

인도양 쌍극자(IOD)를 고려한 인도양에서 우리나라 선망어업의 조업 특성 분석

엄지현 · 박희원* · 박정호 · 임정현 · 이미경 · 김희용 · 이성일¹

국립수산물연구원 원양자원과, ¹국립부경대학교 해양생산시스템관리학부

Fishing Characteristics of the Korean Tuna Purse Seine Fishery in the Indian Ocean Considering the Indian Ocean Dipole (IOD)

Ji-Hyun Eom, Heewon Park*, Jeong-Ho Park, Jung-Hyun Lim, Mi-Kyung Lee, Heeyong Kim, and Sung-Il Lee¹

Distant Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

¹Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

This study analyzed the fishing characteristics of the Korean tuna purse seine fishery in the Indian Ocean considering the Indian Ocean Dipole (IOD). Logbook data collected from 2012 to 2025 and the Dipole Mode Index (DMI), an indicator of the IOD, were used for the analysis. School types were classified as fish aggregating device (FAD) and free-swimming school (FSC) sets. To account for delayed environmental effects, lagged DMI variables from 0 to 6 months were compared. The one-month lagged variable was identified as the most suitable based on model performance. A generalized additive model with a Tweedie distribution and log link function was used to assess the impacts of temporal, spatio-seasonal, environmental, and school-type variables. The results indicated that fishing patterns and environmental responses differed according to school type, and the influence of the IOD was stronger in the FAD than in the FSC sets. In particular, the FAD sets showed a decreasing catch per unit effort pattern under positive DMI conditions. These findings provide useful information for understanding the relationship between climate variability and fishing behavior, thereby contributing to climate-responsive fishery management.

Keywords: Fishing characteristics, Tuna purse seine fishery, Indian Ocean Dipole, Generalized Additive Model

서론

우리나라 다랑어 선망어업은 1970년대 어선 도입 이후, 본격적으로 발전하기 시작하여 1980년대부터 태평양을 중심으로 성장해 왔다(Lee et al., 2020). 2012년에는 조업 해역을 인도양까지 확대하여 새로운 어장 개척 초기에는 조업 환경 적응과 어장 확보와 관련된 시행착오를 겪었으나, 현재까지 인도양에서 지속적으로 조업하고 있다(IOTC, 2025).

전 세계 다랑어 어업별 어획량을 살펴보면 선망어업이 약 66%를 차지하고 있으며(ISSF, 2025), 인도양 내에서는 산업적 선단(industrial fleets)이 어획하는 다랑어 중 약 60%가 선망

어업을 통해 어획되고 있다(Lecomte et al., 2017). 인도양에서 선망어업은 크게 어군집어장치(fish aggregating device, FAD)를 사용한 조업과 자연적으로 형성된 어군(free-swimming school, FSC)을 대상으로 하는 조업으로 구분된다(Govinden et al., 2021). FAD 조업은 주로 가다랑어, 황다랑어 및 눈다랑어의 미성숙 개체의 어획비율이 높고, FSC 조업은 성숙 개체의 어획비율이 높아 조업 방식에 따라 어획되는 종 구성과 체장 구조가 달라지는 특성이 있다(Fonteneau et al., 2015).

열대 다랑어는 특정 수온 범위에 서식하는 고도 회유성 어종으로, 해수면수온(sea surface temperature, SST)은 어군의 회유 및 어장 형성에 영향을 미치는 핵심적인 환경요인으로 알

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2331 Fax: +82. 51. 720. 2337

E-mail address: heewon81@korea.kr



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

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2026.0411>

Korean J Fish Aquat Sci 59(4), 411-418, August 2026

Received 29 May 2026; Revised 3 July 2026; Accepted 22 July 2026

저자 직위: 엄지현(연구원), 박희원(해양수산연구원), 박정호(해양수산연구원), 임정현(해양수산연구원), 이미경(해양수산연구원), 김희용(해양수산연구원), 이성일(교수)

려져 있다(Arrizabalaga et al., 2015). 특히 인도양은 계절적 문순에 의해 해류와 해수면온도(SST)의 변동성이 크게 나타나는 해역으로 이러한 환경적 특성은 다랑어의 시공간적 분포와 어장 형성의 주요 요인이다(Lan et al., 2013). 인도양의 해양환경은 계절적 변동성뿐만 아니라 인도양 쌍극자(Indian Ocean Dipole, IOD)와 같은 대규모 기후 변동성의 영향을 받는다. IOD는 서인도양과 동인도양 간 해수면 온도 차이를 지수화한 Dipole Mode Index (DMI)로 정량화되며, 양(positive)과 음(negative) 위상에 따라 인도양 해양환경의 공간적 구조를 변화시킨다. 이러한 비주기적 기후 변동은 다랑어의 분포와 조업 특성의 차이를 일으키므로 인도양의 조업 특성과 해양환경을 함께 고려한 통합적인 분석이 필요하다.

지금까지 인도양 다랑어 어업과 관련된 국외 선행연구를 살펴보면, 주로 SST, chlorophyll-a 농도, 해수면 높이 등 다양한 환경요인을 활용하여 다랑어의 서식지 적합성 및 시공간적 분포 특성 분석에 관한 연구가 수행되었다. Arrizabalaga et al. (2015)은 태평양, 대서양, 인도양에서 분포하는 주요 다랑어 6종의 서식지 선호도를 비교 분석하였다. 조업 특성과 관련해서는 FAD 조업과 FSC 조업 간에 나타나는 어획 조성 및 부수어획 특성 차이에 관한 연구가 수행되었으며(Dagorn et al., 2013; Fonteneau et al., 2013), 특히 FAD 조업의 확대가 다랑어 자원과 생태계에 미치는 영향에 대한 논의는 현재까지 지속되고 있다(Park et al., 2025). 국내 연구로 Lee et al. (2020)은 과학읍서버 자료를 활용하여 우리나라 인도양 다랑어 선망어업의 조업 형태별 부수 어획 특성 연구를 수행하였다. 연구 결과 FAD 조업이 다른 조업 형태에 비해 상대적으로 높은 부수 어획 비율을 보였으나, 인도양에서 조업하는 주요 선망선단의 FAD 조업과 비교하였을 때 낮은 수준으로 나타났다. 다만 해당 연구는 단기간(2016–2018년) 동안 수집된 과학읍서버 자료에 기반하고 있어 장기적인 어획 특성 변화를 파악하는 데 한계가 있으며, 해양환경요인과의 통합적 분석은 이루어지지 않았다. 이 외에도 인도양 해역 우리나라 원양 연승어업의 어획물 종조성과 어획동향에 대한 연구도 수행된 바 있다(Ku et al., 2018).

최근 기후변화에 따른 해양환경 변동성이 증가함에 따라(IPCC, 2021), 해양환경요인과 어업 활동 간의 상호작용에 대한 이해는 수산자원의 지속 가능한 이용과 효율적인 어업 관리를 위해 중요해지고 있다. 따라서 본 연구에서는 2012년부터 2025년까지 우리나라 다랑어 선망어업의 인도양 조업 특성을 분석하고, 해양환경요인이 단위노력당 어획량(catch per unit effort, CPUE)에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 조업 효율성을 향상시키고 기후변화에 따른 자원평가 및 관리 연구에 필요한 과학적 근거와 사례를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

사용자료

본 연구에서는 2012년부터 2025년까지 우리나라 다랑어 선망어선의 인도양 조업일지(logbook) 자료를 사용하여 조업 특성을 분석하였다. 조업일지에는 조업일자, 조업위치, 어군형태, 어종 및 어획량 등의 정보가 포함되어 있다. 또한 해양환경요인을 고려하기 위해 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC)에서 제공하는 월별 DMI 자료를 수집하였다. 해당 자료는 인도양 쌍극자 현상을 대표하는 지표로서, 연구기간 동안의 해양환경변동 특성을 반영하는 데 활용하였다.

조업특성

연도별 조업척수 및 어획량 변화를 분석하고, 주요 대상종인 가다랑어(skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*; SKJ), 눈다랑어(bigeye tuna, *Thunnus obesus*; BET), 황다랑어(yellowfin tuna, *T. albacares*; YFT)를 제외한 나머지 어종을 기타(others, OTH)로 통합하여 종 조성 비율을 분석하였다.

조업일지 자료에서 '이동식 부유물'과 '고정식 부유물'을 FAD 조업으로, 부상근 및 유목 등의 어군형태를 FSC 조업으로 구분하였으며 '자료없음(NA)'과 어군형태가 공란인 경우는 제외하여 CPUE를 분석하였다. CPUE는 조업일자, 조업위치, 조업시간, 선박명 및 어군형태를 기준으로 투망(set)을 정의하고, 투망 횟수를 노력량으로 하여 아래와 같이 산출하였다.

$$CPUE_i = \frac{Catch_i \text{ (ton)}}{\text{Number of sets}_i}$$

여기서 $Catch_i$ 는 i 번째 투망의 어획량(ton), Number of sets _{i} 는 투망 횟수이다.

공간적 분포를 분석하기 위해 조업위치를 기준으로 위도 및 경도 $5^\circ \times 5^\circ$ 격자(grid)로 구분하였으며, CPUE를 해당 격자에 매핑하여 연도별 공간 분포를 시각화하였다.

DMI 지연효과 분석

DMI 지수에 대해서는 조업시점 기준 0–6개월 이전의 환경조건을 나타내는 지연(lag)을 생성하였다. 이후 Akaike information criterion (AIC)를 이용하여 모형 적합도를 비교하였으며, 가장 낮은 AIC를 나타내는 lag를 분석에 반영하였다.

GAM 모델 구축

수산자원과 해양환경 간의 관계는 단순 선형관계보다는 복잡한 비선형 관계를 나타내는 경우가 많기 때문에(Daskalov, 1999), 이를 고려하기 위해 일반화 가법모형(generalized additive model, GAM)을 이용하여 독립변수와 종속변수 간의 복잡한 비선형 관계를 유연하게 분석하였다(Guisan et al., 2002). 본 연구에서 사용된 CPUE 자료에서 무어획 투망(zero catch)의 비율은 약 17%였으며, 우측으로 긴 비대칭 분포를 나타냈

다. Tweedie 분포는 0값을 포함한 양의 연속형 자료와 과분산 특성을 동시에 처리할 수 있어 무어획 투망이 포함된 선망어업 CPUE 자료에 적합하므로(Shono, 2008), 아래와 같은 식을 사용하였다.

$$Y_i \sim \text{Tweedie}(\mu_i, \phi, p)$$

$$g(\mu_i) = \log(\mu_i)$$

$$g(\mu_i) = \alpha + \text{Year}_i + \text{te}(\text{Long}_i, \text{Lat}_i, \text{Month}_i | \text{Group}_i) + s(\text{DMI}_{\text{lag } 1, i} | \text{Group}_i) + \text{Group}_i$$

여기서 Y_i 는 i 번째 투망(set)의 CPUE를 의미하며, μ_i 는 기대 평균 CPUE, ϕ 는 분산모수(dispersion parameter), p 는 Tweedie 분포의 형태 매개변수를 의미한다. 또한 $g(\mu_i)$ 는 log-link 함수이며, te 와 s 는 각각 tensor product smooth 함수와 spline smooth 함수를 나타낸다. Year_i 는 연도 효과, Group_i 는 어군형태(FAD 및 FSC)를 의미한다.

통계 분석은 R 소프트웨어(R Core Team, 2026)의 mgcv 패키지를 사용하였다. 먼저 연도 효과와 시공간 효과를 포함한 기본 모델(Model 1)을 구축하였으며, 이후 환경요인(DMI), 어군형태(Group), 그리고 어군형태별 공간 및 환경 반응 차이를 반영한 상호작용 효과를 순차적으로 추가하였다(Table 1). 모델에서는 위도, 경도 및 월별 정보를 이용하여 조업 위치와 계절에 따른 시공간적 변동을 반영하였다. 이를 위해 tensor product smooth 함수(te)를 사용하여 공간 및 계절 효과의 복잡한 비선형 변동을 추정하였다. tensor product smooth 함수는 위도, 경도 및 월과 같이 단위가 다른 변수들 간의 상호작용을 안정적으로 추정할 수 있어 시공간 효과 분석에 적합하다(Wood, 2006). DMI는 spline smooth 함수(s)를 이용하여 환경요인과 CPUE 간의 비선형 반응 관계를 추정하였다. 특히 어군형태에 따라 공간 및 환경 반응 특성이 다르게 나타날 가능성을 고려하여 Group별로 서로 다른 반응 구조를 설정하였다. 모델 성능 평가는 Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC), 평균제곱근오차(root mean square error, RMSE), 평균절대오차(mean absolute error, MAE) 및 설명편차(deviance explained)를 이용하여 수행하였다. 여기서 RMSE는 예측값과 관측값 간 오차의 평균적인 크기를 나타내며, MAE는 절대오차의 평균을 의미한다. 또한 analysis of de-

viance 기반 카이제곱 검정(Chi-square test)을 통해 변수 추가에 따른 모델 적합도 개선 여부를 평가하였다.

결 과

조업특성 및 DMI 지연효과

인도양에서 우리나라 다랑어 선망어업은 2012년 2척의 어선이 조업을 시작한 이후 2013년부터 어획량이 1만 톤 이상으로 증가하여 일정 범위 내에서 증감을 보이고 있다. 특히 2016년에는 조업선 5척으로 역대 가장 많은 조업선이 투입되었으며, 이때 어획량은 약 2.5만 톤으로 최대치를 기록하였다(Fig. 1). 이후 어획량은 조업척수와 함께 감소하였으나 다시 점진적인 증가세를 보였다. 그러나 2020년에는 다시 급감하여 특정 연도에 어획량이 증가하였지만, 전체적인 경향은 2021년 보다 낮은 수준에서 변동을 보이고 있다.

연도별 종조성을 분석한 결과(Fig. 2), 전반적으로 가다랑어가 가장 높은 비중을 차지하였으며, 다음으로 황다랑어, 눈다랑어 순이었다. 그러나 2014년과 2015년에는 황다랑어의 어획 비율이 가다랑어보다 높았으며, 2019년에는 두 어종 간 종조성 비율이 비슷한 수준을 보였다는 것이 주요 특징이다.

우리나라 인도양 다랑어 선망어선에 대한 CPUE의 시공간 분포를 살펴보면, 시기에 따라 인도양 동부와 서부 해역을 이동하면서 조업하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 조업 초기인 2012년과 2013년에는 어장을 탐색하고자 조업선이 동부 해역까지 이동하여 광범위한 어장 분포를 보였으며, 이후 2014년부터 2016년까지는 조업이 서부 해역에 집중되는 경향을 보였다. 2017년과 2025년에는 다시 동부 해역까지 이동하여 조업함으로써 어장의 범위가 확장되었으나, 대체로 서부 해역을 중심으로 조업이 이루어졌다. 이러한 조업 패턴 분석을 통해 특정 시기와 해역에서 CPUE가 높은 고밀도 어장이 형성됨을 알 수 있었다. 특히 2017년과 2018년에는 서부 해역의 북위 13° 부근에서 CPUE가 상대적으로 높게 나타났으며, 2023년과 2025년에도 일부 해역에서 고밀도 어장이 관찰되었다.

DMI의 지연효과를 평가하기 위하여 0~6개월 시차를 적용한 GAM 모델을 구축하였다. 시차별 모델의 적합도를 AIC 기준으로 비교한 결과, 1개월 시차를 적용한 모델에서 가장 낮은 AIC 값(73386.10)이 나타났다(Table 2). 이에 따라 본 연구에서는 1개월 시차를 적용한 DMI를 최종 모델에 사용하였다.

Table 1. GAM structures used to evaluate environmental effects on CPUE

Model	GAM structure	Description
Model 1	$Y + \text{te}(\text{long}, \text{lat}, \text{Month})$	Baseline spatiotemporal model
Model 2	Model 1 + $s(\text{DMI}_{\text{lag } 1})$	Addition of environmental effect
Model 3	Model 2 + Group	Addition of fishing school effect
Model 4	$Y + \text{te}(\text{long}, \text{lat}, \text{Month}, \text{by} = \text{Group}) + s(\text{DMI}_{\text{lag } 1}, \text{by} = \text{Group}) + \text{Group}$	Group-specific environmental and spatial responses

CPUE, catch per unit effort; DMI, Dipole Mode Index; GAM, generalized additive model.

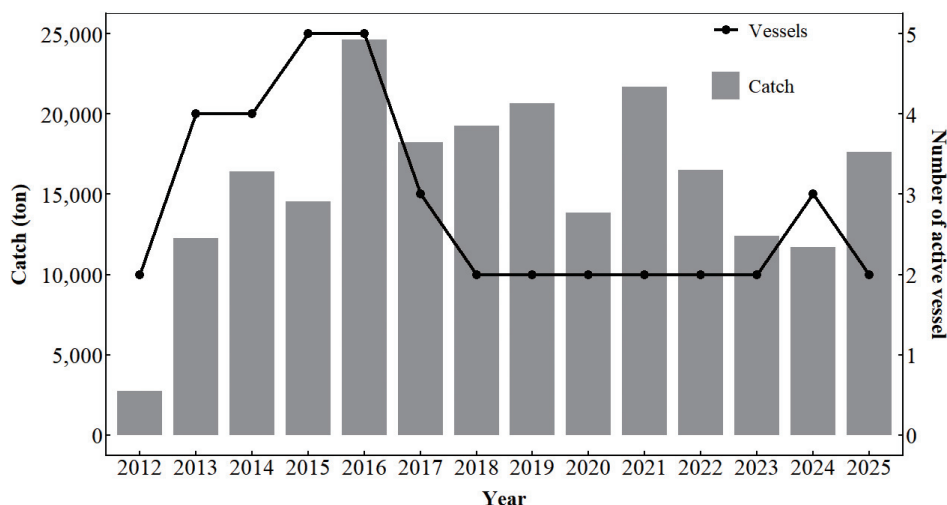


Fig. 1. Annual total catch and number of vessels for the Korean tuna purse seine fishery in the Indian Ocean from 2012 to 2025.

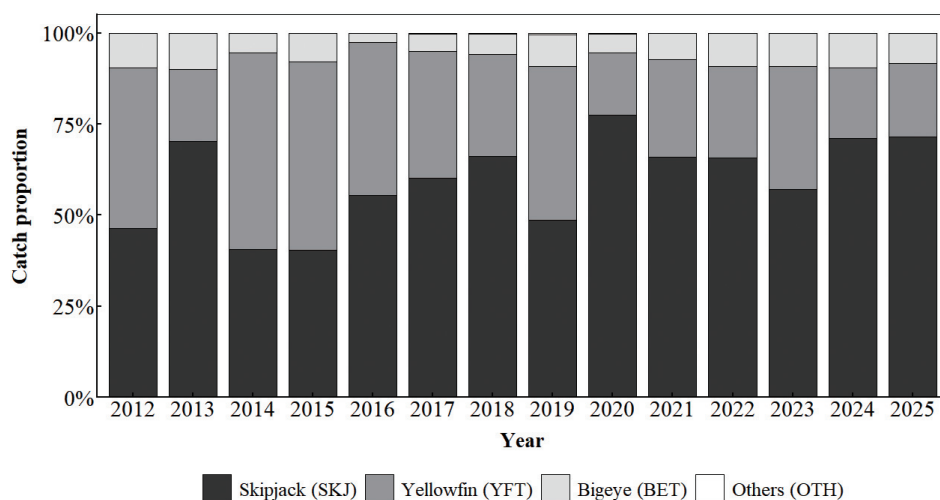


Fig. 2. Annual catch composition of major tuna species caught by the Korean tuna purse seine fishery in the Indian Ocean. SKJ, skipjack; BET, bigeye; YFT, yellowfin; OTH, others.

Table 2. Comparison of AIC values according to DMI lag periods ($\Delta AIC = AIC - AIC_{min}$)

DMI lag (month)	AIC	ΔAIC
Lag 0	73388.21	2.11
Lag 1	73386.10	0.00
Lag 2	73398.55	12.45
Lag 3	73392.23	6.13
Lag 4	73396.55	10.45
Lag 5	73394.04	7.94
Lag 6	73400.90	14.80

AIC, Akaike information criterion; DMI, Dipole Mode Index.

모델 비교 및 선정

단계적 GAM 분석 결과, 어군 형태별 공간 및 환경 반응 차이를 반영한 Model 4가 모든 적합도 지표에서 우수한 것으로 나타났다(Table 3). Model 4의 AIC는 72921.58으로 Model 1(73166.67) 대비 약 245가 낮았으며, RMSE와 MAE 역시 각각 30.28 및 19.57로 가장 낮게 나타났다. 설명편차는 Model 1의 7.42%에서 Model 4의 10.44%로 증가하여 환경 변수 및 어군형태 관련 변수를 순차적으로 추가함에 따라 모델 설명력이 단계적으로 향상되었다.

Analysis of deviance 기반 ANOVA 결과에서도 변수 추가에 따른 잔차 이탈도 감소가 모든 단계에서 통계적으로 유의하게

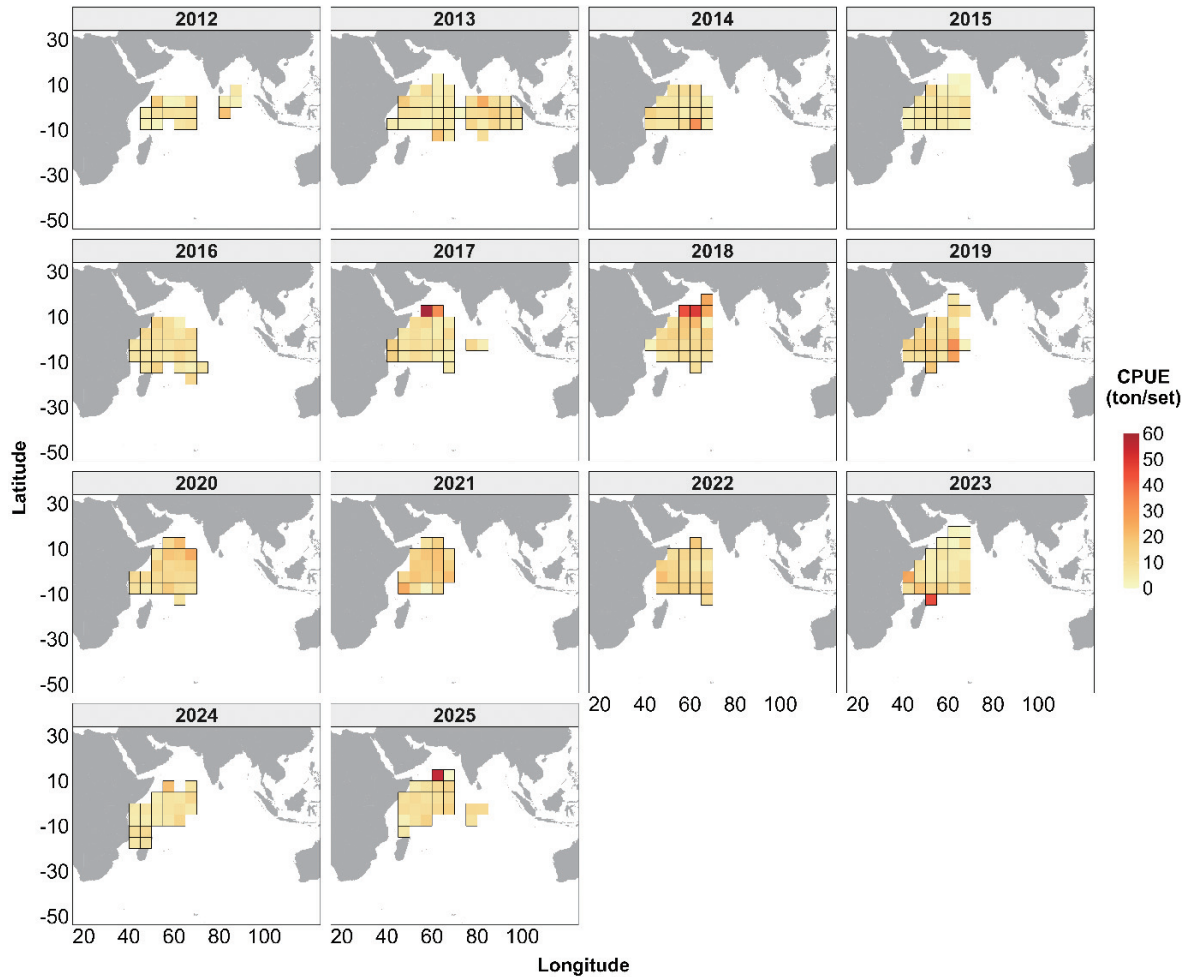


Fig. 3. Annual geographic distribution of CPUE (ton/set) for the Korean tuna purse seine fishery in the Indian Ocean. CPUE, catch per unit effort.

나타났다($P < 0.01$, Table 4). Model 2에서는 DMI 추가에 따라 잔차 이탈도가 약 204 감소하였으며, Model 3에서는 어군형태 변수 추가에 의해 추가적인 감소가 나타났다. 특히 Model 4에서는 잔차 이탈도가 약 2104 감소하여 이전 단계 대비 가장 큰 감소폭이 확인되었다. 이는 어군형태별 공간 및 환경 반응 차이

를 반영한 상호작용 효과가 모델 성능 향상에 중요하게 작용하였음을 시사한다.

어군형태별 환경 반응

최종 모델(Model 4)의 비선형 효과 분석 결과(Table 5), 공간·계절 효과는 FAD 조업과 FSC 조업 모두에서 유의하게 나타

Table 3. Model selection results for Tweedie GAMs ($\Delta AIC = AIC - AIC_{min}$)

Model	AIC	ΔAIC	RMSE	MAE	Deviance explained (%)
Model 1	73166.67	245.10	30.78	19.98	7.42
Model 2	73141.12	219.54	30.73	19.94	7.68
Model 3	73135.02	213.45	30.71	19.92	7.76
Model 4	72921.58	0.00	30.28	19.57	10.44

GAM, generalized additive model; AIC, Akaike information criterion; RMSE, root mean square error; MAE, mean absolute error.

Table 4. Analysis of deviance for Tweedie GAM models based on Chi-square tests

Model	Resid. Df	Resid. Dev	Δ Deviance	P-value
Model 1	8896.3	472021	-	-
Model 2	8893.0	471817	203.90	<0.001
Model 3	8891.4	471757	59.87	<0.01
Model 4	8823.9	469653	2103.95	<0.001

GAM, generalized additive model; df, degrees of freedom; Dev, deviance.

Table 5. Significance of smooth terms in the final Tweedie GAM (edf=effective degrees of freedom)

Smooth term	Group	edf	F-value	P-value
te(Long, Lat, Month)	FAD	63.026	3.880	<0.001
te(Long, Lat, Month)	FSC	49.739	2.342	<0.001
s(DMI _{lag1})	FAD	2.670	7.854	<0.001
s(DMI _{lag1})	FSC	2.988	2.791	0.005

GAM, generalized additive model; FAD, fish aggregating device; FSC, free-swimming school; DMI, Dipole Mode Index.

났다($P<0.001$). DMI의 비선형 효과 역시 두 조업 형태 모두에서 유의하였으나($P<0.05$), 반응 패턴과 반응 강도에서는 뚜렷한 차이가 확인되었다.

FAD 조업에서는 상대적으로 높은 F -value ($F=7.854$)와 넓은 반응 진폭의 비선형 패턴이 나타나 환경 변화에 대한 반응성이 크게 나타났다. 특히 음의 DMI 조건에서는 상대적으로 높은 CPUE 수준이 유지되었으나, DMI가 양의 방향으로 증가함에 따라 CPUE가 점진적으로 감소하는 경향이 확인되었다. 이러한 감소 경향은 양의 DMI 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 높은 DMI 구간에서는 CPUE 감소 폭이 크게 확대되는 특징이 관찰되었다(Fig. 4). 반면 FSC 조업에서는 상대적으로 낮은 F -value ($F=2.791$)와 제한적인 비선형 반응 패턴이 나타났다. DMI가 중간 수준까지 증가하는 구간에서는 완만한 증가 경향이 확인되었으나, 이후 높은 양의 DMI 조건에서는 급격한 감소 패턴이 나타났다. 또한 FSC 조업의 경우 신뢰구간 폭이 상대적으로 넓게 나타나 환경 반응의 불확실성이 FAD 조업보다 크게 나타났다. 특히 FSC 자료는 일부 연도에서 표본 수가 매우 적고 연도별 자료 불균형이 크게 나타나(Fig. 5), 환경 반응 추정의 안정성이 상대적으로 낮은 것으로 판단되었다. DMI 평활항의 유효자유도(edf)는 FAD 조업에서 2.670, FSC 조업에서 2.988로 나타나 DMI와 CPUE 관계가 단순 선형(edf=1)은 아니지만, 지나치게 복잡한 비선형 관계보다는 비교적 완만한 곡선 형태의 비선형 반응임을 의미한다.

고 찰

본 연구에서는 해양환경요인인 DMI 지수를 고려하여 우리나라 인도양 다랑어 선망어업의 조업 특성과 환경 반응을 분석하였다. 연구 결과, DMI 지수는 우리나라 인도양 다랑어 선망어업의 CPUE 변동에 유의한 영향을 미치는 환경요인으로 나타났다. 이러한 결과는 인도양 쌍극자 현상(IOD)이 인도양 전반의 해양환경 구조를 변화시키고 다랑어의 분포 및 어장 형성에 영향을 미친다는 선행연구 결과와 유사한 경향을 보였다(Ménard et al., 2007; Lan et al., 2013).

특히 본 연구의 FAD 조업에서는 DMI가 증가할수록 CPUE가 감소하는 비선형 반응 패턴이 나타났다. 일반적으로 양(+)의 IOD 시기에는 인도양 서부 해역에서 수온이 상승하고 혼합층

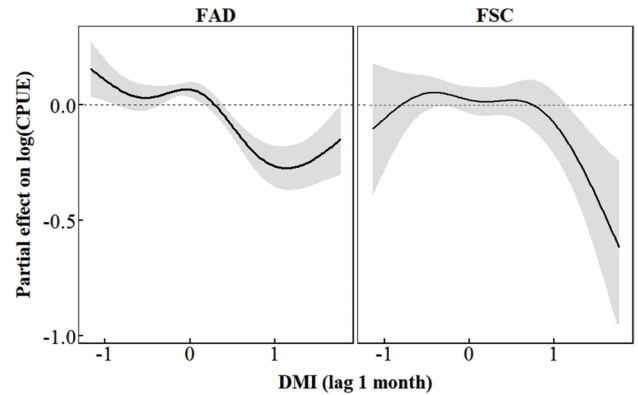


Fig. 4. Partial effects of DMI on nominal CPUE for FAD and FSC sets estimated from the final Tweedie GAM. DMI, Dipole Mode Index; CPUE, catch per unit effort; FAD, fish aggregating device; FSC, free-swimming school; GAM, generalized additive model.

이 깊어지는 반면, 동부 해역에서는 용승이 강화되고 수온 감소와 함께 표층 일차생산성이 증가하는 시공간적 환경 변동이 발생한다(Saji et al., 1999; Roxy et al., 2016). 우리나라 다랑어 선망어업은 주로 서부 인도양을 중심으로 조업을 하고 있으며(Fig. 3), 양(+)의 IOD 시기에 서부 해역에서 발생하는 이러한 환경 변화는 주요 목표 어종인 가다랑어의 행동 특성과 관련되었을 가능성이 있다.

이와 관련하여 양(+)의 IOD 시기에 FAD 조업의 CPUE가 감소되는 이유로 크게 두 가지를 고려할 수 있다. 먼저 수평적 어군의 분산이다. FAD 자체는 먹이를 생산하지 못하며, 다랑어가 FAD로 집결하는 핵심 요인은 FAD 주변에 형성되는 소형 먹이 생물 집단이다(Fréon and Dagorn, 2000). 서부 인도양의 광범위한 수온 상승과 그에 따른 생산성의 감소는 먹이생물의 밀도를 감소시켜 FAD 주변으로 집중되던 어군을 먹이가 풍부한 전선역이나 수렴대로 분산시켰을 가능성이 있다. 두 번째는 어군의 수직적 이동이다. 양(+)의 IOD 시기에 서부 인도양에서 발생하는 침강현상은 수온약층과 혼합층의 깊이를 심층으로 하강시킨다. 이는 표층성 어종인 가다랑어의 수직적 이동을 활발하게 하고 선망 어구의 발줄이 조여지기 전에 어군이 하방으로 이탈하는 현상이 발생하여 실질적인 어획효율을 감소시키는 경향이 있다(Green, 1967). 이처럼 수직적 침강과 수평적 분산이 복합적으로 작용하여 FAD 조업의 CPUE 감소를 유발하였을 가능성이 있다.

또한 본 연구에서는 DMI의 지연효과를 고려한 결과, 1개월 시차를 적용한 모델에서 가장 낮은 AIC가 나타났다. 이는 해양환경 변화가 다랑어의 이동 및 어장 형성에 즉각적으로 반영되기보다는 일정 시간차를 두고 영향을 미칠 가능성을 시사한다. 해양환경 변동은 수온 구조 및 먹이생물 분포의 변화를 통해 다랑어의 행동 및 분포에 영향을 미치며, 이러한 생물학적 반응이 실제 어장 형성으로 나타나기까지는 시간적 지연이 발생

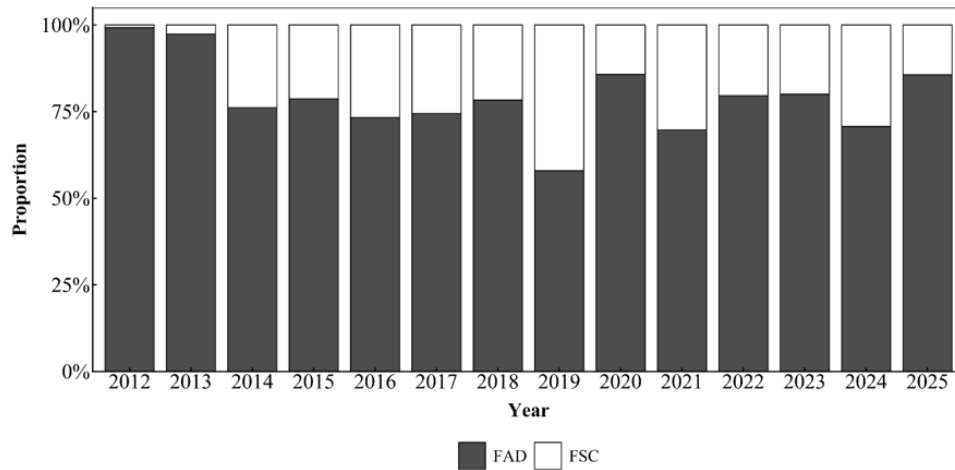


Fig. 5. Annual variation in the proportion of FAD sets and FSC sets. FAD, fish aggregating device; FSC, free-swimming school.

하는 것으로 알려져 있다(Lehodey et al., 1997; Polovina et al., 2001; Kim et al., 2015). 따라서 1개월 시차는 단순한 통계적 적합도 향상뿐만 아니라, 환경변화에 대한 다랑어의 생태학적 반응 시간을 반영한 결과로 해석할 수 있다.

한편 최종 모델의 설명편차는 약 10.4% 수준으로 나타났는데, 이는 인도양 다랑어 선망어업의 CPUE 변동이 단일 환경요인만으로 설명되기 어렵기 때문으로 판단된다. SST, chlorophyll-a, 해수면 높이(sea surface height anomaly, SSHA) 등의 위성 기반 환경자료는 어장 형성 연구에 널리 활용되고 있으나(Lan et al., 2013; Arrizabalaga et al., 2015), 자료별 공간·시간 해상도의 차이와 조업자료와의 시공간 매칭 과정에서 추가적인 불확실성이 발생할 수 있다. DMI는 장기간 일관된 기준으로 산출된 기후지수로서 자료의 연속성과 안정성이 높고 인도양 해양환경의 광역적 변동성을 단일 지표로 설명할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 분석의 일관성과 해석 가능성을 고려하여 DMI를 주요 환경변수로 활용하였다. 또한 본 연구는 우리나라 다랑어 선망어업이 인도양에 진출한 2012년 이후의 자료만을 이용하였기 때문에 전체 분석 기간이 약 14년으로 비교적 짧은 한계가 있다. 향후에는 장기 조업자료의 축적과 함께 SST, 염분, chlorophyll-a 농도 등 다양한 환경요인을 추가적으로 고려한 연구가 수행될 필요가 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 우리나라 인도양 다랑어 선망어업의 조업 특성과 CPUE 변동에 대한 환경요인의 영향을 정량적으로 분석하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 환경 기반 자원평가와 기후 변화 대응형 수산자원 관리 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 2026년도 국립수산물학원 수산과학연구소(R2026003)로 수행되었습니다.

References

- Arrizabalaga H, Dufour F, Kell L, Merino G, Ibaibarriaga L, Chust G, Irigoien X, Santiago J, Murua H, Fraile I, Chifflet M, Goikoetxea N, Sagarminaga Y, Aumont O, Bopp L, Herrera M, Fromentin JM and Bonhommeau S. 2015. Global habitat preferences of commercially valuable tuna. *Deep Sea Res II* 113, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.07.001>.
- Dagorn L, Holland KN, Restrepo V and Moreno G. 2013. Is it good or bad to fish with FADs? What are the real impacts of the use of drifting FADs on pelagic marine ecosystems? *Fish Fish* 14, 391-415. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2012.00478.x>.
- Daskalov GM. 1999. Relating fish recruitment to stock biomass and physical environment in the Black Sea using generalized additive models. *Fish Res* 41, 1-23. [https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00006-5).
- Fonteneau A, Chassot E and Bodin N. 2013. Global spatio-temporal patterns in tropical tuna purse seine fisheries on drifting fish aggregating devices (DFADs): Taking a historical perspective to inform current challenges. *Aquat Living Resour* 26, 37-48. <https://doi.org/10.1051/alr/2013046>.
- Fonteneau A, Chassot E and Gaertner D. 2015. Managing tropical tuna purse seine fisheries through limiting the number of drifting fish aggregating devices in the Atlantic: Food for thought. *Collect Vol Sci Pap ICCAT* 71, 460-475.
- Fréon P and Dagorn L. 2000. Review of fish associative behaviour: Toward a generalisation of the meeting point hypothesis. *Rev Fish Biol Fish* 10, 183-207. <https://doi.org/10.1023/A:1016666108540>.
- Govinden R, Capello M, Forget F, Filmlalter JD and Dagorn L. 2021. Behavior of skipjack (*Katsuwonus pelamis*), yellowfin (*Thunnus albacares*), and bigeye (*Thunnus obesus*) tunas

- associated with drifting fish aggregating devices (dFADs) in the Indian Ocean, assessed through acoustic telemetry. *Fish Oceanogr* 30, 542-555. <https://doi.org/10.1111/fog.12536>.
- Green RE. 1967. Relationship of the thermocline to success of purse seining for tuna. *Trans Am Fish Soc* 96, 126-130. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1967\)96\[126:ROTTTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1967)96[126:ROTTTS]2.0.CO;2).
- Guisan A, Edwards TC and Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: Setting the scene. *Ecol Modell* 157, 89-100. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00204-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00204-1).
- IOTC Secretariat. 2025. Geo-referenced catch and effort data - All fisheries. IOTC-2025-WPTT27-DATA03. Working Party on Tropical Tunas (WPTT), 27th Session, Indian Ocean Tuna Commission. Retrieved from <https://iotc.org/WPTT/27/Data/03-CEon> Mar 13, 2026.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- ISSF (International Seafood Sustainability Foundation). 2025. A snapshot of the large-scale tropical tuna purse seine fishing fleets as of June 2025 (Version 13). ISSF Technical Report 2025-09. ISSF, Pittsburgh, Pittsburgh, U.S.A.
- Kim EJ, Moon DY and Kim SA. 2015. Effects of climate-induced variation in the catch distribution and biological characteristics of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* in the western and central Pacific Ocean. *Korean J Fish Aquat Sci* 48, 484-497. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2015.0489>.
- Ku JE, Lee SI and Kim DN. 2018. Species composition and catch of Korean tuna longline fisheries in the Indian Ocean from 2010 to 2015. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 286-297. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0286>.
- Lan KW, Evans K and Lee MA. 2013. Effects of climate variability on the distribution and fishing conditions of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western Indian Ocean. *Clim Change* 119, 63-77. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0637-8>.
- Lecomte M, Rochette J, Laurans Y and Lapeyre R. 2017. Indian Ocean tuna fisheries: Between development opportunities and sustainability issues. Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI), Paris, France. Retrieved from <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Hors%20catalogue%20Iddri/201811-tuna-indian%20oceanEN.pdf>.
- Lee SI, Kim DN and Lee K. 2020. Characteristics on bycatch in Korean tuna purse seine fishery associated with FAD in the Indian Ocean by scientific observer programs. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 56, 277-291. <https://doi.org/10.3796/KSFOT.2020.56.4.277>.
- Lehodey P, Bertignac M, Hampton J, Lewis A and Picaut J. 1997. El Niño Southern Oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature* 389, 715-718. <https://doi.org/10.1038/39575>.
- Ménard F, Marsac F, Bellier E and Cazelles B. 2007. Climatic oscillations and tuna catch rates in the Indian Ocean: A wavelet approach to time series analysis. *Fish Oceanogr* 16, 95-104. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2006.00415.x>.
- Park HY, Lee WY, Hsiao CD, Yousaf M, Song MH, Lee KS, Kang PJ and Oh SY. 2025. Comparative analysis of marine mammal-fishery interactions and conservation management measures in the convention areas of tuna regional fisheries management organizations (t-RFMOs). *Korean J Fish Aquat Sci* 58, 643-657. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0643>.
- Polovina JJ, Howell E, Kobayashi DR and Seki MP. 2001. The transition zone chlorophyll front, a dynamic global feature defining migration and forage habitat for marine resources. *Prog Oceanogr* 49, 469-483. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(01\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(01)00036-2).
- R Core Team. 2026. R: A language and environment for statistical computing. Version 4.5.3. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.r-project.org/> on Jan 18, 2026.
- Roxy MK, Modi A, Murtugudde R, Valsala V, Panickal S, Prasanna Kumar S, Ravichandran M, Vichi M and Lévy M. 2016. A reduction in marine primary productivity driven by rapid warming over the tropical Indian Ocean. *Geophys Res Lett* 43, 826-833. <https://doi.org/10.1002/2015GL066979>.
- Saji NH, Goswami BN, Vinayachandran PN and Yamagata T. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature* 401, 360-363. <https://doi.org/10.1038/43854>.
- Shono H. 2008. Application of the Tweedie distribution to zero-catch data in CPUE analysis. *Fish Res* 93, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.03.006>.
- Wood SN. 2006. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, U.S.A.. <https://doi.org/10.1201/9781420010404>.