

해양환경측정망 자료를 활용한 강원 연안 수온상승-수질 공동효과와 살오징어 어획량의 비선형 연계 분석

정건우¹ · 강민재¹ · 길정환¹ · 이동준¹ · 이윤경^{2,†}

¹세종대학교 환경융합공학과 학부생

²세종대학교 환경융합공학과 조교수

Nonlinear Linkages Between *Todarodes pacificus* Catches and the Joint Effects of Sea-Surface Warming and Water Quality in the Gangwon Coastal Region, Korea

Geonwoo Jeong¹, Minjae Kang¹, Junghwan Gil¹, Dongjoon Lee¹, and Yunkyung Lee^{2,†}

¹Undergraduate Student, Department of Environmental and Energy, Sejong University, Seoul 05006, Korea

²Assistant Professor, Department of Environmental and Energy, Sejong University, Seoul 05006, Korea

요 약

기후변화로 인한 해수면 수온 상승은 연안 해양환경의 물리·화학적 특성을 변화시키며, 이는 어업자원의 서식 조건과 공간 분포에 중대한 영향을 미친다. 본 연구는 해양환경측정망(MEIS)의 표층 수질자료와 강원 연안의 어업통계(2005–2024)를 결합하여, 수온 상승(SST)과 수질 변화의 공동효과가 살오징어(*Todarodes pacificus*) 어획량에 미치는 비선형 반응 구조를 정량 평가하였다. 먼저 수온 상승의 영향을 거의 받지 않는 변수를 제외하기 위해, SST-수질 간 계절별 회귀로 수온 영향이 미미한 후보 변수를 선별한 뒤, 수온과 수질 변수 간 계절별 회귀 분석을 진행한 후 살오징어 어획량과 수질 변수 간 회귀 분석을 진행하였다. 신뢰성 판단 기준은 단일 선형 회귀의 Pearson 상관계수(r), 표준화 후 다중 선형 회귀(Ordinary Least Squares, OLS)를 통한 유의 확률(p) 및 신뢰 구간(Confidence Interval, CI)과 다중공선성(Variance Inflation Factor, VIF), Elastic Net 회귀 계수 기준을 종합적으로 활용하여 유의 변수를 선정하였다. 이어 GAM (Generalized Additive Models)으로 어획량-수질 간 비선형 반응함수를 적합하였다. 그 결과, 총인(TP)은 5·8·11월 분석에서 일관되게 유의하였고, 계절 통합 GAM에서는 TP \approx 18–39 $\mu\text{g L}^{-1}$ 구간에서 어획량 증가, \geq 40 $\mu\text{g L}^{-1}$ 에서 감소하는 임계-포화형 반응이 확인되었다. 이는 TP가 일정 수준까지는 생산성 촉진 인자로, 과도하면 부영양화·서식지 저하를 야기하는 이중 조절자로 기능함을 시사한다. 본 연구는 연안 오징어 어획이 수온뿐 아니라 수질 요소(특히 TP)의 비선형 변화에 의해 간접적으로 설명될 수 있음을 실증하며, TP 임계치 기반의 관리지표(월별·구간별 위험등급)로의 확장 가능성을 제시한다. 다만, 연안 중심의 단기 관측과 외해 자료·외생 기상요인 미반영은 한계로, 향후 연안-외해 통합 자료와 유기인(유기·입자) 분획 측정을 통한 기작 검증이 요구된다.

Abstract – Climate change-driven ocean warming alters the physicochemical properties of coastal waters, thereby reshaping habitat conditions and the spatial distribution of fishery resources. Leveraging the Marine Environmental Information System (MEIS) surface data and fishery statistics for the Gangwon coast (2005–2024), we quantified the joint effects of sea-surface warming (SST) and water-quality variability on catches of the Japanese flying squid (*Todarodes pacificus*). We first conducted seasonal regressions between SST and water-quality variables to retain candidates minimally affected by temperature, then combined simple and multiple linear regressions (correlation coefficients, p -values, and CIs, VIF) with Elastic Net to identify robust predictors. Subsequently, Generalized Additive Models (GAMs) were fitted to capture nonlinear response functions between catch and water quality. Total phosphorus (TP) emerged as a consistently significant predictor across May, August, and November. The integrated seasonal GAM revealed an ecological threshold: squid catch increased at TP \approx 18–39 $\mu\text{g L}^{-1}$, but declined

[†]Corresponding author: yunkyunglee@sejong.ac.kr

beyond $40 \mu\text{g L}^{-1}$, indicating a dual regulatory role of TP—enhancing productivity below the threshold while inducing eutrophication and habitat degradation at excessive levels. These results indirectly demonstrate that coastal squid catches are shaped not only by temperature but also by water-quality dynamics, particularly TP, and point to the feasibility of TP-threshold-based management indicators (e.g., monthly risk classes) for operational use. Limitations include reliance on coastal observations, exclusion of offshore data, and limited treatment of exogenous meteorological forcings; future work should integrate coastal–offshore datasets and measure organic phosphorus fractions to refine mechanisms and improve predictability under ongoing climate change.

Keywords: *Todarodes pacificus*(살오징어), Sea surface temperature(해수온), Water quality(수질), Eneralized additive model(일반화 가법 모형), Joint effect(공동효과)

1. 서 론

최근 수십 년간 기후변화로 인한 해수온 상승은 해양의 물리·화학적 환경의 변화를 일으켰다(Poloczanska *et al.*[2013]; Hu *et al.*[2019]). 해양 환경 변화는 수질 변동을 초래하며, 나아가 해양 생물자원의 생존, 번식, 분포, 어획량에 복합적인 영향을 미치고 있다(Poloczanska *et al.*[2013]; Venegas *et al.*[2023]). 수온의 장기적인 상승은 표층 해류의 변형, 수직 수온 구배의 심화로 인한 혼합 저하 등 물리적 해양 환경 변화를 초래한다(Breitburg *et al.*[2018]; Gerace *et al.*[2025]). 이는 곧 pH, 용존 산소(DO), 영양염과 같은 화학적 요소의 변동으로 이어지며, 해양 생물의 생존과 번식에 직접적인 영향을 미친다(Breitburg *et al.*[2018]; Venegas *et al.*[2023]). 특히, 수온이 상승할수록 해수 중 산소(O₂)의 용해도는 감소하고, 이에 따른 저산소 수괴(hypoxic zones)의 형성은 산란장 파괴 및 유생기 생존율 감소를 유발할 수 있다(Breitburg *et al.*[2018]; Hu *et al.*[2019]). 또한, 표층과 심층 간 혼합의 약화는 질산염(NO₃⁻)과 인산염(PO₄³⁻)을 포함한 영양염의 공급을 저해하여, 결과적으로 해양 1차 생산성을 떨어뜨린다(Breitburg *et al.*[2018]; Gerace *et al.*[2025]). 이러한 해양 환경 변화가 해양 생물 중에 미치는 영향은 실제 사례에서도 분명히 나타난다. 북해에서는 해수온 상승의 영향으로 대서양 대구(*Gadus morhua*)의 주요 서식지가 점차 북상하면서 개체군 구조 변화 및 어획 효율성 저하가 관찰되었고(Schakmann *et al.*[2023]; Perry *et al.*[2024]), 태평양에서는 청어(*Chupea pallasii*)의 생식 능력이 수온 상승과 해양 산성화의 복합 작용으로 감소하였다(Singh *et al.*[2023]). 알래스카 베링 해의 눈꽃게(*Chionoecetes opilio*)는 고수온에 의한 열량 요구량 증가와 먹이 자원 부족의 동시 발생으로 개체 수가 급감해 일시적 조업 중단에까지 이르렀다(Szuwalski *et al.*[2023]). 이와 같은 사례는 단순히 수온의 직접적인 효과를 넘어, 수온 상승으로 인해 변화하는 다양한 해양 환경 요소에 의한 결과이며, 종의 생리적 특성에 따라 다르게 나타난다. 전 지구적 해수온 상승과 그로 인한 해양 환경 변화는 동북아시아 연안에서도 점차 뚜렷해지고 있으며, 계절적 및 시공간적 수질 변동은 이 지역 생태계의 구조와 생물 종 분포에 중요한 변화를 일으키고 있다(Hu *et al.*[2019]; Kim *et al.*[2019]).

살오징어(*Todarodes pacificus*)는 동북아시아 해역에서 분포하는 대표적인 두족류로, 일본 북서부 해역 및 한국과 중국의 동쪽 해역에서 연중 조업이 이루어지는 주요 상업 종이다(Rosa *et al.*[2011];

Kim *et al.*[2019]; Yang *et al.*[2023]). 이 종은 단년생으로, 개체군의 전 생애가 단기간 내 해양 환경에 노출되기 때문에 해양의 물리·화학적 변화에 민감하게 반응한다(Sakurai *et al.*[2000]; Rosa *et al.*[2011]). 살오징어는 일반적으로 동중국해 또는 남해에서 산란한 후 동해를 따라 북상하며, 이후 다시 남하하는 연중 반복적 회유 경로를 따른다(Kidokoro *et al.*[2010]; Rosa *et al.*[2011]; Kim *et al.*[2019]). 이러한 회유 경로는 수온, 해류, 혼합층 깊이 등의 해양 물리적 요인에 상당한 영향을 받으며, 일부 개체군은 특정 해역에 정착해 군집을 형성하기도 한다(Sakurai *et al.*[2000]; Kidokoro *et al.*[2010]). 예를 들어, 일본 북서부 해역의 장기적 수온 상승은 살오징어의 회유 시기 및 산란장 위치를 북상시키는 경향을 보였으며(Kidokoro *et al.*[2010]), 이는 지역 어업 활동의 조기화 혹은 조업지 이동으로도 이어지고 있다. 또한, 표층 수온 상승은 대사율 증가와 연관되어 살오징어의 개체 성장 속도에는 긍정적 영향을 줄 수 있으나, 일정 수온 임계치를 초과할 경우, 개체의 생장률 및 생존율이 급격히 저하되는 부적응 반응도 보고된다(Takahara *et al.*[2017]). 수온에 의한 생리적 반응 외에도, 해양 화학적 요인에 의한 메커니즘 역시 작용한다(Breitburg *et al.*[2018]; Han *et al.*[2019]; Gerace *et al.*[2025]). 예를 들어, 북서 인도양 오징어(*Sthenoteuthis oualaniensis*)를 다룬 논문에서는 오징어가 단순히 수온뿐만 아니라 염분 농도, 염분 등 다양한 변수와 유의한 상관관계를 보인다고 보고되었으며(Wang *et al.*[2022]), 일본의 살오징어를 대상으로 하는 연구에서도 오징어는 수온 외 해류, 염분, 저산소 수괴 등의 영향을 받는 것으로 나타났다(Sakurai *et al.*[2000]; Han *et al.*[2019]). 따라서 살오징어는 단순한 물리 환경뿐 아니라, 다양한 수질 요인의 복합적인 영향을 받는 생물 종이며, 한반도 동해안, 그중에서도 강원도 해역은 살오징어의 주요 회유 경로로서 생태적 중요성이 크다(Kim *et al.*[2017]; Kim *et al.*[2019]).

강원도 해역은 해양 수질의 장기적 변화가 뚜렷하게 나타나는 구역이며, 동시에 살오징어의 주요 조업지 및 회유 경로로서 가치가 크다(Kim *et al.*[2019]; National Institute of Fisheries Science, NIFS[2024a]). EU에서 운영하며, 고해상도 해양 재분석 자료를 제공하는 Copernicus Marine Environment Monitoring Service(CMEMS)에 따르면, 강원도 해역(37.0°N–38.5°N, 129.0°E–130.5°E)에서의 연평균 표층 수온은 1993년 15.17°C에서 2022년 17.74°C로 상승하여, 약 2.6°C의 증가 폭을 보였다. 한편, 국립수산물과학원의 관측 결과에 따르면, 2023년 9월 강원도 연근해의 표층 평균 수온은 약

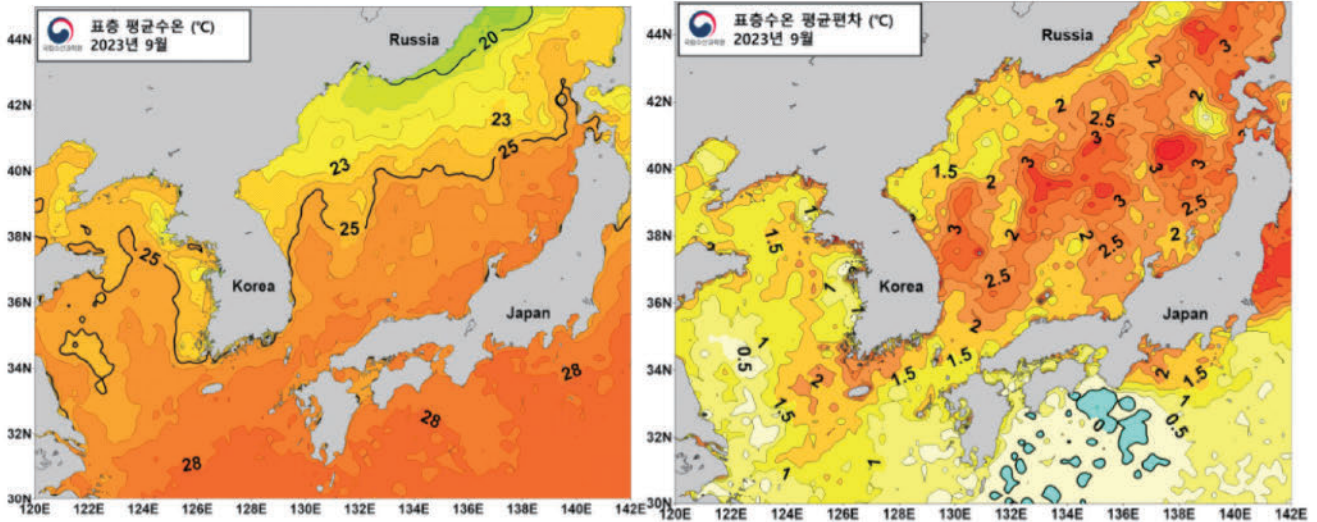


Fig. 1. Sea surface temperature (SST) distribution and 20-year mean anomaly in the Korean coastal waters for September 2023.

24°C로, 지난 20년 평균보다 약 1.5~3.0°C 높은 이상 편차를 보였다(Fig. 1).

이러한 단기적 이상 고수온 현상은 장기적인 상승 추세(CMEMS[2023])와 함께, 살오징어를 포함한 연안 어자원에 스트레스 및 회귀 경로 복잡 등, 누적적인 생태적 부담을 유발할 가능성이 크다(Sakurai *et al.*[2000]; Takahara *et al.*[2017]). 실제로, 국내 연근해 어업 통계 따르면, 1993년 36,265톤이었던 연안 어획량은 2024년 914톤으로 감소하였으며, 최근 10년간 평균은 약 4,900톤 수준에 머물렀다(Ministry of Oceans and Fisheries, MOF[2023]). 이러한 수온 상승과 어획량 감소 간의 장기 추세는 구조적 연관 가능성 시사하며, 단순한 어획 압력 외에도 수질 변화가 어군 밀도와 분포에 영향을 미쳤을 가능성이 제기된다(Rosa *et al.*[2011]; Venegas *et al.*[2023]). 본 연구는 이러한 배경을 바탕으로, 강원도 해역에서 관측된 살오징어 어획량과 수질 변화의 상관성을 보다 정밀하게 분석하기 위해, 실제 조업과 생태적 접촉이 이루어지는 강원도 연안 정점 기반의 수질 자료를 활용하였다 다만, 연안(만 및 항구)을 중심으로 한 수질관측망 자료는 공간적으로 제한된 범위를 대표하므로, 넓은 해역을 회유하는 살오징어의 분포 변동을 직접적으로 설명하기에는 한계가 존재한다. 따라서, 본 연구는 이러한 한계성을 인지하고, 연안에서의 환경 변동이 회유성 어종에 미칠 수 있는 간접적 영향의 가능성에 초점을 두었다.

해양 수질 변화가 어자원에 미치는 영향을 정량적으로 분석하려는 시도는 국내외에서 꾸준히 이루어지고 있으며, 그 방법론은 점점 정교해지고 있다(Huang *et al.*[2022]; Yang *et al.*[2023]). 대부분의 연구는 수온, 염분, DO 등의 환경 데이터를 독립변수로 설정하고, 특정 어종의 출현율, 밀도, 어획량을 종속변수로 삼아 회귀 분석 또는 기계학습 기반 예측 모델을 활용하고 있다(Huang *et al.*[2022]; Yang *et al.*[2023]; Xiang *et al.*[2025]). 예를 들어, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 여름철 수온, 염분, DO 등이 넙치(*Paralichthys dentatus*)의 연안 분포와 어획량에 유

의미한 영향을 미친다는 분석 결과를 제시하며, 이러한 통계 기반 모형이 어획량 관리 의사결정에 정량적 근거를 제공할 수 있음을 강조하였다(EPA[2014]). 또한, Xiang *et al.*[2025]은 아르헨티나 오징어(*Illex argentinus*)의 분포 예측을 위해, 위성 자료 및 어획량 데이터를 활용한 CNN-Attention(Convolutional Neural Network with Attention) 형모를 적용하였으며, 5종 이상의 환경 변수 자료를 바탕으로 85% 이상의 예측 정확도를 기록하였다. 선행 연구로는 Yang *et al.*[2023]이 수행한 서식지 적합도 분석이 있으며, 이들은 남황해에서 동중국해에 이르는 해역을 대상으로 수온, 염분, 수심 등의 해양 환경 변수를 입력하여 일반화 가법 모형(Generalized Additive Model, GAM)을 적용하고, 계절별 살오징어 서식 분포를 정량적으로 예측하였다. 특히 가을철 수온은 서식 적합도에 비선형적 영향을 미치는 요인 중 하나로 확인되어, 조업 시기 결정 및 어군 밀도 예측의 과학적 근거를 제시하였다. 최근에는 기후변화에 따른 해양 환경의 미래 변화를 정량적으로 예측하기 위해, 사회경제발전경로(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)기반의 시나리오가 널리 활용되고 있다. 특히, 고배출 시나리오인 SSP5-8.5는 향후 온실가스 배출이 지속적으로 증가할 경우를 가정하여 수온, 염분, DO, pH 등 주요 수질 변수의 변화를 시뮬레이션하며, 이를 통해 미래 어종의 서식지 적합도 변화를 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Huang *et al.*[2022]). 이처럼 어획량 변동의 원인을 단순히 어업 활동의 결과로만 해석하기보다, 수온을 비롯한 해양 환경의 복합적인 영향력을 통계적 분석 기반으로 규명하려는 시도는 현대 수산 과학의 핵심적 흐름을 반영한다(Huang *et al.*[2022]; Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO[2022]).

본 연구는 강원도 연안에서 살오징어의 자원 변동성과 해양 환경 변화 간의 관계를 규명하기 위해 다음과 같은 목적을 가진다: 첫 번째, 강원도 연안 수온 및 염분, DO, 영양염 등의 수질 자료를 기반으로, 수온 상승에 따른 해양 환경 변화의 계절별 변동성을 파악한다. 두 번째, 살오징어 어획량과 수온-수질 변수 간의 상관관계 및

회귀 분석을 수행하여, 어획량 변동에 영향을 미치는 주요 환경 요인을 정량적으로 규명한다. 이를 바탕으로 강원도 연안의 지속 가능한 수산 자원 관리 및 기후변화 대응의 과학적 기반을 마련한다.

2. 연구 방법

2.1 자료 수집 및 분석 대상

본 연구는 강원도 연안의 물리·화학적 특성을 반영하기 위해 해양환경정보 포털에서 제공하는 해양환경측정망 자료 중 동해-연안 해역에 해당하는 수질 자료를 활용하였다(Marine Environmental Information System, MEIS[2024]). 분석 대상 지역으로는 삼척, 강

릉, 주문진, 속초의 네 지역을 선정하였으며, 각 지역은 총 20개의 수질 관측 정점으로 구성된다. 이들 지역은 강원도 연안의 남부에서 북부까지 고르게 분포하고 있으며, 살오징어의 주요 조업지로 기능하고 있다는 점에서 본 연구의 목적에 적합한 해역으로 판단된다(NIFS[2024b]). 지역별 정점 구성은 다음과 같다(Fig. 2).

수질 자료는 각 정점에서의 관측 값을 먼저 지역별로 평균한 후, 산출된 각 지역의 평균값을 다시 네 지역으로 평균하여, 강원도 연안 전체의 수질을 대표하는 지표로 사용하였다. 수질 자료는 표층과 저층으로 나뉘어 측정되나, 저층 수심 기준이 일정하지 않다는 점과 불연속적인 자료로 인해 분석에 제약이 있었다. 따라서, 본 연구는 통계적 일관성을 위해 표층 수질 자료만을 분석에 사용하였다. 또

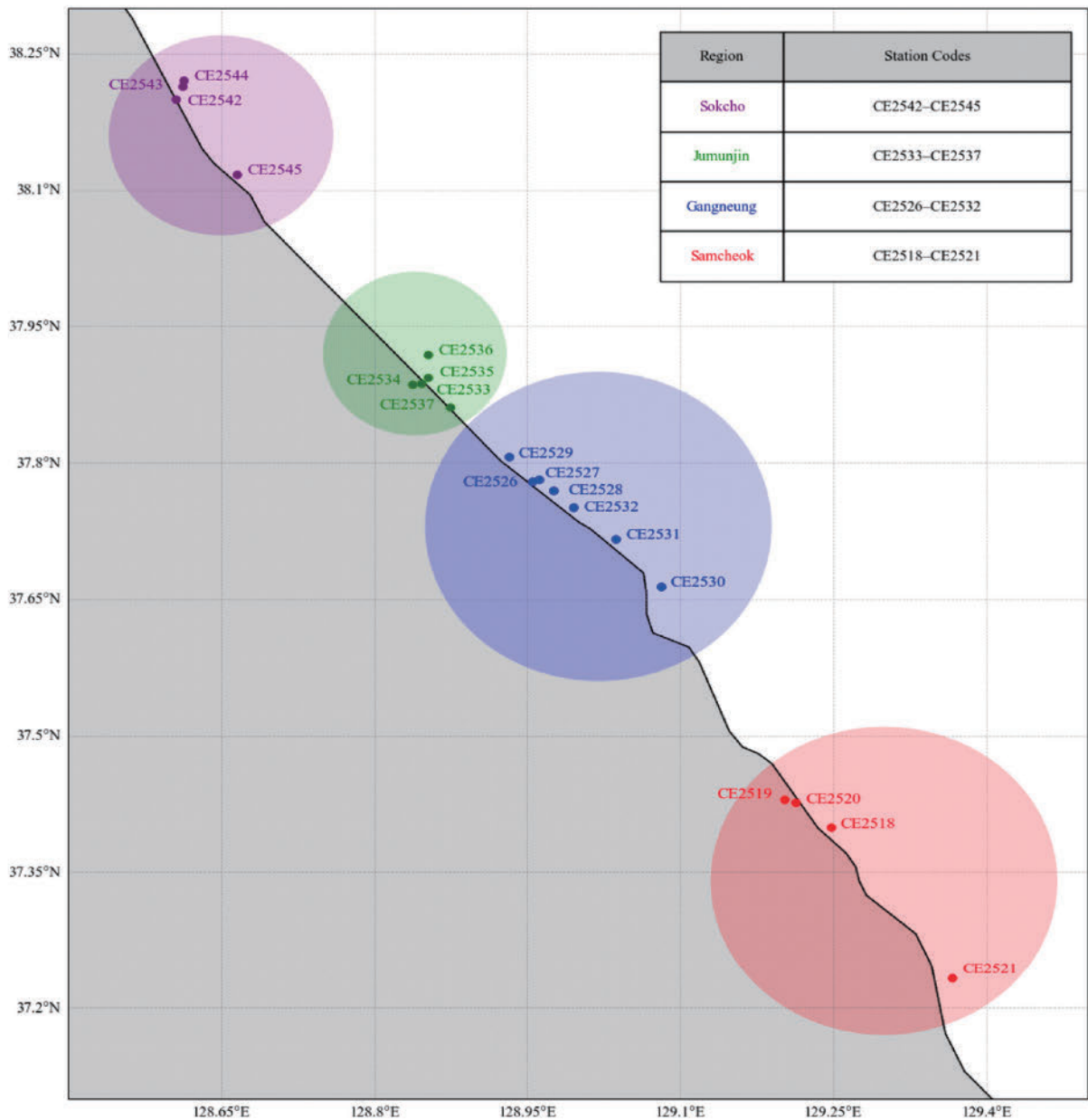


Fig. 2. Geographic distribution of oceanographic monitoring stations in the coastal region of Gangwon Province.

Table 1. Description of oceanographic variables measured in the surface water mass

NO.	Variable name	Abbreviation	Unit
1	Seawater temperature	T	°C
2	Seawater salinity	S	psu
3	Hydrogen ion concentration	pH	-
4	Total nitrogen	TN	µg·L ⁻¹
5	Dissolved inorganic nitrogen	DIN	µg·L ⁻¹
6	Ammonium nitrogen	NH ₄ ⁺ -N	µg·L ⁻¹
7	Nitrite nitrogen	NO ₂ ⁻ -N	µg·L ⁻¹
8	Nitrate nitrogen	NO ₃ ⁻ -N	µg·L ⁻¹
9	Dissolved oxygen concentration	DO	µg·L ⁻¹
10	Chemical oxygen demand	COD	µg·L ⁻¹
11	Total phosphorus	TP	µg·L ⁻¹
12	Dissolved inorganic phosphorus	DIP	µg·L ⁻¹
13	Dissolved silicate	DSi	µg·L ⁻¹
14	Suspended solids	SS	mg·L ⁻¹
15	Chlorophyll-a concentration	Chl	µg·L ⁻¹

- All environmental variables were obtained from the surface water mass (0 m depth).

한, 수질 자료가 2.5·8·11월 연 4회만 제공된다는 점과 측정일이 해마다 달라지거나 표기가 되지 않은 불연속성의 문제를 해결하기 위해 수질 자료에 대응하는 살오징어 어획량은 일별 자료가 아닌, 월별 총 어획량(단위:톤)을 기준으로 정리하여 시계열의 일관성을 확보하였다. 살오징어 어획량 데이터는 국가통계포털(Korean Statistical Information Service, KOSIS)의 '어업생산동향조사 > 연근해어업 > 품종별 통계' 항목에서 제공된 자료를 사용하였으며, 전체 분석 기간은 2005년부터 2024년까지 총 20년으로 설정하였다.

2.2 수질 변수 및 회귀 분석

해양 수질 변수는 총 15가지로 구성되며, 이는 연안 생태계의 물리적, 화학적, 생물학적 특성을 포괄한다. 분석에 포함된 변수는 다음과 같다(Table 1).

해양 수질 변수와 살오징어 어획량 간의 상관관계를 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 회귀 분석 절차를 (1) 1차 변수 선별, (2) 2차 신뢰도 평가, (3) 최종 분석의 세 단계로 구분하여 수행하였다. 분석에 앞서, 단위가 서로 다른 변수 간의 영향력 비교를 가능하게 하기 위해, 단일 선형 회귀를 제외한 모든 분석에 Z-score 표준화를 적용하였다. 표준화 식은 다음과 같다:

$$Z_i = (X_i - \bar{X}) / s \tag{1}$$

여기서 Z는 표준화된 값, X는 원본 수질 값, \bar{X} 는 해당 변수의 평균, s는 표준편차이다. 이를 통해 모든 변수의 평균을 0, 표준편차를 1로 정규화하여 상이한 척도의 변수들이 동일한 기준에서 비교 가능하도록 하였다. 1차 분석은 어획량이 아닌 수온(T)을 종속 변수로 설정한 월별 회귀 분석으로, 수온이 해양 환경 변화에 영향을 주는 핵심 조절 인자이자, 어획량에 선행하는 생태적 매개 변수라는 점을 고려하였다(Poloczanska et al.[2013]; Venegas et al.[2023]). 각 수질 변수에 대해 (1) 비표준화 단일 선형 회귀를 통한 Pearson 상

관계수(r) 산출, (2) 표준화 Ordinary Least Squares(OLS) 회귀를 통한 유의 확률(p-value, p) 계산을 병행하였으며, 단일 선형 회귀 식은 아래와 같다:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon \tag{2}$$

여기서 Y는 종속 변수, X는 독립 변수, β_0 는 절편, β_1 은 회귀계수, ϵ 는 오차항이며 다중 선형 회귀 분석인 OLS역시 기본 수식은 동일한 구조를 따른다. 1차 분석에서는 선별 기준을 $p < 0.1$ 또는 $|r| \geq 0.2$ 로 설정하여, 두 조건 중 하나도 충족하지 않는 변수는 다음 분석 대상에서 제외하였다.

2차 분석에서는 1차로 선정된 변수들을 대상으로 어획량을 종속 변수로 설정한 단일 선형 회귀, 표준화 OLS 및 Elastic Net 회귀를 수행하였고, 변수의 통계적 신뢰도를 다음 네 기준으로 평가하였다: (1) $p < 0.1$, (2) 97.5% 신뢰 구간(Confidence Interval, CI) 내에 0 미포함, (3) 다중공선성 지표(Variance Inflation Factor, VIF) < 10, (4) Elastic Net 회귀 계수 $\neq 0$, 다만, 과도한 수의 변수를 투입하여 회귀 분석을 수행할 경우 과적합(overfitting)의 가능성이 존재하며, 이로 인해 일부 변수들이 통계적 유의성 기준을 충족하지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 보완적으로, $p < 0.1$ 이상인 경우라도 $|r| \geq 0.7$ 인 변수는 그 영향력을 인정하여 최종 분석 대상에 포함하였다(Han et al.[2019]; Huang et al.[2022]). 97.5% 신뢰 구간은 다음 조건으로 정의된다:

$$0 \notin [\beta_j - 1.96 \cdot SE(\beta_j), \beta_j + 1.96 \cdot SE(\beta_j)] \tag{3}$$

여기서 β_j 는 회귀 계수, SE는 β_j 의 표준 오차이다. 또한, VIF는 다음 수식으로 정의된다:

$$VIF_j = 1 / (1 - R_j^2) \tag{4}$$

여기서 R_j^2 는 변수 X_j 를 다른 변수로 회귀한 결정계수이다. Elastic

Net 회귀는 L1(Lasso)과 L2(Ridge) 정규화를 동시에 적용한 회귀 방식이며, 과적합 방지와 변수 선택을 동시에 가능하게 하는 기법이다. 수식은 아래와 같이 정의된다:

$$\min\beta = \{ (1/2n) \sum (y_i - \beta_0 - \sum \beta_j x_{ij})^2 + \lambda [\alpha \sum |\beta_j| + (1-\alpha)/2 \sum \beta_j^2] \} \quad (5)$$

이때 λ 는 정규화 강도, α 는 L1/L2 비중 조절 계수이다. 본 연구에서는 Elastic Net을 변수 선별에만 사용하고, 최종 회귀 분석에는 포함하지 않았다.

최종 분석에는 위 조건 중 가능한 많은 기준을 충족하는 변수, 특히 $p < 0.1$ 을 만족하는 2~3개의 변수를 월별로 선정하여 표준화 OLS를 통해 재분석하였다. 그 후, 더 보수적인 신뢰 기준($p < 0.05$, $VIF < 5$)을 적용한 결과 선정된 최종 변수에 대해 일반화 기법 모형(Generalized Additive Model, GAM)을 수행하였다. OLS는 선형 관계 기반, GAM은 비선형 반응까지 포괄할 수 있는 확장형 회

귀 기법으로, GAM의 일반형은 다음과 같다:

$$Y = \beta_0 + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_j(X_j) + \epsilon \quad (6)$$

여기서 $f(\cdot)$ 는 변수 X_j 에 대한 평활함수(smoothing function)를 의미하며, 모형 적합도는 Deviance Explained $\geq 60\%$ 를 기준으로 설명력을 판단하였다(Wood[2017]). 본 연구에서 적용한 회귀 분석 흐름과 변수 선별 기준은 Fig. 3에 종합적으로 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수온 변화에 따른 살오징어 어획량 및 수질 변화와의 연계성

Fig. 4는 1993년부터 2022년까지 강원도 연근해(37.0–38.5°N, 128.6–129.6°E)에서의 연평균 표층 해수면 온도(T)와 살오징어 어획량 간의 장기 추세를 시각화한 결과이다(MOF[2023]; CMEMS

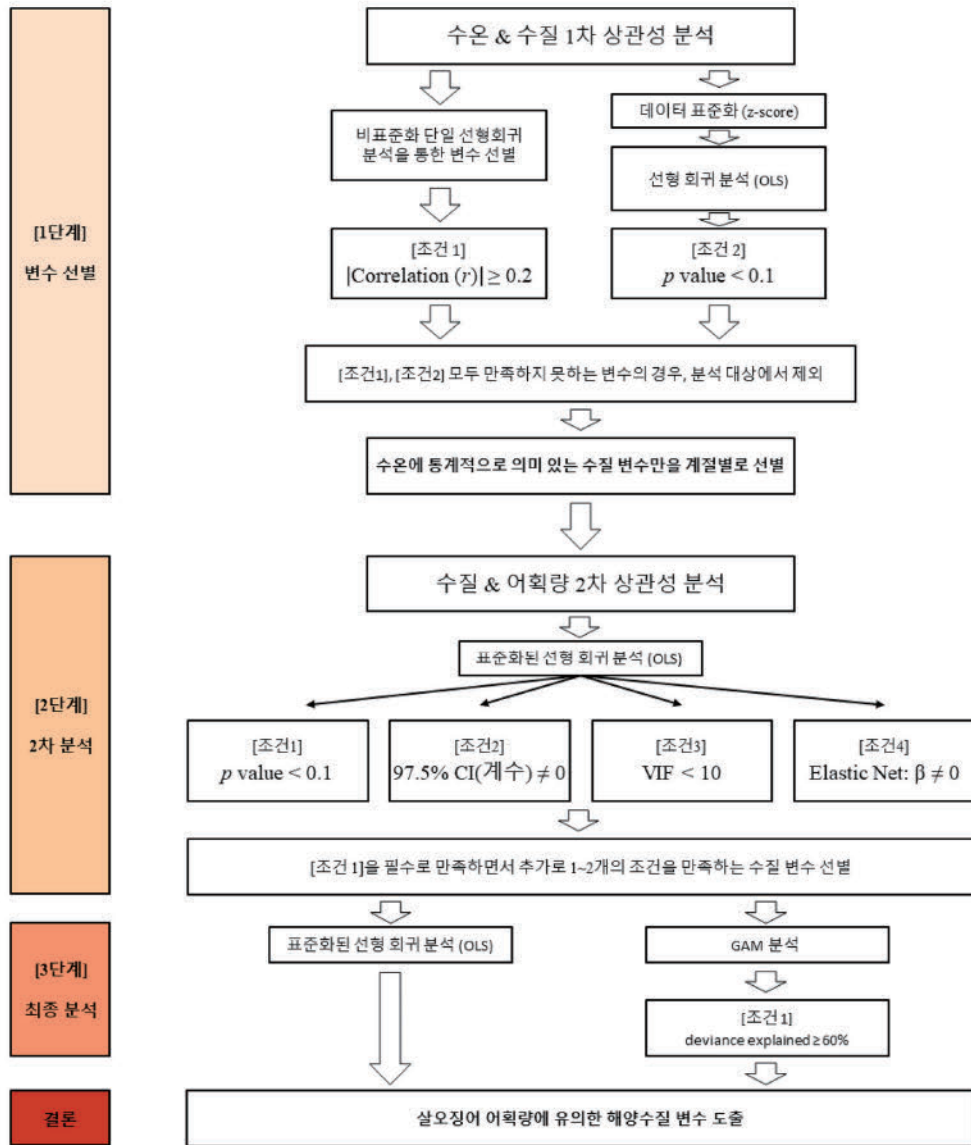


Fig. 3. Conceptual diagram of the analytical framework linking sea temperature to water quality, and water quality to squid catch.

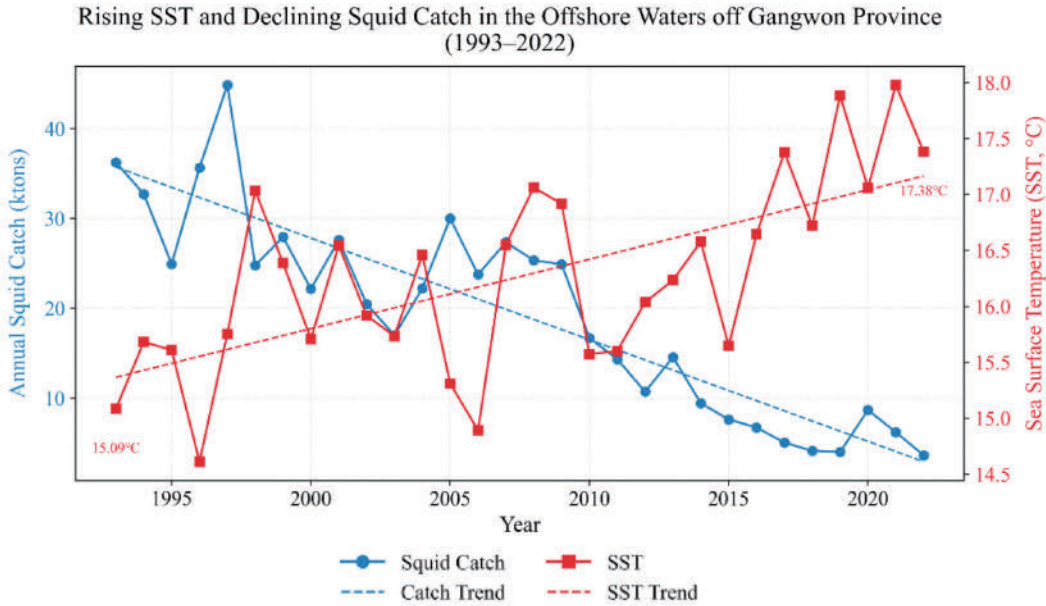


Fig. 4. Comparison of annual mean sea surface temperature (SST) and *Todarodes pacificus* catch trends in the coastal waters of Gangwon Province, 1993-2022.

[2023]). 분석 기간 표층 수온은 15.09°C에서 17.38°C로 약 2.29°C 상승했지만, 살오징어 어획량은 약 35,000톤에서 5,000톤 이하로 감소하여 두 변수는 추세상 반비례 관계를 보였다. 이는 수온 상승이 살오징어 어획량에 부정적인 영향을 미쳤음을 시사하며, 기후변화가 생물자원의 분포 및 개체군 구조에 중대한 영향을 줄 수 있음을 보여준다(Perry *et al.*[2024]; Poloczanska *et al.*[2013]). 그러나 일부 연도에서는 수온과 어획량 간의 음의 추세가 일치하지 않는, 예외적인 패턴도 관찰된다. 예를 들어, 1999년부터 2004년 사이에는 수온과 어획량이 모두 증가하는 경향을 보였고, 이후 동반 감소하는 시기도 존재했다. 이러한 동반 상승 또는 하락 경향은 수온이 일정 범위 내에서는 살오징어의 대사율 증가와 성장 촉진에 기여할 수 있음을 나타내며(Takahara *et al.*[2017]), 온도 상승이 항상 부정적 결과로 이어지는 것은 아님을 보여준다. 하지만 2013년 이후에는 어획량이 지속해서 하락하는 반면, 수온은 상승과 하강을 반복하는 변동성을 보이며, 이는 양 변수 간의 관계가 복잡하고, 더 다양한 해양 환경 요인의 영향을 받는 것으로 해석된다(Takahara *et al.*

[2017]; Han *et al.*[2019]). 아울러 강원도 연안은 동한 난류와 북한 한류의 상호작용이 빈번하게 발생하는 전이 해역으로, 계절별 수온 및 영양염 분포가 복잡하게 변동하는 특성을 지닌다(Hu *et al.*[2019]). 따라서 단순한 수온 상승 자체보다는, 그로 인해 유발되는 수질 변화가 자원에 미치는 영향을 보다 세부적으로 파악하는 것이 필요하며, 본 연구의 후속 분석에서도 이러한 관점이 반영되었다.

Fig. 5는 수온(T)을 종속 변수로, 나머지 해양 환경 변수들을 독립 변수로 설정한 월별 회귀 분석 결과를 히트맵으로 시각화한 것이다. 본 분석은 수온과 각 해양 환경 변수 간의 Pearson 상관계수(r)와 OLS 기반 유의 확률(p)을 월별로 비교하여, 변수 간 관계를 탐색적 수준에서 파악하고자 한 것이다. 히트맵 결과, 변수 대부분은 계절에 따라 수온과의 상관계수 방향성 및 유의성이 불안정하게 나타났다. 예를 들어, 수소이온농도(pH)는 8월에는 양의 상관계수가 높고 p 값이 낮아 통계적으로 유의했으나, 2월에는 상관계수가 낮고 유의 확률이 높아 통계적으로 유의하지 않았다. 이는 pH의 계절적 민감성과 수온 변화 간의 연동성이 뚜렷하게 시기 의존적이

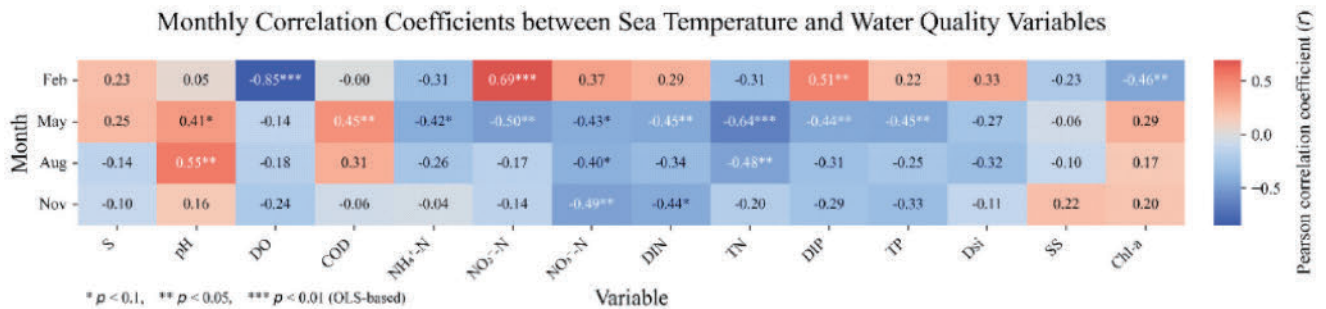


Fig. 5. Results of correlation analysis between monthly sea surface temperature and various oceanographic water quality parameters.

라는 점을 시사한다(Gerace *et al.*[2025]). 또한, 아질산염 질소 (NO₂-N)의 경우, 2월에는 수온과 양의 상관관계를 보였으나, 나머지 계절에서는 일관된 음의 상관관계를 나타냈다. 이는 단일 변수 간의 선형 관계로는 수온 변화에 대한 해양 환경 변수의 계절적 반

Table 2. Summary of regression results examining the relationships between pre-selected oceanographic variables and squid catch

Variable	r	SE(r)	OLS <i>p</i> -value	CI(97.5%)	VIF	EN.Coeff	Criteria Met	
Feb	T	0.051	0.235	0.035	[-2.733, 0.120]	10.534	0	*
	S	-0.399	0.198	0.273	[-2.190, 0.924]	12.544	0	
	DO	-0.229	0.223	0.028	[-3.173, 0.047]	13.415	0	*
	NH ₄ ⁺ -N	0.146	0.231	0.942	[-843.628, 801.399]	3501795	0	
	NO ₂ ⁻ -N	0.147	0.231	0.951	[-76.014, 72.795]	28655	0	
	NO ₃ ⁻ -N	-0.444	0.189	0.942	[-1696.855, 1612.114]	14168707	0	
	DIN	-0.417	0.195	0.944	[-1410.645, 1482.693]	10832862	0	
	TN	-0.145	0.231	0.892	[-0.715, 0.787]	2.920	0	*
	DIP	-0.044	0.235	0.872	[-1.686, 1.505]	13.177	0	
	TP	0.159	0.230	0.865	[-1.032, 0.915]	4.905	0	*
	DSi	-0.267	0.219	0.838	[-1.519, 1.754]	13.870	0	
	SS	-0.322	0.211	0.892	[-0.652, 0.717]	2.427	0	*
	Chl-a	0.136	0.231	0.247	[-2.061, 0.817]	10.723	0	
May	T	-0.505	0.176	0.297	[-0.911, 0.405]	3.699	-0.281	**
	S	-0.12	0.232	0.249	[-0.317, 0.795]	2.636	0.151	**
	pH	-0.552	0.164	0.599	[-0.959, 0.657]	5.575	-0.263	**
	COD	-0.157	0.230	0.308	[-0.722, 0.328]	2.352	-0.119	**
	NH ₄ ⁺ -N	0.389	0.2	0.642	[-658.295, 917.741]	5300517	-0.074	*
	NO ₂ ⁻ -N	0.667	0.131	0.64	[-57.643, 80.558]	40757.35	0.092	*
	NO ₃ ⁻ -N	0.727	0.111	0.64	[-977.104, 1365.611]	11711833	0.540	*
	DIN	0.628	0.143	0.642	[-2234.330, 1601.444]	31397259	0	
	TN	0.137	0.231	0.438	[-1.535, 0.864]	12.279	-0.359	*
	DIP	0.636	0.140	0.294	[-1.162, 0.514]	5.991	-0.160	**
	TP	0.715	0.115	0.203	[-0.423, 1.206]	5.664	0.469	**
	DSi	0.237	0.226	0.925	[-1.208, 1.131]	11.679	-0.146	*
	Chl-a	-0.037	0.235	0.794	[-0.653, 0.785]	4.415	0.107	**
Aug	T	-0.136	0.231	0.757	[-0.273, 0.347]	3.696	0.069	**
	pH	0.095	0.234	0.256	[-0.146, 0.385]	2.703	0.087	**
	COD	-0.614	0.147	0.029	[-0.495, 0.008]	2.429	-0.228	***
	NH ₄ ⁺ -N	0.720	0.113	0.436	[-3.849, 7.200]	1171.657	0.081	*
	NO ₃ ⁻ -N	0.373	0.203	0.535	[-1.683, 2.747]	188.423	-0.019	*
	DIN	0.726	0.111	0.464	[-9.645, 5.370]	2163.599	0	
	TN	0.394	0.199	0.354	[-0.448, 0.209]	4.134	-0.044	**
	DIP	0.505	0.176	0.816	[-0.360, 0.301]	4.184	-0.042	**
	TP	0.952	0.022	0.005	[0.286, 1.845]	23.33	0.835	***
	DSi	0.039	0.235	0.425	[-0.301, 0.573]	7.332	0.001	**
Nov	T	-0.411	0.196	0.159	[-0.712, 0.190]	1.924	-0.187	**
	DO	-0.408	0.196	0.170	[-0.735, 0.206]	2.097	-0.226	**
	NO ₃ ⁻ -N	0.421	0.194	0.345	[-1.040, 2.296]	26.334	0	
	DIN	0.492	0.179	0.249	[-2.985, 1.081]	38.571	0	
	TN	0.573	0.158	0.037	[-0.043, 0.986]	2.507	0.277	***
	DIP	0.387	0.200	0.685	[-0.591, 0.429]	2.46	0	*
	TP	0.785	0.091	0.022	[0.018, 1.417]	4.992	0.418	****
	SS	-0.140	0.231	0.728	[-0.475, 0.361]	1.655	-0.018	**
	Chl-a	-0.026	0.236	0.828	[-0.408, 0.483]	1.878	0.025	**

- *r* and SE(*r*) denote the Pearson correlation coefficient and its standard error.
 - The *p*-value and 97.5% confidence interval (CI) from OLS are based on standardized regression results.
 - VIF represents the variance inflation factor used to assess multicollinearity.
 - EN.Coeff indicates the correlation coefficient estimated from the Elastic Net regression analysis.
 - Selection criteria: **p* < 0.1, **97.5% CI does not include 0, ***VIF < 10, and ****EN.Coeff ≠ 0.

응을 설명하기 어려움을 나타낸다(Venegas et al.[2023]). 이와 같은 결과는 여러 원인으로 해석될 수 있다. 첫째, 해양 환경 변수 간에는 복잡한 상호작용이 존재하며, 특히 DO, 영양염, 엽록소 농도 등은 수온뿐만 아니라 광조건, 혼합층 깊이, 저층 부유, 생물학적 생산성 등 다양한 요소의 영향을 동시에 받는다(Breitburg et al.[2018]; Gerace et al.[2025]). 둘째, 수온의 변화가 다른 수질 변수에 시차를 두고 영향을 미칠 가능성이 있다(Breitburg et al.[2018]; Venegas et al.[2023]). 예컨대 수온 상승이 광합성 작용을 증가시켜 DO나 pH에 영향을 미치기까지는 일정 시간이 소요될 수 있으며, 이는 월 단위 분석에서 신호 왜곡으로 이어질 수 있다. 또한, 특정 변수의 상관성 방향이 계절마다 변동하는 현상은 변수 간 다중공선성의 존재 가능성을 반영할 수 있으며(Han et al.[2019]), 이는 변수 선택 혹은 회귀 모형 적용 시 주의가 필요한 요소로 작용한다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 본 연구는 히트맵에서 계절별로 통계 기준($p < 0.1$ 또는 $|r| \geq 0.2$)을 만족하는 변수들을 선별하고, 다음 단계에서는 선정 변수들을 중심으로 더욱 정밀한 회귀 모형 및 통계적 기준을 적용하였다.

3.2 수온 상승에 유의한 수질 지표에 대한 살오징어 어획량 상관성

Table 2는 히트맵에서 선별된 수질 변수들을 대상으로 수행한 단일 선형 회귀, OLS 및 Elastic Net 회귀 분석 결과를 요약한 것이다. 분석 기준은 다음의 네 가지 신뢰 조건을 중심으로 설정되었다: (1) $p < 0.1$, (2) 97.5% 신뢰 구간 내에 0이 미포함, (3) 다중공선성 지표(VIF) < 10 , (4) Elastic Net 회귀에서 회귀계수 $\neq 0$. 본 연구는 유의 확률(p) 조건을 포함한, 세 가지 이상을 만족하는 변수만을 ‘유의 변수’로 정의하여 차기 분석에서 과적합(overfitting)을 방지하고, 변수 선택의 통계적 신뢰도를 확보하고자 하였다. 이는 복수의 검증 기준을 통해 회귀계수의 일관성과 예측 신뢰도를 동시에 확보하기 위한 목적에 기반을 둔다. 다만, Pearson 상관관계수가 $|r| \geq 0.7$ 을 만족하는 변수의 경우, 비록 유의 확률 조건($p < 0.1$)을 충족하지 못하더라도 단일 변수로서의 영향력을 고려하여 다음 회귀 분석에 포함하였다(Han et al.[2019]; Huang et al.[2022]). 예를 들어, 5월의 질산성 질소(NO_3^- -N, $r = 0.727$) 및 총인(TP, $r = 0.715$), 8월의 암모니아성 질소(NH_4^+ -N, $r = 0.720$)와 용존무기질소(DIN, $r = 0.726$)는 통계적으로 유의하다고 볼 수는 없으나, 어획량과의 강한 선형 상관관계를 보여, 잠재 변수로서 후속 분석 변수 군에 포함하였다. 이는 다중 조건에서 선별된 주요 변수와 더불어, 환경 생태학적으로 의미 있는 경향성까지 포괄하기 위한 보완적 접근의 일환이다(Han et al.[2019]; Yang et al.[2023]; Xiang et al.[2025]). 2월에는 어떠한 변수도 네 가지 기준 중 세 가지 이상을 만족하지 못해, 통계적으로 유의한 변수는 도출되지 않았다. 이는 겨울철 저수온으로 살오징어의 생리적 활동이 저하되면서, 수질 변화가 어획량에 미치는 영향이 미미했음을 시사한다(Rosa et al.[2011]; Takahara et al.[2017]). 실제로 저온기에는 대사율, 이동성, 포식 행동 등이 전반적으로 저하되어, 수질 요인 간 상호작용이 어중에 대

한 반응으로 연결되기 어려운 상태일 가능성이 높다(Rosa et al.[2011]). 5월은 수온이 완만히 상승함과 동시에 살오징어의 생리 활동이 회복되는 시기로, 다양한 수질 요인이 점진적으로 어획량에 영향을 미치기 시작하는 과도기적 특성을 가진다(Rosa et al.[2011]; Kim et al.[2019]). 하지만 5월 역시 유의 확률 조건($p < 0.1$)을 충족한 변수는 없었으며, NO_3^- -N과 TP를 제외하면 주요 변수로 분류할 만한 강한 설명력은 현재 단계에선 확보되지 않은 것으로 판단된다. 8월에는 TP와 화학적 산소 요구량(COD)이 세 가지 이상 기준을 동시에 만족하며 유의 변수로 선정되었다. 특히 TP는 r 이 0.952로 매우 강한 양의 상관관계를 나타내며, 여름철 어획량 변동의 주요 설명 변수로 작용했음을 시사한다. 이 시기는 식물성 플랑크톤의 생산성이 최대치에 도달하는 시기로, 총인 농도가 해양 1차 생산성과 식물성 플랑크톤 군집 구조에 직접적인 영향을 미침에 따라, 영양망 상위에서 살오징어에도 간접적 영향을 전달할 가능성이 크다(Gerace et al.[2025]). COD는 유기물 분해 및 1차 생산성에 반응하는 지표로, DO 농도 변화와 밀접하게 연관되며, 결과적으로 살오징어의 서식 적합도에 부정적 영향을 미칠 수 있다(Breitburg et al.[2018]; Han et al.[2019]). 11월에는 총질소(TN)와 TP가 각각 세 가지 이상의 기준을 충족하며 유의 변수로 확인되었다. 이 중 TP는 네 가지 기준을 모두 만족한 유일한 변수로서, 0.785의 높은 상관계수와 낮은 p , 좁은 신뢰 구간을 통해 통계적 유의성이 매우 높은 것으로 분석되었다. 특히 가을철은 표층 혼합이 활발해지고, 강우나 바람 등 외부 유입 요인이 증가하는 시기로, 육상 기원 유기물과 영양염이 연안으로 유입되기 쉬운 계절이다(Breitburg et al.[2018]; Hu et al.[2019]). 이에 따라 TP는 외부 유입과 수직 혼합의 영향을 동시에 받으며, 이 변화가 살오징어 개체군까지 전달되는 복합 반응을 유도할 수 있다. 요약하자면, 여름과 가을철에는 특정 수질 변화가 살오징어 어획량에 더 직접적이고 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 총인은 두 시기 모두에서 주요 변수로 작용하였다. 이러한 결과는 2차 회귀 분석에서도 핵심 변수 유지의 근거가 된다.

3.3 주요 환경 변수 선정 및 살오징어 어획량 간 상관성

Table 3에 제시된 2차 회귀 분석 결과는, 앞선 OLS 및 Elastic Net 회귀 분석을 통해 선정된 변수들과 더불어, Pearson 상관관계수(r)의 절댓값이 0.7 이상인 변수를 포함하였다. 이들 변수는 살오징어 어획량에 영향을 미치는 주요 환경 요인을 파악하기 위해 OLS 회귀 분석으로 다시 검증되었으며, 그 결과는 크게 질소성 영양염 항목(NH_4^+ -N, NO_3^- -N, TN)과 총인(TP)의 두 범주로 분류할 수 있다. 질소성 항목 가운데, 통계적으로 가장 강한 설명력을 보인 것은 질산성 질소(NO_3^- -N)로, 5월에 $r = 0.727$, $p = 0.0018$ 의 값을 기록하였으며, 세 가지 기준($p < 0.05$, 97.5% 신뢰 구간 내 0 미포함, VIF < 5)을 만족하여 생태학적 해석과 통계적 유의성을 동시에 확보하였다. 이는 봄철 광주기 증가와 함께 식물성 플랑크톤 생장이 재개되는 시기와 맞물려, 질산염이 생물 이용 가능한 영양염으로 기능했을 가능성을 시사한다(Hu et al.[2019]; Gerace et al.[2025]). 반

Table 3. Summary of regression results examining the relationships between second-stage selected key variables and squid catch

	Variable	r	SE(r)	OLS_p-value	CI(97.5%)	VIF	Criteria Met
May	NO ₃ ⁻ -N	0.727	0.111	0.0018	[0.172, 0.859]	1.224	***
	TP	0.715	0.115	0.0025	[0.151, 0.838]	1.224	***
Aug	NH ₄ ⁺ -N	0.720	0.113	0.6302	[-0.186, 0.279]	2.120	*
	COD	-0.614	0.147	0.0277	[-0.363, -0.004]	1.340	***
	TP	0.952	0.022	3.13E-07	[0.583, 1.074]	2.358	***
Nov	TN	0.573	0.158	0.0722	[-0.082, 0.660]	1.227	*
	TP	0.785	0.091	0.0004	[0.289, 1.031]	1.227	***

- Final candidate variables are identified based on the p-value, CI, and variance inflation factor VIF.

- Selection criteria: * $p < 0.05$, **97.5% CI does not include 0, ***VIF < 5.

면, 8월에 나타난 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)는 비록 상관계수는 높았지만, 신뢰 기준을 충족하지 못해 설명력이 낮은 것으로 간주하였다. 이는 암모니아성 질소가 여름철 유기물 분해에 의한 축적 형태로 나타나는 일시적 현상일 가능성을 의미한다(Breitburg *et al.* [2018]; Gerace *et al.* [2025]). 총질소(TN)는 1차 회귀 분석에서는 $p = 0.037$ 로 유의성을 보였으나, 2차 분석에서는 $p = 0.072$ 로 통계 기준을 만족하지 않아 불안정한 변수로 평가되었다. 이는 해양 혼합 강화 및 외부 유입 증가에도 개체군 반응과의 직접적인 선형 관계는 불확실하다는 점을 시사한다(Poloczanska *et al.* [2013]; Venegas *et al.* [2023]). 질소군 항목 전반에 비해, TP는 모든 계절에서 일관된 양의 효과를 보이며, 안정적인 유의성을 유지하였다(5월 TP, $r = 0.715$; 8월 TP, $r = 0.952$; 11월 TP, $r = 0.785$). 특히 TP는 모든 월에서 세 가지 기준을 만족함으로써, 계절에 구애받지 않는 일관된 설명 변수로 기능함을 실증적으로 입증하였다. 이는 TP가 용존무기인(DIP)뿐 아니라 유기인 및 입자상 인까지 포함하는 지표로서, 본 연구에서 영양염 부하와 생물학적 이용 가능성을 함께 반영하는 유의미한 변수임을 방증한다(Correll [1998]; Gerace *et al.* [2025]). 한편, 8월 COD는 유일하게 음의 상관관계를 나타내었으며($r = -0.614$, $p = 0.0277$), 이는 여름철 고온기 유기물 축적 및 산소 소비

증가에 따른 서식지 질 저하를 시사한다(Han *et al.* [2019]; Gerace *et al.* [2025]). 따라서 COD는 TP와는 달리 에너지 공급원이 아닌, 해양 스트레스 인자 역할로 해석된다(Breitburg *et al.* [2018]). 종합적으로 볼 때, 질소성 항목들은 일부 계절에 국지적인 유의성을 보였지만, 통계적 안정성과 반복성에서는 TP에 미치지 못했다. 반면, 총인은 가장 높은 상관계수(8월, $r = 0.952$)를 기록함과 동시에 계절별로 일관된 유의성을 보였다. 이와 같은 결과는 TP가 단순한 영양 인자를 넘어 구조적 변화를 유도할 수 있는 핵심 영양염으로 기능할 수 있음을 시사하며(Breitburg *et al.* [2018]; Gerace *et al.* [2025]), 본 연구의 후속 단계인 비선형 분석에서 핵심 변수로 설정된 근거를 제공한다.

앞선 Table 3의 분석 결과에서 총인(TP)은 5·8·11월 전 시기에 반복적으로 유의미한 변수로 도출되었으며, 이는 계절별로 어획량 변동을 비교할 수 있는 핵심 변수로 기능하고 있음을 시사하였다. 이에 따라 본 연구는 월별 TP와 어획량 간의 관계에서 단순 선형성을 넘어선 비선형 반응 구조를 파악하고자, Generalized Additive Model(GAM) 기법을 적용하여 월별 곡선 구조를 비교 분석하였다(Fig. 6). 검은 선은 GAM의 적합 곡선을, 파란 점은 실제 관측값을 의미하며, 모형의 설명력은 Deviance Explained를 이용하여 나타

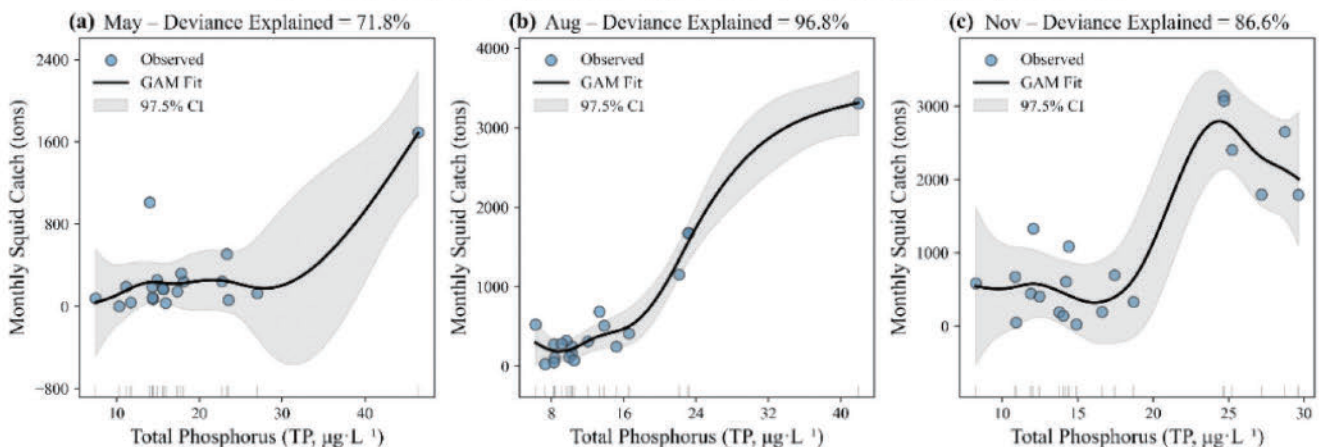
GAM-Based Relationship Between Squid Catch and TP (May, August, November)

Fig. 6. GAM-derived nonlinear response of squid catch to monthly total phosphorus (TP) concentration: (a) May, (b) August, and (c) November.

내었다(Wood[2017]). 각 반응 곡선 주변의 회색 음영은 해당 예측 값의 97.5% 신뢰 구간(CI)을 나타내며, 모형의 예측 불확실성을 시각적으로 제시한 것이다. 5월의 TP-GAM 분석 결과, 전체적으로 단조 증가형 반응 함수를 나타냈으며, 약 $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 이하에서는 완만한 증가가 이어지다가 이후 구간에서 급격한 어획량 증가가 관찰되었다. 봄철은 혼합층 안정과 일사량 증가로 인해 식물성 플랑크톤 군집이 초기 확산을 시작하는 계절로, 1차 생산성이 회복되는 전환기적 특성을 보인다(Behrenfeld[2010]; Hu *et al.*[2019]). 이 시기의 TP 농도 증가는 이러한 군집의 생산력 회복을 가속하고, 이는 곧 상위 영양단계인 살오징어의 먹이 자원 기반 회복과 간접적인 자원군 밀도 증가로 연결되었을 가능성이 크다(Han *et al.*[2019]; Gerace *et al.*[2025]). 8월의 TP 반응 곡선은 명확한 임계값 기반의 포화 함수를 형성하였으며, 높은 설명력(Deviance Explained = 96.8%)과 더불어 약 $16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 을 기점으로 어획량의 급격히 증가 및 $40 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 부근에서 포화하는 곡선을 나타냈다. 여름철은 수온이 가장 높고 수직 혼합이 약해지는 시기로, 광합성률 증가, 영양염 확산 억제 등의 물리·화학적 변화가 복합적으로 작용한다(Breitburg *et al.*[2018]). 이 환경 내에서 TP는 단계적으로 1차 생산성을 제한하는 주요 인자로 기능하며, 일정 농도 초과 시 급격한 플랑크톤 번성을 유도한다(Gerace *et al.*[2025]). 이는 영양망 전반으로 에너지를 빠르게 전달하여, 살오징어 개체군의 밀도 증가에 영향을 주었을 가능성이 높다. 11월은 상대적으로 복잡하며, 전형적인 역 U자형 곡선을 나타냈다. 구체적으로는 약 $16\text{--}25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 구간에서 어획량이 증가하다가 이후 TP 농도 증가에 따라 오히려 감소하는 역효과가 발생하였다. 가을철은 강우 및 하천 유입 증가로 인해 육상 기원 유기물과 영양염류가 연안 해역으로 집중되며, 이와 동시에 계절풍에 의한

혼합이 심화하는 시기이다(Breitburg *et al.*[2018]; Hu *et al.*[2019]). 이러한 해양 환경 조건은 TP의 농도를 단계적으로 상승시켜, 부영양화에 따른 식물플랑크톤의 과잉 증식, 수층 내 DO의 급감, 그리고 저산소 수괴의 형성과 같은 연쇄적인 생태학적 부작용을 초래할 수 있다(Breitburg *et al.*[2018]). 이러한 영향은 살오징어의 서식 적합도 저하 및 어획량을 감소시킨 주요 요인으로 해석된다(Han *et al.*[2019]). 요약하면, TP는 계절마다 뚜렷하게 구분되는 비선형 반응 곡선을 형성하였고, 연속적으로 높은 설명력을 유지하며, 계절 맥락에 따라 기능과 영향력이 달라지는 가변적 지표임을 실증적으로 입증하였다. 또한, 이러한 월별 반응의 구조적 차이는 TP와 어획량 간의 더 일관되고 안정적인 예측 곡선을 도출하기 위한 계절 통합 분석의 필요성을 제기하며, 이는 3.4에서 다룬다.

3.4 총인(TP)과 살오징어 어획량 간의 계절 통합 상관성

3.3에서의 월별 GAM 결과는 총인(TP)이 살오징어 어획량에 영향을 미치는 비선형 환경 요인으로 기능하고 있음을 명확히 보여주었다. 그러나 월별 분석은 모두 20개의 제한된 표본 수에 기반하고 있었으며, 적은 표본 수는 고차원 통계 모형에서 곡선의 민감도 과장, 과적합에 의한 신뢰성 저하 등 해석상 오류 가능성을 증가시킨다(Wood[2017]). 특히 11월의 고농도 구간, 8월의 임계점 구간 등에서는 표본 밀도가 낮아 추정의 과도한 민감성으로 실제 반응보다 과대 평가되었을 가능성이 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 본 연구는 5·8·11월의 TP 데이터를 통합한 총 60개의 표본을 기반으로 GAM 분석을 재수행하였다(Fig. 7). 그 결과, Deviance explained는 63.4%로, 월별 결과 값보다 낮지만, 과적합 방지 및 일반화 가능성 측면에서 통합 모형의 해석 타당성이 높다. 곡선은 약

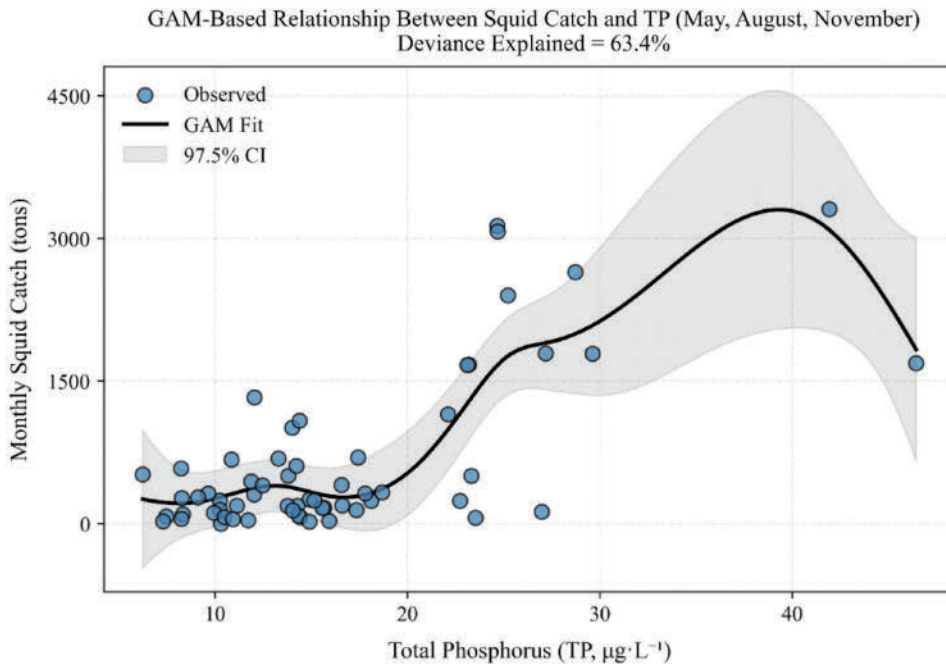


Fig. 7. GAM-derived nonlinear response of squid catch to total phosphorus (TP) concentration integrated across May, August, and November.

18–39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 구간에서 어획량이 완만히 증가하다가, 약 40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 의 임계 농도 초과 이후 어획량이 감소하는 비선형 반응 구조를 나타냈다. 이는 일정 수준 이하에서는 에너지 흐름을 촉진하지만, 임계 농도 초과 시 생태계 균형을 붕괴시키는 전통적 양분 역치 이론과 일치한다(Correll[1998]; Dodds[2003]). 이러한 결과는 TP가 단순한 용존무기인(DIP) 농도 이상으로, 용존유기인(DOP), 입자상 유기인까지 포괄하는 총체적 농도 지표이기 때문에 가능한 결과로 해석된다(Dodds[2003]; Gerace *et al.*[2025]). 유기인은 미생물에 의한 가수분해, 재활용을 통해 시차적이고 누적적인 생물학적 이용 경로를 가지며, 강원도 연안의 조간대 발달과 계절 혼합 특성은 이러한 유기인 순환 경향을 강화한다(Dodds[2003]; Breitbart *et al.*[2018]; Gerace *et al.*[2025]). 이는 본 연구의 통합 곡선 구조가 생물학적으로도 설득력 있는 결과임을 뒷받침한다. 본 연구에서 통합 GAM 분석이 TP에 한해서만 가능했던 이유는, 질소 계열 변수들이 모든 계절에서 반복적으로 유의성을 확보하지 못했기 때문이다. NH_4^+ , NO_3^- , TN, COD 모두 단일 계절에서만 유의하거나 통계적 조건을 충족하지 못했으므로, 계절 통합 기반의 비선형 반응 추정은 통계적으로 정당화되지 않았다. 반면, TP는 모든 계절에서 반복적으로 유의성을 확보한 변수로서, 통합 모형의 구조적 타당성을 확보한 유일한 지표였다. 이처럼 TP는 일정 농도 이하에서는 살오징어 회유 및 정착에 유리한 환경을 제공하는 서식 적합도 향상 변수인 반면, 일정 농도 이상에서는 저산소 수괴 유발 등으로 군집 안정성 저해 인자로 전환되는 이중 생태 조절 인자로 기능할 수 있음을 본 연구는 보여주었다.

4. 결론 및 추후 연구 방향

본 연구는 2005–2024년 강원도 연안 해역의 수질 자료와 살오징어(*T. pacificus*) 어획 통계를 바탕으로, 수온 외 수질 요인이 자원 변동성에 미치는 영향을 실증적으로 규명하였다. 총 15개 수질 변수를 대상으로 표준화 회귀 분석과 일반화 가법 모형(Generalized Additive Model, GAM)을 적용한 결과, 총인(TP)은 5·8·11월의 월별 분석과 통합 분석 모두에서 일관된 통계적 유의성을 보였다. 특히 통합 GAM 분석에서는 TP 농도 약 18–39 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 구간에서 어획량이 점진적으로 증가하고, 40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 이상에서는 감소하는 역 U자형 반응 구조가 확인되었다. 이로부터 TP는 일정 농도 이하에서는 생산성을 촉진하는 양분 공급 인자로, 일정 수준 이상에서는 부영양화 및 서식지 질 저하를 유발하는 교란 요인으로 작용하는 이중 생태 조절 인자의 가능성을 시사한다(Han *et al.*[2019]; Gerace *et al.*[2025]). 이러한 반응 구조는 저산소 수괴 형성 및 군집 안정성 저하와 같은 생태계 교란 현상과 연계될 수 있으며(Breitburg *et al.*[2018]), 수온과 TP 간 음의 상관성을 고려할 때(Fig. 5) 살오징어 어획량 감소 역시 간접적으로 설명할 수 있다. 또한, 총인은 용존무기인(DIP)뿐만 아니라 용존유기인(DOP), 입자상 유기인 등을 포함하는 복합적 양분 지표로서, 어획량 반응을 더 정밀하게 설명할 수 있는 잠재력을 지닌다(Dodds[2003]; Gerace *et al.*[2025]). 이는

앞으로 총인 지표의 세분화와 더불어 유기인 계열에 대한 정량적 모니터링과 생물학적 이용 가능성에 관한 후속 연구가 필요함을 시사한다.

다만 본 연구는 살오징어의 넓은 서식 범위에 비해 공간적으로 제한적인 연안 정점의 수질 자료만을 사용하였고, 주요 서식지인 근해 수질 자료를 포함하지 못했다는 공간적 한계를 가진다. 또한 2·5·8·11월 중 각각 1일 관측치만을 기반으로 하였기에, 계절 평균을 대표하기에는 시간 해상도 측면에서 제약이 존재한다. 이 외에도 2000년대 이전 수질 자료의 부재, 어획 기술의 변화, 태풍 등의 외부 교란 요인, 영양망 구조 변화 등의 생태계 전반 요인들이 충분히 반영되지 못해 해석의 정량성과 일반화 가능성에 영향을 미쳤을 수 있다. 후속 연구에는 연안-근해 통합 수질 자료의 확보, TP의 형태별 구분 및 정량 분석, 월 단위의 세밀한 반응 곡선 도출이 병행되어야 하며, 이러한 통합적 접근은 기후변화에 따른 해양 환경 변화 예측력 제고와 함께, 연안 생물자원의 지속 가능한 관리 전략 수립에도 실질적인 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Behrenfeld, M.J., 2010, Abandoning Sverdrup's critical depth hypothesis on phytoplankton blooms, *Ecology*, 91(4), 977-989.
- [2] Breitbart, D., Levin, L.A., Oschlies, A., Gregoire, M., Chavez, F.P., Conley, D.J., Garcon, V., Gilbert, D., Gutierrez, D., Isensee, K., Jacinto, G.S., Limburg, K.E., Montes, I., Naqvi, S.W.A., Pitcher, G.C., Rabalais, N.N., Roman, M.R., Rose, K.A., Seibel, B.A., Telszewski, M., Yasuhara, M. and Zhang, J., 2018, Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359(6371), eaam7240.
- [3] Copernicus Marine Service (CMEMS), 2023, Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis, <http://marine.copernicus.eu>, (accessed 2025.07.12).
- [4] Correll, D.L., 1998, The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review, *J. Environ. Qual.*, 27(2), 261-266.
- [5] Dodds, W.K., 2003, Misuse of inorganic N and soluble reactive P concentrations to indicate nutrient status of surface waters, *J. N. Am. Benthol. Soc.*, 22(2), 171-181.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022, The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation, FAO, Rome.
- [7] Gerace, S.D., Yu, J., Moore, J.K. and Martiny, A.C., 2025, Observed declines in upper ocean phosphate-to-nitrate availability, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 122(6), e2411835122.
- [8] Han, I., Kim, S. and Kang, D., 2019, Spatio-temporal variability of the habitat suitability index for the *Todarodes pacificus* around South Korea, *Remote Sens.*, 11(23), 2720.
- [9] Hu, W., Du, J., Su, S. and Chen, B., 2019, Climate-induced long-term variations in ecosystem structure and atmosphere-ocean-ecosystem processes in the Yellow Sea and East China Sea, *Prog.*

- Oceanogr.*, 178, 102148.
- [10] Huang, L., Wang, Y. and Chen, X., 2022, Efficacy of fisheries management strategies in mitigating ecological impacts under climate change scenarios, *J. Environ. Manage.*, 304, 114312.
- [11] Kim, Y.H., Choi, K.H. and Lee, C.I., 2017, Migration and distribution of the common squid (*Todarodes pacificus*) in Korean waters, *J. Environ. Sci. Int.*, 26, 173-181.
- [12] Kim, Y.H., Jung, H.K., Oh, S.Y., Kim, H.W. and Lee, C.I., 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(1), 14-21.
- [13] Kidokoro, H., Goto, T., Nagasawa, T., Nishida, H., Akamine, T. and Sakurai, Y., 2010, Impact of a climate regime shift on the migration of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in the Sea of Japan, *ICES J. Mar. Sci.*, 67(7), 1314-1322.
- [14] Ministry of Oceans and Fisheries, 2023, Coastal and offshore fisheries production statistics (2005–2024), Korean Statistical Information Service (KOSIS), <https://kosis.kr>, (accessed 2025.07.12).
- [15] Ministry of Oceans and Fisheries, 2024, Marine environmental monitoring data, Marine Environmental Information System (MEIS), <https://www.meis.go.kr>, (accessed 2025.07.14).
- [16] National Institute of Fisheries Science, 2024a, 2024 Report on the Impact of Climate Change on the Fisheries Sector, National Institute of Fisheries Science, Busan.
- [17] National Institute of Fisheries Science, 2024b, Weekly East Sea fishing ground information (2017–2024), <https://www.nifs.go.kr>, (accessed 2025.08.03).
- [18] Perry, D., Tamarit, E., Sundell, E., Axelsson, M., Bergman, S., Grans, A., Ekstrom, A., Sundh, H., Brijis, J., Sundin, J., Olsson, C., Larsson, M., Sandblom, E. and Wennhage, H., 2024, Physiological responses of Atlantic cod to climate change indicate that coastal ecotypes may be better adapted to tolerate ocean stressors, *Sci. Rep.*, 14, 12896.
- [19] Poloczanska, E.S., Brown, C.J., Sydeman, W.J., Kiessling, W., Schoeman, D.S., Moore, P.J., Brander, K., Bruno, J.F., Buckley, L.B., Burrows, M.T., Duarte, C.M., Halpern, B.S., Holding, J., Kappel, C.V., O'Connor, M.I., Pandolfi, J.M., Parnesan, C., Schwing, F.B., Thompson, S.A., Richardson, A.J. and Molinos, J.G., 2013, Global imprint of climate change on marine life, *Nat. Clim. Change*, 3(10), 919-925.
- [20] Rosa, A.L., Yamamoto, J. and Sakurai, Y., 2011, Effects of environmental variability on the spawning areas, catch, and recruitment of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae), from the 1970s to the 2000s, *ICES J. Mar. Sci.*, 68(6), 1114-1121.
- [21] Sakurai, Y., Kidokoro, H. and Yamashita, Y., 2000, Effects of environmental variability on the spawning areas, catch, and recruitment of the Japanese common squid, *Todarodes pacificus*, *ICES J. Mar. Sci.*, 57(5), 939-944.
- [22] Schakmann, M., Rönn, M., Jonsson, B., Wernberg, T. and Peck, M.A., 2023, The influence of body size on behavioral thermal preference in Atlantic cod (*Gadus morhua*): Larger fish favor colder waters, *Fishes*, 8(12), 596.
- [23] Singh, N.R., Love, B., Murray, C.S., Sobocinski, K.L. and Cooper, W.J., 2023, The combined effects of acidification and acute warming on the embryos of Pacific herring (*Clupea pallasii*), *Front. Mar. Sci.*, 10, 1307617.
- [24] Szuwalski, C.S., Aydin, K., Fedewa, E.J., Garber-Yonts, B. and Litzow, M.A., 2023, The collapse of eastern Bering Sea snow crab, *Science*, 382(6668), 306-310.
- [25] Takahara, H., Kidokoro, H. and Sakurai, Y., 2017, High temperatures may halve the lifespan of the Japanese flying squid, *Todarodes pacificus*, *J. Nat. Hist.*, 51(43-44), 2607-2614.
- [26] U.S. Environmental Protection Agency, 2014, The effects of water quality on coastal recreation flounder fishing, EPA Office of Policy, https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-12/documents/effects_of_water_quality_on_coastal_recreation_flounder_fishing.pdf, (accessed 2025.07.22).
- [27] Venegas, R.M., Acevedo, J. and Wiff, R., 2023, Three decades of ocean warming impacts on marine ecosystems: A review and perspective, *Deep-Sea Res. Pt. II: Top. Stud. Oceanogr.*, 212, 105318.
- [28] Wang, Z., Tang, Y., Khan, M.N., Tang, J., Tang, Q. and Liu, Q., 2022, Environment variables affect CPUE and spatial distribution of fishing grounds on the light falling gear fishery in the northwest Indian Ocean at different time scales, *Front. Mar. Sci.*, 9, 939334.
- [29] Wood, S.N., 2017, Generalized additive models: An introduction with R, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton.
- [30] Xiang, D., Sun, Y., Zhu, H., Wang, J., Huang, S., Zhang, S., Zhang, F. and Zhang, H., 2025, Comparative analysis of prediction models for trawling grounds of the Argentine shortfin squid *Illex argentinus* in the Southwest Atlantic high seas based on vessel position and fishing log data, *Biology*, 14(1), 35.
- [31] Yang, L., Jiang, Y., Zhang, H., Yuan, X. and Liu, Z., 2023, Seasonal variations and environmental drivers of suitable habitats of *Todarodes pacificus* in southern Yellow Sea and East China Sea, *Chin. J. Ecol.*, 42(3), 685-693.

Received 15 September 2025

Revised 10 November 2025

Accepted 14 November 2025