>

East China Sea	Eggs	<i>Harpadon nehereus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Hime japonica</i>
East China Sea	Eggs	<i>Lepidotrigla guentheri</i>
East China Sea	Eggs	<i>Lepidotrigla kishinouyei</i>
East China Sea	Eggs	Ophichthidae sp.
East China Sea	Eggs	<i>Ophisurus macrorhynchus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Rhynchoconger ectenurus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Saurenchelys taiwanensis</i>
East China Sea	Eggs	<i>Saurida wanieso</i>
East China Sea	Eggs	<i>Scomber australasicus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Scomber colias</i>
East China Sea	Eggs	<i>Scomber japonicus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Seriola lalandi</i>
East China Sea	Eggs	<i>Seriola quinqueradiata</i>
East China Sea	Eggs	<i>Trichiurus japonicus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Uranoscopus japonicus</i>
East China Sea	Eggs	<i>Xenoccephalus elongatus</i>
East China Sea	Eggs	Anguilliformes sp.
East Sea	Larvae	Apogonidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Auxis rochei</i>
East Sea	Larvae	<i>Branchiostegus japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Bregmaceros nectabanus</i>
East Sea	Larvae	Bregmacerotidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Callanthias japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Callionymus valenciennae</i>
East Sea	Larvae	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>
East Sea	Larvae	<i>Champsodon snyderi</i>
East Sea	Larvae	<i>Chromis notata</i>
East Sea	Larvae	<i>Cleisthenes pinetorum</i>
East Sea	Larvae	<i>Echelus uropterus</i>
East Sea	Larvae	<i>Engraulis japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Eopsetta grigorjewi</i>
East Sea	Larvae	<i>Girella punctata</i>
East Sea	Larvae	<i>Glossanodon semifasciatus</i>
East Sea	Larvae	Gobiidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Gymnocanthus herzensteini</i>
East Sea	Larvae	<i>Helicolenus hilgendorffii</i>
East Sea	Larvae	<i>Hoplichthys langsdorffii</i>
East Sea	Larvae	<i>Jaydia lineata</i>
East Sea	Larvae	Labridae sp.
East Sea	Larvae	<i>Lateolabrax japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla hime</i>
East Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla kishinouyei</i>
East Sea	Larvae	<i>Lophiomus setigerus</i>

East Sea	Larvae	<i>Maurolicus japonicus</i>
East Sea	Larvae	Myctophidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Myctophum asperum</i>
East Sea	Larvae	<i>Odontamblyopus lacepedii</i>
East Sea	Larvae	Ophidiidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Ophisurus macrorhynchus</i>
East Sea	Larvae	Opistognathidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Paralichthys olivaceus</i>
East Sea	Larvae	Pleuronectidae sp.
East Sea	Larvae	Scombridae sp.
East Sea	Larvae	Sebastidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Sebastiscus marmoratus</i>
East Sea	Larvae	<i>Sphyaena pinguis</i>
East Sea	Larvae	<i>Stalix histrio</i>
East Sea	Larvae	<i>Suruga fundicola</i>
East Sea	Larvae	Synodontidae sp.
East Sea	Larvae	<i>Trachurus japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Trichiurus japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Uranoscopus japonicus</i>
East Sea	Larvae	<i>Uroconger lepturus</i>
South Sea	Larvae	<i>Acanthaphritis unoorum</i>
South Sea	Larvae	<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>
South Sea	Larvae	<i>Apogon notatus</i>
South Sea	Larvae	Apogonidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Asterorhombus</i> sp.
South Sea	Larvae	<i>Aulotrachichthys prothemius</i>
South Sea	Larvae	<i>Auxis rochei</i>
South Sea	Larvae	<i>Benthoosema pterotum</i>
South Sea	Larvae	<i>Bregmaceros japonicus</i>
South Sea	Larvae	<i>Bregmaceros nectabanus</i>
South Sea	Larvae	<i>Bregmaceros neonectabanus</i>
South Sea	Larvae	<i>Callanthias japonicus</i>
South Sea	Larvae	Callionymidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Caprion schlegelii</i>
South Sea	Larvae	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>
South Sea	Larvae	<i>Champsodon snyderi</i>
South Sea	Larvae	<i>Chromis notata</i>
South Sea	Larvae	<i>Chromis</i> sp.
South Sea	Larvae	<i>Coelorrinchus multispinulosus</i>
South Sea	Larvae	<i>Conger myriaster</i>
South Sea	Larvae	<i>Coryphaena hippurus</i>
South Sea	Larvae	<i>Cynoglossus joyneri</i>
South Sea	Larvae	<i>Dentex hypselosomus</i>
South Sea	Larvae	<i>Echelus uropterus</i>

South Sea	Larvae	<i>Eleutherochir mirabilis</i>
South Sea	Larvae	<i>Engraulis japonicus</i>
South Sea	Larvae	<i>Eopsetta grigorjewi</i>
South Sea	Larvae	<i>Erisphex pottii</i>
South Sea	Larvae	<i>Glossanodon semifasciatus</i>
South Sea	Larvae	Gobiidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Halichoeres tenuispinis</i>
South Sea	Larvae	<i>Helicolenus hilgendorffii</i>
South Sea	Larvae	<i>Hemitripterus villosus</i>
South Sea	Larvae	<i>Heteroplopomus barbatus</i>
South Sea	Larvae	<i>Hexagrammos otakii</i>
South Sea	Larvae	<i>Hime japonica</i>
South Sea	Larvae	Hoplichthyidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Hoplichthys langsdorffii</i>
South Sea	Larvae	<i>Hoplobrotula armata</i>
South Sea	Larvae	<i>Iniistius</i> sp.
South Sea	Larvae	<i>Jaydia lineata</i>
South Sea	Larvae	Labridae sp.
South Sea	Larvae	<i>Laemonema nana</i>
South Sea	Larvae	<i>Lateolabrax japonicus</i>
South Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla microptera</i>
South Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla</i> sp.
South Sea	Larvae	<i>Lestrolepis japonica</i>
South Sea	Larvae	<i>Lipolagus ochotensis</i>
South Sea	Larvae	<i>Lophiomus setigerus</i>
South Sea	Larvae	<i>Lophius litulon</i>
South Sea	Larvae	<i>Mugil cephalus</i>
South Sea	Larvae	<i>Muraenesox cinereus</i>
South Sea	Larvae	<i>Myctophum asperum</i>
South Sea	Larvae	<i>Neobythites sivicola</i>
South Sea	Larvae	<i>Notoscopelus japonicus</i>
South Sea	Larvae	Ophidiiformes sp.
South Sea	Larvae	<i>Opistognathus</i> sp.
South Sea	Larvae	Opistognathidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Paralichthys olivaceus</i>
South Sea	Larvae	<i>Pisodonophis sangjuensis</i>
South Sea	Larvae	<i>Psettina tosana</i>
South Sea	Larvae	<i>Pseudopleuronectes yokohamae</i>
South Sea	Larvae	<i>Pseudorhombus pentophthalmus</i>
South Sea	Larvae	<i>Rhinogobius leavelli</i>
South Sea	Larvae	<i>Scomber japonicus</i>
South Sea	Larvae	<i>Sebastes pachycephalus</i>
South Sea	Larvae	<i>Sebastes thompsoni</i>
South Sea	Larvae	<i>Sebastiscus marmoratus</i>

South Sea	Larvae	<i>Siganus fuscescens</i>
South Sea	Larvae	<i>Sigmops gracilis</i>
South Sea	Larvae	<i>Sillago japonica</i>
South Sea	Larvae	<i>Stalix histrio</i>
South Sea	Larvae	<i>Stephanolepis cirrifer</i>
South Sea	Larvae	<i>Synagrops philippinensis</i>
South Sea	Larvae	<i>Syngnathus schlegeli</i>
South Sea	Larvae	<i>Synodus macrops</i>
South Sea	Larvae	<i>Trachinocephalus myops</i>
South Sea	Larvae	<i>Tanakius kitaharae</i>
South Sea	Larvae	<i>Trachurus japonicus</i>
South Sea	Larvae	<i>Trichiurus lepturus</i>
South Sea	Larvae	<i>Trichiurus japonicus</i>
South Sea	Larvae	Tripterygiidae sp.
South Sea	Larvae	<i>Vinciguerria</i> sp.
West Sea	Larvae	<i>Ammodytes japonicus</i>
West Sea	Larvae	<i>Auxis rochei</i>
West Sea	Larvae	<i>Benthosema pterotum</i>
West Sea	Larvae	<i>Callionymus valenciennesi</i>
West Sea	Larvae	<i>Conger myriaster</i>
West Sea	Larvae	Cynoglossidae sp.
West Sea	Larvae	<i>Cynoglossus joyneri</i>
West Sea	Larvae	Engraulidae sp.
West Sea	Larvae	<i>Engraulis japonicus</i>
West Sea	Larvae	<i>Erisphex pottii</i>
West Sea	Larvae	Gobiidae sp.
West Sea	Larvae	<i>Hexagrammos otakii</i>
West Sea	Larvae	<i>Laemonema nana</i>
West Sea	Larvae	<i>Lateolabrax japonicus</i>
West Sea	Larvae	<i>Luciogobius grandis</i>
West Sea	Larvae	<i>Minous monodactylus</i>
West Sea	Larvae	Sciaenidae sp.
West Sea	Larvae	<i>Sillago japonica</i>
West Sea	Larvae	<i>Trachinocephalus myops</i>
West Sea	Larvae	<i>Trichiurus japonicus</i>
West Sea	Larvae	<i>Xenocephalus elongatus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Acanthaphritis</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Acanthaphritis unoorum</i>
East China Sea	Larvae	<i>Acanthocephala schlegeli</i>
East China Sea	Larvae	<i>Acropoma japonicum</i>
East China Sea	Larvae	<i>Amblychaeturichthys hexanema</i>
East China Sea	Larvae	<i>Apogon cathetogramma</i>
East China Sea	Larvae	<i>Arnoglossus</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Auxis rochei</i>

East China Sea	Larvae	<i>Benthoosema pterotum</i>
East China Sea	Larvae	Bothidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Branchiostegus japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Bregmaceros japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Bregmaceros nectabanus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Bregmaceros</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Callanthias japonicus</i>
East China Sea	Larvae	Callionymidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>
East China Sea	Larvae	<i>Champsodon snyderi</i>
East China Sea	Larvae	<i>Coelorinchus multispinulosus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Conger myriaster</i>
East China Sea	Larvae	<i>Coryphaena hippurus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Cynoglossus joyneri</i>
East China Sea	Larvae	<i>Cynoglossus robustus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Dentex hypselosomus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Diaphus</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Echelus uropterus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Engraulis japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Erisphex pottii</i>
East China Sea	Larvae	<i>Gnathophis heterognathos</i>
East China Sea	Larvae	Gobiidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Gonorynchus abbreviatus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Gymnothorax minor</i>
East China Sea	Larvae	<i>Harpadon nehereus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Helicolenus hilgendorffii</i>
East China Sea	Larvae	Hoplichthyidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Hoplichthys langsdorffii</i>
East China Sea	Larvae	<i>Hoplobrotula armata</i>
East China Sea	Larvae	<i>Iniistius</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Jaydia lineata</i>
East China Sea	Larvae	<i>Laemonema nana</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lagocephalus wheeleri</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lateolabrax japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla microptera</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lepidotrigla</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Lestidium prolixum</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lestrolepis japonica</i>
East China Sea	Larvae	<i>Lipolagus ochotensis</i>
East China Sea	Larvae	<i>Macroramphosus scolopax</i>
East China Sea	Larvae	<i>Minous monodactylus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Muraenesox cinereus</i>
East China Sea	Larvae	Myctophidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Myctophum asperum</i>

East China Sea	Larvae	<i>Neobythites sivicola</i>
East China Sea	Larvae	Nettastomatidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Notoscopelus japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Odontamblyopus lacepedii</i>
East China Sea	Larvae	Ophidiiformes sp.
East China Sea	Larvae	<i>Ophisurus macrorhynchus</i>
East China Sea	Larvae	Opistognathidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Pennahia argentata</i>
East China Sea	Larvae	<i>Pisodonophis sangjuensis</i>
East China Sea	Larvae	Pleuronectidae sp.
East China Sea	Larvae	Pleuronectiformes sp.
East China Sea	Larvae	<i>Psettina tosana</i>
East China Sea	Larvae	<i>Rhinogobius leavelli</i>
East China Sea	Larvae	<i>Saurenhelys</i> sp.
East China Sea	Larvae	<i>Saurida elongata</i>
East China Sea	Larvae	<i>Saurida wanieso</i>
East China Sea	Larvae	<i>Scomber japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Scorpaena neglecta</i>
East China Sea	Larvae	<i>Sebastiscus marmoratus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Seriola quinqueradiata</i>
East China Sea	Larvae	<i>Sillago japonica</i>
East China Sea	Larvae	<i>Synagrops philippinensis</i>
East China Sea	Larvae	<i>Syngnathus schlegeli</i>
East China Sea	Larvae	Synodontidae sp.
East China Sea	Larvae	<i>Synodus macrops</i>
East China Sea	Larvae	<i>Trachurus japonicus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Trichiurus lepturus</i>
East China Sea	Larvae	<i>Tanakius kitaharae</i>
East China Sea	Larvae	<i>Trichiurus japonicus</i>

Table S3. Sample information and sequence-processing statistics for the 41 pooled fish egg DNA metabarcoding libraries

Sea area	Season	Station	Raw data	Adapter & Primer Trimming	Quality Filter	denoisedFor	denoisedRev	mergedPair	non-chimeric	ASV Length Filter
West Sea	Summer	307-03	484,832	477,442	472,005	471,453	471,386	464,388	460,058	460,058
West Sea	Summer	307-05	512,698	504,791	500,247	499,874	499,749	490,293	489,039	489,039
West Sea	Summer	309-03	447,122	439,806	435,738	435,437	435,551	428,362	404,746	404,735
West Sea	Summer	311-05	513,817	505,434	500,709	500,362	500,297	484,867	470,308	470,308
West Sea	Summer	311-07	495,748	487,658	483,340	482,947	482,889	476,638	464,839	464,839
West Sea	Summer	312-03	465,707	458,077	453,653	453,317	453,439	443,564	429,399	429,399
West Sea	Summer	312-05	496,749	488,663	484,085	483,800	483,875	472,802	461,900	461,900
East China Sea	Summer	315-12	476,410	469,229	464,718	464,000	464,340	457,430	440,137	440,137
East China Sea	Summer	315-13	483,674	476,031	471,865	470,879	471,262	464,439	462,820	462,818
East China Sea	Summer	316-12	488,238	480,489	475,295	474,517	474,696	466,651	445,634	445,632
East China Sea	Summer	317-19	507,604	499,425	495,224	494,854	494,703	483,665	448,332	448,328
South Sea	Summer	203-01	544,097	535,231	530,587	529,589	530,026	517,328	491,405	491,401
South Sea	Summer	203-03	399,491	392,969	389,757	389,295	388,801	383,905	368,464	368,464
South Sea	Summer	204-04	484,043	475,900	471,821	471,438	471,397	464,437	416,379	416,379
South Sea	Summer	205-03	463,010	454,948	450,962	450,560	450,575	439,369	419,435	419,433
South Sea	Summer	205-05	460,172	452,834	446,402	446,036	445,993	439,852	434,001	433,976
South Sea	Summer	206-03	573,808	564,931	557,001	556,239	556,480	548,878	520,990	520,982
South Sea	Summer	207-03	565,125	556,699	548,935	547,761	548,198	534,079	497,702	497,702
South Sea	Summer	314-03	551,756	543,397	536,020	535,169	535,406	526,767	515,733	515,733
South Sea	Summer	314-07	535,463	527,331	522,122	521,870	521,926	515,509	484,046	484,011
West Sea	Autumn	307-05	548,330	539,752	533,946	533,143	533,335	512,182	470,826	470,815
West Sea	Autumn	307-07	518,987	510,994	504,518	503,925	503,995	489,457	450,464	450,307
East Sea	Autumn	209-03	432,698	425,680	420,775	420,311	420,317	407,758	382,430	382,430
East Sea	Autumn	209-05	430,662	424,355	420,200	419,937	419,985	410,123	410,102	410,102
West Sea	Autumn	312-03	371,437	365,553	362,395	362,110	362,222	359,123	356,612	356,610
South Sea	Summer	400-25	359,461	353,927	350,192	349,839	349,850	345,472	344,872	344,872
East China Sea	Autumn	315-12	515,913	507,598	502,757	502,228	502,288	492,968	491,783	491,783
East China Sea	Autumn	315-13	424,656	417,920	412,594	412,074	412,338	407,754	407,693	407,693
East China Sea	Autumn	316-12	445,084	438,112	432,501	432,192	432,244	428,345	428,332	428,332
East China Sea	Autumn	316-22	411,243	404,721	400,606	400,351	400,300	396,822	396,663	396,556
East China Sea	Autumn	317-22	324,571	319,415	316,263	316,049	316,102	310,562	310,469	310,469
South Sea	Autumn	203-03	492,343	484,926	479,398	478,730	479,074	471,767	467,545	467,545
South Sea	Autumn	204-04	529,121	521,320	517,006	516,557	516,736	510,425	508,059	508,059
South Sea	Autumn	205-03	593,021	584,076	579,121	578,465	578,424	568,146	562,797	562,789
South Sea	Autumn	207-03	536,613	528,392	524,348	524,035	524,019	512,987	512,977	512,977
South Sea	Autumn	313-03	450,611	443,790	440,403	440,046	439,953	431,761	431,589	431,589
South Sea	Autumn	314-03	479,404	472,588	468,955	468,559	468,681	457,111	450,918	450,918
South Sea	Autumn	314-05	414,679	409,313	405,874	405,399	405,339	401,117	400,379	400,379
South Sea	Autumn	400-14	351,725	347,189	344,408	343,906	344,112	336,003	328,658	328,635
South Sea	Autumn	400-25	256,956	253,352	250,570	249,986	250,254	245,941	245,076	245,076
South Sea	Autumn	400-27	404,271	398,431	394,297	393,920	393,899	388,781	388,140	388,140