

기후 변동이 제주도 해역 주요 어업어종 군집 조성에 미치는 영향(1970–2023)

옹기호 · 고성길¹ · 박선규 · 정석근*

제주대학교 해양생명과학과, ¹한국해양과학기술원 열대 · 아열대연구센터

Climate Variability Impact on Major Fishery Species Community Composition in the Waters of Jeju Island, Republic of Korea (1970–2023)

Giho Ong, Seonggil Go¹, Sunkyu Park and Sukgeun Jung*

Department of Marine Life Science, Jeju National University, Jeju 63243, Republic of Korea

¹Tropical & Subtropical Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Jeju 63349, Republic of Korea

This study investigated the North Pacific climate variability impacts on fishery species composition in Jeju Island waters between 1970 and 2023. Annual catch data were standardized as catch per unit effort (CPUE) using fishing vessel gross tonnage. Ten major fishery species were analyzed with the Pacific Decadal Oscillation (PDO), North Pacific Gyre Oscillation (NPGO), and Arctic Oscillation (AO) indices. Three distinct periods were identified based on species composition similarities: 1970–1981, 1982–1993, and 1999–2023. Seven species correlated with the climate variability indices. The largehead hairtail *Trichiurus lepturus* and small yellow croaker *Larimichthys polyactis* were negatively correlated with PDO, whereas the tiger puffer *Takifugu rubripes*, Pacific flying squid *Todarodes pacificus*, and silver croaker *Pennahia argentata* were positively correlated. Chub mackerel *Scomber japonicus* and Japanese Spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* were positively correlated with NPGO. Compositional shifts corresponded to PDO phase changes: *T. pacificus* dominated during the positive phase (1977–1997), whereas *T. lepturus* and *L. polyactis* increased during the negative phase (1999–2023). North Pacific climate variability likely affects Jeju Island fisheries, underscoring the need for climate-resilient strategies.

Keywords: Climate variability, Pacific Decadal Oscillation, Fishery species composition, Jeju Island

서 론

기후 변동(climate variability)은 다양한 시공간적 규모에서 기후의 평균 상태 변동을 의미한다(IPCC, 2018). 이러한 변동은 대기와 해양의 물리·생물학적 과정 전반에 영향을 미치며, 해양환경과 생태계 구조 변화를 일으킨다. 북태평양에서는 여러 기후 변동이 보고되었으며 대표적으로 태평양 10년 주기 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO), 북태평양환류 진동(North Pacific Gyre Oscillation, NPGO), 북극진동(Arctic Oscillation, AO) 등이 있다. PDO는 북태평양에서 나타나는 해수면 온도(sea surface temperature, SST), 해수면 기압(sea level pressure, SLP)의 장기 변동과 밀접하게 관련된다(Mantua et

al., 1997). PDO는 십 년에서 수십 년 주기로 양과 음의 위상(phase)을 반복하며, PDO가 양의 위상일 때는 북서태평양이 평년보다 낮고, 북동태평양은 높은 SST 이상치를 보인다(Mantua et al., 1997; Mantua and Hare, 2002). PDO 지수는 북태평양(20°N 이북)의 월별 SST 이상치(anomaly)에서 전지구 평균을 제거한 뒤, 경험직교함수(empirical orthogonal function, EOF) 분석으로 도출된 첫 번째 주성분(principal component, PC) 시계열로 정의된다(Mantua et al., 1997). NPGO는 북태평양의 상승류, 수평 이류, 아열대 환류 강도의 변동을 나타내는 기후 변동 지수이다(Di Lorenzo et al., 2008). NPGO 지수는 북동태평양(180°W–110°W, 25°N–62°N)의 해수면 높이 이상치에 대한 EOF 분석에서 얻은 두 번째 PC로 특정된다. NPGO는 북태

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 754. 3424 Fax: +82. 64. 756. 3493

E-mail address: sukgeun.jung@gmail.com

 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.2025.0757>

Korean J Fish Aquat Sci 58(6), 757-768, December 2025

Received 23 September 2025; Revised 10 November 2025; Accepted 18 November 2025

저자 직위: 옹기호(대학원생), 고성길(연수연구원), 박선규(대학원생), 정석근(교수)

평양의 염분, 영양염류, 엽록소의 십년 주기 변동과 밀접한 상관성을 보인다(Di Lorenzo et al., 2008). AO는 북반구의 고위도와 중위도 사이에서 나타나는 SLP의 대표적 변동 양상이다(Thompson and Wallace, 1998). AO 지수는 북반구(20°N 이북)의 월평균 1,000 mb SLP 이상치에 대한 EOF 분석으로 도출된 첫 번째 PC 시계열로 정의된다. AO의 위상 전환은 편서풍 강도와 동아시아 기후 변동에 중요한 영향을 미친다(Thompson and Wallace, 1998).

기후 변동의 장기적인 지속은 하나의 체제(regime)로 설명된다. 체제는 기후에서 일정 기간 지속되는 준평형(quasi-equilibrium) 상태를 의미하며, 수년에서 수십 년 규모로 나타나는 기후 상태의 급격한 전환을 기후 체제 전환(climate regime shift)이라고 한다(Overland et al., 2008). 20세기 후반 북태평양에서는 1976–1977년, 1988–1989년, 1997–1998년에 대표적인 기후 체제 전환이 관측되었고(Miller et al., 1994; Hare and Mantua, 2000; Chavez et al., 2003), 이들은 해양생태계 구조적 변화를 동반한 것으로 보고되었다(Francis and Hare, 1994; Mantua and Hare, 2002; Overland et al., 2008).

기후 체제 전환에 따른 해양의 물리·화학적 환경 변화는 어류와 무척추동물류(이하 어종)의 생활사 전반에 영향을 미친다. 수온 변화는 성장률, 대사율, 분포, 번식 생태에 영향을 주어 어종의 자원량 변동으로 이어지며(Brander, 2007; Pörtner and Knust, 2007), 해류와 수괴 구조 변동은 해양생태계의 생산 구조를 바꾸어 어종 군집의 장기적 변화를 야기한다(Francis et al., 1998). 또한 염분과 영양염 변동은 식물플랑크톤 생산성을 조절하여 상위 영양단계의 변동을 야기할 수 있다(Di Lorenzo et al., 2008). 북태평양은 이러한 영향이 뚜렷하게 나타나는 해역으로, PDO는 혼합층 변화를 통한 식물플랑크톤부터 연어에 이르는 상향식(bottom-up) 조절을 통해 어업 생산성에 핵심적인 역할을 담당한다(Mantua and Hare, 2002). 실제로 10년 규모의 체제 전환은 어종의 분포, 자원량, 우점종 교체에 급격한 변화를 일으킨 사례들이 보고되었다(Francis and Hare, 1994; Overland et al., 2008).

본 연구 대상인 제주도 해역은 대마난류, 제주난류, 양쯔강 저염분수, 황해저층냉수 등 다양한 수괴의 영향으로 복잡한 해양 환경을 형성한다. 쿠로시오 해류의 분지인 대마난류는 제주도 남동쪽을 지나면서 고온·고염분 해수를 수송하며(Hur et al., 1999; Cha and Moon, 2020), 제주난류는 제주도 주변을 시계 방향으로 순환하면서 서부 연안과 제주해협으로 고온·고염분 해수를 운송한다(Lie et al., 2000). 반면 황해저층냉수는 겨울 철황해 해수면 냉각과 강한 북풍에 의한 수직 혼합으로 형성되며(Moon et al., 2009), 여름철에는 제주도 남서부 해역까지 확장된다(Pang et al., 2003). 이들 수괴는 기후 변동의 영향을 받으며, PDO의 양의 위상은 쿠로시오 해류의 약화와 대마난류 수송량 증가를 초래한다(Gordon and Giulivi, 2004; Shin et al., 2022). PDO와 AO의 음의 위상은 겨울 몬순 강화로 인한 황해

저층냉수 발달과 연결된다(Guo et al., 2021).

이렇게 다양한 해양환경 때문에 제주도 해역에 다양한 어종이 서식하고 있으며, 특히 온대·아열대 어종이 주로 분포한다. 또한 고등어, 오징어, 전갱이 등 난류성 어종들의 회유경로상에 위치하여 중요한 어장을 형성하므로 우리나라 수산업에서 제주도 해역이 경제적으로 중요하다(Yang et al., 2007; Ko et al., 2015). 실제로 제주도 도내 수협 위원장에서 계통출하로 보고된 어획량은 2000년 이후 평균 58.8×10^3 metric tons (MT)으로 전국 어획량의 5.6%를 차지하는 반면, 생산금액은 전체의 10.9%를 차지한다(KOSIS, 2025a). 이는 제주도 어업이 어획량 대비 높은 경제적 가치를 통해 지역 경제에서 중요한 비중을 차지하고 있음을 시사한다.

한반도 해역에서는 기후 변동과 어종 변동 간의 관계를 규명하기 위해 다양한 연구가 수행되어 왔다. Zhang et al. (2000)은 1976–1977년과 1997–1998년 기후 체제 전환이 수온, 플랑크톤 생산성, 어종 변동에 유의한 영향을 미쳤음을 보고하였다. 또한 Jung et al. (2013)은 어획량과 제주도 주변 해양환경 자료를 활용한 정준 대응 분석(canonical correspondence analysis, CCA)을 통해 제주도 해역에서 1981–2010년간 어종 군집의 변화를 확인하였으며, 특히 1982–1983년과 1990–1992년 사이에 어류 군집 구조 변화가 일어났음을 보고하였다.

기존 연구들은 어획량과 제주도 해양환경 자료를 활용하여 어종 군집 변화를 분석하였다. 그러나 제주도 해역을 경유하는 대부분의 회유성 어종들은 동중국해, 황해, 동해에 걸쳐 넓은 해역에 분포한다. 따라서 제주도 해양환경 자료는 회유성 어종의 변동을 부분적으로만 설명할 수 있으며, 광범위한 해역을 회유하는 어종들에 미치는 해양환경 변화를 종합적으로 반영하는 데는 한계가 있다. 이와 같은 한계점을 보완하기 위해서는 더 넓은 규모의 해양환경 변화를 반영할 필요가 있다.

기후 변동에 따른 해양환경 변화는 어종 조성과 어획량 변동을 통해 제주도 어업에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 이에 따른 어종 군집 변동을 분석할 필요가 있다. 이를 위해 회유성 어종이 분포하는 광범위한 해역의 환경 변화를 포괄적으로 반영하는 북태평양 기후 변동 지수를 활용하였다. 본 연구는 1970–2023년간 제주도 연근해에서 어선어업을 통해 어획되는 어종(이하 어업어종)의 어획량을 기반으로 어종 군집의 장기 변화를 분석하고, 개별 어업어종과 기후 변동 간의 상관관계를 규명하여 기후 변동이 제주도 해역 주요 어업어종 군집에 미친 영향을 파악하는 것을 목표로 한다.

재료 및 방법

어획노력량

제주도 연근해어업의 어획노력량 자료는 1969–1991년간 제주도 행정구역별 통계연보와 1992–2023년간 통계청 국가통계 포털의 시도별 선종별 어선세력 통계에서 어선세력(척수, 총톤

수, 마력수) 자료를 수집하였다(KOSIS, 2025b). 본 연구에서는 동력선과 무동력선의 어업 활동을 종합적으로 반영하는 총톤수 (gross tonnage, GT)를 어획노력량 변수로 사용하였다.

어획량

제주도 연근해어업 어획량 자료는 통계청 국가통계포털의 어업별 품종별 통계에서 1970–2023년간 연근해어업으로 어획된 어류, 갑각류, 연체동물류의 어획량을 수집하였다(KOSIS, 2025a). 어업생산동향조사 지침 개정에 따른 어업어종의 세분화로 인한 집계 기준 불일치를 해결하기 위해 일부 어업어종을 재분류하여 자료의 시계열 일관성을 확보하였다. 수집된 어획량 자료를 통해 전체 어획량의 장기 변화 추세를 분석하였으며, 어획량은 평균±표준편차로 표시하였다.

주요 어업어종 선정

분석 대상 어업어종은 자료의 연속성과 어업에서의 중요도를 고려하여 선정하였다. 먼저 1970–2023년간 결측 횟수가 전체 기간의 10% 미만인 어업어종으로 한정하였으며, 연도별 총 어획량 대비 해당 어업어종 어획량 비율의 연평균이 1% 이상인 어업어종을 '주요 어업어종'으로 정의하였다. 주요 어업어종에 복수의 세부 어업어종이 포함된 경우, 연도별 총 어획량 대비 연평균 비율이 50% 이상을 차지하는 세부 어업어종을 대표종으로 선정하였다. 단일 어업어종으로 분류되지 않는 주요 어업어종은 분석에서 제외하였다. 세부 어업어종별 어획량은 공공자료포털의 일자별 위탁판매현황에서 2013–2023년간 제주도 위판 기록을 활용하였다(OGD, 2025). 이렇게 선정된 주요 어업어종의 어획량 기여도를 평가하기 위해 각 주요 어업어종이 전체 어획량에서 차지하는 비율을 산출하였다. 주요 어업어종별 어획량은 시기를 구분하여 비교 분석하였으며, 시기별 어획량의 상대적 변동성 비교를 위해 변동계수(coefficient of variation, CV)를 산출하였다.

단위노력당 어획량

분석기간 동안 어선의 기계화와 어선세력 확대에 따른 어획노력량 증가를 고려하여, 어획량을 어획노력량으로 표준화한 단위노력당 어획량(catch per unit effort, CPUE)을 사용하였다. 본 연구에서는 어획량(kg)을 연간 GT로 나눈 단위 톤당 어획량(kg GT⁻¹)을 CPUE로 정의하였다. GT는 매년 12월 31일을 기준으로 조사되는 반면 어획량은 연간 누적되어 집계되므로, 실제 어업 활동에 기여한 어획 노력을 반영하기 위해 전년도와 해당연도 GT의 평균값을 연간 GT로 활용하였다. 이렇게 산정된 CPUE를 각 어업어종의 연도별 표준화된 어획량 척도로 활용하여 후속 분석을 수행하였다.

기후 변동 지수

PDO, NPGO, AO 지수의 시계열 자료는 미국 해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)

산하 Physical Science Laboratory에서 제공하는 월별 지수를 사용하였다(<https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/>). PDO 지수는 북태평양(20°N–70°N) 영역의 COBE-SST, NOAA ERSST V5, HadISST1.1의 세 가지 SST 자료를 통합한 Ensemble SST 기반 지수를 사용하였으며, NPGO 지수는 HadISST1.1 자료를 이용하여 재구성된 지수를 활용하였고, AO 지수는 NOAA Climate Prediction Center 데이터에 기반하여 계산된 지수를 활용하였다. 연도별 어획량과의 통계적 분석을 위해 PDO와 NPGO는 연평균 지수를 사용했으며, AO는 일반적으로 겨울철 현상으로 여겨지기 때문에 전년도 12월부터 해당연도 3월까지(December through March)의 평균값을 사용하였다.

정준 대응 분석

연도별 주요 어업어종 군집 구조 변화를 파악하기 위해 대응 분석(correspondence analysis, CA)을 수행하였다. CA는 범주형 자료 간의 연관성을 저차원 좌표 공간에 시각적으로 표현하는 다변량 통계 기법이다(Hill, 1974; Greenacre, 2010; Yel-land, 2010). 연간 CPUE를 주요 어업어종과 연도로 구성한 행렬로 정리하고, CA를 통해 연도와 주요 어업어종의 변화를 2차원 좌표 공간에 표현하였다. 각 축은 총 변동성 중 일정 비율을 설명하며, 누적 설명력이 높을수록 저차원 좌표가 주요 어업어종 군집 구조의 변화를 잘 나타낸다.

제주도 해역 주요 어업어종과 기후 변동 간의 연관성을 파악하기 위해 CCA를 수행하였다. CCA는 반응변수와 설명변수를 동시에 고려하는 확장된 CA 기법으로, 반응변수를 기반으로 계산된 CA 축이 설명변수의 변화와 최대한 일치하도록 배열 구조를 제약한다(Ter Braak, 1986). 본 연구에서는 주요 어업어종별 CPUE를 반응변수로, 기후 변동 지수를 설명변수로 설정하여 군집 구조 변화를 설명할 수 있는 기후 변동 요인을 도출하였다.

분석은 R 소프트웨어(4.5.0)를 사용하였으며(R Core Team, 2025), CCA는 vegan 패키지로 수행하였다(Oksanen et al., 2025). 통계적 유의성은 순열검정(permuation test)을 통해 전체 축과 개별 설명변수에 대해 각각 평가하였다. 분석 결과는 서열화 도표로 시각화하여 주요 어업어종 CPUE와 기후 변동 지수 간의 관계를 해석하였다.

주요 어업어종 군집의 시간적 변화

연도별 주요 어업어종 군집의 시기를 구분하기 위해 CA 결과를 바탕으로 K-means 군집화(K-means clustering)를 통해 1970–2023년을 주요 어업어종 군집 구조의 유사성에 따라 분류하였다. K-means 군집화는 사전에 지정한 K개의 군집으로 표본을 분할하고, 각 군집 중심과 거리 차이의 제곱거리 합을 최소화하는 방법이며(MacQueen, 1967), CA 제1축(CA1)과 제2축(CA2)에서 각 연도별 좌표를 이용하여 수행하였다. 최적 군집 수는 실루엣 분석(silhouette analysis)을 통해 결정하였다(Rousseeuw, 1987).

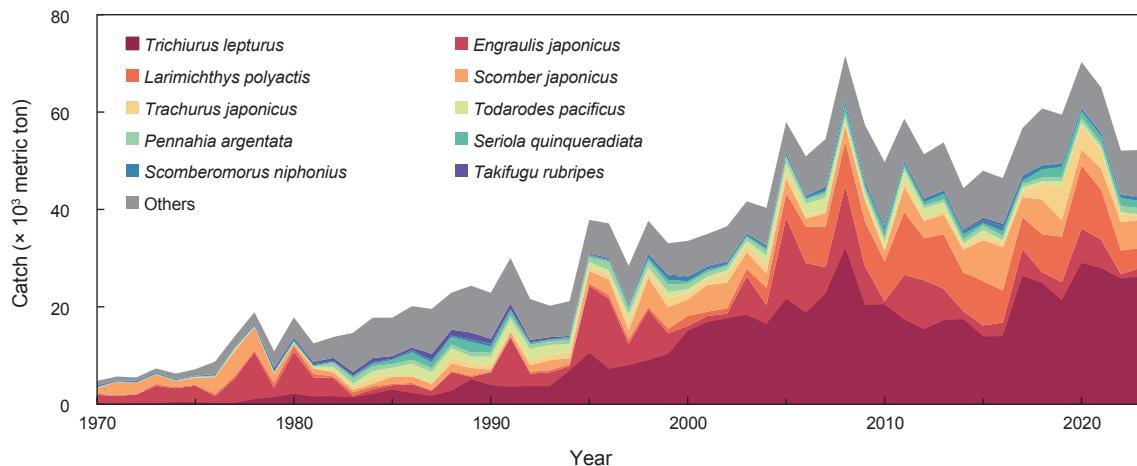


Fig. 1. Time series of annual catch by each major fishery species in the waters of Jeju Island, 1970–2023.

K-means 군집화 결과를 기준으로 종 조성 시기를 1차적으로 구분한 후, 시간적 연속성을 고려한 보정을 수행하였다. 동일한 군집으로 분류된 연도들 중에서 시간적으로 연속된 기간만을 안정된 '시기'로 재정의하고, 불연속적인 연도는 '과도기'로 분류하였다. 추가적으로, K-means 군집화를 통해 도출된 시기 구분이 통계적으로 유의한 체제 전환에 해당하는지 검증하기 위해 순차적 *t*-검정 체제 전환 분석(sequential *t*-test analysis of regime shifts, STARS)을 병행하였다(Rodionov, 2004, 2006). STARS는 시계열 자료에서 평균값의 유의한 변화를 탐지하는 방법으로, CA1과 CA2 좌표의 시계열에 대해 체제 전환 시점을 분석하였다. STARS의 주요 매개변수는 유의 수준(*P*), cut-off length (*l*), Huber's 가중치 매개변수(*h*)이며, 본 연구에서는 Rodionov (2006)을 참고하여 *P*=0.05, *h*=1로 설정했으며, 북서 태평양 어류 군집 변화에 영향을 주는 이후 변동성인 PDO 변동 주기(15–25년)를 고려하여 *l*=15로 설정하였다(Mantua and Hare, 2002).

K-means 군집화를 통해 구분된 주요 어업어종 군집의 전환 시점과 STARS로 검출된 체제 전환 시점 간의 일치성을 비교함으로써, 제주도 연근해 어업어종 군집 구조의 장기적 변화가 통계적으로 유의한 체제 전환에 해당하는지 검증하였다. 분석은 R 소프트웨어의 cluster 패키지(Maechler et al., 2025)와 FactoMineR 패키지(Lê et al., 2008)를 사용하여 수행하였다.

상관관계 분석

주요 어업어종별 CPUE와 이후 변동 지수 간의 상관관계를 분석하였다. 어획량 자료는 0 이상의 양수 값으로 구성되며 시계열의 편차가 평균보다 큰 과분산(overdispersion)의 특성을 가져 정규분포 가정을 충족하지 않는다. 따라서 분포 가정에 딸 민감하고 단조(monotonic) 관계를 검정할 수 있는 스피어만 순위 상관분석(Spearman's rank correlation)을 수행하였다.

결 과

주요 어업어종

제주도 연근해어업을 대표하는 주요 어업어종은 갈치(*Trichiurus lepturus*), 멸치(*Engraulis japonicus*), 참조기(*Larimichthys polyactis*), 고등어(*Scomber japonicus*), 살오징어(*Todarodes pacificus*), 전갱이(*Trachurus japonicus*), 보구치(*Pennahia argentata*), 방어(*Seriola quinqueradiata*), 삼치(*Scomberomorus niphonius*), 자주복(*Takifugu rubripes*)으로 총 10종을 선정하였다. 자주복은 실제 일자별 위탁판매현황 자료상으로는 참복에 해당하나, 최근 유전분류학적 연구에서 참복과 자주복이 동일 종으로 확인되었고(Lee et al., 2025), 국가 해양수산생물종 목록집에서는 자주복만 등재되어 있으므로(MABIK, 2023), 본 연구에서는 이를 자주복으로 표기하였다.

1970–2023년간 제주도 어업어종의 총 어획량은 지속적으로 증가하는 추세를 보였다(Fig. 1). 연대별 평균 어획량은 1970년 대 $8.9 \pm 4.5 \times 10^3$ MT, 1980년대 $18.1 \pm 3.8 \times 10^3$ MT, 1990년 대 $29.0 \pm 7.2 \times 10^3$ MT, 2000년대 이후 $52.0 \pm 10.2 \times 10^3$ MT로 나타났다. 주요 어업어종 10종의 어획량이 연도별 전체 어획량에서 차지하는 비율은 평균 $76.4 \pm 10.6\%$ 였다.

1970–2023년간 총 어획량을 기준으로 주요 어업어종 중 갈치의 어획량이 가장 높았다. 갈치의 1970–1999년간 평균 어획량은 $3.1 \pm 3.1 \times 10^3$ MT (CV=100.2%)으로 총 어획량의 13.2%를 차지하였으나, 2000년 이후에는 $20.7 \pm 5.1 \times 10^3$ MT (CV=24.7%)으로 40.0%를 차지하여 비율이 증가하였다. 반면 멸치는 1970–1999년 평균 $4.2 \pm 3.9 \times 10^3$ MT (CV=92.4%)으로 총 어획량의 24.2%를 차지하였으나, 2000년 이후에는 $5.4 \pm 4.3 \times 10^3$ MT (CV=79.0%)으로 9.9%를 차지하여 비율이 감소하였다. 참조기는 1970–1999년 평균 $0.4 \pm 0.3 \times 10^3$ MT (CV=59.9%)으로 총 어획량의 2.9%였으며, 2000년 이후에는

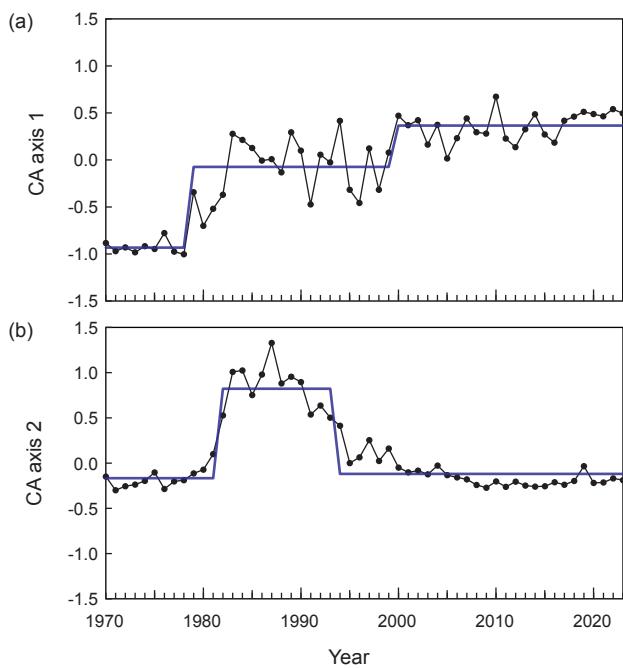


Fig. 2. Sequential *t*-test analysis of regime shifts (STARS) applied to (a) the first and (b) the second axis of correspondence analysis (CA), derived from the annual catch per unit effort of major fishery species in the waters of Jeju Island from 1970 to 2023. The black line represents the observed CA scores, and the blue line indicates regime means with statistically significant step changes ($P < 0.05$, cut-off length=15 years).

7.0±3.5×10³ MT (CV=49.7%)으로 12.9%를 차지하여 비율이 증가하였다. 고등어는 1970–1999년 평균 2.0±1.4×10³ MT (CV=71.1%)으로 총 어획량의 14.6%를 차지하였으며, 2000년 이후에는 4.4±1.8×10³ MT (CV=40.8%)으로 8.9%를 차지하여 비율이 감소하는 등, 시기별로 주요 어업어종의 어획량과 비율이 변화하였다.

정준 대응 분석

CA 결과, CA1과 CA2의 분산 설명력은 각각 45.0%와 26.0%로 나타났으며, 누적 설명력은 71.0%였다. CA 결과를 활용한 K-means 군집화를 통해 1970–2023년은 3개의 군집으로 분류되었으며, 군집1에는 1970–1981년, 1995–1996년, 1998년, 군집2는 1982–1993년, 군집3은 1994년, 1997년, 1999–2023년이 속하였고, 군집 전환 시점은 1981–1982년과 1993–1994년으로 확인되었다.

STARS를 통해 탐지한 체제 전환 시점은 CA1에서 1978–1979년과 1999–2000년, CA2에서는 1981–1982년과 1993–1994년으로 확인되었다(Fig. 2). K-means 군집화를 통해 추정된 주요 어업어종 군집 전환 시점(1981–1982년, 1993–1994년)이 STARS로 확인된 체제 전환 시점과 일치하였으며, 이는

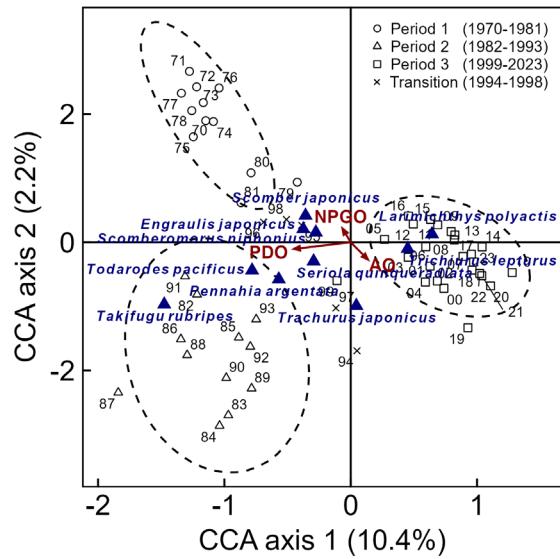


Fig. 3. Canonical correspondence analysis (CCA) biplot showing the relationship between catch per unit effort (CPUE) of major fishery species and climate variability indices in the waters of Jeju Island. Dashed ellipses denote 95% confidence regions for three temporally stable periods determined through temporal coherence correction of K-means clustering results. Transition period is shown as individual points.

K-means 군집화를 통해 구분된 군집 변화가 통계적으로 유의한 체계 전환에 해당함을 나타낸다.

시간적 연속성 기준의 보정 과정을 통해 1970–2023년은 주요 어업어종 군집 구조의 유사성에 따라 3개의 안정된 시기로 분류되었다(Fig. 3): 1970–1981년(12년간), 1982–1993년(12년간), 1999–2023년(25년간). 시간적으로 불연속적인 1994–1998년(5년간)은 과도기로 분류되었다. 각 시기의 대표적인 주요 어업어종은 다음과 같았다. 1970–1981년 시기에는 멸치, 고등어, 삼치가 특징적으로 나타났으며, 1982–1993년 시기에는 자주복, 살오징어, 보구치, 방어, 전갱이가 비교적 높은 어획 비율을 보였다. 1999–2023년 시기에는 갈치와 참조기가 대표적으로 나타났다.

CA 축별 주요 어업어종의 좌표값 분포는 다음과 같았다. CA1에서 멸치(-0.676), 고등어(-0.510)는 음의 좌표값을, 갈치(0.468), 참조기(0.437)는 양의 좌표값을 나타내어 1970–1981년 시기와 1999–2023년 시기의 구분에 기여하였다. CA2에서 는 자주복(1.603), 살오징어(0.911)가 높은 양의 좌표값을 보인 반면, 멸치(-0.049), 고등어(-0.188), 갈치(-0.125), 참조기(-0.392)는 음의 좌표값을 나타내어 1982–1993년 시기와 다른 시기들을 구분하는 데 기여하였다.

CCA 결과, 제1축(CCA1)이 군집 변동을 유의하게 설명하였으나($F=6.00$, $P<0.05$), 제2축(CCA2)은 통계적으로 유의하지 않았다. 기후 변동 지수 중 PDO 지수가 주요 어업어종 군집 구

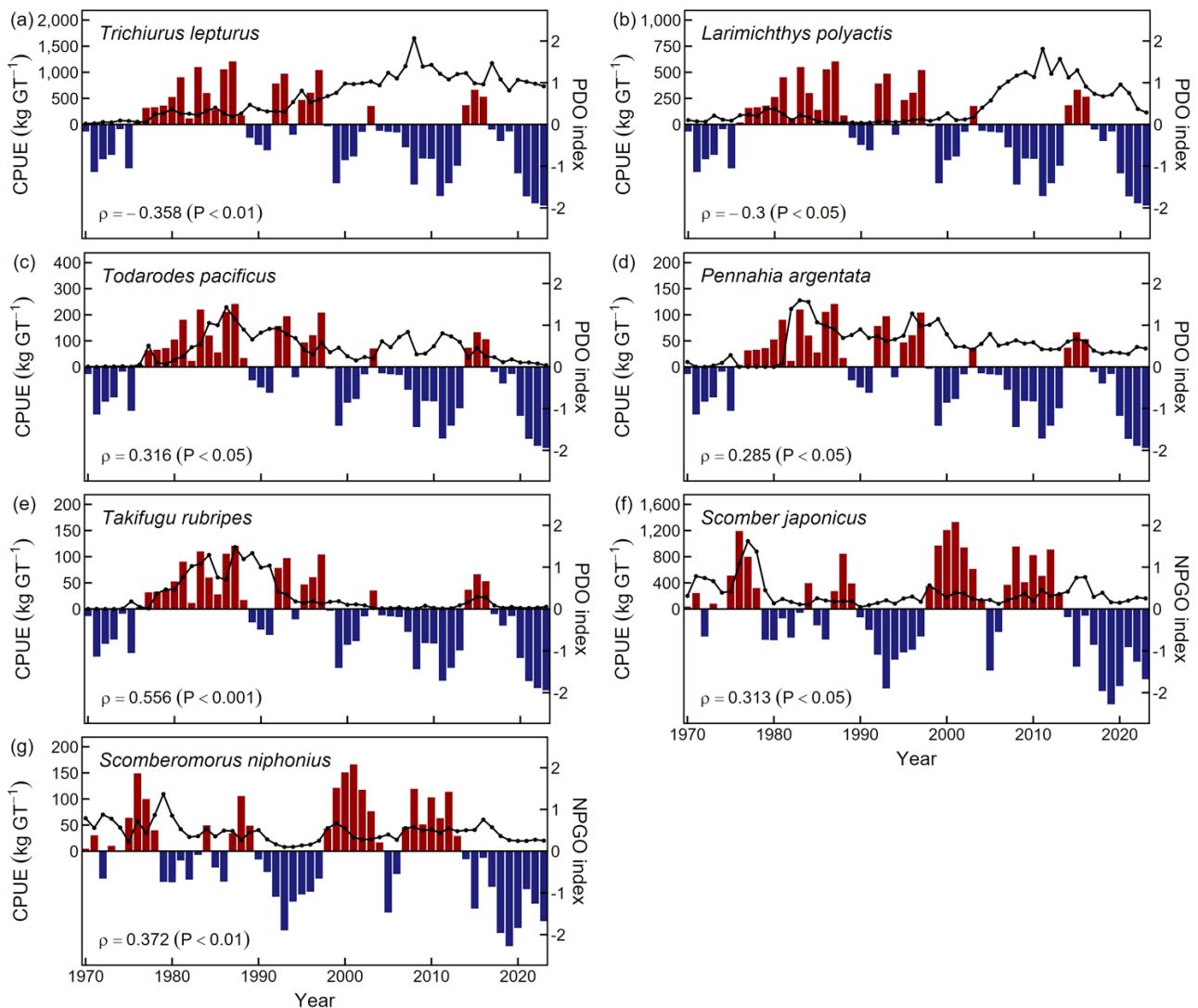


Fig. 4. Time series of catch per unit effort (CPUE) and climate indices for major fishery species in the waters of Jeju Island, 1970–2023. Each panel shows individual species, exhibiting significant Spearman's rank correlations ($P < 0.05$) with (a–e) Pacific Decadal Oscillation (PDO) index and (f, g) North Pacific Gyre Oscillation (NPGO) index. Black lines with dots represent annual CPUE in kg per gross tonnage (GT).

조와 유의한 상관관계를 나타냈으며 ($F=5.04$, $P < 0.01$), AO와 NPGO 지수는 통계적으로 유의한 상관관계를 보이지 않았다.

상관관계 분석

스피어만 순위 상관분석 결과, 제주도 주요 어업어종 10종 중 7종이 기후 변동 지수와 유의한 상관관계를 나타냈다(Table 1). 반면 멸치, 전갱이, 방어는 분석된 기후 변동 지수와 유의한 상관관계를 보이지 않았다. PDO와의 상관관계에서 갈치와 참조기는 유의한 음의 상관관계를 나타냈으며 (Fig. 4a, 4b), 살오징어, 보구치, 자주복은 유의한 양의 상관관계를 보였다 (Fig. 4c–4e). NPGO와의 상관관계에서는 고등어와 삼치가 유의한

양의 상관관계를 나타냈다 (Fig. 4f, 4g).

시계열 변동 양상을 살펴보면, 갈치는 1990년대 중반부터 높은 CPUE를 보이기 시작하여 1990년대 후반 이후 지속적으로 높은 수준을 유지하였다. 참조기는 2000년대 중반부터 높은 CPUE 수준을 나타내기 시작하여 2020년대 초반까지 상대적으로 높은 수준을 유지하였다. 살오징어는 1970년대 후반과 1980년대부터 1990년대 중반까지 높은 CPUE를 보였으나, 이후 간헐적으로 나타났다. 보구치는 1980년대부터 1990년대까지 지속적으로 높은 CPUE를 나타냈다. 자주복은 1970년대 후반부터 1990년대 초반까지 높은 CPUE를 보였다. 고등어는 1970년대 후반에 높은 CPUE를 나타낸 이후 상대적으로 낮은

수준을 유지하였으며, 2010년대 중반 이후 더욱 감소하는 경향을 보였다. 삼치는 1970년대 후반에 높은 CPUE를 나타낸 후 전반적으로 낮은 수준을 유지하였으며, 2010년대 중반 이후에는 더욱 낮은 수준으로 감소하였다.

고 찰

주요 어업어종 군집 변동

제주도 주요 어업어종의 CPUE 변동 분석 결과, 대부분의 어종이 PDO와 유의한 상관관계를 보였다. 살오징어, 자주복, 보구치는 PDO와 양의 상관관계를, 갈치와 참조기는 음의 상관관계를 나타냈으며, 이는 PDO 체제 전환이 제주도 해역 주요 어업어종 군집 변동에 주요한 영향을 미쳤음을 시사한다. 반면 고등어와 삼치는 NPGO와 양의 상관관계를 보였다.

살오징어는 1982–1993년 시기에 높은 CPUE를 보였으며, PDO 지수와 유의한 양의 상관관계를 보였다(Table 1). 특히 PDO가 양의 위상인 1977–1997년간 높은 CPUE를 기록하였으며(Fig. 4c), 이는 PDO 위상 변화가 살오징어의 회유, 분포, 산란장 환경에 영향을 미친다는 선행연구와 일치한다(Kim et al., 2018, 2019). PDO가 양의 위상일 때 북서태평양 해수온 하강으로 산란에 적합한 15–24°C 해역이 남쪽으로 확장되면서 동중국해에 산란장이 형성된다. 반면 PDO가 음의 위상일 때는 해수온 상승으로 적정 수온대가 북상하여 산란장이 대한해협 인근으로 축소되며(Kim et al., 2018), 동중국해 잡재 산란장 면적 역시 감소하여 자원량이 줄어드는 것으로 보고되었다(Liu et al., 2021). 따라서 1980년대 PDO가 양의 위상인 시기에 제주도 해역에서 살오징어 CPUE가 높게 나타난 것은 두 가

Table 1. Spearman's rank correlation coefficients between climate variability indices and annual catch per unit effort (CPUE) in kg per gross tonnage of major fishery species in the waters of Jeju Island, 1970–2023

Species	PDO	NPGO	AO (DJFM)
<i>Trichiurus lepturus</i>	-0.358**	-0.021	0.176
<i>Engraulis japonicus</i>	0.033	0.081	-0.141
<i>Scomber japonicus</i>	-0.171	0.313**	-0.097
<i>Larimichthys polyactis</i>	-0.300**	0.011	0.023
<i>Todarodes pacificus</i>	0.316**	-0.062	-0.005
<i>Trachurus japonicus</i>	0.033	0.196	0.245
<i>Pennahia argentata</i>	0.285**	0.018	0.099
<i>Seriola quinqueradiata</i>	-0.057	0.071	0.026
<i>Scomberomorus niphonius</i>	-0.034	0.372**	-0.088
<i>Takifugu rubripes</i>	0.556***	-0.095	-0.019

Climate variability indices include Pacific Decadal Oscillation (PDO), North Pacific Gyre Oscillation (NPGO), and winter (December to March, DJFM) Arctic Oscillation (AO). *P<0.05, **P<0.01, ***P<0.001.

지 요인으로 해석된다. 첫째, 동중국해에 형성된 산란장으로 회유하는 성어가 제주도 해역을 통과하고, 둘째, 동중국해에서 부화한 유생이 해류를 따라 황해로 수송된 뒤 성장하여 산란장에 남하하면서 제주도 해역을 경유하기 때문이다. 이는 PDO 양의 위상이 산란장 확장을 통해 살오징어의 회유와 분포를 변화시켜 제주도 해역 살오징어 CPUE 증가에 기여했음을 시사한다.

같은 시기에 높은 CPUE를 보인 자주복 역시 PDO 지수와 유의한 양의 상관관계를 보였으나($P<0.001$), 어획량 변동 원인을 기후 변동으로 단정하기는 어렵다. 자주복은 동중국해에서 월동하고 산란장(3–6월) 이전에 일본 연안으로 산랠회유하며, 표지방류 결과 제주도 해역을 통과하는 회유경로를 보인다(Tagawa and Ito, 1996). 통계청 자료에 따르면 자주복은 제주도에서 11–4월에 주로 어획되었으며(KOSIS, 2025a), 산랠회유 시기에 어획되는 특성상 자주복 CPUE는 기후 변동보다 자원량 변화와 더 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 실제로 자주복은 미성어 남획으로 1990년대 초반부터 일본에서 어획량이 급감하였고(Kawata, 2012), 제주도 해역의 감소 역시 과도한 어획이 주요 원인으로 추정된다.

보구치와 PDO 지수 간의 유의한 상관관계가 나타났으나, PDO 변동이 보구치에 미치는 생태학적 영향은 불분명하다. 보구치는 동중국해와 황해에서 일본과 인도태평양에 이르는 연안에 널리 분포하며, 20–140 m 수심의 모래나 진흙 바닥에서 서식하는 저서성 어종이다(Jeon et al., 2020). 그러나 보구치의 생활사는 동중국해에서도 충분히 연구되지 않은 상황이며(Zhao et al., 2024), 구체적인 생태학적 특성과 환경 변화에 대한 반응이 명확하지 않다. PDO는 황해난류 변화나 황해저층냉수 등을 통해 저서 생태계에 영향을 미칠 가능성이 있으나, 보구치와의 직접적인 연관성을 규명하기 위해서는 보구치의 분포 변화, 선호 해양환경 등 환경 변화에 관한 생리적 반응에 관한 추가 연구가 필요하다.

1999–2023년 시기에는 갈치와 참조기가 높은 CPUE를 기록하였으며, 두 어종 모두 PDO 지수와 유의한 음의 상관관계를 보였다(Table 1). 이는 1997–1998년에 PDO가 음의 위상으로 전환된 이후 장기간 지속된 영향이 두 어종의 어획량 증가에 기여했음을 시사한다.

갈치는 대표적인 온대성 어종으로 저층 수온 상승에 민감하게 반응하며(Jin et al., 2023), 쿠로시오 해류와 대마난류 변동과 연관된 것으로 알려져 있다. PDO는 동중국해로의 쿠로시오 해류 수송 변동에 영향을 주기 때문에(Andres et al., 2009), 강화된 쿠로시오는 동중국해 대륙붕으로의 서향 침입을 촉진하며(Wu et al., 2017), 대만 동북쪽에서 대륙붕과 충돌하여 온난한 쿠로시오 수괴가 동중국해로 확산된다(Hsueh, 2000). 이러한 해류 강화와 수온 상승은 제주도 해역의 갈치 서식 적합성을 높여 자원량 증가에 기여했을 가능성이 높다. 더불어 지구 온난화에 따른 해수온 상승은 갈치의 분포 북상과 서식 범위 확장을 촉진하여 지속적인 CPUE 증가에 영향을 미쳤을 가능성이 크다.

참조기는 PDO와의 음의 상관관계가 확인되었으며, 이는 PDO가 동아시아 몬순과 황해난류를 통해 참조기 분포에 영향을 미친 결과로 해석된다. PDO는 동아시아 몬순과 연관되어 있으며(Wang et al., 2008), 몬순에 따른 겨울철 지역 바람장 변화는 황해난류의 형성과 경로를 좌우한다(Xu et al., 2009). 이러한 해류 변화는 참조기 월동장을 동쪽과 북쪽으로 이동시켜(Li et al., 2023) 제주도 해역으로의 참조기 분포 확대로 이어진다. 실제로 Han et al. (2021)은 황해에서 참조기 분포 중심과 접유면적의 분석을 통해 PDO가 참조기의 자원량 변동에 기여한다고 보고하였다. 참조기의 주요 조업 기간은 9월부터 이듬해 3월 까지로(Lim et al., 2014), 월동장의 북상으로 인한 분포 확대는 제주도 해역 참조기 어획량 증가에 기여했을 것으로 판단된다.

종합적으로, 1999–2023년 시기에 나타난 갈치와 참조기의 높은 CPUE는 공통적으로 1997–1998년 PDO 체제 전환의 영향을 받은 것으로 보이며, 특히 갈치는 지구 온난화에 따른 해수온 상승의 영향도 복합적으로 작용하여 어획량 증가에 기여했을 것으로 판단된다.

1970–1981년 시기에 상대적으로 높은 CPUE를 보인 고등어와 삼치는 NPGO와 유의한 양의 상관관계를 보였으나, NPGO 변동에 따른 생태학적 연관성에 관한 연구는 매우 제한적이다. 두 어종은 유사한 어획량 변동 양상을 보이는데(Fig. 4f, 4g), 이는 동일한 어업활동에 의한 외적 영향이 생태학적 차이보다 더 크게 작용했을 가능성을 시사한다. 특히 국내 대형선망어업은 고등어, 전갱이, 삼치 등 표영성 어종을 주로 어획하며 고등어 어획량의 대부분을 차지하므로(Lee et al., 2012; Kim, 2015), NPGO와의 상관관계는 기후 변동보다 조업활동 변화에 따른 허위상관일 가능성이 높다고 판단된다. 다만 고등어와 삼치 자원량 변동이 PDO 등 다른 기후 변동과 관련이 있다는 보고도 있으므로(Tian et al., 2008; Yu et al., 2021), NPGO와의 허위상관 가능성이 높다고 해서 기후 변동의 영향 자체를 배제할 수는 없다.

멸치는 PDO 등 기후 변동과 자원량 변동이 관련이 있다고 알려져 있으나(Zhang et al., 2000; Takasuka et al., 2008), 본 연구에서는 기후 변동과 유의한 상관관계가 확인되지 않았다. 이는 제주도에서 멸치 CPUE 변동이 기후 요인보다 어업 구조 변화와 더 밀접한 관련이 있기 때문으로 해석된다. 확보한 어선세력 자료에 따르면 1969–1979년 사이 동력선은 454척에서 1,107 척으로 증가하였고, 동력선의 높은 출어비용 때문에 어업인들은 경제적 가치가 높은 어업어종으로 어획 대상을 전환했을 가능성이 높다. 그 결과 1970년대 멸치 우세에서 1980년대 이후 갈치 중심의 어획 조성으로 변화하였다(Fig. 1).

또한 멸치 어획량은 시장 수요에 의해 일정한 수준을 유지하는 경향이 있어(Baitaliuk and Radchenko, 2024), 기후 변동에 따른 자원량 변동이 어획량에 반영되지 않았을 가능성이 크다. 실제로 황해와 동중국해의 멸치 현존량은 $1.96\text{--}3.00 \times 10^6 \text{ MT}$ 으로 추정되지만(Iversen et al., 1993; Ohshima, 1996), 1970–

2023년간 국내 멸치 연평균 어획량은 약 $0.2 \times 10^6 \text{ MT}$ 으로 현존량 대비 현저히 낮은 수준에 머물고 있다(KOSIS, 2025a). 따라서 제주도 해역에서 멸치 CPUE 변동은 기후 변동의 영향보다는 어업 구조 변화, 시장 수요, 조업 전략 등 사회·경제적 요인이 주요하게 작용한 것으로 판단된다.

기후 변동에 따른 제주도 어업 대응방안

제주도 주요 어업어종 일부는 PDO와 유의한 상관관계를 보였으며, PDO 양의 위상기(1977–1997년)에는 살오징어가, 음의 위상기(1999–2023년)에는 갈치와 참조기가 높은 어획량을 기록하여 위상 변화에 따른 어획 조성 변화가 뚜렷하게 나타났다. 이는 북태평양 기후 변동이 제주도 어업에 직접적인 영향을 미치고 있음을 시사한다. 특히 주목할 점은 PDO가 1998년 이후 음의 위상이 지속되고 있으나, 20–30년 주기의 위상 전환 특성을 고려할 때(Mantua and Hare, 2002) 향후 양의 위상으로 전환될 가능성이 있다는 것이다. 따라서 이러한 체제 전환 시 주요 어업어종별로 상반된 영향을 받을 것으로 예상되므로, 제주도 어업 부문의 선제적 대응 전략 수립이 필요하다.

기후 변동으로 인해 어획량 감소가 예상되는 어업의 경우에는 두 가지 적응 방향을 고려할 수 있다. 첫째는 어업 전환 지원을 통한 탄력성 증진이다. 어선·어구 개조비용 보조, 전환 기간 중 어업인의 소득 보전을 위한 지원금 지급, 전환한 어업에 대한 어업지도 및 교육훈련 제공 등 기후 변동에 취약한 어종에서 상대적으로 안정적인 어종으로의 어업 전환을 제도적으로 지원함으로써 어업인의 적응 역량을 강화할 수 있다. 이는 어업인 생계 안정성 확보와 동시에 기후 변동에 대한 어업의 적응력 향상에 기여할 것으로 판단된다.

둘째, 어업 구조개선을 통한 사회적 지원 강화이다. 어업인의 고령화나 자본 제약으로 어업 전환이 어려운 경우에는 감척 정책의 개정을 통한 우선순위 조정을 통해 기후 변동의 부정적 영향을 완화할 수 있다. 이는 취약계층에 대한 기후 변동에 따른 소득 손실에 선제적으로 대응하는 사회안전망 기능과 더불어 전체적인 어업 구조의 효율성 제고에도 기여할 수 있을 것이다.

기후 변동으로 인해 어획량 증가가 예상되는 어업의 경우에도 장기적 지속가능성을 위한 관리 체계 구축이 필요하다. 자원량 증가가 반드시 어획량 증대로 이어져야 하는 것은 아니며, 과도한 어획 압력은 오히려 자원량에 부정적인 영향을 주어 장기적으로 어획량 감소를 야기할 수 있기 때문이다. 따라서 기후 변동을 고려한 과학적 자원평가 체계의 구축과 이에 기반한 적정 어획량 설정이 필요하다. 또한 어획량 증가로 인한 시장 공급 과잉은 어가 하락을 통해 어업인 소득에 부정적 영향을 미칠 수 있으므로, 어업인 자율관리 체계를 통한 계획적 어획량 조절도 고려할 수 있다. 이는 시장 안정성 확보와 함께 자원의 지속적 이용에도 기여할 것으로 예상된다.

총허용어획량 제도

우리나라는 일부 어업어종을 대상으로 총허용어획량(total al-

lowable catch, TAC)을 설정하여 자원관리를 하고 있다. 수산 자원관리법에 따르면, 한국의 TAC는 생물학적허용어획량(alowable biological catch, ABC) 산정을 기반으로 하는 자원량 종속 전략을 채택하며, 자원 상태에 따라 TAC를 조정하는 적응적 관리 방식을 적용한다(KLIC, 2020). ABC 산정은 이용 가능한 정보 수준에 따라 5단계로 구분하여 수행되고, 1~3단계는 자원량과 어획사망계수 등을 직접 활용하는 반면, 4단계는 CPUE를 통해 자원 상태를 평가한다. 이때 4단계 평가는 CPUE가 자원량을 적절히 반영한다는 가정에 기초한다.

본 연구에서 기후 변동과 상관관계를 보인 주요 어업어종 중 TAC 대상 어종인 살오징어, 갈치, 참조기의 경우에는 앞서 고찰한 바와 같이 변동이 자원량 변화보다는 기후 변동에 따른 산란장과 월동장 이동으로 인한 분포와 회유 경로 변화에 주로 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 어획 접근성 변화는 자원량이 안정적임에도 CPUE의 증감을 통해 자원 상태를 잘못 평가하게 하여 부적절한 TAC 설정을 초래하고, 결과적으로 불필요한 어획 제약을 가할 수 있다. 따라서 효율적인 수산업 관리를 위해서는 어종별 특성에 따른 차별화된 접근이 필요하다. 자원량 변동이 주된 요인인 어종에는 기존 TAC 제도를 적용하되, 분포 변화가 지배적인 어종에 대해서는 기후 변동을 고려한 새로운 관리 방안을 도입하는 것이 바람직하다.

연구 한계

본 연구는 제주도 해역 어업어종을 대상으로 한 장기 자원량 조사 자료가 부족하여 불가피하게 연근해어업 어획량 자료를 사용하였으나, 행정구역별 집계자료라는 특성상 실제 제주도 해역 어획량을 완전히 반영하지 못하는 한계가 있다. 타 해역에서 조업하여 제주도로 위판되거나 반대로 제주도 해역에서 조업하여 타 행정구역으로 위판된 어획량, 그리고, 비계통으로 거래되는 어획량으로 인해 실제 어획량이 과대·과소평가되었을 가능성이 있다. 본 연구에서 확보한 어선세력 자료는 어업 종류별로 구분되어 있지 않아 어업어종별로 차별화된 어획노력량을 반영하지 못한 한계가 있다. 또한, GT는 어구 및 어로장비 발달, 조업 기술 향상 등 시대별 어업 기술 발전에 따른 어획효율 변화를 반영하지 못하여 실제 어획노력량을 과대·과소평가 할 가능성이 있다. 더불어 기후 변동 지수와 제주도 해역의 수온, 염분, 해류 등 해양환경 간의 상관관계를 검증하지 않아 기후 변동이 실제 제주도 해역 해양환경에 미치는 영향을 확인할 수 없었으며, 위경도 정보가 포함된 어획량 자료 확보의 어려움으로 기후 변동에 따른 어업어종의 시공간 분포 변화를 파악하지 못한 한계가 있다.

향후 연구

향후 연구에서는 기후 변동과 제주도 해역 해양환경 간의 연계를 명확히 규명하기 위한 자료 확보와 분석이 필요하다. 수온, 염분, 엽록소 a 등 해양환경 변수의 장기 시계열 자료를 확보하고, 이를 통해 기후 변동 지수와의 상관관계를 정량적으로 분석

해야 한다. 또한, 실제 조업 위치를 기반으로 제주도 어업어종별 어획량 자료와 어업 종류별 어획노력량 자료를 확보하고, 시대별 어업 기술 발전에 따른 어획효율 변화를 보정하여 CPUE 추정의 정확도를 높일 필요가 있다. 마지막으로 이러한 자료들을 통합하여 예측 모델을 개발하고, 어업어종의 시공간 분포 및 어획량 변화를 전망하는 연구가 이루어진다면 기후변화가 제주도 연근해어업에 미치는 영향을 종합적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행되었습니다(RS-2022-KS221566, 제주씨그랜트).

References

Andres M, Park JH, Wimbush M, Zhu XH, Nakamura H, Kim K and Chang KI. 2009. Manifestation of the Pacific decadal oscillation in the Kuroshio. *Geophys Res Lett* 36, L16602. <https://doi.org/10.1029/2009GL039216>.

Baitaliuk AA and Radchenko VI. 2024. The current status and trends in the commercial stock of the Japanese anchovy, *Engraulis japonicus* (Engraulidae), in Russian waters of the Sea of Japan. *Russ J Mar Biol* 50, 380-391. <https://doi.org/10.1134/S1063074024700299>.

Brander KM. 2007. Global fish production and climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A* 104, 19709-19714. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702059104>.

Cha SC and Moon JH. 2020. Current systems in the adjacent seas of Jeju Island using a high-resolution regional ocean circulation model. *Ocean Polar Res* 42, 211-223. <https://doi.org/10.4217/OPR.2020.42.3.211>.

Chavez FP, Ryan J, Lluch-Cota SE and Niessen CM. 2003. From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science* 299, 217-221. <https://doi.org/10.1126/science.1075880>.

Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb KM, Franks PJS, Chhak K, Miller AJ, McWilliams JC, Bograd SJ, Arango H, Curchitser E, Powell TM and Riviére P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys Res Lett* 35, L08607. <https://doi.org/10.1029/2007GL032838>.

Francis RC and Hare SR. 1994. Decadal-scale regime shifts in the large marine ecosystems of the north-east Pacific: A case for historical science. *Fish Oceanogr* 3, 279-291. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1994.tb00105.x>.

Francis RC, Hare SR, Hollowed AB and Wooster WS. 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fish Oceanogr* 7, 1-21. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.1998.00052.x>.

Gordon AL and Giulivi CF. 2004. Pacific decadal oscillation and

sea level in the Japan/East Sea. Deep Sea Res I Oceanogr Res Pap 51, 653-663. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.02.005>.

Greenacre MJ. 2010. Correspondence analysis. Wiley Interdiscip Rev Comput Stat 2, 613-619. <https://doi.org/10.1002/wics.114>.

Guo Y, Mo D and Hou Y. 2021. Interannual to interdecadal variability of the Southern Yellow sea cold water mass and establishment of “Forcing Mechanism Bridge”. J Mar Sci Eng 9, 1316. <https://doi.org/10.3390/jmse9121316>.

Han Q, Grüss A, Shan X, Jin X and Thorson JT. 2021. Understanding patterns of distribution shifts and range expansion/contraction for small yellow croaker (*Larimichthys polyacanthus*) in the Yellow Sea. Fish Oceanogr 30, 69-84. <https://doi.org/10.1111/fog.12503>.

Hare SR and Mantua NJ. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. Prog Oceanogr 47, 103-145. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00033-1).

Hill MO. 1974. Correspondence analysis: A neglected multivariate method. J R Stat Soc Ser C Appl Stat 23, 340-354. <https://doi.org/10.2307/2347127>.

Hsueh Y. 2000. The Kuroshio in the East China Sea. J Mar Syst 24, 131-139. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00083-4](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00083-4).

Hur HB, Jacobs GA and Teague WJ. 1999. Monthly variations of water masses in the Yellow and East China Seas, November 6, 1998. J Oceanogr 55, 171-184. <https://doi.org/10.1023/A:1007885828278>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2018. Annex I: Glossary. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M and Waterfield T, eds. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.A., 546-546.

Iversen SA, Zhu D, Johannessen A and Toresen R. 1993. Stock size, distribution and biology of anchovy in the Yellow Sea and East China Sea. Fish Res 16, 147-163. [https://doi.org/10.1016/0165-7836\(93\)90049-D](https://doi.org/10.1016/0165-7836(93)90049-D).

Jeon BS, Choi JH, Im YJ, Lee HW and Kim JW. 2020. Maturity and spawning of white croaker *Pennahia argentatus* in the Southern Sea of Korea. Korean J Fish Aquat Sci 53, 36-42. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0036>.

Jin Y, Yuan XW, Zhang Y, Li JS, Yan LP, Liu ZL and Cheng JH. 2023. Impacts of climate change on vicennial spatial behaviors of *Trichiurus japonicus* in the East China Sea. Estuar Coast Shelf Sci 285, 108305. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108305>.

Jung S, Ha S and Na H. 2013. Multi-decadal changes in fish communities Jeju Island in relation to climate change. Korean J Fish Aquat Sci 46, 186-194. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0186>.

Kawata Y. 2012. Fishery resource recovery strategy without reducing the number of landings: A case study of the oceanic puffer in Japan. Ecol Econ 77, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.03.006>.

Kim DY. 2015. Comparison of production structure of purse seine fishery in Korea and Norway. J Fish Mar Sci Educ 27, 308-318. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.1.308>.

Kim YH, Jung HK and Lee CI. 2018. Changes in the spawning ground environment of the common squid, *Todarodes pacificus* due to climate change. Ocean Polar Res 40, 127-143. <https://doi.org/10.4217/OPR.2018.40.3.127>.

Kim YH, Jung HK, Oh SY, Kim HW and Lee CI. 2019. Review of migration and distribution of the common squid (*Todarodes pacificus*) in the East Sea and the Yellow Sea. J Mar Life Sci 4, 14-21. <https://doi.org/10.23005/KSMLS.2019.4.1.14>.

KLIC (Korean Law Information Center). 2020. Methods and Details of Detailed Investigation and Assessment of Fishery Resources. Retrieved from <https://law.go.kr/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000119074> on Sep 3, 2025.

Ko JC, Kim BY, Kim MJ, Park SE, Kim JB and Cho HK. 2015. A seasonal characteristic of marine environment and fish assemblage in the coastal waters Jeju Island, Korea from 2012 to 2013. J Fish Mar Sci Educ 27, 319-344. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.2.319>.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2025a. Fishery Production Statistics by Type of Fishery and Species. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EW0004&conn_path=I2 on Mar 1, 2025.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2025b. Fishing Fleet Statistics by Province and Type of Vessel. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=146&tblId=DT_ERT9010&conn_path=I2 on Mar 1, 2025.

Lê S, Josse J and Husson F. 2008. FactoMineR: An R package for multivariate analysis. J Stat Softw 25, 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.

Lee JH, Lee JB, Zhang CI, Kang S, Choi YM and Lee DW. 2012. A study on fluctuation of the fishing grounds of target fishes by the Korean large purse seine fishery. J Korean Soc Fish Ocean Technol 48, 107-117. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.2.107>.

Lee JY, Kim KH, Lee HJ, Hwang SG and Kang TS. 2025. Genetic variations suggests that *Takifugu rubripes*, *T. chinensis*, and *T. pseudomimus* are the same species with a shared gene pool. Front Mar Sci 11, 1506390. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1506390>.

Li G, Xiong Y, Zhong X, Song D, Kang Z, Li D, Tang J, Wang Y and Wu L. 2023. Changes in overwintering ground of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) based on MaxEnt and GARP models: A case study of the southern Yellow Sea stock. *J Fish Biol* 102, 1358-1372. <https://doi.org/10.1111/jfb.15383>.

Lie HJ, Cho CH, Lee JH, Lee S and Tang Y. 2000. Seasonal variation of the Cheju warm current in the northern East China Sea. *J Oceanogr* 56, 197-211. <https://doi.org/10.1023/A:1011139313988>.

Lim YN, Kim H and Kim DH. 2014. Predicting changes in fishing conditions for the small yellow croaker *Larimichthys polyactis* based on expansions of the Yellow Sea bottom cold water. *Korean J Fish Aquat Sci* 47, 419-423. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2014.0419>.

Liu Y, Xia X, Tian Y, Alabia ID, Ma S, Sun P and Saitoh SI. 2021. Influence of spawning ground dynamics on the long-term abundance of Japanese flying squid (*Todarodes pacificus*) winter cohort. *Front Mar Sci* 8, 659816. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.659816>.

MABIK (Marine Biodiversity Institute of Korea). 2023. Marine vertebrates. In: 2023 National List of Marine Species. Namu Press, Seocheon, Korea, 70-71.

MacQueen J. 1967. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Le Cam LM and Neyman J, eds. University of California Press, Berkeley, CA, U.S.A., 281-283.

Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M and Hornik K. 2025. Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions (R package version 2.1.8.1). Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=cluster> on Apr 1, 2025.

Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM and Francis RC. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull Am Meteorol Soc* 78, 1069-1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICO>2.0.CO;2).

Mantua NJ and Hare SR. 2002. The Pacific Decadal Oscillation. *J Oceanogr* 58, 35-44. <https://doi.org/10.1023/A:1015820616384>.

Miller AJ, Cayan DR, Barnett TP, Graham NE and Oberhuber JM. 1994. The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography* 7, 21-26. <https://doi.org/10.5670/oceanog.1994.11>.

Moon JH, Hirose N and Yoon JH. 2009. Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea. *J Geophys Res Oceans* 114, C08016. <https://doi.org/10.1029/2009JC005314>.

OGD (Open Government Data). 2025. Consignment Sales Status by Date. Retrieved from <https://www.data.go.kr/en/data/15057689/openapi.do> on Feb 1, 2025.

Ohshima S. 1996. Acoustic estimation of biomass and school character of anchovy *Engraulis japonicus* in the East China Sea and the Yellow Sea. *Fish Sci* 62, 344-349. <https://doi.org/10.2331/fishsci.62.344>.

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, Borman T, Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista HBA, FitzJohn R, Friendly M, Furneaux B, Hannigan G, Hill MO, Lahti L, Martino C, McGlinn D, Ouellette MH, Ribeiro Cunha E, Smith T, Stier A, Ter Braak CJF and Weedon J. 2025. Vegan: Community Ecology Package. Retrieved from <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> on Mar 20, 2025.

Overland J, Rodionov S, Minobe S and Bond N. 2008. North Pacific regime shifts: Definitions, issues and recent transitions. *Prog Oceanogr* 77, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.03.016>.

Pang IC, Hong CS, Chang KI, Lee JC and Kim JT. 2003. Monthly variation of water mass distribution and current in the Cheju Strait. *J Korean Soc Oceanog* 38, 87-100.

Pörtner HO and Knust R. 2007. Climate change affects marine fishes through the oxygen limitation of thermal tolerance. *Science* 315, 95-97. <https://doi.org/10.1126/science.1135471>.

R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Retrieved from <https://www.R-project.org/> on Mar 10, 2025.

Rodionov SN. 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys Res Lett* 31, L09204. <https://doi.org/10.1029/2004GL019448>.

Rodionov SN. 2006. Use of prewhitening in climate regime shift detection. *Geophys Res Lett* 33, L12707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025904>.

Rousseeuw PJ. 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *J Comput Appl Math* 20, 53-65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).

Shin HIR, Lee JH, Kim CH, Yoon JH, Hirose N, Takikawa T and Cho K. 2022. Long-term variation in volume transport of the Tushima warm current estimated from ADCP current measurement and sea level differences in the Korea/Tushima Strait. *J Mar Syst* 232, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103750>.

Tagawa M and Ito M. 1996. Migration of ocellate puffer, *Takifugu rubripes*, based on tagging experiments in the East China Sea and the Yellow Sea. *Bull Seikai Natl Fish Res Inst* 74, 73-83.

Takasuka A, Oozeki Y, Kubota H and Lluch-Cota SE. 2008. Contrasting spawning temperature optima: Why are anchovy and sardine regime shifts synchronous across the North Pacific?. *Prog Oceanogr* 77, 225-232. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.03.008>.

Ter Braak CJF. 1986. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* 67, 1167-1179. <https://doi.org/10.2307/1938737>.

org/10.2307/1938672.

Thompson DWJ and Wallace JM. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett* 25, 1297-1300. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.

Tian Y, Kidokoro H, Watanabe T and Iguchi N. 2008. The late 1980s regime shift in the ecosystem of Tsushima warm current in the Japan/East Sea: Evidence from historical data and possible mechanisms. *Prog Oceanogr* 77, 127-145. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.03.007>.

Wang L, Chen W and Huang R. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett* 35, L20702. <https://doi.org/10.1029/2008GL035287>.

Wu CR, Wang YL, Lin YF and Chao SY. 2017. Intrusion of the Kuroshio into the south and East China Seas. *Sci Rep* 7, 7895. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08206-4>.

Xu LL, Wu DX, Lin XP and Ma C. 2009. The study of the Yellow Sea Warm Current and its seasonal variability. *J Hydodyn* 21, 159-165. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(08\)60133-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60133-X).

Yang MH, Moon TS, Yu JT, Ko JC and Chang DS. 2007. Species appearance and seasonal variation of macrobenthic invertebrate in the coastal water of Chagwi-do, Jeju-Island. *Korean J Malacol* 23, 235-243.

Yelland PM. 2010. An introduction to correspondence analysis. *Math J* 12, 1-23. <https://doi.org/10.3888/tmj.12-4>.

Yu W, Wen J, Chen X, Li G, Li Y and Zhang Z. 2021. Effects of climate variability on habitat range and distribution of chub mackerel in the East China Sea. *J Ocean Univ China* 20, 1483-1494. <https://doi.org/10.1007/s11802-021-4760-x>.

Zhang CI, Lee JB, Kim S and Oh JH. 2000. Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystem and fisheries resources in Korean waters. *Prog Oceanogr* 47, 171-190. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00035-5).

Zhao S, Kindong R, Gao C, Pandong NA and Tian S. 2024. Stock exploitation status of silver croaker (*Pennahia argentata*) from the East China Sea. *J Sea Res* 202, 102549. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102549>.