KFAS 한국수산과학회지 Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences
한수지 58(4), 341-352, 2025

Original Article
Korean J Fish Aquat Sci 58(4),341-352,2025

울릉도 해역의 어란 및 자치어 종조성과 해양환경 변화에 따른 시 · 공간적 변동(2021–2024)

신의철 · 김은호* · 윤석진[1] · 서영일

국립수산과학원 독도수산연구센터, [1]국립수산과학원 연근해자원과

Species Composition of Ichthyoplankton and Spatio-Temporal Variations in Relation to Marine Environmental Changes around Ulleungdo (2021-2024)

Ui-Cheol Shin, Eun-Ho Kim*, Seok-Jin Yoon[1] and Young-Il Seo

Dokdo Fisheries Research Center, National Institute of Fisheries Science, Pohang 37709, Republic of Korea
Fisheries Resources and Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

In response to increasing sea surface temperatures and the intensified Tsushima Warm Current in the East Sea, ichthyoplankton were seasonally sampled from 2021 to 2024 around Ulleungdo to assess species composition changes and evaluate spawning and nursery functions. Sampling was conducted at eight stations using bongo and ring nets, and environmental data were recorded with CTD. Fish eggs and larvae were identified morphologically, and COI gene analysis was applied to morphologically ambiguous samples. A total of 37 egg and 48 larval species were identified, with Engraulis japonicus and Maurolicus japonicus dominant in both stages. Cluster and SIMPER analyses revealed interannual variation in eggs and spatial differentiation of larvae after 2023, largely influenced by E. japonicus and M. japonicus. No significant correlation was found with temperature or salinity. However, the increased presence of warm-current larval species in 2023 and 2024, such as Thunnus orientalis, Champsodon snyderi, and Scomber japonicus, coincided with strengthened surface currents, suggesting possible transport from external spawning grounds. The continuous appearance of dominant coastal species supports the role of Ulleungdo as a stable spawning ground, while the irregular occurrence of warm-water species larvae suggests the potential use of the area as a nursery ground under changing oceanographic conditions.

Keywords: Ichthyoplankton, Species composition, Ulleungdo, East Sea, Spawning and nursery ground

서 론

울릉도 주변해역은 난류와 한류가 만나 극전선을 형성한다. 극전선은 대마난류의 세기에 따라 해마다 남북방향으로 크게 이동하며, 그 변동성은 크다(Lee and Niiler, 2010; Chung et al., 2015). 또한, 울릉도는 고립된 섬 지형과 깊은 수심의 영향으로 섬효과에 의한 용승이 유발되며(Palacios, 2002), 이로 인해 높은 기초생산력이 유지된다(Lee et al., 2020). 아울러 해저에는 암반, 모래, 해조류 군락 등 다양한 저서 서식지를 형성하고 있으며, 어류의 산란과 성육에 적합한 환경을 제공한다(Kang et al., 2013; Kim et al., 2016). 난자치어의 분포 여부는 어류의 산란장 및 성육장 이용 실태를 반영하는 중요한 생태 지표이다. 그러므로 난자치어의 분포형태는 연안 및 외해 해역의 생태계 구조와 자원 변동을 이해하는 데 효과적인 자료를 제공한다(Shin et al., 2021; Moon et al., 2022). 특히 난자치어는 해양환경 변화에 민감하게 반응하기 때문에 수온, 염분, 해류 등의 변화에 따른 생태계 반응 및 어종 분포 변화를 파악하는 데도 유용하다(Choi et al., 2022; Yen et al., 2022). 또한, 어업자원관리 측면에서는 특정 어종의 가입 성공률을 간접적으로 추정할 수 있어, 지속가능한 자원 평가 및 보전 전략 수립에 기초자료로 활

*Corresponding author: Tel: +82. 54. 724. 1010 Fax: +82. 54. 724. 1088
E-mail address: kimeunho4@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.2025.0341
Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 341-352, August 2025
Received 5 June 2025; Revised 21 July 2025; Accepted 18 August 2025
저자 직위: 신의철(인턴연구원), 김은호(연구사), 윤석진(연구사), 서영일(연구관)

용된다(Fuiman and Werner, 2002; Miller and Kendall, 2009).

울릉도 해역에서의 연구는 해양환경과 주로 해조류, 저서생물, 어류 등의 생물을 중심으로 이루어져 왔다(Yoon et al., 2007; Chung et al., 2015; Kim et al., 2016, 2023). 그러나 어류의 초기 생활사에 해당하는 어란과 자치어를 대상으로 한 연구는 독도와 동해 근해에서만 이루어 졌다(Shin et al., 2021; Choi et al., 2022). 따라서 울릉도 해역을 중심으로 난자치어 출현 양상을 체계적으로 분석한 사례는 드물며, 이 해역이 어류의 산란장 및 성육장으로서 어떠한 기능을 수행하는지에 대한 생태학적 평가가 필요하다.

최근에는 동해에서 북태평양 고기압의 확장과 난류의 수송량 증가로 인한 여름철 고수온 현상이 증가하고 있다(Lee and Park, 2019; Han et al., 2023). 또한 국립수산과학원의 해양기후모델 예측에 따르면, 21세기 중반 이후 동해 해역의 표층 수온이 급격히 상승할 것이라고 보고하였다(Kim et al., 2024). 이러한 변화는 어류의 산란장 및 성육장 이용에도 영향을 미칠것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 2021년부터 2024년까지 울릉도 주변 해역에서 채집된 난자치어 자료를 분석하여, 울릉도 해역의 산란장 및 성육장으로서의 생태학적 기능을 알아보고자 한다. 구체적으로는 첫째, 연간 및 정점별 난자치어의 종조성 변화를 파악하고, 둘째, 해양환경과 난자치어 출현과의 관계를 알아봄으로써 울릉도 해역이 안정적인 산란장 또는 성육장으로서의 기능과 잠재적 가능성을 지닌 해역인지에 대해 평가하고자 한다.

재료 및 방법

울릉도 주변에 분포·서식하는 어란과 자치어를 알아보기 위해 2021년부터 2024년까지 울릉도 주변 8개 정점(37°25'N–37°35'N, 130°40'E–131°00'E)에서 연 4회, 4년간 총 11회 채집하였다(Fig. 1). 단, 2021년에는 외해 정점에서만 수행되었다. 수심 100 m 이내인 4개정점(W1–W4)을 울릉도 연안 정점, 수심 500 m 이상인 4개 정점(U1–U4)을 울릉도 외해 정점으로 구분하였다. 연안 정점에서는 RN80네트(망구 지름 80 cm, 망목 330 μm)를 사용하여 수심 100 m까지 수직채집을 실시하였고, 외해 정점에서는 봉고네트(망구 지름 80 cm, 망목 330, 500 μm)를 사용하여 표층부터 200 m까지 경사채집을 실시하였다. 네트로 여과된 해수의 양은 유량계(Hydro Co., USA)를 이용하여 측정하였으며, 조사정점별 수온과 염분은 CTD (SBE911 plus; Sea-bird electronics, Bellevue, WA, USA)를 이용하여 관측하였다. 또한, 울릉도 해역의 해류 흐름 및 해양환경 특성을 정성적으로 파악하기 위해 CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)에서 제공하는 global ocean physics reanalysis (interim version) 자료 GLOBAL_MULTI-YEAR_PHY_001_030를 활용하였다. 2021년부터 2024년까지 각 조사 시기의 월평균 표층 유속 자료를 바탕으로 해류의 방향을 시각화하였으며, 시각화는 ocean data view (version 5.7.1; Schlitzer, 2023)를 이용하여 수행하였다.

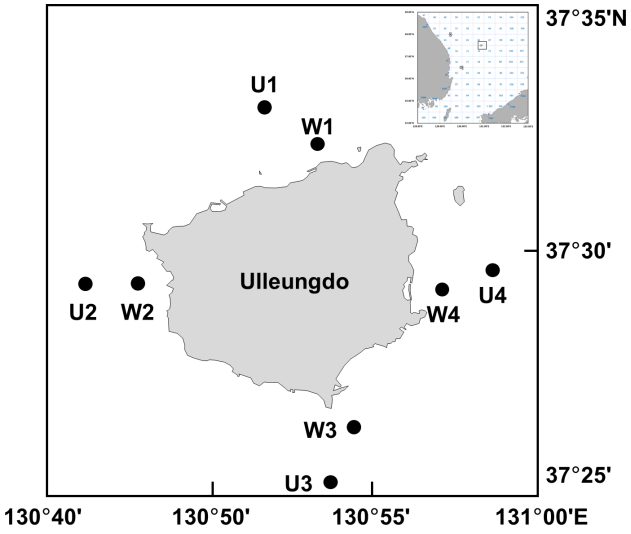

Fig. 1. Map showing the eight sampling stations for fish eggs and larvae around Ulleungdo from 2021 to 2024.

네트로 채집한 시료는 95% 에탄올로 고정한 후 실험실로 운반하여 해부현미경(SZH-10; Olympus, Tokyo, Japan)을 이용하여 종 동정하였다. 종 동정은 난경, 난막의 질, 흑색소포의 분포, 지느러미 발달 등의 외부형태형질을 확인하였고, Ji et al. (2020)과 Okiyama (2014)를 참고하여 종 수준까지 동정하였다. 형태 동정이 불가능한 어란과 자치어는 분자생물학적 동정을 통해 보완하였다. 10% Chelex 100 Resin (Bio-Rad, Hercules, CA, USA)을 이용하여 Total DNA를 추출하였다. 중합효소연쇄반응(polymerase chain reaction, PCR)은 미토콘드리아 DNA의 cytochrome c oxidase subunit I (COI) 영역을 대상으로 VF2 (5'-TCA ACC AAC CAC AAA GAC ATT GGC AC-3')와 FishR2 (5'-ACT TCA GGG TGA CCG AAG AAT CAG AA-3') 프라이머(Ward et al., 2005)를 이용하여 증폭하였다. PCR은 다음과 같은 조건에서 수행하였다[Initial denaturation 95°C, 5 min; PCR reaction 37 cycle (denaturation 94°C, 30 sec; annealing 52°C, 30 sec; extension 72°C, 1 min); final extension 72°C, 7 min]. 염기서열은 ABI 3730XL DNA analyzer에서 ABI prism big dye terminator v3.1 ready reaction cycle sequencing kit (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA)를 이용하여 얻었다. COI 염기서열의 정렬은 BioEdit (ver. 7) (Hall, 1999)의 Clustal W (Thompson et al., 1994)를 이용하였고, 정렬된 염기서열은 NCBI (National Center for Biotechnology Information) genbank database에 등록하였다(PV993760-PV993814). 염기서열은 기존에 등록된 성어의 염기서열과 비교하였다. 유전적 거리는 MEGA X (Kumar et al., 2018)의 pairwise distance를 Kimura-2-parameter모델(Kimura, 1980)로 계산하였고, 개체 간의 유연관계를 나타내기 위해 근린결합

수를 작성하여 분석하였으며, bootstrap은 1,000번 수행하였다.

동정한 어란과 자치어는 각 분류군 별로 계수한 후 1,000 m^3당 개체수(inds./1,000 m^3)로 환산하였고, 봉고네트를 사용하여 채집한 경우에는 네트 한 쌍(330, 500 μm)의 자료를 평균하였다. 종 동정 결과, 우점종의 비율은 높았고, 우점종 이외 다양한 어종이 출현하긴 하였으나 그 양이 적어 루트변환 후 군집분석을 수행하였다. 군집 구조 분석은 Bray-Curtis 유사도 지수(Bray and Curtis, 1957)를 기반으로 한 계통도 분석(Cluster analysis)을 하였으며, 군집 간의 유사성은 비모수 다차원척도법(non-metric multidimensional scaling)을 이용하여 시각화하였다. 또한, 각 군집 간 차이에 기여한 종을 확인하기 위해 SIMPER (similarity percentages) 분석을 실시하였다. 모든 분석은 primer v7 statistical package (Clarke and Gorley, 2015)를 사용하였다. 그리고, 종 다양도 지수(Shannon and Weaver, 1964)와 종 풍부도 지수(Margalef, 1958), 종 균등도 지수(Pielou, 1966)를 통해 생태적 특성도 비교하였다. 연도 및 정점간 종조성과 환경의 차이는 PERMANOVA로 검정하였으며, 종 조성과 수온 및 염분 간의 상관성은 정준 대응분석(canonical correspondence analysis, CCA)을 이용하여 평가하였다. 두 분석 모두 R소프트웨어(R Core Team, 2025)의 vegan 패키지(Oksanen et al., 2025)를 이용하여 분석하였다.

결 과

종조성

형태 동정을 통해 어란과 자치어는 종 수준까지 확인하였다. 그러나, 일부 형태적으로 구분이 어려운 시료에 대해서는 COI 영역(444 bp)에서 분자생물학적 분석을 수행하였다. 그 결과, 성어의 염기서열과 98.6–100% 일치하여 종 수준까지 정확히 동정되었으며, 관련 계통수는 부록 Fig. A1에 제시하였다. 이후 동정된 자료를 바탕으로 각 시기별 종 조성의 변화를 분석하였다.

2021년부터 2024년까지 울릉도 주변해역에서 출현한 어란은 총 37종이었다(Table 1). 그 중 멸치(*Engraulis japonicus*)의 출현비율은 평균 49.5%로 가장 많았으며, 다음으로 앨퉁이(*Maurolicus japonicus*)가 37.0%로 많았다. 이 두 종은 연도에 따라 출현량이 크게 변동하였다. 그 외에 참돔(*Pagrus major*), 혹돔(*Semicossyphus reticulatus*), 돌돔(*Oplegnathus fasciatus*) 등 다양한 어종이 안정적으로 출현하였으나 우점도는 낮은 수준이었다.

자치어는 총 48종이 출현하였고, 이 중 멸치는 전체 자치어 출현량의 78.5%를 차지하며 극우점하였다. 특히, 2023년 외해정점에서는 이전해보다 2.5배 더 많았다(Table 2). 이어서 앨퉁이(15.1%)와 자리돔(*Chromis notata*; 2.5%)은 조사기간 전반에 걸쳐 안정적으로 출현하였다. 2023년 이후 연안 정점에서는 큰미끈망둑(*Luciogobius grandis*), 미역치(*Paracentropogon rubripinnis*), 황놀래기(*Pseudolabrus sieboldi*)와 같은 연안정착성 어종이 출현하였으며, 외해 정점에서는 참다랑어(*Thunnus orientalis*), 악어치(*Champsodon snyderi*), 날붕장어(*Echelus uropterus*), 고등어(*Scomber japonicus*)와 같은 난류성 어종이 주로 출현하였다.

군집분석

군집구조 분석결과, 어란은 유사도 60% 수준에서 연도에 따라 세 개의 주요 그룹으로 구분되었다(Fig. 2A). 2021년과 2022년 연안과 외해 정점이 Group 1, 2023년 연안과 외해 정점이 Group 2, 2024년 연안과 외해정점이 Group 3으로 형성되었다. SIMPER분석 결과, Group 1에서는 앨퉁이와 멸치가 각각 평균 유사도 28.7%, 15.1%로 주요 기여종으로 나타났다. Group 2에서는 멸치(39.5%), Group 3에서는 앨퉁이(69.8%)의 기여도가 높게 나타났다. 그룹 간 비교에서는 멸치와 앨퉁이의 출현량 차이가 주요한 분리 요인으로 작용하였으며, 2023년과 2024년에는 난류성 어종의 출현이 군집 간 이질성에 추가적인 영향을 미쳤다.

자치어의 군집 분석 결과, 2021년과 2022년의 모든 정점이 Group 1으로 묶였으며, 2023년부터는 연안과 외해 정점이 각각 독립적인 군집(Group 2–5)으로 분리되는 경향을 보였다(Fig. 2B). SIMPER분석에서는 멸치가 60.7%, 앨퉁이가 31.7%로 군집 유사성에 크게 기여하였다. 그룹 간 비교에서는 2024년 외해 정점이 다른 그룹과 유사성이 가장 낮았다. 이는 멸치와 앨퉁이 이외에도 일부 난류성 어종의 출현이 군집 간 이질성을 높이는 데 기여한 것으로 나타났다.

PERMANOVA분석에서도 어란은 연도 간 유의한 차이가 확인되었으며(R^2=0.809, P=0.011), 연안과 외해 간에는 유의한 차이가 나타나지 않았다(P=0.725). 두 요인을 모두 포함한 통합 모델에서도 어란의 연간 차이는 유의성이 있는 것으로 확인되었다(R^2=0.894, P=0.007). 따라서, 어란의 종조성은 주로 연도에 따라 변화하는 것으로 추정된다.

자치어는 통합 모델에서 통계적으로 유의한 차이가 있었고(R^2=0.789, P=0.044), 정점유형은 경계선 수준의 유의성을 보였다(P=0.085). 반면, 연도 단독 요인은 유의하지 않았다(P=0.524). 이는 자치어 단계에서는 공간적 요인이 종 조성 차이에 더 큰 영향을 미친 것으로 나타났다.

생태지수

생태지수 분석 결과는 군집 구조의 변화와 유사한 양상을 보였다(Table 3). 어란의 경우, 2023년과 2024년에 멸치 또는 앨퉁이의 집중 출현으로 인해 종 다양도 및 균등도 지수가 낮았으며, 출현 종수와 풍부도 또한 전반적으로 감소하였다. 특히, 2024년 연안 정점에서는 출현 종수가 가장 적었고 생태지수 값 또한 낮았다.

2021–2023년 자치어의 생태지수는 어란의 생태지수와 유사한 경향이었다. 그러나 2024년에는 외해 정점에서 멸치의 출현

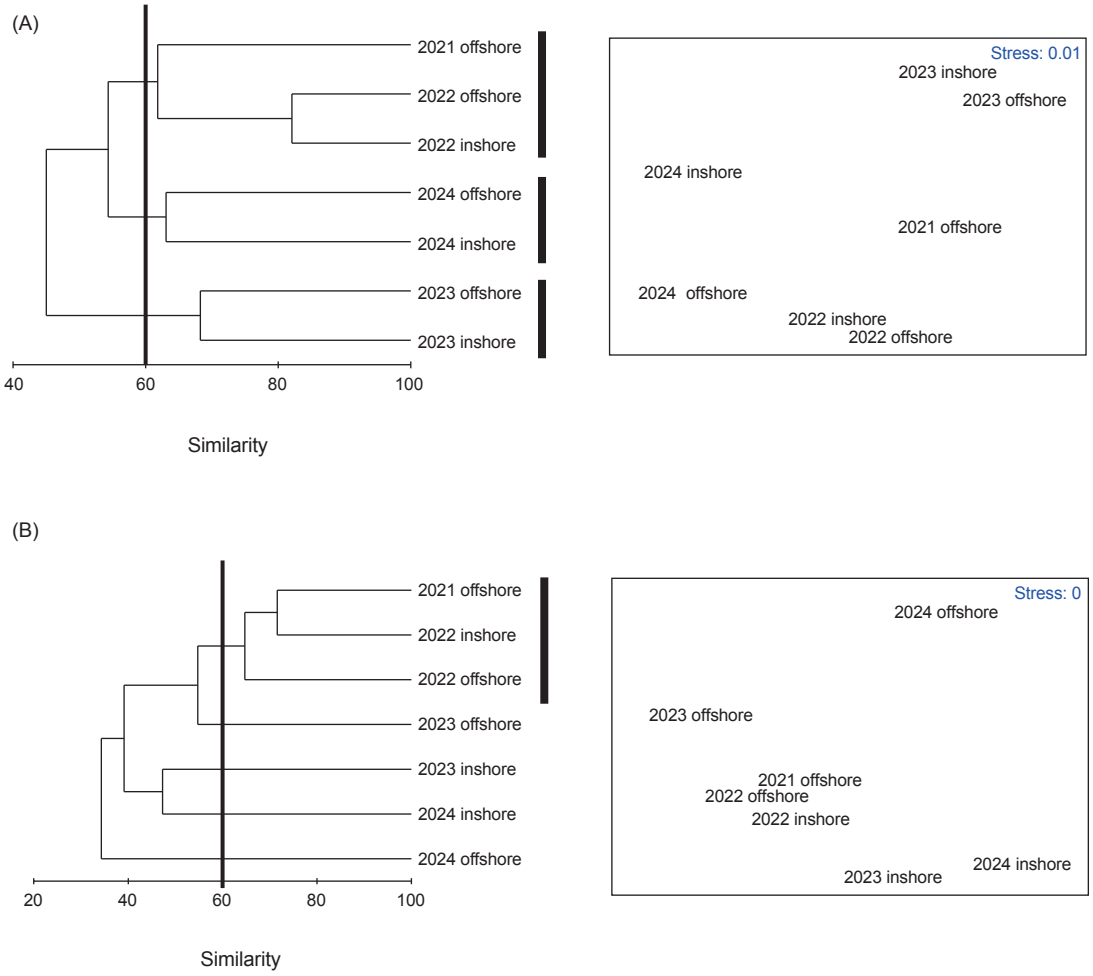

Fig. 2. Cluster analysis and non-metric multidimensional scaling (nMDS) plots showing the similarity in species composition of ichthyoplankton based on Bray-Curtis similarity of square-root-transformed abundance data. A, Fish eggs; B, Fish larvae. Vertical lines in dendrograms indicate the 60% similarity level. Stress values for the nMDS plots are shown in the upper right corner.

량이 줄어들고 다양한 난류성 어종이 출현하면서 종 다양도, 풍부도, 균등도가 상승하는 회복 양상을 보이며, 2021–2023년과는 차이가 있었다. 어란과 자치어 모두에서 연안 정점은 연도 간 비교적 안정적인 생태지수를 유지한 반면, 외해 정점은 연도별 변동 폭이 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

수온 및 염분의 분포특성

연도별 표층평균수온은 2022년에 24.8°C로 가장 낮았고, 2023년에 27.1 °C로 가장 높게 나타났다. 표층 염분은 연도별로 비교적 일정한 값을 유지하였다(34.2–34.5 psu). 정점유형 간 비교에서는, 동일한 조사시기에서 외해 정점이 연안 정점에 비해 비교적 수온이 높고 염분도 높은 경향을 보였다. 그러나 수온과 염분의 수직 분포에 대한 PERMANOVA분석 결과, 정점 유형과 연도 각각 통계적 유의한 차이는 없었으며, 정점 유형과 연도를 동시에 적용한 결과 또한 유의한 차이가 나타나지 않았다(P>0.05).

수온 및 염분과의 관계

CCA 결과, 어란과 자치어 모두 수온 및 염분과의 관계에서 뚜렷한 군집 분포 경향이나 유의한 상관성은 나타나지 않았다(Fig. 3). 어란의 경우, 주요 축의 설명력이 낮고 통계적으로 유의하지 않았다(P>0.05; Fig. 3A). 자치어의 경우에도 전체 모델 및 축별 분석 모두에서 유의성이 확인되지 않았다(Fig. 3B).

고 찰

본 연구에서는 2021년부터 2024년까지 울릉도 해역에서 채집된 어란과 자치어 자료를 바탕으로 종조성, 군집 구조, 생태지수, 그리고 수온 및 염분과의 관계를 종합적으로 분석하였다.

Table 1. Temporal and spatial variation in fish egg composition around Ulleungdo, 2021–2024

(inds./1,000m³)

	2021	2022		2023		2024	
	Offshore	Inshore	Offshore	Inshore	Offshore	Inshore	Offshore
Maurolicus japonicus	97	227	205	38	41	262	124
Paracentropogon rubripinnis	9	6	7	1	+	2	1
Semicossyphus reticulatus	8	1	+	7	9	3	1
Pagrus major	7	2	1	15	13	8	1
Oplegnathus fasciatus	9	+	4		9	1	+
Hyperoglyphe japonica	+	1	3	6	1	8	
Engraulis japonicus	36	42	36	211	515		+
Paralichthys olivaceus	3		+	2	3	5	+
Acanthopsetta nadeshnyi	1	1	1		1		+
Auxis rochei	+	5	8	2	1		
Trachurus japonicus	1	1	2		8		
Parajulis poecilepterus	1		5	3	3		
Seriola quinqueradiata	8			2	11		
Seriola aureovittata	2			1	38		
Halichoeres tenuispinis	2		1		3		
Microstomus achne	+				+		
Evynnis cardinalis	2						
Girella punctata	+						
Uranoscopus japonicus	+						
Coryphaena hippurus		2	3	2	+		+
Hime japonica		1		1	+		
Repomucenus valenciennei		+	1		2		
Pseudolabrus sieboldi		2	1				
Parapercis decemfasciata		1				1	
Lotella phycis		+			+		
Gnathophis heterognathos		+		1			
Glossanodon semifasciatus			+				
Zebrias japonicus			+				
Pleuronichthys cornutus				2	+	2	+
Scomber japonicus				1	+		
Cleisthenes pinetorum					+		+
Thunnus orientalis					+		
Etrumeus micropus						1	+
Synodus sp.							+
Glyptocephalus stelleri							1
Acanthopagrus schlegelii							+
Others	+						
Total	184	293	275	295	658	291	130

+<0.5.

그 결과, 어란과 자치어는 각각 연도별, 공간별로 뚜렷한 종조성 차이를 보였으며, 일부 시기에는 난류성 어종의 증가가 확인되었다. 이러한 차이는 해양환경의 변화 및 어종 생태 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 보인다.

Table 2. Temporal and spatial variation in fish larvae composition around Ulleungdo, 2021–2024

(inds./1,000m³)

	2021	2022		2023		2024	
	Offshore	Inshore	Offshore	Inshore	Offshore	Inshore	Offshore
Maurolicus japonicus	8	23	11	13	5	15	6
Chromis notata	+	+	+	8	1	4	+
Engraulis japonicus	38	31	99	12	240		1
Scorpaena onaria	+		+				+
Sebastiscus marmoratus	+					1	+
Bothidae sp.	+						+
Paracentropogon rubripinnis	+					1	
Glossanodon semifasciatus	+						+
Parascombrops philippinensis	+						
Symphurus longirostris	+						
Bregmaceros nectabanus	+						
Hexagrammos otakii	+						
Oxyurichthys sp.	+						
Thunnus orientalis		+	1		+		+
Calliurichthys japonicus		1	+				
Ophisurus macrorhynchos		+					
Halichoeres tenuispinis			+				+
Gobiidae sp. 1			+				+
Sebastes pachycephalus			1				
Auxis rochei			+				
Labroides dimidiatus			+				
Carangidae sp.			+				
Benthosema pterotum			+				
Sebastes owstoni				6			
Luciogobius sp.				1			
Luciogobius grandis				1			
Gobiidae sp. 2					+		+
Opistognathidae sp. 1					+		+
Champsodon snyderi					+		1
Pseudolabrus sieboldi					+		
Echelus uropterus					+		
Repomucenus virgis					+		
Tetraodontidae sp.					+		
Trichiurus japonicus					+		
Pseudopleuronectes yokohamae					+		
Scomber japonicus					+		
Sebastes schlegelii						1	
Pseudanthias squamipinnis							+
Eviota prasina							+
Callanthias japonicus							+
Callionymidae sp.							+
Acanthocepola limbata							+
Ostorhinchus semilineatus							+
Hippocampus sp.							+
Lophius litulon							+
Parapriacanthus ransonneti							+
Opistognathidae sp. 2							+
Others							+
Total	47	56	112	41	248	23	10

+<0.5

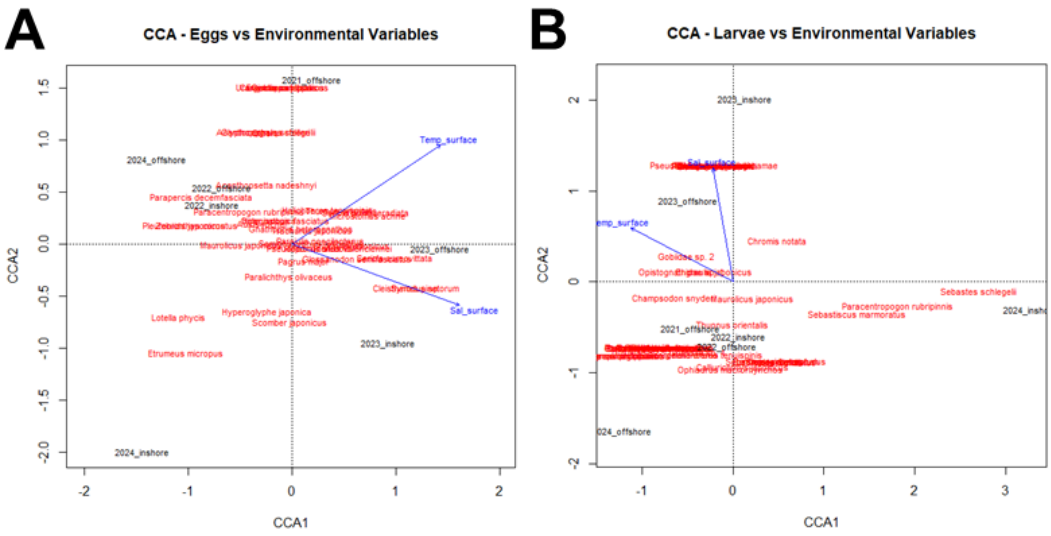

Fig. 3. Canonical correspondence analysis (CCA) plots illustrating the relationship between species composition and environmental variables in the Ulleungdo waters. A, Fish eggs; B, Fish larvae. Red labels species, and blue arrows indicate environmental variables (temperature and salinity).

연도별로는 어란에서 멸치와 앨퉁이의 출현 양상이 급격히 변동하였고, 자치어에서는 2023년 이후 연안과 외해 정점 간의 군집 분화가 뚜렷하게 나타났다. 멸치는 동해에서 대표적인 연안 회유성 어종으로, 연안 수온 및 먹이 환경에 따라 산란 시기와 장소를 조절하는 경향을 보인다(Kim and Lo, 2001; Yoneda et al., 2014). 이러한 특성은 Bang et al. (2022)의 수치 모델 분석에서도 확인되었으며, 산란 활동이 환경요인(수온, 클로로필-a, 표층 유속 등)의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 이와 달리 앨퉁이는 주로 심해층에서 서식하지만, 여름철에는 표층 혼합층으로 이동하여 산란하는 특성을 보이며, 산란 시기와 장소는 수온 및 수직 수괴 구조에 따라 달라질 수 있다(Watanabe et al., 2010; Paraboles et al., 2019). 이들 종의 일시적 대량 출현은 혼합층의 두께 변화나 표층 수온의 변동 등 환경 조건의 변화로 인해, 산란개체군의 일시적 이동 또는 산란 활동이 집중적으로 발생했을 가능성이 있다. 자치어 군집에서는 정착성 어종이 연안 정점에서 집중적으로 나타난 반면, 난류성 어종은 주로 외해 정점에서 출현하였다. 이러한 시·공간적 종조성 차이는 울릉도 해역이 어종별로 서로 다른 생태적 역할을 수행하는 해역임을 뒷받침하는 중요한 근거가 된다.

Table 3. Ecological indices of fish eggs and larvae at inshore (W1–W4) and offshore (U1–U4) stations around Ulleungdo, 2021–2024

	Inshore (W1-W4)			Offshore (U1-U4)			
	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
Eggs							
Number of species	17	16	10	20	18	24	15
Diversity index	0.87	1.14	0.52	1.62	1.02	0.98	0.30
Richness index	2.82	2.64	1.51	3.64	3.03	3.54	2.72
Evenness index	0.31	0.41	0.22	0.54	0.35	0.31	0.11
Larvae							
Number of species	6	6	5	11	13	14	23
Diversity index	0.83	1.52	1.04	0.61	0.47	0.18	1.86
Richness index	1.24	1.34	1.28	2.59	2.54	2.36	9.47
Evenness index	0.46	0.85	0.64	0.25	0.18	0.07	0.59

조사기간 동안 수온과 염분은 큰 변동 없이 비교적 안정적인 수직 분포를 보였다($P>0.05$). CCA 결과에서도 수온과 염분에 의한 어란과 자치어의 군집 구조는 유의한 관련을 보이지 않았다. 이는 조사 기간이 4년으로 상대적으로 짧고, 장기적인 수온 상승 경향을 통계적으로 반영하기 어려웠기 때문일 수 있다. 실제로 동해 해역의 장기 관측에서는 수온 상승 경향이 보고되었으며(Yoon et al., 2007), 해양기후모델은 21세기 중반 이후 표층 수온의 추가 상승을 예측하고 있다(Kim et al., 2024). 또한, 다수의 희귀종 출현과 적은 출현량을 보인 다양한 어종의 출현이 민감도를 낮춘 요인으로 작용했을 가능성이 있다(Clarke and Warwick, 2001). 따라서 어란과 자치어의 시공간적 분포를 보다 정밀하게 이해하기 위해서는 해류, 클로로필-a, 영양염, 먹이생물 분포 등 다양한 환경요인의 통합적 고려가 필요하다(Bang et al., 2022; Choi et al., 2022).

한편, 어란 및 자치어의 출현 양상은 해류와 같은 동적인 환경요인과도 일정 부분 연관되었을 가능성이 있다. CMEMS 재분석 자료에 따르면(Fig. 4), 2021년과 2022년에는 표층 해류가 울릉도 남서부 인근에 국한되어 흐름의 강도와 범위가 제한

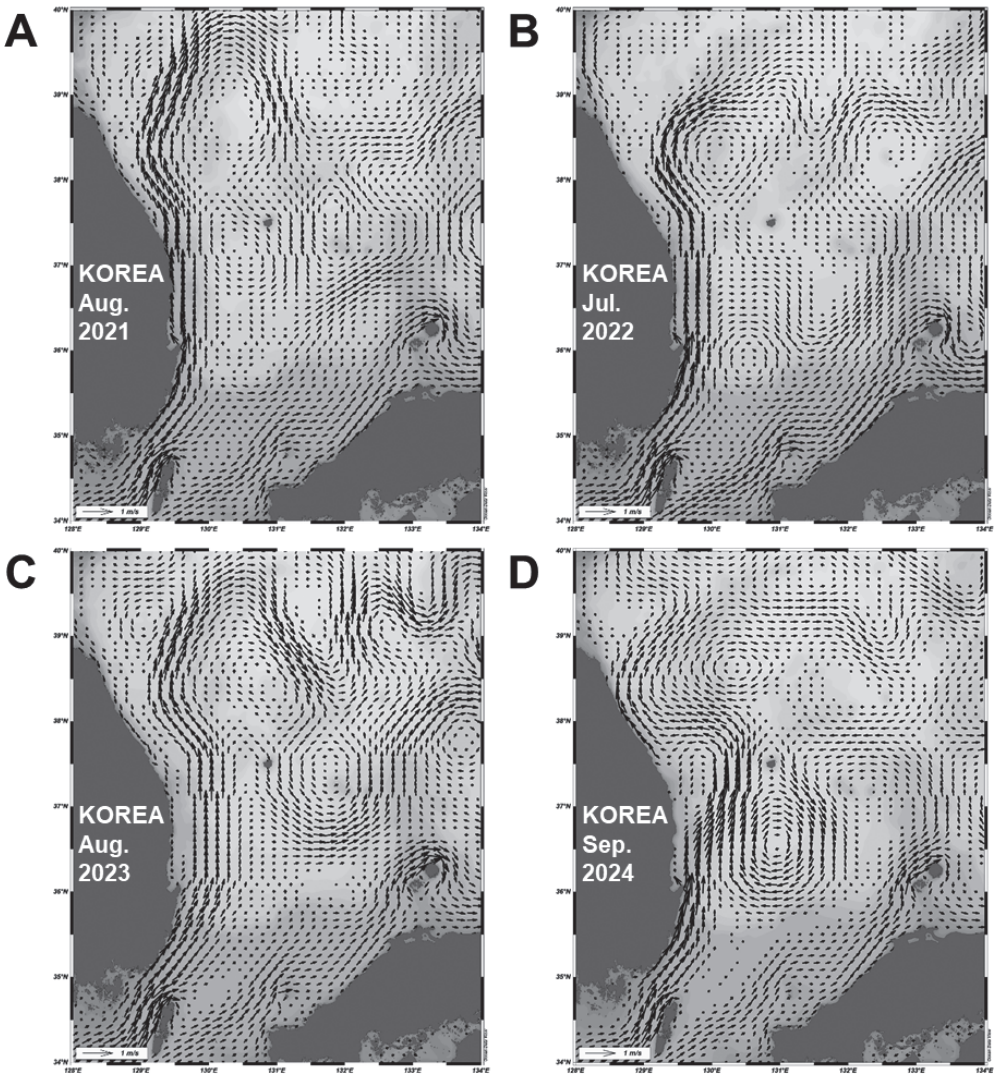

Fig. 4. Surface current vector fields around Ulleungdo in (A) August 2021, (B) July 2022, (C) August 2023, and (D) September 2024. Vectors are derived from CMEMS reanalysis data and visualized using Ocean Data View. The scale bar represents 1 m/s. CMEMS, Copernicus marine environment monitoring service.

적이었다(Fig. 4A, 4B). 반면 2023년에는 울릉도 남측에서 유입된 해류가 동부 해역을 지나 북동측 외해 정점 방향으로 확장되는 흐름이 일부 관찰되었고(Fig. 4C), 2024년 9월에는 이러한 흐름이 더욱 뚜렷해지며, 외해 정점까지 연결되는 강한 해류 경로가 형성되었다(Fig. 4D). 이러한 해류 확장은 난류성 어종의 산란장 접근과 초기 생활사 단계의 분산 가능성을 높이고, 외해역에서의 어란 및 자치어 밀도 증가와도 일정 부분 연계된 것으로 판단된다. 실제로 2023년 외해 정점에서는 멸치의 대량 출현이 확인되었고, 이는 당시 형성된 적정 수온대와 전선역에 따라 산란 활동이 활발했거나 외부 산란장에서 유입된 개체가 도달했을 가능성이 있다(Choo and Kim, 1998; Tsuruta, 2001). 또한, 2024년 외해 정점에서는 참다랑어, 악어치, 금강바리(*Pseudopleuronectes yokohamae*) 등 다양한 난류성 어종의 자치어 출현이 증가하였는데, 이는 대마난류의 확장과 같은 해류 변화가 종조성의 시기적·공간적 차이에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

본 연구는 울릉도 해역에서 어란의 안정적인 출현과 자치어 분포의 공간적 차이를 확인하였다. 그 결과, 울릉도 해역은 다양한 어종의 산란장 및 성육장 기능을 동시에 수행하고 있음을 알 수 있었다. 어란의 경우, 미역치, 혹돔, 황놀래기 등 연안 정착성 어종부터 참다랑어, 고등어, 방어(*Seriola quinqueradiata*), 전갱이(*Trachurus japonicus*) 등 회유성 어종까지 다양한 생태적 특성을 지닌 어종들이 매년 반복적으로 출현하였다(Fig. 5A–5D). 또한, 참돔, 돌돔, 방어, 황놀래기 등의 난자치어 출현은 과

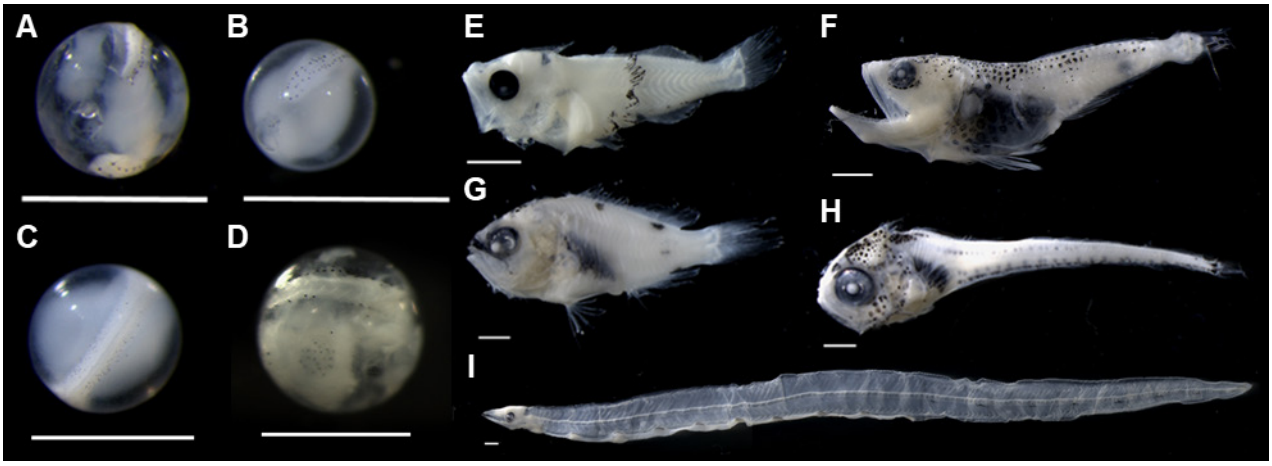

Fig. 5. Fish eggs and larvae collected around Ulleungdo during 2021–2024. A, *Paracentropogon rubripinnis* egg; B, *Semicossyphus reticulatus* egg; C, *Thunnus orientalis* egg; D, *Seriola quinqueradiata* egg; E, *Scorpaena onaria* larva; F, *Champsodon snyderi* larva; G, *Pseudanthias squamipinnis* larva; H, *Acanthocepola limbata* larva; I, *Echelus uropterus* larva. Scale bars=1 mm.

거 울릉도에서 수행된 성어 조사 결과(Chung et al., 2015)와 본 연구시기에 함께 수행된 자망조사에서도 성어의 서식이 확인되어 울릉도 해역이 산란장으로 활용되고 있음을 알 수 있었다.

멸치, 앨퉁이, 자리돔, 참다랑어 등의 자치어 출현은 지속적으로 관측되었으며, 동일 어종의 성어 또한 조사 해역에 분포하고 있는 것으로 확인되어, 성육장으로도 이용되고 있는 것으로 판단된다(Chung et al., 2015; Ashida et al., 2021). 반면, 난류성 어종인 악어치, 날붕장어, 먹점홍갈치(*Acanthocepola limbata*), 금강바리 등의 자치어는 연간 출현 양상이 달랐다. 이들은 주로 외해 정점에서 관찰되었으며(Fig. 5E–5I), 성어의 출현은 확인되지 않았다(Chung et al., 2015). 따라서, 울릉도 외해에서의 난류성 어종의 출현은 해류를 통한 외부 유입에 기인한 일시적 출현일 가능성이 높은 것으로 사료된다(Shin et al., 2021). 이러한 결과는 울릉도 해역이 어종별 생태적 요구에 따라 산란장 또는 성육장으로서의 기능을 수행하고, 초기 생활사 단계에서는 다기능적 해역으로 활용되는 것으로 보인다.

본 연구는 난자치어 분포특성에 대해 수온과 염분 등 일부 환경요인만을 대상으로 분석을 하였고, 자원량 추정 역시 어란과 자치어의 출현 유무와 밀도 산출에만 국한되어 있다는 한계가 있다. 향후에는 해류, 클로로필-a, 영양염 등 다양한 해양환경 요인과의 상관관계를 포괄적으로 분석할 필요가 있다. 또한, 장기 시계열 자료 축적과 유전적 분석을 통해 개체군 간 연결성 및 유래지를 파악함으로써 보다 정밀한 해역 기능 평가가 이루어져야 한다. 특히, 울릉도와 인접한 독도 해역은 성육장 기능이 더 뚜렷하게 나타나는 경향이 있어(Shin et al., 2021), 두 해역 간 어종 이용 특성과 환경 조건을 비교하는 연구를 병행한다면, 동해 도서해역의 생태적 기능 차이를 이해하는 데 기초 자료로 활용될 것이다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원 수산과학연구사업(R2025005 독도 및 심해 생태계 수산자원 조사)으로 수행되었다.

References

Ashida H, Okochi Y, Ohshimo S, Sato T, Ishihara Y, Watanabe S, Fujioka K, Furukawa S, Kuwahara T, Hiraoka Y and Tanaka Y. 2021. Differences in the reproductive traits of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* among three fishing grounds in the Sea of Japan. Mar Ecol Prog Ser 662, 125-138. https://doi.org/10.3354/meps13625.

Bang MK, Sohn DH, Kim JJ, Choi WK, Jang CJ and Kim CS. 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.

Bray JR and Curtis JT. 1957. An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. Ecol Monogr 27, 325-349. https://doi.org/10.2307/1942268.

Choi HC, Jung HK, Cho JH, Youn SH and Oh HJ. 2022. Distribution of larval fishes off the East Sea, Korea. Korean J Ichthyol 34, 186-200. https://doi.org/10.35399/isk.34.3.5.

Choo HS and Kim DS. 1998. The effect of variations in the Tsushima warm currents on the egg and larval transport of anchovy in the southern sea of Korea. Korean J Fish Aquat Sci 31, 226-244.

Chung SD, Cha HK, Lee JB, Lee HW and Yang JH. 2015. Species composition of the catches collected by trammel net in the coastal waters off Ulleungdo of Korea. J Korean Soc Fish Ocean Technol 51, 567-575. https://doi.org/10.3796/

KSFT.2015.51.4.567.
Clarke KR and Gorley RN. 2015. Getting started with PRIMER v7. PRIMER-E Ltd., Plymouth, U.K.
CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). 2025. Global Ocean Physics Reanalysis [GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030]. Retrieved from https://marine.copernicus.eu/ on May 18, 2025.
Fuiman LA and Werner RG. 2002. Fisheries Science: The Unique Contributions of Early Life History Stages. Blackwell Science Ltd., Hoboken, NJ, U.S.A., 1-340.
Hall TA. 1999. BioEdit: A user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. Nucleic Acids Symp Ser 41, 95-98.
Han IS, Lee JS and Jung HK. 2023. Long-term pattern changes of sea surface temperature during summer and winter due to climate change in the Korea Waters. Fish Aquat Sci 26, 639-648. https://doi.org/10.47853/fas.2023.e56.
Ji HS, Yu HJ, Kim JK, Kim DN, Kim ST, Kim JN, Kim HJ, Moon SY, Shin DH, Oh TY, Yoo JT, Yoon EA, Lee SG, Lee HW, Lee HB, Im YJ, Jeong JM, Choi JH and Hwang KS. 2020. Fish Eggs, Larvae and Juveniles of Korea. NIFS, Tongyeong, Korea.
Kang DW, Seo SY, Kang JS and Paek WK. 2013. Diversity of intertidal benthic invertebrate of Dokdo and Ulleung-do Island from Korea. J Asia Pacific Biodivers 6, 157-164. https://doi.org/10.7229/jkn.2013.6.1.157.
Kim JY and Lo NC. 2001. Temporal variation of seasonality of egg production and the spawning biomass of Pacific anchovy, *Engraulis japonicus*, in the southern waters of Korea in 1983-1994. Fish Oceanogr 10, 297-310. https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2001.00175.x.
Kim ST, Hwang KS, Park GJ and Choi CG. 2016. Benthic algal community of Ulleungdo, East coast of Korea. J Fish Mar Sci Educ 28, 83-90. https://doi.org/10.13000/jfmse.2016.28.1.83.
Kim SL, Kang SM, Lee HG, Han GH and Yu OH. 2023. Species diversity and community structure of macrobenthos in the Ulleung Basin, East Sea, Republic of Korea. J Mar Sci Eng 11, 92. https://doi.org/10.3390/jmse11010092.
Kim CS, Lee JS, Yang JY and Han IS. 2024. Dynamic downscaling for regional ocean climate modeling around the Korean peninsula and its application in fisheries. Korean J Fish Aquat Sci 57, 177-185. https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0177.
Kimura M. 1980. A simple method for estimating evolutionary rates of base substitutions through comparative studies of nucleotide sequences. J Mol Evol 16, 111-120. https://doi.org/10.1007/BF01731581.
Kumar S, Stecher G, Li M, Knyaz C and Tamura K. 2018. MEGA X: Molecular evolutionary genetics analysis across computing platforms. Mol Biol Evol 35, 1547-1549. https://doi.org/10.1093/molbev/msy096.
Lee DK and Niiler P. 2010. Surface circulation in the southwestern Japan/East Sea as observed from drifters and sea surface height. Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap 57, 1222-1232. https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.06.003.
Lee EY and Park KA. 2019. Change in the recent warming trend of sea surface temperature in the East Sea (Sea of Japan) over decades (1982-2018). Remote Sens 11, 2613. https://doi.org/10.3390/rs11222613.
Lee MJ, Kim JH, Kim YB, Park CH, Shin K and Baek SH. 2020. Specific oceanographic characteristics and phytoplankton responses influencing the primary production around the Ulleung Basin area in spring. Acta Oceanol Sin 39, 107-122. https://doi.org/10.1007/s13131-020-1545-9.
Margalef R. 1958. Information theory in ecology. Gen Syst 3, 36-71.
Miller BS and Kendall AW. 2009. Early Life History of Marine Fishes. University of California Press, Berkeley, CA, U.S.A., 1-376. https://doi.org/10.1525/9780520943766.
Moon SY, Lee MH, Jung KM, Kim HY 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.
Okiyama M. 2014. An Atlas of Early Stage Fishes in Japan. 2nd ed. Tokai University Press, Tokyo, Japan.
Oksanen J, Simpson GL, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista HBA, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill MO, Lahti L, McGlinn D, Ouellette M-H, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak CJF, Weedon J and Borman T. 2025. Vegan: Community Ecology Package (Version 2.6-10). Retrieved from https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html on Mar 29, 2025.
Palacios DM. 2002. Factors influencing the island-mass effect of the Galápagos Archipelago. Geophys Res Lett 29, 2134. https://doi.org/10.1029/2002gl016232.
Paraboles LC, Guarte DM and Kinoshita I. 2019. Vertical distribution of eggs and larvae of *Maurolicus japonicus* (Sternoptychidae, Pisces) in Tosa Bay, Japan. Plankton Benthos Res 14, 80-85. https://doi.org/10.3800/pbr.14.80.
Pielou EC. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. J Theor Biol 13, 131-144. https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0.
R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from https://www.R-project.org/ on Mar 29, 2025.
Schlitzer R. 2023. Ocean Data View (Version 5.7.1). Retrieved from https://odv.awi.de/ on Mar 29, 2025.
Shannon CE and Weaver W. 1964. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana, IL,

U.S.A.
Shin UC, Yoon SJ, Kim JK and Choi GH. 2021. Species composition of ichthyoplankton off Dokdo in the East Sea. Korean J Fish Aquat Sci 54, 498-507. https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0498.
Thompson JD, Higgins DG and Gibson TJ. 1994. Clustal W: Improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. Nucleic Acids Res 22, 4673-4680. https://doi.org/10.1093/nar/22.22.4673.
Tsuruta Y. 2001. Life history strategy of Japanese anchovy. Nippon Suisan Gakkaishi 67, 1133-1134. https://doi.org/10.2331/suisan.67.1133.
Ward RD, Zemlac TS, Innes BH, Last PR and Hebert PDN. 2005. DNA barcoding Australia's fish species. Philos Trans Roy Soc Land B Biol Sci 360, 1847-1857. https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1716.
Watanabe H, Sassa C and Ishida M. 2010. Late winter vertical distribution of mesopelagic fish larvae in the Kuroshio Current region of the western North Pacific. Bull Jpn Soc Fish Oceanogr 74, 153-158.
Yen KW, Pan CI, Chen CH and Lien WH. 2022. Spatiotemporal characteristics of fish larvae and juveniles in the waters around Taiwan from 2007 to 2019. Animals 12, 1890. https://doi.org/10.3390/ani12151890.
Yoneda M, Kitano H, Tanaka H, Kawamura K, Selvaraj S, Ohshimo S, Matsuyama M and Shimizu A. 2014. Temperature- and income resource availability-mediated variation in reproductive investment in a multiple-batch-spawning Japanese anchovy. Mar Ecol Prog Ser 516, 251-262. https://doi.org/10.3354/meps10969.
Yoon YY, Jung SJ and Yoon SC. 2007. Characteristics and long term variation trend of water mass in the coastal part of East Sea, Korea. J Korean Soc Mar Environ Energy 10, 59-65.

부 록

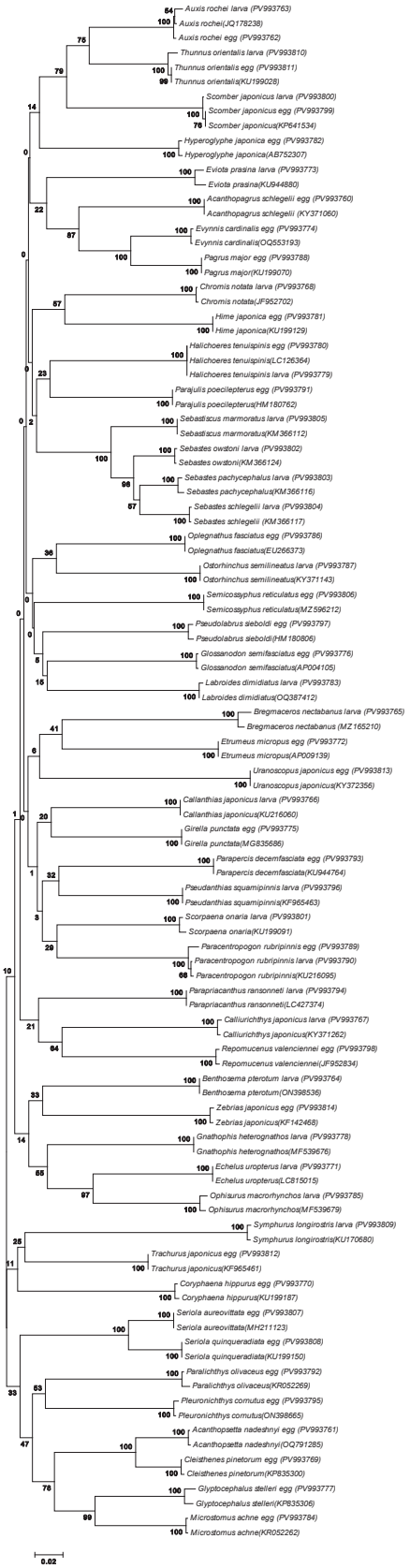

Fig. A1. Neighbor-joining tree based on mtDNA COI sequences showing the phylogenetic relationships among ichthyoplankton specimens collected from Ulleungdo. Numbers at branches indicate bootstrap support values from 1,000 replications. Scale bar represents a genetic distance of 0.05.