

## 중서부태평양해역 다랑어어업의 생태계기반 어업 위험도 평가

권유정 · 임정현 · 이미경 · 이성일\*  
국립수산과학원 원양자원과 연구원

### Evaluation of Korean distant water tuna fisheries in the Western and Central Pacific Ocean using ecosystem-based fishery risk assessment

Youjung KWON, Jung-hyun LIM, Mi Kyung LEE and Sung Il LEE\*

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

Tuna fisheries were applied to an integrated ecosystem-based fishery risk assessment method using indexes of target species status, inhabited species in a target ecosystem, habitat quality and socio-economic benefit of affected fisheries. This study suggested more effective and efficient management measures to break away from traditional management methods, such as limitation of catch and fishing effort. The results presented that the objective risk index ( $ORI_S$ ) on sustainability of bigeye and yellowfin tunas by purse seine fishery was estimated high due to the high catch ratio of small fishes. The  $ORIs$  of biodiversity ( $ORI_B$ ) and habitat quality ( $ORI_H$ ) of purse seine fishery were also estimated at a high level from using fish-aggregating devices (FAD). However, due to skipjack tuna's high catches, the  $ORI$  of socio-economic benefit ( $ORI_E$ ) was estimated at a very low level. Due to the high bycatch rate,  $ORI_B$  was high, and  $ORI_S$  and  $ORI_H$  were evaluated at a low level in longline fishery. Due to strengthen of fishing restrictions and increase of fishing costs, the  $ORI_E$  was assessed to be very high. The ecosystem risk index (ERI) for two tuna fisheries was assessed low, but the overall FAD management by purse seine fishery is necessary at the ecosystem level.

Keywords: Tuna fishery, Ecosystem-based fishery risk assessment, WCPFC, Tuna longline, Tuna purse seine

#### 서론

다랑어어업은 대형 다랑어류 및 다랑어 유사종을 목표로 조업하는 어업으로 인류 역사상 가장 오래된 어업 중 하나이다(O'Connor et al., 2011). 2차 세계대전 이후 캔 음식의 수요가 증가되고, 냉동기술 등이 발달되면서 다랑어 관련 산업은 폭발적으로 확장되어 1980년대 이

후로 모든 대양에서 다랑어 조업이 이루어졌다(Miyake et al., 2004, Majkowski, 2007). 전 세계적으로 다랑어 어획량은 1950년 45만톤을 시작으로 현재 약 5백만톤으로 증가되었으며, 70% 이상이 태평양해역에서 어획하고 있다. 특히, 가다랑어의 어획량은 전 세계 어획량의 30% 이상을 차지하고 있으며 최근에는 약 50% 정도

\*Corresponding author: k.sungillee@korea.kr, Tel: +82-51-720-2330, Fax:+82-51-720-2337

수준까지 증가된 반면, 눈다랑어 어획량은 2004년 49만 톤을 최고점으로 이후 감소하였으나 2018년에는 41만 톤으로 다소 증가하였다. 황다랑어도 눈다랑어와 마찬가지로 1950년 이후 가파른 상승경향을 보였으며 2004년 147만톤을 기점으로 이후 잠시 감소경향을 보였으나, 2017년도에 151만톤으로 가장 높은 어획량을 기록했다(FAO, 2020).

1920년대에 일본이 최초로 기업형 다랑어 선단을 시작하면서 최근에는 기업형 다랑어 선단의 노력량이 다랑어 어업 총 노력량의 55%이상을 차지하고 있으며, 특히, 90% 이상 공해상에서 조업되고 있다. 기업형 다랑어 선단의 증가는 정부 보조금 및 선원 임금 삭감 등으로 비현실적인 사회경제적 구조로 빚어진 결과이다(Sala et al., 2018, Tickler et al., 2018a, 2018b). 비현실적인 사회경제적 구조로 빚어진 어업의 확장은 대체어장이 없는 현재로서는 조업어장의 포화상태를 야기시킬 수 밖에 없다(Cheung et al., 2009, 2010). 지속가능한 다랑어어업 및 현재 수준의 사회경제적 편익을 유지하기 위해서는 어획되는 계군 및 생태계 차원에서 장기적이고 지속가능한 어업관리를 할 필요가 있다(Coulter et al., 2020).

현재 다랑어의 어획관리를 위해 지역수산물관리기구(Regional Fisheries Management Organizations, RFMOs)에서 채택·이행하고 있는 보존관리조치는 어획량 제한, 노력량 제한, 금어기, 금지체장 등의 전통적인 관리 방법이다(Anonymous, 2015, de Bruyn et al., 2013, Meltzer, 2009, Coulter et al., 2020). 특히, RFMOs에서 눈다랑어, 황다랑어, 참다랑어 등 주요 다랑어류에 대해서는 총허용어획량(total allowable catch, TAC) 제도에 의해 어획량을 제한하고 있는 방법을 사용하고 있다. 이러한 어획제한 방법은 실시가 용이하고, 어업관리 효과를 극대화 할 수 있다. 그러나 이러한 전통적인 자원관리 방법들은 혼획, 남획 또는 과소어획, 어업소득 감소 등의 문제점이 발생되며, 부수어획종 및 대상생태계를 관리하기에 매우 제한적이다(Maury et al., 2013, Mooney-Seus and Rosenberg, 2007, Zhang et al., 2010).

RFMOs는 주요 목표 관리종 및 부수어획종에 대한 어업의 영향력을 최소화하기 위해 여러가지 관리방안들을 시행 중이나, 어업의 영향을 받는 생태계와 관련된 피-포식관계, 먹이망 구조, 영양단계 등을 고려한 관리 방안들은 전무한 실정이다(Juan-Jordá et al., 2016, Oh

et al., 2009). 따라서 본 연구에서는 다랑어어업에 의해 영향을 받는 목표종의 자원상태, 대상생태계 내 서식종간 관계, 서식처의 훼손 정도 및 사회경제적 효과까지 고려할 수 있는 통합 생태계기반 자원평가 모델에 다랑어어업을 적용하였으며, 특히, 다랑어어업이 주로 이루어지고 있는 태평양해역에 초점을 두었다. 이를 통해 어획량이나 노력량 제한과 같은 기존의 전통적인 관리방안에서 탈피하여 보다 효과적이고 포괄적인 관리방안을 제시할 수 있는 기초연구로 사용하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 대상생태계, 대상어업 및 대상종

본 연구에서는 대상생태계, 대상어업 및 대상종을 선정하기 위해 세계 해역별 어종별 연간 생산량 통계(FAO, 2020) 및 중서부태평양수산위원회(Western and Central Pacific Fisheries Commission, WCPFC)해역의 어업별, 해역별(5°×5°), 어종별 어획량자료를 사용하였으며(FAO, 2020, WCPFC, 2019), 선정하는 방법은 다음의 절차를 따랐다.

1) 대상생태계를 정의하기 위한 대양 선정: 다랑어류의 세계 생산량 중 가장 높은 생산량을 차지하는 대양 선택(FAO, 2020);

2) 대상어업 정의: 해당 대양의 어업별 어획량 중 총 어획량의 80% 이상이 되도록 대상어업 선택(WCPFC, 2019);

3) 대상종 정의: 대상어업의 어종별 어획량 중 총 어획량의 80% 이상이 되도록 대상종 선택(WCPFC, 2019);

4) 대상생태계 최종 정의: 대상종의 해역별(5°×5°) 어획분포 중 대상어업의 총 어획량이 80% 이상이 되도록 대상생태계 선택(Vincent et al., 2019, 2020, Ducharme-Barth et al., 2020, WCPFC, 2019).

### 생태계기반 어업 위험도 평가 모델

대상생태계, 대상어업 및 대상종에 대한 생태계기반 어업 위험도 분석은 생태계기반 어업 위험도 평가 모델(Ecosystem-based fisheries risk assessment)을 사용하였다(Zhang et al., 2009, 2010, Seo, 2011, Park et al., 2013). 위험도 평가 모델은 지속가능성, 생물다양성, 서식처의 질, 사회경제적 편익에 대한 4가지 목표로 설정되어 있으며, 각 목표별 지표와 기준점을 대상생태계,

Table 1. Objectives, indicators, data and references for ecosystem-based fishery risk assessment

Objective (weight)	Indicator	Weight	Data	Reference
Sustainability (3)	S1. Biomass (B)	3	Stock assessment results	- Vincent et al. (2019, 2020)
	S2. Fishing mortality (F)	2		- Ducharme-Barth et al. (2020)
	S3. Size at first capture (L <sub>c</sub> )	1	Minimum length by fishery	- NIFS
	S4. Rate of mature fish (MR)	1	Length composition	- NIFS
Biodiversity (2)	B1. Bycatch rate (BCR)	2	Annual amount of catch, 2014-2018	- WCPFC
	B2. Diversity (DI)	1	Annual amount of catch, 2014-2018	- WCPFC
	B3. Discards rate (DCR)	1	Annual number of discards, 2014-2018	- NIFS
Habitat quality (1)	H1. Habitat damage (DH)	2	Previous study	- Seo (2011) - NOAA (2015)
	H2. Lost fishing gear (FR)	1	Proportion of gear loss by fishery	- Richardson et al. (2019)
	H3. Discarded wastes (DW)	1	Previous study, Fishing effort	- Scott and Lopez (2014), WCPFC
Socio-economic benefit (1)	E1. Income (IPPE)	1	Korean income per person employed by fishery	- KOSIS
	E2. Employment rate (ER)	1	- Korean average person by 1 vessel - Annual number of fishing vessel in the target area	- KOSIS, WCPFC

어업 및 종에 적용하였다. 4가지 목표별 지표는 기준점 (reference points, RP)에 따라 0~3점 사이의 위험도가 계산되며, 위험도가 낮을수록 자원 및 생태계 관리가 잘 이루어졌음을 의미하고, 위험도가 높을수록 해당 지표의 위험도를 낮추기 위한 노력이 필요하다는 것을 의미한다(Zhang et al., 2009, 2010, Seo, 2011, Kang, 2018). 본 연구에서는 Kim (2020)에서 제시한 14개의 지표 중 대상종에 적용 가능한 12개의 지표를 설정하여 위험도 분석을 실시하였다(Table 1).

생태계기반 어업 위험도 평가는 지표와 기준점에 의해 추정된 위험도점수(risk score, RS), 목표위험지수(objectives risk index, ORI), 종위험지수(species risk index, SRI), 어업위험지수(fishery risk index, FRI), 생태계위험지수(ecosystem risk index, ERI)의 단계로 추정하였다(Zhang et al., 2009, 2010, Seo, 2011, Park et al., 2013). 생태계기반 어업 위험도 평가를 위한 위험 지수는 Park et al. (2013)에서 제시된 방법을 따랐다. 지표 및 목표별 중요도는 대상생태계, 대상어업 및 대상종의 최종 관리목표를 고려하여 선행연구들을 참고하여 결정되었다.

지표별 위험도점수(RS)는 식(1)과 같다.

$$RS_{i,sp,F} = \frac{TRP_{i,sp,F} - I_{i,sp,F}}{TRP_{i,sp,F} - LRP_{i,sp,F}} + 1 \quad (1)$$

여기서,  $RS_{i,sp,F}$ 는 지표  $i$ , 어종  $sp$ , 어업  $F$ 에 대한 위험도점수이며,  $TRP$ 는 목표기준점,  $LRP$ 는 한계기준점,  $I$ 는 지표의 값이다.

목표위험지수(ORI)는 관리목표에 대한 지표의 RS의 중요도(weight,  $w$ )를 고려하여 식(2)와 같이 계산하였다.

$$ORI_{j,sp,F} = \frac{\sum_i (w_{i,j} RS_{i,sp,F})}{\sum_i w_{i,j}}, \quad j = (S, B, H, E) \quad (2)$$

여기서,  $ORI_{j,sp,F}$ 는 관리목표  $j$ 에 대한 어종  $sp$ , 어업  $F$ 에 대한 목표위험지수다.  $j$ 는 지속가능성(S), 생물 다양성(B), 서식처의 질(H), 사회경제적 편익(E)을 나타낸다.  $w_{i,j}$ 는 관리목표  $j$ 의 지표  $i$ 에 대한 중요도이며, Table 1과 같다(Kim, 2020).

종위험지수(SRI)는 ORI의 중요도를 고려하여 식(3)과 같이 계산하였다.

$$SRI_{sp,F} = \frac{\sum_j (\lambda_j ORI_{j,sp,F})}{\sum_j \lambda_j}, \quad j = (S, B, H, E) \quad (3)$$

여기서,  $SRI_{sp,F,A}$ 는 어종  $sp$ , 어업  $F$ 에 대한 종위험지수,  $\lambda_j$ 는 관리목표  $j$ 의 중요도이며, 대상어종별 관리

목표에 따라 중요도가 부여되었다.

어업위험지수(FRI)는 SRI의 중요도를 고려하여 식(4)와 같이 계산하였다.

$$FRI_F = \frac{\sum_{sp} (B_{sp} \cdot SRI_{sp,F})}{\sum_{sp} B_{sp}} \quad (4)$$

여기서,  $FRI_F$ 는 어업  $F$ 에 대한 어업위험지수이며,  $B_{sp}$ 는 어종  $sp$ 에 대한 생체량 또는 생체량지수이다. 생태계위험지수(ERI)는 FRI의 중요도를 고려하여 식(5)와 같이 계산하였다.

$$ERI = \frac{\sum_F (C_F \cdot FRI_F)}{\sum_F C_F} \quad (5)$$

여기서,  $ERI$ 는 생태계위험지수이며,  $C_F$ 는 어업  $F$ 에 대한 어획량이다.

### 지표별 기준점

지속가능성, 생물다양성, 서식처의 질, 사회경제적 편익 등 4개의 관리목표에 대한 지표의 목표기준점(target reference point, TRP)과 한계기준점(limit reference point, LRP)이 Table 2과 같이 설정되었으며, Zhang et al. (2010) 및 Seo (2011)의 기준점을 참고하였다.

### 지속가능성

본 연구에서 자원량은 산란자원량으로 설정하였으며, 자원량 지표를 위해 TRP는 최대지속적생산량(maximum sustainable yield, MSY)시의 산란자원량( $SB_{MSY}$ ), LRP는 TRP의 절반 수준으로 설정하였다(Zhang et al., 2010). 사용된 자료는 대상종별 자원평가 결과를 사용하였다(Vincent et al., 2019, 2020, Ducharme-Barth et al., 2020).

어획강도의 지표인 순간어획사망계수(F)의 TRP는 MSY시의 순간어획사망계수( $F_{MSY}$ ), LRP는 TRP의 두배로 설정되었으며(Zhang et al., 2010), 자원량 지표와 동일한 자원평가 결과 연구를 자료로 사용하였다.

어획개시 체장의 TRP는 50% 군성숙 체장( $L_{50\%}$ ), LRP

Table 2. The data of target and limit reference points (TRP and LRP) by indicator for ecosystem-based fishery risk assessment

Objective	Indicator	TRP	LRP	Data	Reference
Sustainability	S1. Biomass (B)	$SB_{MSY}$	$0.5SB_{MSY}$	Stock assessment results	- Vincent et al. (2019, 2020)
	S2. Fishing mortality (F)	$F_{MSY}$	$2F_{MSY}$		- Ducharme-Barth et al. (2020)
	S3. Size at first capture ( $L_c$ )	$L_{50\%}$	$0.5L_{50\%}$	Length at 50% maturity	- Zhu et al. (2011) - Ashida et al. (2010) - Sun et al. (2005)
	S4. Rate of mature fish (MR)	$MR_{target}$	$MR_{limit}$	TRP: 40%, LRP: 20%	- Seo (2011)
Biodiversity	B1. Bycatch rate (BCR)	$0.5\overline{BCR}$	$\overline{BCR}$	Average amount of catch, except target species, 2014-2018	- WCPFC
	B2. Diversity (DI)	$\overline{DI}$	$0.5\overline{DI}$	Average annual amount of catch by species, 2014-2018	- WCPFC
	B3. Discards rate (DCR)	$0.5\overline{DCR}$	$\overline{DCR}$	Average annual discards, 2014-2018	- NIFS
Habitat quality	H1. Habitat damage (DH)	$DH_{target}$	$DH_{limit}$	TRP: 0.2, LRP: 0.4	- Seo (2011)
	H2. Lost fishing gear (FR)	$FR_{target}$	$2FR_{target}$	Average proportion of gear loss	- Richardson et al. (2019)
	H3. Discarded wastes (DW)	$0.5\overline{DW}_{limit}$	$\overline{DW}_{limit}$	- FAD loss - Average fishing effort	- Scott and Lopez (2014) - WCPFC
Socio-economic benefit	E1. Income (IPPE)	UIPPE	LIPPE	- TRP: average annual wages in the world - LRP: average minimum wages in the world	- OECD
	E2. Employment rate (ER)	UER	$0.5UER$	Employment rate in the world, 2017-2018	- OECD

는 TRP의 절반 수준으로 설정하였고(Seo, 2011), 대상 종별 성숙체장 연구 결과를 사용하였다(Zhu et al., 2011, Ashida et al., 2010, Sun et al., 2005).

재생산력의 지표인 성어비율의 TRP는 40%, LRP는 20%로 설정하였다(Seo, 2011).

### 생물다양성

혼획(bycatch)은 대상종을 제외한 모든 어종을 혼획으로 정의하였으며, 혼획률의 LRP는 대상생태계의 대상 어업에 대한 혼획된 어종의 최근 5개년의 평균 어획량으로 설정하였고, LRP의 절반을 TRP로 설정하였다. 2014년부터 2018년까지 WCPFC의 어업별, 해역별(5°×5°), 어종별 어획량자료를 사용하였다(WCPFC, 2019).

종다양성지수의 TRP는 Shannon and Wiener (1963) 방법에 의해 직접 추정된 최근 5개년간 평균 종다양성지수이며, LRP는 TRP의 절반 수준으로 설정하였다(Kim, 2020). 사용된 자료도 혼획율과 동일하게 WCPFC의 어획량자료를 사용하였다. 폐기량의 LRP는 최근 5개년간 평균 폐기량으로 설정하였으며, LRP의 절반을 TRP로 설정하였다. 대상생태계에 한정된 폐기량이 없기 때문에, 대상생태계 내 조업하는 우리나라 선박들이 보고한 폐기량 자료를 사용하였다(Gilman et al., 2017, unpublished data from NIFS).

### 서식처의 질

서식처 훼손율의 TRP는 0.2, LRP는 0.4로 설정되었으며(Seo, 2011), 어구 유실율의 TRP는 선행연구 중 이용가능한 모든 어업별 어구유실율의 평균으로 설정하였으며, LRP는 TRP의 두 배로 설정되었다(Kim, 2020). 사용한 자료는 통발, 자망, 연승, 선망, 트롤 등 20개의 어업에 대한 어구유실율의 평균을 사용하였다(Richardson et al., 2019).

어업폐기물은 어업별 자료가 거의 없었기 때문에 최근 5개년간 어획노력량의 평균으로 LRP를 설정하였으며, TRP는 LRP의 절반 수준으로 설정되었다. 사용한 자료는 조업척수가 많으면 어업폐기물도 증가된다는 가정 하에, 조업일수를 가중하여 사용하였다. 또한, 선박에서 조업에 도움을 받기 위해 해상에 설치하는 부유물의 유실정도에 대한 자료도 사용하였다(Scott and Lopez, 2014).

### 사회경제적 편익

임금의 TRP와 LRP는 각각 세계 평균 임금 및 최저임금으로 설정하였다. 사용된 자료는 OECD에서 제공하는 세계 평균 1인당 임금 및 세계 평균 최저임금을 사용하였다(OECD, 2020).

고용율의 지표인 고용증가율의 TRP는 전년대비 세계 고용증가율로 설정하였으며, LRP는 TRP의 절반 수준으로 설정하였다. 사용된 자료는 OECD에서 제공하는 2017년에서 2018년간 세계 고용률을 사용하였다(OECD, 2019).

### 자료

#### 지속가능성

자원량 및 순간어획사망계수는 대상종별 자원평가 결과를 사용하였다(Vincent et al., 2019, 2020, Ducharme-Barth et al., 2020). 어획개시체장은 우리나라 원양어선 및 국제음서버에 의해 수집되는 어업별 어종별 최소체장을 사용하였다(Abascal et al., 2014, McKechnie, 2014, Peatman et al., 2020, Vincent et al., 2019, unpublished data from NIFS). 성어비율은 50% 군성숙체장(L<sub>50%</sub>)을 기준으로 우리나라 원양어선 및 국제음서버에 의해 수집된 어업별 어종별 체장조성 비율로 계산하였다(Abascal et al., 2014, McKechnie, 2014, Peatman et al., 2020, Vincent et al., 2019, unpublished data from NIFS).

#### 생물다양성

혼획율 및 종다양성은 2014년부터 2018년까지 WCPFC의 어업별 어종별 어획량 자료를 사용하였으며, 폐기량은 우리나라 원양어선에서 보고되는 어업별 어종별 폐기량자료를 사용하였다(Gilman et al., 2017, unpublished data from NIFS).

#### 서식처의 질

서식처 훼손율은 Seo (2011), Pritzker et al. (2015)의 선행연구를 활용하였으며, 어구유실율은 Richardson et al. (2019)의 대상어업별 어구유실율을 사용하였다. 어업 폐기물의 기준점을 설정하는 방법과 동일하게 어획노력량에 비례함을 가정하였으며, 해상에 설치하는 부유물의 정도를 사용하였다(Scott and Lopez, 2014, WCPFC, 2019).

사회경제적 편익

각 조업국별 어업별 임금에 대한 자료가 없기 때문에, 국가공식통계에서 제공하는 대상어업별 우리나라 평균임금을 사용하였다(Koran Statistical Information Service, KOSIS). 고용률의 경우, 대상생태계 내 어업별로 비슷한 조업환경을 가정하여, 대상어업별 우리나라 선박 1척당 평균 승선인원을 대상생태계 내 연간 조업한 척수로 곱해서 연간 승선원수를 계산하였다.

결과 및 고찰

대상생태계, 대상어업 및 대상종

대상생태계, 어업 및 종 선정 절차에 따라 1) 대상생태계를 정의하기 위한 대양 선정: FAO 수산통계에 따르면, 눈다랑어, 황다랑어, 가다랑어 및 날개다랑어의 세계 생산량은 1950년대 40만톤이었던 것이 최근에는 5백만톤까지 지속적으로 증가하였다(Fig. 1). 해역별로는 모든 대양에서 증가를 보였으며, 특히, 태평양해역이 1970년대 중반 이후 매우 가파르게 증가하였다(Fig. 1a). 어종



Fig. 1. Global catches of (a) major tunas (bigeye tuna, yellowfin tuna, skipjack tuna, and albacore tuna) by ocean, (b) major tunas by species, (c) bigeye tuna, (d) yellowfin tuna, (e) skipjack tuna and (f) albacore tuna.

별로는 가다랑어가 가장 증가 경향이 뚜렷했으며, 황다랑어도 2000년대까지는 증가경향을 보였으나, 이후 큰 폭으로 감소하였가 2010년도 이후 다시 증가 경향을 보였다(Fig. 1b). 눈다랑어도 황다랑어와 유사하게 2000년대까지 증가하였으나, 이후 지속적인 감소경향을 보였다. 날개다랑어는 큰 변동 없이 일정한 어획수준을 보였다. 주요 다랑어류의 어종별 대양별 어획량은

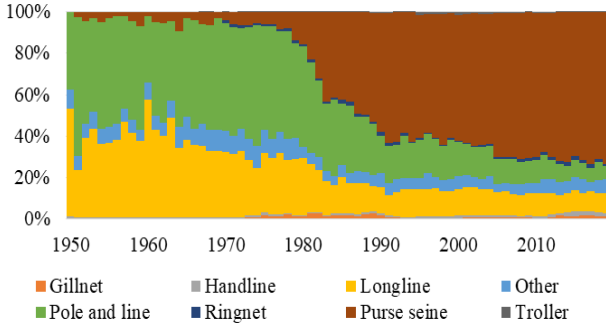
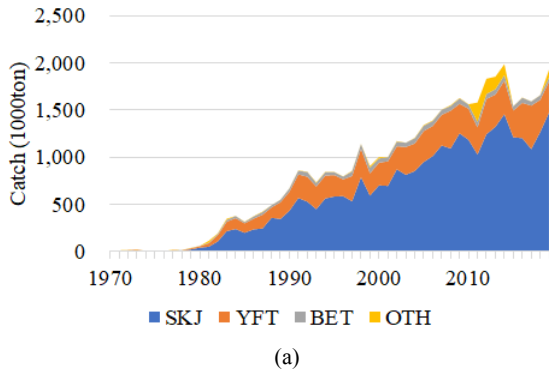


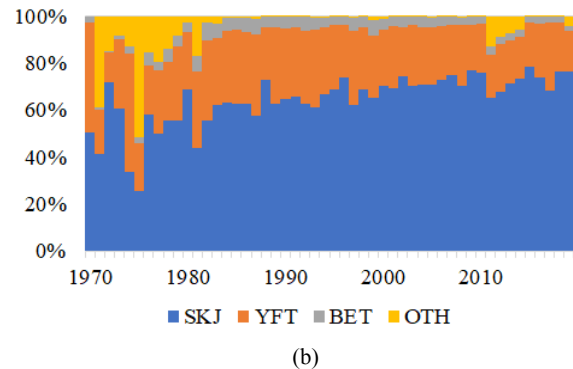
Fig. 2. Global catches of major tunas by fishing gear.

모든 생산량이 태평양해역에서 탁월하게 높았다(Fig. 1c-1f). 따라서 본 연구에서는 태평양해역을 대상생태계로 선택하였다. 태평양해역의 다랑어 어획의 대부분이 중서부태평양수산위원회(WCPFC) 관할 수역에서 발생하고 있으므로, 태평양해역 중 WCPFC해역으로 한정하였다.

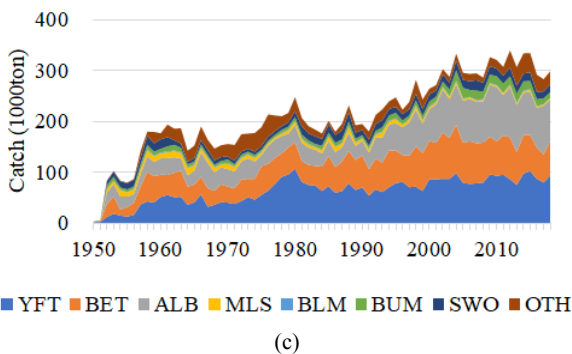
2) 대상어업: 1950년대부터 1970년대 후반까지는 연승어업 및 외줄낚시어업(pole and line)이 전체 다랑어 어획량의 90% 정도를 차지했으나, 1980년대 이후로 외줄낚시어업이 급감하고 선망어업이 급증하였다(Fig. 2). 최근에는 선망어업이 전체 다랑어어업의 60% 이상의 어획비율을 보이고 있다. 두번째로 높은 어업은 연승어업으로 1960년대는 최고 60% 정도의 어획비율을 나타냈으나, 외줄낚시어업과 유사하게 1980년대 이후 다소 감소하는 추세를 보였다. 그러나 외줄낚시어업만큼 큰 폭으로 감소하지 않았고, 최근에는 20% 정도의 어획비율을 나타냈다. 따라서 대상어업은 선망과 연승어업으



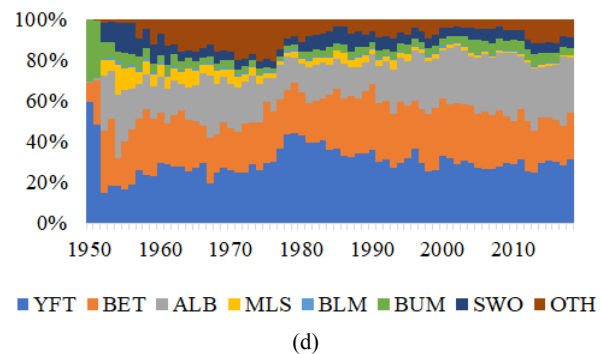
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Catches (a and c) and catch ratio (b and d) by purse seine fishery and longline fishery in the WCPFC area (SKJ: skipjack tuna, YFT: yellowfin tuna, BET: bigeye tuna, MLS: striped marlin, BLM: black marlin, BUM: blue marlin, SWO: swordfish, OTH: other fishes).

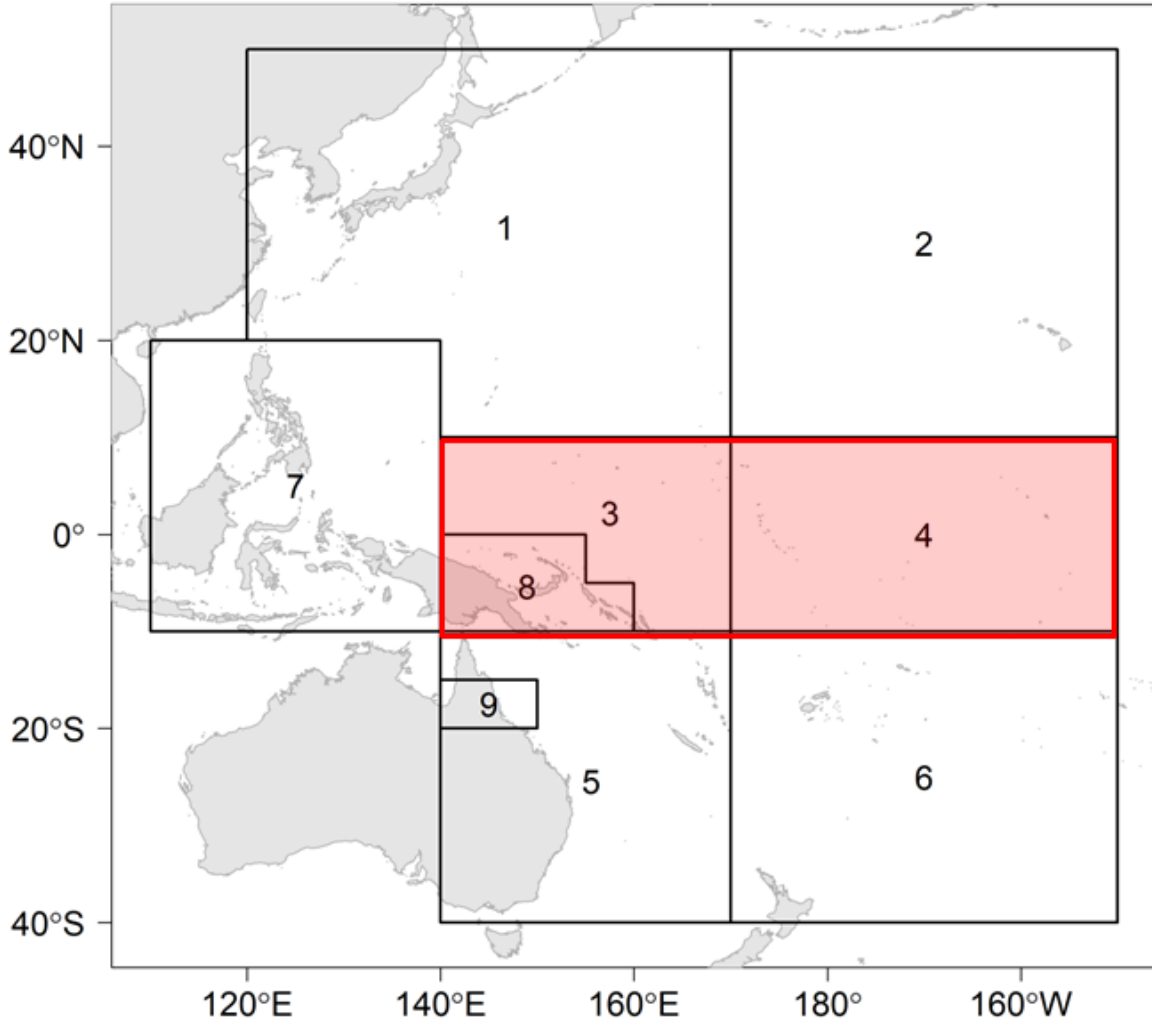


Fig. 4. The red rectangle is the target area for this study (modified by Vincent et al., 2020 and Ducharme-Barth et al., 2020).

로 선택하였다.

3) 대상종: 선망어업 어획량의 70% 이상이 가다랑어이며, 20% 이상은 황다랑어이다(Fig. 3a, 3b). 눈다랑어는 선망어업 총 어획량의 5% 미만이지만, FAD(어군유집장치, fish-aggregating devices)를 이용한 조업으로 눈다랑어 치어의 어획사망 및 어획량이 높아지면서 문제가 대두되고 있다(Harley and Suter, 2007, Maunder and Harley, 2002, Harley et al., 2005). 따라서 본 연구에서는 선망어업의 대상종은 가다랑어, 황다랑어 및 눈다랑어를 선택하였다. 연승어업은 황다랑어, 눈다랑어 및 날개다랑어의 어획량이 각각 7~8만톤 전후로 비슷한 수준으로 나타났다(Fig. 3c, 3d). 날개다랑어는 황다랑어, 눈다랑어

와 서식범위가 다르며, 조업하는 방법에서도 차이가 있기 때문에 연승어업의 대상종은 눈다랑어와 황다랑어에 한정하였다.

4) 대상생태계: 대상어업의 주 어장 및 WCPFC 자원 평가에 사용되는 해역 구분을 참고하여 본 연구의 대상생태계는 Fig. 4와 같이 선정하였다. 대상생태계와 그 외 해역에 대한 어종별 어획비율은 가다랑어가 90% 내외로 가장 높았으며, 황다랑어와 눈다랑어는 70% 내외를 보였다(Fig. 5).

따라서 본 연구의 대상생태계는 WCPFC해역(140°E-160°W, 10°N-10°S)이며, 대상어업은 선망어업과 연승어업, 그리고 대상종은 가다랑어, 황다랑어 및 눈다랑어



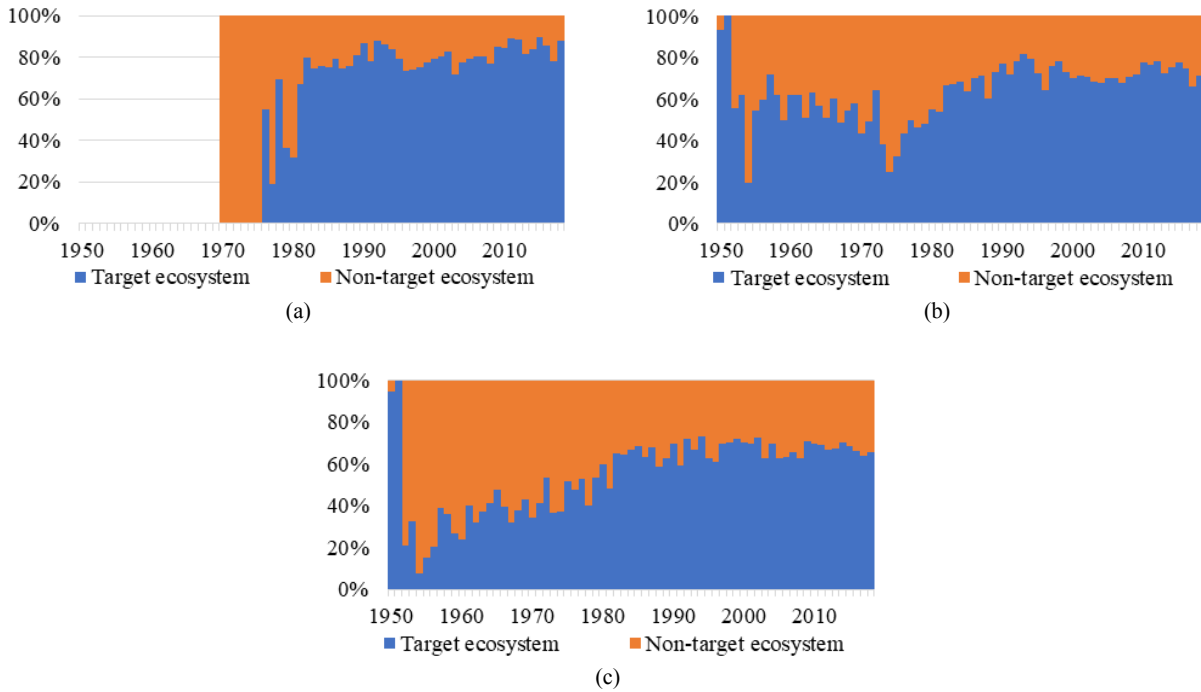


Fig. 5. Catch ratio of (a) skipjack tuna, (b) yellowfin tuna, and (c) bigeye tuna by target area and non-target area.

Table 3. Target ecosystem, fishery and species

Ecosystem	Fishery	Species
WCPFC area (140°E-160°W, 10°N-10°S)	Purse seine	Skipjack tuna, Yellowfin tuna and Bigeye tuna
	Longline	Bigeye tuna and Yellowfin tuna

로 선정하였다(Table 3)

### 생태계기반 어업 위험도 평가 모델

#### 지표별 위험도점수(RS)

##### 지속가능성

선망어업에서 어획되는 가다랑어의 지표별 위험도점수는 Fig. 6a와 같다. 지속가능성의 지표에서 자원량, 어획강도 및 성어비율은 RS가 모두 1 미만으로 양호한 상태로 평가되었으나, 어획개시체장의 RS는 2 이상으로 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 현재 가다랑어의 산란자원량은 목표기준점(TRP)인 MSY시의 산란자원량(SB<sub>MSY</sub>)의 두 배 이상으로 평가되고 있으므로 RS는 0으로 평가되었다(Vincent et al., 2019). 순간어획사망계수의 TRP인 MSY시의 순간어획사망계수(F<sub>MSY</sub>)보다 현재 수준이 절반정도 낮은 상태로 평가되고 있으므로 RS

는 0.46으로 평가되었다. 어획개시체장의 TRP는 40.7 cm, LRP는 20.4 cm였으나, 선망어업에서 어획된 최소 체장은 19.0 cm로 LRP보다 더 작아 RS가 2.07로 주의를 요하는 상태로 평가되었었다. 가다랑어의 50% 군성숙 체장(L<sub>50%</sub>)인 40.7 cm보다 큰 개체의 어획비율이 총 어획량의 80%로 계산되었기 때문에 성어비율의 RS는 0으로 평가되었다.

선망어업의 눈다랑어의 지표별 위험도점수는 Fig. 6b와 같다. 지속가능성의 지표에서 자원량, 어획강도의 RS는 1 미만으로 양호한 상태로 평가되었으나, 성어비율은 1.5 이상으로 주의를 요하는 상태로 평가 되었으며, 어획개시체장의 RS는 2.5 이상으로 매우 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 현재 눈다랑어의 산란자원량은 SB<sub>MSY</sub>의 1.7 배로 평가되고 있으므로 RS는 0으로 평가되었다(Vincent et al., 2020). 현재 순간어획사망계

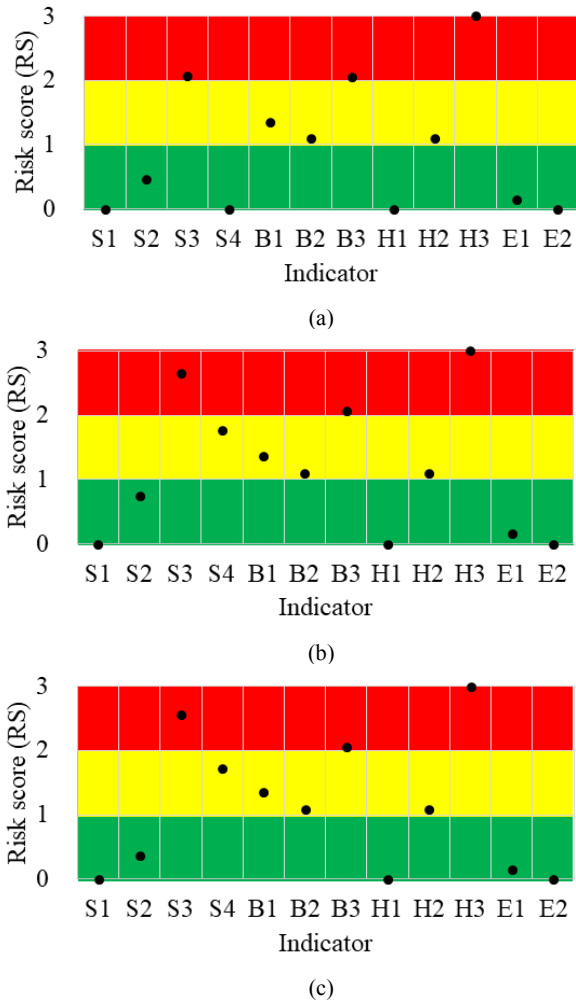


Fig. 6. Estimated risk score (RS) of (a) skipjack tuna, (b) bigeye tuna, and (c) yellowfin tuna by the purse seine fishery.

수도  $F_{MSY}$  보다 낮은 상태로 평가되고 있으므로 RS는 0.74로 평가되었다. 어획개시체장의 TRP는 117.5 cm, LRP는 58.8 cm 였으나, 선망어업에서 어획된 최소체장은 20.0 cm로 LRP보다 더 작아 RS가 2.66으로 매우 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 눈다랑어의  $L_{50\%}$ 보다 큰 개체의 어획량은 선망어업에서 어획된 눈다랑어 총 어획량의 25%로 계산되었기 때문에 성어비율의 RS는 1.77로 평가되었다.

선망어업의 황다랑어의 지표별 위험도점수는 Fig. 6c와 같다. 눈다랑어와 유사하게 자원량과 어획강도의 RS는 1 미만으로 양호한 상태로 평가되었으나, 성어비율은 1.5 이상으로 주의를 요하는 상태로 평가되었으며, 어획개시

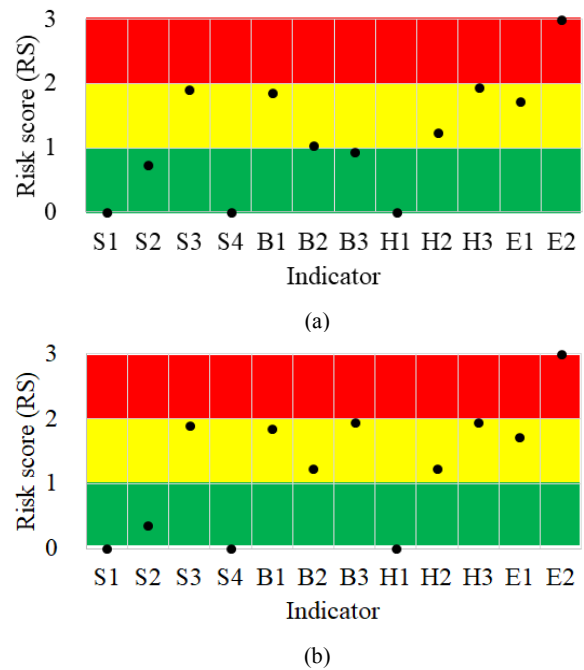


Fig. 7. Estimated risk score (RS) of (a) bigeye tuna and (b) yellowfin tuna by the longline fishery.

체장의 RS는 2.5 이상으로 매우 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 현재 황다랑어의 산란자원량은  $SB_{MSY}$ 의 2배 이상으로 평가되고 있으므로 RS는 0으로 평가되었다 (Ducharme-Barth et al., 2020). 현재 순간어획사망계수도  $F_{MSY}$  보다 낮은 상태로 평가되고 있으므로 RS는 0.37로 평가되었다. 어획개시체장의 TRP는 107.8 cm, LRP는 53.9 cm 였으나, 선망어업에서 어획된 최소체장은 24.0 cm로 LRP 보다 더 작아 RS가 2.55로 매우 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 황다랑어의  $L_{50\%}$  보다 큰 개체의 어획량은 선망어업에서 어획된 황다랑어 총 어획량의 26%로 계산되었기 때문에 성어비율의 RS는 1.71로 평가되었다.

연승어업의 눈다랑어의 지표별 위험도점수는 Fig. 7a와 같다. 자원량, 어획강도 및 성어비율의 RS는 1 미만으로 양호한 상태로 평가되었으나, 어획개시체장의 RS는 2 정도로 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 현재 눈다랑어의 산란자원량, 어획강도는 어업별 차이는 없었다. 연승어업에서 어획된 눈다랑어의 최소체장은 64.0 cm로 LRP인 58.8 cm와 유사하여 RS가 1.91로 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 연승어업에서 어획된 눈다랑어의 체장조성은  $L_{50\%}$  보다 대부분 큰 개체가 어

획되었으며, 연승어업의 총 어획량의 96%로 계산되었기 때문에 성어비율의 RS는 0으로 평가되었다.

연승어업의 눈다랑어의 지표별 위험도점수는 Fig. 7b와 같으며, 지표별 RS는 눈다랑어의 RS와 유사하였다. 연승어업에서 어획된 황다랑어의 최소체장은 60.0cm로 LRP인 58.8 cm와 유사하여 RS가 1.89로 주의를 요하는 상태로 평가되었다. 연승어업에서 어획된 눈다랑어의 체장 조성은  $L_{50\%}$ 보다 대부분 큰 개체가 어획되었으며, 연승어업의 총 어획량의 99%로 계산되었기 때문에 성어비율의 RS는 0으로 평가되었다.

지속가능성에 대한 지표별 위험도점수에서 어업에 상관없이 어획개시체장의 RS는 모두 2 내외로 주의를 필요로 하는 것으로 평가되었다. 그러나 가다랑어는 성어의 어획비율이 80%로 성장남획의 가능성은 낮을 것으로 추측되나, 눈다랑어와 황다랑어는 성어어획비율이 30% 미만으로 대부분 미성숙개체가 어획되고 있는 상태이다. 선망어업의 특성상 FAD조업으로 인해 미성숙개체가 많이 어획되며, 특히 소형 눈다랑어의 어획이 증가되면서 RFMOs에서는 FAD 조업에 대한 보존관리조치를 채택하여 엄격히 관리 중에 있다. 현재 눈다랑어 및 황다랑어의 자원상태가 양호하다는 결과를 보이고 있으나, 소형어 어획이 감소되지 않으면 성장남획을 초래하여 자원이 감소될 가능성이 높으므로 소형어 어획에 대한 체계적인 관리가 이루어져야 할 것으로 보인다.

### 생물다양성

생물다양성은 어업에 대한 목표이기 때문에 어종별 차이 없이 평가되었다. 선망어업의 생물다양성과 관련된 3개의 지표는 모두 1 이상으로 평가되었으며, 그 중 폐기율에 대한 RS가 2 이상으로 평가되었다(Fig. 6). 혼획량은 대상종을 제외한 어종의 어획량이며, 2014년에서 2018년까지 연간 혼획률의 평균인 LRP는 3%로 설정되었다. 2018년 현재 선망어업의 혼획률은 2%로 RS가 1.36으로 평가되었다. 종다양성지수의 TRP는 0.65로 설정되었고, 2018년 현재 종다양성지수는 0.62로 RS는 1.09로 평가되었다. 폐기율에 대한 LRP는 0.37%로 설정되었으며, 현재 폐기율은 0.38%로 RS는 2.06으로 평가되었다.

연승어업은 2개의 지표가 1 이상으로 평가되었으며, 그 중 폐기율에 대한 RS는 1 이하로 평가되었다(Fig. 7).

연승어업에서 혼획률의 LRP는 26%로 설정되었고 2018년 현재 연승어업의 혼획률은 24%로 RS가 1.85로 평가되었다. 종다양성지수의 TRP는 1.45로 설정되었고, 2018년 현재 종다양성지수는 1.42로 RS는 1.04로 평가되었다. 폐기율에 대한 LRP는 3.1%로 설정되었으며, 현재 폐기율은 1.45%로 RS는 0.94로 평가되었다.

### 서식처의 질

서식처의 질에 대한 지표도 생물다양성과 마찬가지로 어업에 대한 목표이기 때문에 어종별 차이 없이 평가되었다. 선망어업의 서식처의 질 관련된 3개의 지표 중 서식처훼손율은 양호하게 평가되었으나, 어업폐기물은 매우 주의가 필요하게 평가되었다(Fig. 6). 다랑어 선망어업의 조업수심은 보통 90~160 m이므로, 선망의 조업으로 서식처가 훼손될 가능성은 매우 낮기 때문에 RS를 0으로 설정하였다(Seo, 2011, FAO, 2013). 어구유실율의 TRP는 0.136이며, 선망어업의 어구유실율 0.066으로 RS는 1.09로 평가되었다. 선망어업은 조업의 특성상 해상에 FAD를 설치하며, 전 대양의 FAD의 약 60%가 WCPFC해역에서 이루어지며, 설치된 FAD를 관리하는 비율은 50% 정도이다(Scott and Lopez, 2014). 본 연구에서는 관리되지 않는 FAD도 어업폐기물로 가정하여 선망어업의 어업폐기물에 대한 RS는 3으로 평가하였다.

연승어업도 선망어업의 결과와 유사하게 서식처훼손율은 양호하게 평가되었으나, 어업폐기물은 매우 주의가 필요한 것으로 평가되었다(Fig. 7). 다랑어 연승어업의 조업수심은 보통 150~250 m이므로, 연승어업의 조업으로 서식처가 훼손될 가능성은 매우 낮기 때문에 RS를 0으로 설정하였다. 어구유실율의 TRP는 0.136이며, 연승어업의 어구유실율 0.17로 RS는 1.24로 평가되었다. 연승어업의 어업폐기물에 대한 정보는 구할 수 없었기 때문에, 조업척수 및 조업일수에 따라 어업폐기물의 양도 비례한다고 가정하였다. 어업폐기물의 TRP는 471로 설정하였으며, 2018년 현재 어업폐기물은 916으로 RS는 1.95로 평가되었다.

### 사회경제적 편익

사회경제적 편익에 대한 지표도 어업에 대한 목표이기 때문에 어종별 차이 없이 평가되었다. 선망어업의 평균임금에 대한 TRP와 LRP는 각 4,188,024원과 1,443,898원으로 설정되었고, 2018년도 선망어업의 평

균임금은 6,512,000원으로 RS는 0.15로 평가되었다 (Fig. 6). 고용증가율의 TRP는 1.42이며, 현재 선망어업의 고용률은 20.73으로 RS는 0으로 평가되었다.

연승어업의 2018년도 평균임금은 2,224,000원으로 RS는 1.72로 평가되었다(Fig. 7). 고용증가율은 -1.41로 RS는 3으로 평가되었다.

**목표위험지수(Objective risk index, ORI)**

**선망어업**

선망어업의 목표위험지수(ORI)는 지속가능성, 서식처의 질 및 사회경제적 편익의 ORI의 대부분은 1 미만으로 평가되었으며, 생물다양성의 ORI는 1 이상으로 평가되었다(Fig. 8). 현재 대상종들의 자원상태는 양호하

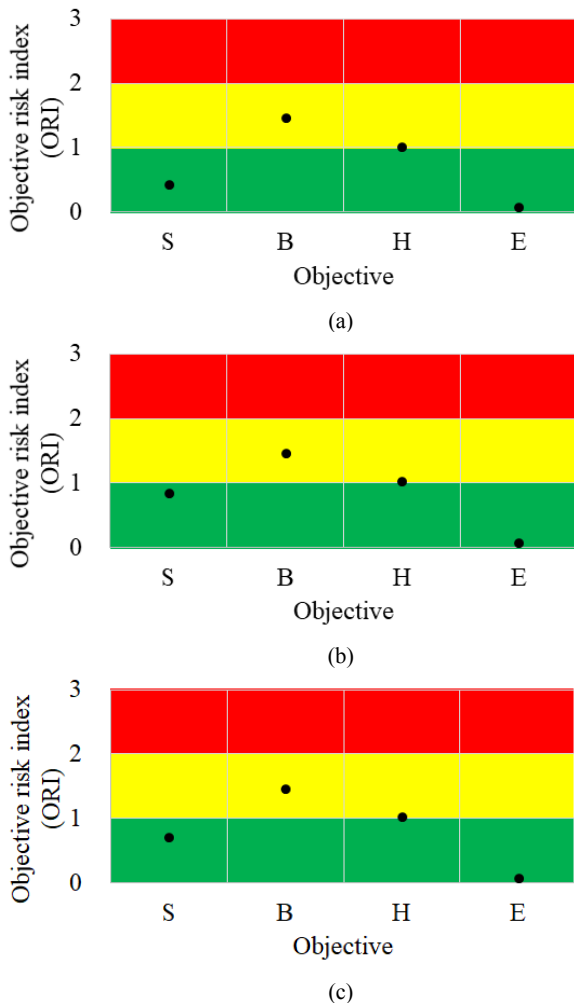


Fig. 8. Estimated objective risk index (ORI) of (a) skipjack tuna, (b) bigeye tuna and (c) yellowfin tuna by the purse seine fishery.

고, 어획강도는 낮은 상태이기 때문에 지속가능성에 대한 ORI(ORI<sub>S</sub>)는 대부분의 어종에서 1 미만의 양호한 상태로 평가되었다. 그러나 FAD조업으로 인한 소형 눈다랑어 및 황다랑어 어획비율이 증가되면서 어획개시체장 및 성어비율의 위험도가 높아져 눈다랑어 및 황다랑어의 ORI<sub>S</sub>는 가다랑어에 비해 높았다. 생물다양성의 OIR(ORI<sub>B</sub>)는 1.47로 주의가 필요한 단계로 평가되었는데, 이는 FAD 조업으로 부수어획이 높아지면서 혼획률 및 폐기율의 위험도가 높게 평가된 것에 기인한 것으로 보인다. 또한 서식처의 질에 대한 ORI(ORI<sub>H</sub>)는 1.02로 평가되었다. 표층조업이며 어구유실이 거의 없는 선망어업은 서식처를 훼손하는 지표의 위험도는 높지 않았으나, FAD 종류에 따라 9.9~82%의 높은 FAD 유실율로 어업폐기물의 위험이 상대적으로 매우 높게 평가되었다 (Richardson et al., 2019). 사회경제적 편익에 대한 ORI(OIR<sub>E</sub>)는 0.08로 매우 양호한 상태로 평가되었다. 현재 전 세계 다랑어류 생산량의 50% 정도를 가다랑어가 차지하고 있기 때문에 평균임금 및 고용증가율의 위험도는 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

**연승어업**

연승어업의 목표위험지수(ORI)는 지속가능성 및 서식처의 질의 ORI의 대부분은 1 미만으로 평가되었으며, 생물다양성의 ORI는 1 이상, 사회경제적 편익은 2 이상으로 위험도가 매우 높게 평가되었다(Fig. 9). 대상종의 현재 자원상태 및 어획강도가 양호한 상태이므로 ORI<sub>S</sub>는 0.5 미만의 매우 양호한 상태로 평가되었다. 어획개시체장의 위험도가 다소 높기는 하지만, 연승어업에서 어획되는 개체크기가 대부분이 L<sub>50%</sub> 이상으로 어획되므로 선망어업에 비해서는 ORI<sub>S</sub>가 낮았다. ORI<sub>B</sub>는 1.42로 다소 주의가 필요한 단계로 평가되었다. 연승어업은 개체크기에 대한 선택성을 할 수 있기 때문에 다랑어류의 폐기량은 상대적으로 적은 편이나, 바닷새, 바다거북 및 상어 등의 부수어획은 선망어업에 비해 높은 편이며 연승어업 부수어획의 90% 이상이 상어인 것으로 알려져 있다(FAO, 2013). ORI<sub>H</sub>는 0.8로 양호한 수준으로 평가되었다. 표·중층 조업으로 선망어업과 유사하게 서식처를 훼손하는 지표의 위험도는 높지 않았으나, 어구의 특성상 낚시바늘 및 낚시줄의 어구유실이 빈번하게 발생하므로(Richardson et al.,

2019),  $OIR_E$ 는 2.36으로 매우 높은 위험도로 평가되었다. 자원보존관리를 위해 WCPFC해역의 눈다랑어는 연승어업 대상으로 국별 쿼터할당으로 관리를 하고 있으며, 황다랑어는 어획노력량 제한으로 관리되고 있다. 눈다랑어의 경우, 전 세계적으로 어획량이 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 태평양해역은 1980년대 이후로 급증하는 경향을 보였다(Fig. 1c). 그러나 이러한 증가는 선망어업의 발달에 따른 눈다랑어 어획량 증가로 보이며, 연승어업에서의 눈다랑어 어획량의 변화는 거의 없었다(Fig. 3a, 3c). 눈다랑어 및 황다랑어의 자원상태가 양호하다고 하나, 선망어업의 소형개체 어획 등 여러 가지 요인들로 인해 자원감소의 징후가 보이므로 어획쿼터 증대는 불투명해 보인다. 또한, 우리나라의 경우처럼 연승선박 노후화 및 선원 평균 연령 증가와 같은 부수적인 요인들이 더해지면서, 연승어업의 평균임금 및 고용증가율은 현재와 유사한 상황으로 지속될 것으로 보인다.

**종위험지수(Species risk index, SRI)**

선망어업 대상종의 종위험지수(SRI)는 모두 1 미만으

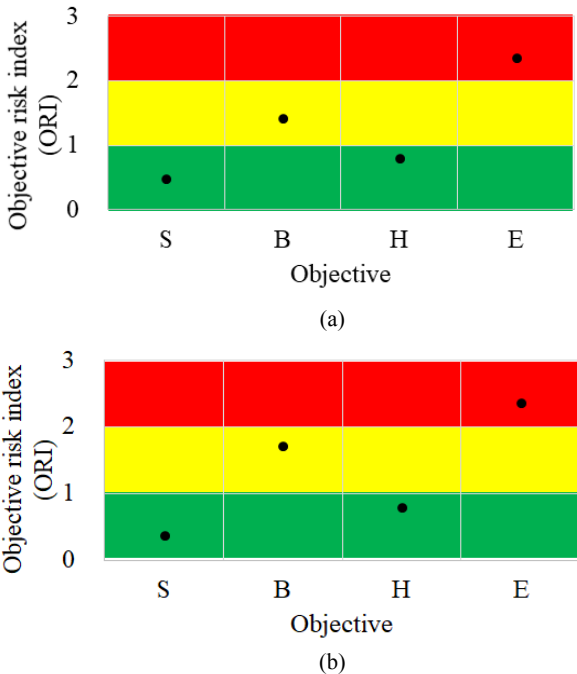


Fig. 9. Estimated objective risk index (ORI) of (a) bigeye tuna and (b) yellowfin tuna by the longline fishery.

로 양호한 상태로 평가되었으며, 연승어업은 1 이상으로 평가되었다(Fig. 10). 지속가능성, 생물다양성 및 서식처의 질에 대한 ORI는 연승어업에 비해 선망어업이 대부분 높았으나, 사회경제적 편익에서 연승어업이 매우 높은 위험도를 보여 연승어업의 SRI가 선망어업보다 높은 것으로 평가되었다. 과거부터 자원평가를 위한 자원관리는 대부분 자원의 지속가능성의 관점에서 자원량, 어획강도 등 직접적인 방법으로 통제 및 관리되고 있다. 직접적인 방법은 자원상태가 감소된 자원에 효과적이거나, 자원상태가 양호한 계군에 대해서는 다양한 측면에서의 관리방안 적용검토가 필요하다. 특히, 사회경제적 편익은 어업생산량의 효율성과 관련되기 때문에 상대적으로 적은 노력으로 높은 생산성을 기대할 수 있으므로, 노력량 감소에 따른 서식처 환경에도 도움이 될 것으로 보인다(Kim and Zhang, 2011, Cho et al., 2017). 또한, 사회경제적 편익은 어업인을 비롯하여 어업관계자들의 실질적인 목표이며, 안정적인 생산성 유지 및 관련 정책들과 긴밀한 관련이 있다(Zhang et al., 2010).

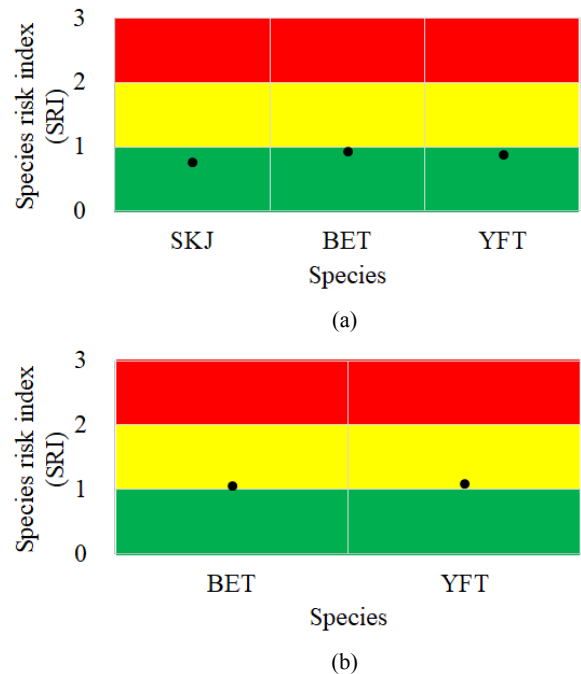


Fig. 10. Estimated species risk index (SRI) of (a) purse seine fishery and (b) longline fishery.

**어업위험지수(Fishery risk index, FRI) 및 생태계위험지수(Ecosystem risk index, ERI)**

선망어업 어업위험지수(FRI)는 0.84, 연승어업의 FRI는 1.08로 평가되었다(Fig. 11a). 두 어업에 대한 생태계위험지수(ERI)는 0.85로 평가되었다(Fig. 11b). 두 어업에 대한 어업위험지수 및 대상생태계의 위험지수는 다소 양호한 편으로 평가되었다. 그러나 선망어업의 경우 FAD 조업으로 인해 야기되는 소형어 어획증가, 혼획률 및 폐기물 증가, 어업폐기물 증가로 지속가능성뿐만 아니라 생물다양성 및 서식처의 질에서도 높은 위험도를 나타냈다. 기존 많은 연구에서 FAD를 이용한 조업은 눈다랑어와 황다랑어 치어의 어획사망 및 어획량이 높이기 때문에 문제가 대두되고 있다 (Harley and Suter, 2007, Maunder and Harley, 2002, Harley et al., 2005). FAD 조업으로 인해 FAD 아래에 몰려드는 여러 생물군들이 부수어획되며, 부수어획된 어획물의 대부분은 폐기되고 있다(Chan et al., 2014, Pilling et al., 2015). Griffiths et al. (2018)에 의하면, 특히 상어는 FAD 조업에 취약해 FAD 조업을 증가시

켰을 때, 상어류(미혹점상어, 청상아리류 등)의 자원량이 43% 이상 감소할 것이라고 하였다. 중서부태평양해역은 FAD 사용의 약 60%가 이 해역에서 이루어지며, FAD를 관리하는 비율은 50% 정도이므로(Scott and Lopez, 2014) 많은 어업폐기물의 발생을 야기시켜 이는 서식처의 질을 저하시킬 수 있다. 따라서 선망어업의 FAD 조업에 대한 생태계 차원에서의 전반적인 관리가 필요할 것을 보인다.

**결론**

본 연구에서는 어업의 영향을 받는 대상종의 자원상태, 대상생태계내 서식종의 상태, 서식처 상태 및 사회경제적 효과까지 고려된 통합 생태계기반 자원평가 모델에 원양다랑어어업을 적용하였다. 이를 통해 본 연구의 결과를 어획이나 노력 제한과 같은 기존의 전통적인 자원관리방안에서 탈피하여 보다 효과적이고 효율적인 관리방안을 제시할 수 있는 기초연구로 사용하고자 한다. 평가 결과 선망어업은 눈다랑어와 황다랑어의 소형어 어획비율이 높아 지속가능성 목표에서 높은 위험도를 나타냈다.

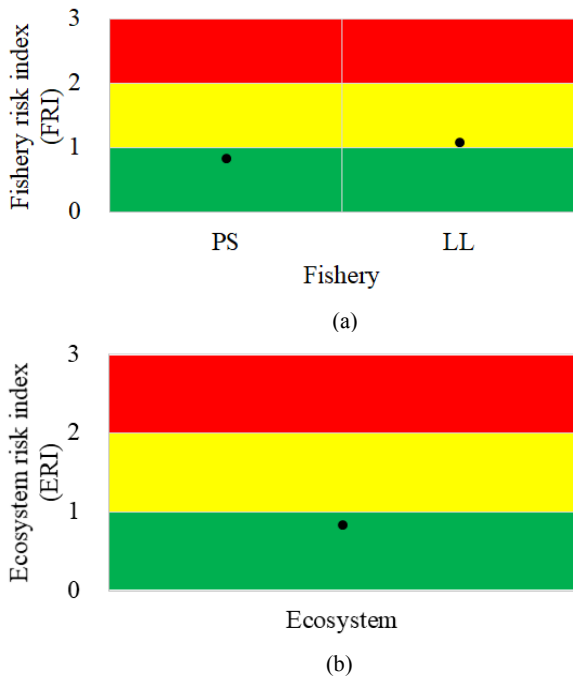
또한 선망어업의 특성상 FAD 조업으로 인한 혼획률, 폐기물 및 어업폐기물이 TRP보다 높아 생물다양성 및 서식처의 질에 대한 위험도도 높은 것으로 평가되었다. 다만, 가다랑어의 어획량이 높아 사회경제적 편익에서는 매우 양호하게 평가되었다. 연승어업은 혼획률이 높아 생물다양성의 위험도가 다소 높게 평가되었으나, 지속가능성 및 서식처의 질에서는 매우 양호한 상태를 나타냈다. 그러나 눈다랑어 및 황다랑어의 어획 및 노력량 제한, 조업비용 상승 등으로 사회경제적 편익의 위험도는 매우 높게 평가 되었다. 두 어업에 대한 대상생태계의 위험도는 다소 양호한 상태로 평가 되었으나, 향후 선망어업의 FAD조업에 대한 생태계 차원에서의 전반적인 관리가 필요할 것을 보인다.

**사사**

본 연구는 2020년도 국립수산과학원 수산과학연구소 사업(R2020023)의 일환으로 수행되었습니다.

**References**

Anonymous. 2015. Report of the 2015 ISSF Stock Assessment



**Fig. 11. Estimated (a) fishery risk index(FRI) of purse seine fishery (PS) and longline fishery (LL) and (b) ecosystem risk index (ERI) of the target ecosystem.**

- Workshop: Characterizing uncertainty in stock assessment and management advice. ISSF Technical Report 2015-06. IOTC-2-15-WPTT17-INF02, 32.
- Abascal F, Lawson T and Williams P. 2020. Analysis of tropical purse seine length data for skipjack, bigeye and yellowfin tunas. WCPFC-SC10-2014/SA-IP-05, 25.
- Ashida H, Tanabe T and Satoh K. 2010. Reproductive biology of male skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* (Linnaeus) in the tropical western and central Pacific Ocean. Fish Sci 76, 785-793. <https://doi.org/10.1007/s12562-010-0282-y>.
- de Bruyn P, Murua H and Aranda M. 2013. The Precautionary approach to fisheries management: How this is taken into account by Tuna regional fisheries management organizations (RFMOs). Marine Policy 38, 397-406.
- Chan V, Clarke R and Squires D. 2014. Full retention in tuna fisheries: Benefits, costs and unintended consequences. Marine Policy, 45, 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.10.016>.
- Cheung W, Lam V, Sarmiento J, Kearney K, Watson R and Pauly D. 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. Fish Fish 10, 235-251.
- Cheung W, Lam V, Sarmiento J, Kearney K, Watson R, Zeller D and Pauly D. 2010. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. Glob. Change Biol 16, 24-35.
- Cho HJ, Kim DN, Kim DH, Lee SI, Kwon Y and Ku JE. 2017. Estimating the productive efficient of distant-water longline vessels in Pacific Ocean using a Stochastic Frontier Approach. J Korean Soc Fish Technol 53, 357-362.
- Coulter A, Cashion T, Cisneros-Montemayor A, Popov S, Tsui G, Manach F, Schiller L, Palomares M, Zeller D and Pauly D. 2020. Using harmonized historical catch data to infer the expansion of global tuna fisheries. Fisheries Research 221. 105379. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.105379>.
- Ducharme-Barth N, Vincent M, Hampton J, Hamer P, Williams P and Pilling G. 2020. Stock assessment of bigeye tuna in the western and central Pacific Ocean. WCPFC-SC16-2020/SA-WP-03 (Rev.01), 144.
- FAO. 2013. Bycatch and non-tuna catch in the tropical tuna purse seine fisheries of the world. FAO Fisheries and aquaculture technical paper 568, 262.
- FAO. 2020. FAO Yearbook of fishery and aquaculture statistics 2018. 110. <https://doi.org/10.4060/cb1213t>.
- Gilman E, Suuronen P and Chaloupka. 2017. Discards in global tuna fisheries. Mar Ecol Prog Ser 582, 231-252. <https://doi.org/10.3354/meps12340>.
- Griffiths S, Allain V, Hoyle S, Lawson T and Nicol S. 2018. Just a FAD? Ecosystem impacts of tuna purse-seine fishing associated with fish aggregating devices in the western Pacific Warm Pool Province. Fish Ocean, 28, 94-112. <https://doi.org/10.1111/fog.12389>.
- Harley S, Maunder M and Deriso R. 2005. Assessment of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Pacific Ocean. ICCAT 57, 218-241.
- Harley S and Suter JM. 2007. The potential use of time-area closures to reduce catches of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the purse-seine fishery of the eastern Pacific Ocean. Fish Bul 105, 49.
- Kang HJ. 2018. A study on the ecosystem-based spatio-temporal assessment and forecasting. Ph.D. Pukyong National University. 70.
- Kim DH and Zhang CI. 2011. Developing socioeconomic indicators for an ecosystem-based fisheries management approach: An application to the Korean large purse seine fishery. Fish Res 112, 134-139.
- Kim H. 2020. A study on the spatio-temporal IFRAME approach for fisheries assessment and forecasting. Ph.D. Pukyong National University. 133.
- Majkowski J. 2007. Global Fishery Resources of Tuna and Tuna-like Species. FAO Fisheries Technical Paper 483, 54.
- Maunder MN and Harley SJ. 2002. Status of bigeye tuna in the eastern Pacific Ocean in 2001 and outlook for 2002. In Stock assessment report 3: status of the tuna and billfish stocks in 2001. IATTC, 201-311.
- Maury O, Miller K, Campling L, Arrizabalaga H, Aumont O, Bodin T and Murtugudde R. 2013. A global science-policy partnership for progress toward sustainability of oceanic ecosystems and fisheries. Current Opinion in Environmental Sustainability 5, 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.008>.
- McKechnie S. 2014. Analysis of longline size frequency data for bigeye and yellowfin tunas in the WCPO. WCPFC-SC10-2014/SA-IP-04, 14.

- Meltzer E. 2009. The quest for sustainable international fisheries: Regional efforts to implement the 1995 United Nations Fish Stock Agreement: An Overview for the May 2006 Review Conference. Ottawa: NRC Research Press.
- Miyake M, Miyabe N and Nakano H. 2004. Historical trends of tuna catches in the world. FAO Fisheries technical paper. No. 467, 74.
- Mooney-Seus M and Rosenberg A. 2007. Best practices for high seas fisheries management: Lessons learned. London: Chatham House. 8.
- Juan-Jordá M, Murua H, Arrizabalaga H, Dulvy N and Restrepo V. 2016. Report card on ecosystem-based fisheries management in tuna regional fisheries management organizations. *Fish and Fisheries* 19, 321-339.
- O'Connor S., Ono R., Clarkson C. 2011. Pelagic fishing at 42,000 years before the present and the maritime skills of modern humans. *Science* 334, 1117-1121.
- OECD. 2020. "Average wages" (indicator). <https://doi.org/10.1787/cc3e1387-en> (accessed on 08 November 2020)
- OECD. 2019. OECD Employment Outlook 2019: The Future of Work. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9ee00155-en>.
- Oh C, Kim S and Na J. 2009. Variations in Species Composition, Biomass, and Density in Shrimp Trawl Bycatch Across Seasons and Tidal Phases in Southern Korean Waters: Developing a Fisheries Risk Management Approach. *Fish Aqua Sci* 12, 138-151.
- Park HW, Zhang CI, Kwon YJ, Seo YI, and Oh TY. 2013. A study on the risk scoring and risk index for the ecosystem-based fisheries assessment. *J Kor Soc Fish Tech* 49, 469-482.
- Peatman T, Barth D and Vincent M. 2020. Analysis of purse seine and longline size frequency data for bigeye and yellowfin tuna in the WCPO. WCPFC-SC16-2020/SA-IP-18, 57.
- Richardson K, Hardesty B and Wilcox C. 2019. Estimates of fishing gear loss rates at a global scale: A literature review and meta-analysis. *Fish and Fisheries* 20, 1218-1231.
- Pilling G, Harley S, Nicol S, Williams P and Hampton J. 2015. Can the tropical Western and Central Pacific tuna purse seine fishery contribute to Pacific Island population food security? *Food Security*, 7, 67-81. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0407-8>.
- Pritzker P, Sullivan K and Callender R. 2015. 2015 NOAA Marine Debris Program Report Impact of "Ghost Fishing" via Derelict Fishing Gear. Silver Spring MD, 25.
- Sala E, Mayorga J, Costello C, Kroodsmas D, Palomares M, Pauly D, Sumaila U and Zeller D. 2018. The economics of fishing the high seas. *Sci Adv* 4, eaat2504. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat2504>.
- Scott G and Lopez J. 2014. THE USE OF FADS IN TUNA FISHERIES. Policy Department B: Structural and Cohesion Policies, 70.
- Seo YI. 2011. Ecosystem-based stock assessment and fisheries management in the southern sea of Korea. Ph.D. Pukyong National University, 198.
- Shannon CE and Wiener W. 1963. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press Urbana, 125.
- Sun C, Wang W and Yeh S. 2005. Reproductive biology of yellowfin tuna in the central and western Pacific Ocean. WCPFC-SC1, BI WP-1, 15.
- Tickler D, Meeuwig J, Bryant K, David F, Forrest J, Gordon E, Larsen J, Oh B, Pauly D, Sumaila U and Zeller D. 2018a. Modern slavery and the race to fish. *Nat Commun* 9, 4643.
- Tickler D, Meeuwig J, Palomares M, Pauly D and Zeller D. 2018b. Far from home: distance patterns of global fishing fleets. *Sci. Adv.* 4, eaar3279. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07118-9>.
- Vincent M, Pilling G and Hampton J. 2019. Stock assessment of skipjack tuna in the western and central Pacific Ocean. WCPFC-SC15-2019/SA-WP-05-Rev2, 148.
- Vincent M, Ducharme-Barth N, Hamer P, Hampton J, Williams P and Pilling G. 2020. Stock assessment of yellowfin tuna in the western and central Pacific Ocean. WCPFC-SC16-2020/SA-WP-04(Rev.01), 151.
- WCPFC (Western and Central Pacific Fisheries Commission). 2019, WCPFC tuna fishery yearbook – Annual catch estimates. WCPFC, 155.
- Zhang CI, Kim S, Gunderson D, Marasco R, Lee JB, Park HW and Lee JH. 2009. An ecosystem-based fisheries assessment approach for Korean fisheries. *Fish Res* 100, 26-41.
- Zhang CI, Park HW, Lim JH, Kwon HC and Kim DH. 2010.



A study on indicators and reference points for the ecosystem-based resource assessment. J Kor Soc Fish Tech 46, 32-49.

Journal of Fish Aqu Sci 11, 149-156. <https://doi.org/10.4194/trjfas.2011.0119>.

---

Zhu G, Dai X, Song L and Xu L. 2011. Size at Sexual Maturity of Bigeye Tuna *Thunnus obesus* (Perciformes: Scombridae) in the Tropical Waters: a Comparative Analysis. Turkish

2020. 10. 13 Received

2020. 11. 10 Revised

2020. 11. 20 Accepted