

BSS 모형을 이용한 참조기 최적 어획량 및 어획노력량 추정

남종오 · 이무희*

국립부경대학교(교수) · *국립부경대학교(학생)

Estimation of Optimal Catch and Fishing Effort for the Yellow Croaker Using the BSS Model

Jong-Oh NAM · Mu-Hui LEE*

Pukyong National University(professor) · *Pukyong National University(student)

Abstract

This study evaluates the optimal catch levels for yellow croaker in Korean inshore and offshore fisheries by applying the Bayesian State-Space Model (BSS) with the Hamiltonian approach, incorporating biological and economic factors. The analysis reveals that the Maximum Sustainable Yield (MSY) is approximately 38,355 tons, while the Maximum Economic Yield (MEY) is around 37,020 tons. The difference between these two figures indicates that current fisheries management strategies might be misaligned, potentially emphasizing biological conservation at the expense of economic efficiency. This study highlights the need to integrate economic considerations into fisheries management policies to achieve a more balanced and sustainable approach. Furthermore, the study notes that environmental change and illegal fishing pose significant threats to the sustainable use of the yellow croaker resource. These findings suggest that the adjustment of our fisheries management policies should take into account not only the biological objective of sustainable use, but also economic objectives, so as to ensure efficient use of fishery resources and long-term sustainability of local communities.

Key words : Fisheries management, Bioeconomic, Yellow croaker, Bayesian state-space model, Hamiltonian method

I. 서론

참조기는 농어목(*Perciformes*) 민어과(*Sciaenidae*)에 속하는 어종으로, 한국 서남해안 해역에 주로 서식하는 연안 회유성 어종이다(Kang et al., 2006). 이 어종은 한국뿐만 아니라 일본 서부와 동중국해 등 아시아의 다양한 해역에 널리 분포하고 있으며(Kim et al., 2005), 한국 연근해어업에서 경제적으로 중요한 어종으로 자리 잡고 있다. 특히 참조기는 서남해 지역의 대표 어종으로 근해안강망어업, 근해자망어업, 대형트롤어업, 서

남해구외끌이중형저인망어업, 쌍끌이대형저인망어업, 연안개량안강망어업, 연안자망어업, 외끌이대형저인망어업에 의해 주로 어획된다.

2023년 기준 최근 5년간의 데이터를 보면, 참조기는 전남지역 연근해어업 생산금액의 11.73%를 차지하며, 이는 낙지류(12.01%)에 이어 두 번째로 높은 비중이다(KOSIS, 2024). 제주지역 참조기의 생산금액 비중은 13.39%로, 갈치(60.06%) 다음으로 높은 수준을 기록하고 있다(KOSIS, 2024). 이러한 통계는 참조기가 국민 식생활뿐만 아니라 어업인들의 소득에서도 중요한 역할을 담당하고

* Corresponding author : 051-629-5310 takere10@gmail.com

* 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음

있음을 보여준다.

그러나 참조기의 경제적 중요성에도 불구하고, 과도한 어선 세력으로 인한 남획문제는 자원관리의 어려움을 더욱 가중시키고 있다. 특히 1990년대 중반 이후 참조기의 어획량은 급격히 줄어들었는데, 이는 어업인의 과도한 어획, 그리고 중국 어선의 무분별한 불법 조업 등에 기인한 것으로 보인다(NIFS, 2011).

참조기는 산란기에 겨울철 제주도 서남부에서 월동한 후, 봄에 수온 상승에 따라 북상하여 서해 연안에서 산란을 하고 다시 남하하는 회유 특성을 가지고 있다(Kang et al., 2020). 일례로 2000년대 중반에는 수온 상승으로 인해 산란 및 서식 조건이 개선되어 가입자원이 증가하고 불법어업 단속 강화로 자원이 일시적으로 회복되었다(NIFS, 2011). 그러나 최근들어 어획량이 다시 감소하는 양상을 보이고 있다. 2023년 참조기의 어획량은 전년 대비 약 8% 감소하였으며, 2020년 대비 약 63% 급감하는 등 자원관리에 다시 관심을 가져야 하는 상황에 이르렀다. 이러한 이유는 고유가로 인한 조업 활동의 위축과 기후 이상으로 인한 수온 변화, 그리고 여전히 과도한 어획 노력 수준에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 2022년 기준 최근 5년 평균 대비 자원 밀도가 절반 이하로 떨어지면서, 생산량 감소에 크게 영향을 미친 것으로 보인다(MOF, 2022). 이를 해결하기 위해 정부는 과도한 어선세력 조정과 남획 방지를 위한 어선 감척 정책, 참조기 금지체장 및 금어기 설정, 그리고 총허용어획량(TAC) 제도 도입을 추진하였으며, 광역형 산란·서식장 조성 및 사후관리 강화 등을 통해 어장환경을 복원하려는 노력을 기울이고 있다.

하지만 현재의 어업관리 정책은 자원 고갈과 과잉 어업을 방지하는 데 중점을 두고 있어, 경제적 효과를 충분히 고려하지 못하는 한계가 있다. 이처럼 최대지속적어획량(MSY, Maximum Sustainable Yield)을 유지하는 것은 지속 가능한 자원 이용 및 자원 보호에는 중요한 역할을 할

수 있지만, 어업인의 경제적 또는 사회적 효율성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 특히 개별 어종에 대해 시장 가치를 고려한 효과적 자원 관리 조치가 이루어지지 않는다면 더더욱 그 효과는 반감되어질 수 있다.

이러한 배경에서 참조기의 최대경제적어획량(MEY, Maximum Economic Yield)을 추정하는 것은 어업인의 경제적 가치와 이익을 극대화하는데 있어 중요한 기준이 될 수 있다.

따라서 본 연구는 참조기 자원의 어업정책 결정 시 경제적 지속 가능성을 보장하고, 어업관리의 효율성을 제고하며, 어업인의 장기적 경영 안정을 도모하는 데 있어 어느 정도 기여할 것으로 판단된다.

본 연구는 BSS 모형을 활용해 참조기 자원의 생물학적 자원량을 분석하고, 해밀토니안 기법을 적용하여 경제적 변수를 통합적으로 고려한 후 참조기 자원의 경제적 가치와 이익을 극대화하는 최적 이용 수준과 함께 그 결과의 함의를 제시한다.

II. 연구 방법

1. 자료 변환 : 어획노력량의 표준화

본 연구에서는 참조기를 어획하는 8개 연근해 어업 업종의 어획노력량을 표준화하기 위해 Gavaris(1980)의 일반선형모형(GLM)을 적용하였다. 이 모형은 업종별 및 연도별 어획노력량의 차이를 조정함으로써, 단위 노력당 어획량(CPUE, Catch Per Unit Effort)을 표준화한다. 식 (1)에서 나타낸 CPUE는 기준연도, 어법, 수심 등 다양한 요인변수의 영향을 반영한 모형이다. 여기서 종속변수 CPUE는 단위 노력당 어획량을 나타내며, 기준 CPUE_r는 특정 요인변수에 대한 기준값으로 설정된다(Quinn and Deriso, 1999).

$$CPUE = CPUE_r \prod_i \prod_j P_{ij}^{X_{ij}} e^{\epsilon} \dots \dots \dots (1)$$

각 요인변수 i 와 해당 수준 j 에서의 상대적 어획 능력은 P_{ij} 로 표현되며, 기준 수준에 대해서는 1로 설정된다. 더미변수 X_{ij} 는 요인변수와 수준이 일치하지 않을 경우는 0, 일치할 경우는 1의 값을 갖는다(Quinn and Deriso, 1999).

로그 변환된 식 (2)에서는 종속변수의 로그값이 기준 로그 CPUE와 로그화된 어획능력 계수, 그리고 정규분포를 따르는 오차항 ε 의 합으로 표현된다. 이는 요인변수들 사이의 복합적 효과를 고려하여 CPUE를 추정하는 데 사용된다(Quinn and Deriso, 1999).

$$\ln \widehat{CPUE} = \ln CPUE_r + \sum_i \sum_j X_{ij} \ln P_{ij} + \varepsilon \quad \dots\dots (2)$$

식 (3)은 식 (2)를 기반으로 하여 어획량 데이터에 대한 선형회귀 모형을 나타낼 수 있으며, 여기서 Y 는 어획량에 대한 반응변수이며, β_0 은 절편, β_k 는 각 요인변수의 회귀계수, X_k 는 해당 요인변수를 나타내며, ε 은 오차항을 의미한다(Quinn and Deriso, 1999).

$$Y = \beta_0 + \sum_k \beta_k X_k + \varepsilon, \text{ where } k = i \cup j \quad \dots\dots\dots (3)$$

2. 적용 모형

1) 베이지안 상태공간 모형

어획량 및 CPUE 자료로부터 베이지안 상태공간 모형(BSS, Bayesian State-Space Model)을 활용하여 자원량과 최대지속적어획량을 추정한다. BSS 모형은 관측된 자료와 매개변수에 대해 확률모형을 적용하며, 사전 정보와 관측된 데이터를 결합하여 사후분포를 추정하고, 이를 기반으로 추론을 실시한다(Cho, 2024; Froese et al., 2017).

BSS 모형의 중요한 이점 중 하나는 사전적 분포를 활용하여 분석할 수 있다는 점이다. 이를 통해 상대적으로 짧은 기간의 데이터를 사용하거

나 일부 연도의 CPUE 시계열 자료가 누락된 경우에도 분석할 수 있고, 데이터의 불완전성에도 불구하고 더 정확한 추정을 할 수 있다(Cho, 2024; Froese et al., 2017).

본 연구에서는 참조기의 어획량, CPUE, 그리고 본원적 성장률에 대한 사전 정보를 바탕으로 자원량을 추정한다. 특히, Schaefer 모형의 기본 가정인 로지스틱 성장함수를 적용하여 시간에 따른 자원량(B_t), 본원적 성장률(r), 환경수용능력(k), 어획량(Y_t)을 기반으로 다음 시기의 자원량을 추정하였다(Cho, 2024; Froese et al., 2017).

$$B_{t+1} = B_t + r(1 - \frac{B_t}{k})B_t - Y_t \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 B_t 는 t 년도의 자원량, r 은 본원적 성장률, k 는 환경수용능력, C_t 는 t 년도의 어획량을 의미한다. 만일 자원량이 환경수용능력 대비 25% 이하로 감소할 때 자원 고갈 상태로 판단하여, 이를 고려한 접근방법이 필요한 데 식 (5)는 그 방법을 나타낸다.

$$B_{t+1} = B_t + 4 \frac{B_t}{k} r(1 - \frac{B_t}{k})B_t - C_t < 0.25 \quad \dots\dots\dots (5)$$

BSS 모형은 수산자원의 어획량 자료와 해당 자원의 복원력을 기준으로 본원적 성장률, 환경수용능력, 그리고 최대지속적어획량(MSY)을 평가하는 데 매우 유용한 도구이다. 본원적 성장률과 환경수용능력을 평가할 때는 Markov Chain Monte Carlo(MCMC) 기법을 사용하여 실행 가능한 ‘ r - k ’ 값의 범위를 설정한다. 이 범위는 분석 결과로 도출된 자원량 값이 관측된 생산량 자료와 사전에 추정된 자원량 범위와 일치하는지를 확인하기 위한 것이다(Cho, 2024; Froese et al., 2017).

또한, 본원적 성장률에 대한 사전 정보와 그 범위 설정을 위해 FishBase(www.fishbase.org) 데이

터베이스를 활용할 수 있다. 자원의 복원력은 본원적 성장률 범위에 따라 4가지 등급으로 구분되며, 이를 통해 자원의 회복 가능성을 보다 정밀하게 평가할 수 있다(Cho, 2024).

<Table 1> Prior ranges for parameter r, based on classification of resilience

Resilience	Prior r-range
High	0.6 ~ 1.5
Medium	0.2 ~ 0.8
Low	0.05 ~ 0.5
Very low	0.015 ~ 0.1

수산자원관리에서 환경수용능력(k)에 대한 사전적 범위 설정은 어획량 데이터와 본원적 성장률을 고려하여 결정된다. 이 과정에서 MSY_{prior} 이 사용되며, 이는 MSY의 사전 추정치로서 기능한다. 어획량 데이터가 안정적이거나 지난 5년간 최대치를 기록했다면, 가장 높은 어획량의 상위 3개년도 평균을 MSY의 사전 추정치로 설정한다. 반면, 최대 생산 이후 감소 추세를 보이는 경우, 가장 높은 어획량 상위 5개년도 평균의 75%를 MSY 사전 추정치로 채택한다(Cho, 2024).

<Table 2> Prior range of MSY

Catch	Prior range for MSY
Maintenance	• The average of the highest three catches (standard deviation is less than 10% of the average, and the lowest catch is at least 66% of the highest catch)
Increase	
Decrease	• 75% of the average of the top five highest catch

Source: Cho, 2024.

MSY_{prior} 는 MSY를 도출하는 데 있어 필수적인 사전 범위로 활용되며, 이는 $MSY=rk/4$ 를 이용하여 환경수용능력과 본원적 성장률 사이의 관계를 설정함으로써 환경수용능력에 대한 사전 범위

k_{prior} 를 추정할 수 있다. 구체적으로, 환경수용능력의 하한은 관찰된 최대 생산량보다 커야 하며, 상한은 관찰된 최대 생산량의 10배에서 100배 이상이 되어야 한다(Cho, 2024; Froese et al., 2017).

$$k_{prior} = \frac{4 \times MSY_{prior}}{r_{prior}} \dots\dots\dots (6)$$

$$k_{low} > MAX(Y); \dots\dots\dots (7)$$

$$k_{high} > (10 \sim 100) \times MAY(Y)$$

자원량의 사전 정보는 자원량을 환경수용능력으로 나눈 B/k 비율을 사용하여 나타나며, 이 사전 정보는 자료의 시작 연도, 중간 연도, 마지막 연도 3가지 시점에 대해 설정된다. 사전 자료가 불충분할 경우 Froese et al.(2017)이 제안한 기본 규칙(Default rule)을 활용하여 분석 자료의 기간과 어획량을 기반으로 자원량의 사전 범위를 설정한다. 이는 <Table 3>와 같다.

<Table 3> Default prior biomass ranges relative to k

Prior biomass	B/k
High	0.5 ~ 0.4
Medium	0.2 ~ 0.6
Low	0.5 ~ 0.9

이러한 r과 k는 자원의 회복력과 지속가능성을 평가하는데 매우 중요한 역할을 하며, 실행가능한 'r-k'쌍을 시뮬레이션하여 어획량과 자원의 회복 가능성을 평가할 수 있다. 실행 가능한 'r-k'쌍을 추정하는 과정을 보다 구체적으로 살펴보면, 먼저 사전 범위 내에서 임의의 'r-k' 쌍이 우선적으로 선택된다(Cho, 2024). 이때 사전 자원량의 범위로부터 분석 기간의 첫 번째 연도에 해당하는 자원량이 선택되고, 그다음 연도의 자원량을 계산하기 위해 식 (4) 또는 식 (5)를 사용한다 (Kim, 2023).

CPUE는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며, Schaefer 모형에 기반한 어획생산함수식을 통해 도출할 수 있다. 함수에 따라 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CPUE_{t+1} = CPUE_t + r(1 - \frac{CPUE_t}{qk})CPUE_t - qY_t \dots (8)$$

BSS 모형에 대한 이론은 베이지안 추론을 바탕으로 수산자원에 대한 평가를 수행하는 것을 의미한다. 베이지안 추론이란 관측된 자료와 매개변수 모두에 확률적 접근방식을 적용하며 관측된 자료 및 사전 정보를 결합한 사후 분포를 추정함으로써 통계적 추론을 하는 방법을 의미한다 (Meyer and Millar, 1999). 여기서 사후 분포의 추정 대상은 r, k, q 등 다양한 매개변수들이 해당하므로, 사후 분포 추정에는 다차원적인 적분 계산이 요구된다. 그러나 다차원적 적분 계산을 수행하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 이를 통계적으로 분석하는 MCMC 분석을 이용한다 (Millar and Meyer, 1999). 이때, 다차원의 결합확률분포에서의 랜덤 샘플을 생성하는 것은 복잡한 과정을 수반하기 때문에, 변수들의 조건부확률분포로부터 연속적으로 샘플을 추출하는 방법인 깁스샘플링(Gibbs sampling)을 이용한다(Millar and Meyer, 1999). 본 연구에서는 BSS 모형을 통한 자원평가 분석을 수행하기 위해 베이지안 통계 및 머신러닝에서 많이 활용되는 JAGS(Just Another Gibbs Sampler)를 이용하였다(Cho, 2024).

2) 해밀토니안

본 연구에서는 수산자원의 시간적 변화와 이에 따른 어업 생산량을 모델링하기 위해 Clark and Munro(1975)가 제시한 동태적 최적화 모형을 적용하였다. 이 모형은 수산자원을 어업 자본으로 간주하고, 시간이 지남에 따라 발생하는 어업활동의 사회적 이익을 최대화하는 방법이다. 우선, 어업활동의 순현재가치(NPV, Net Present Value)

를 최대화하는 목적함수는 식 (9)와 같이 설정할 수 있다(Conrad, 1999; Nam et al., 2015).

Maximize

$$NPV = \int_0^{\infty} [pY(t) - cF(t)]e^{-\delta t} dt \dots (9)$$

$$= \int_0^{\infty} [pqF(t)B(t) - cF(t)]e^{-\delta t} dt$$

Y(t)는 시점 t에서의 어획량, F(t)는 시점 t에서의 어획노력량, p는 단위 어획량당 가격, c는 단위 어획노력당 비용, δ는 사회적 할인율을 나타낸다. 또한, 이 목적함수는 식 (10)과 같은 제약 조건에서 최적화된다(Conrad, 1999; Nam et al., 2015).

Subject to

$$\frac{dB}{dt} = \dot{B}, B(0) = B_0, B(t) \geq 0; \dots (10)$$

$$B_t \geq 0, Y(t)_{\max} \geq Y(t) \geq 0$$

이 모형의 해를 도출하기 위해 사용하는 현재 가치 해밀토니안(Y_c)의 함수식은 식 (11)과 같다.

$$Y_c = [pqF(t)B(t) - cF(t)] + \lambda[F(B(t)) - qF(t)B(t)] \dots (11)$$

여기서 λ는 그림자 가격(Shadow price)으로, 미래의 가치를 현재가치로 환산한 값이다(Nam et al., 2015). 해밀토니안 접근법을 통해 어획노력량과 수산자원량에 대한 최적화 조건을 식 (12)와 식 (13)과 같이 구할 수 있다(Conrad, 1999; Nam et al., 2015).

- 상태효율조건(SEC, Static Efficiency Condition)

$$\frac{\partial Y_c}{\partial F} = pqB - c - \lambda qB = 0, p - \frac{c}{qB} = \lambda \dots (12)$$

- 동태효율조건(DEC, Dynamic Efficiency Condition)

$$\frac{\partial Y}{\partial B} = pqF + \lambda G'(B) - \lambda qF = -\dot{\lambda} + \delta\lambda \dots\dots\dots (13)$$

다음으로 상태효율조건을 변수 t에 대해 편미분하면, 이는 식 (14)와 같다.

$$\dot{\lambda} = \frac{c}{qB^2} \dot{x} = \frac{c}{qB^2} [G(B - qFB)] \dots\dots\dots (14)$$

수산자원의 한계성장률과 한계자원효과의 합이 사회적 할인율과 일치할 때 수산자원의 최적 수준이 달성되며, 이를 황금률(Golden rules)이라고 한다. 식 (12), 식 (13), 식 (14)를 기반으로 최적 자원량을 추정하기 위해 적용되어야 할 황금률을 유도할 수 있으며, 이는 식 (15)와 같다(Nam et al, 2015).

$$G'(B^*) + G(B^*) \frac{c}{B^*(pqB^* - c)} = \delta \dots\dots\dots (15)$$

식 (15)에서 $G'(B^*)$ 는 해당 어종의 자원량 B^* 에서의 한계성장률을 나타내고, $G(B^*) \frac{c}{B^*(pqB^* - c)}$ 은 한계자원효과를 의미한다. 황금률을 이용하여 자원의 최적 수준을 계산하고, 이를 통해 수산자원의 지속 가능한 이용을 도모할 수 있다. 또한, 최적자원량과 최적어획노력량은 황금률을 통해 도출할 수 있다.

$$B^* = \frac{k}{4} \left[\left(\frac{c}{pqk} + 1 - \frac{\delta}{r} \right) + \sqrt{\left(\frac{c}{pqk} + 1 - \frac{\delta}{r} \right)^2 + \frac{8c\delta}{pqkr}} \right] \dots (16)$$

$$F^* = \frac{r}{q} \left[\frac{3}{4} - \frac{1}{4} \left(\frac{c}{pqk} - \frac{\delta}{r} \right) + \sqrt{\left(\frac{c}{pqk} - \frac{\delta}{r} \right)^2 + \frac{8c\delta}{pqkr}} \right] \dots (17)$$

최적자원량이 결정된 후에는, 자원의 균형상태($\dot{x} = G(B^*) - Y^* = 0$)로부터 자원의 최적어획량을 추정할 수 있다.

$$Y^* = qF^* B^* \dots\dots\dots (18)$$

Ⅲ. 연구 결과

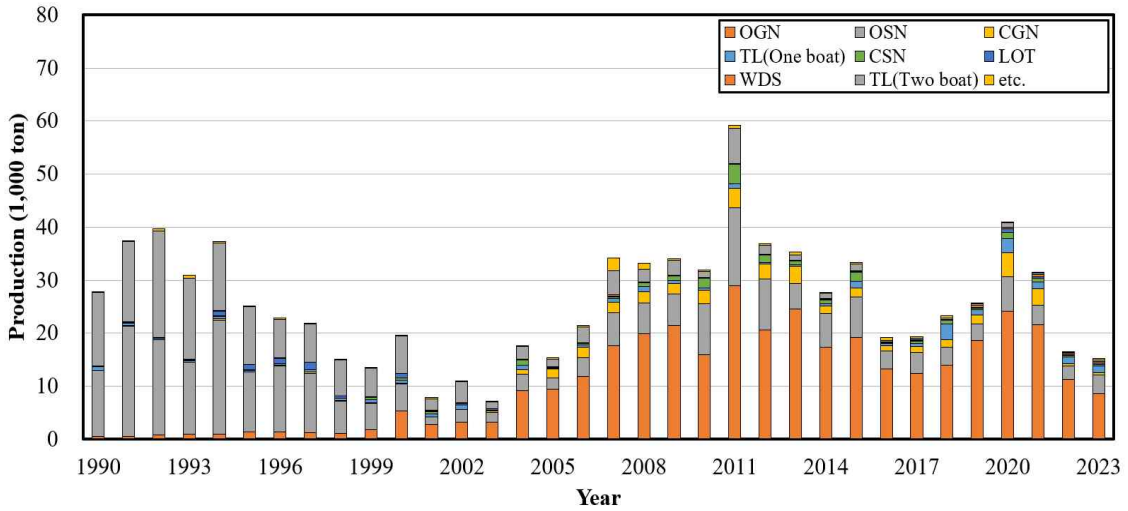
1. 자료 분석

본 연구는 1990년부터 2022년까지 참조기를 어획하는 상위 8개 업종을 분석한다. 해당 업종은 「수산업법」 제40조(허가어업)제1항과 제2항 그리고 동법 시행령 제21조(근해어업의 종류)제1항과 제22조(연안어업의 종류)제1항에 의해 규정된 연근해어업 중 근해안강망어업(OSN), 근해자망어업(OGN), 대형트롤어업(LOT), 서남해구외끌이중형저인망어업(WDS), 쌍끌이대형저인망어업(TL_Tow boat), 연안개량안강망어업(CSN), 연안자망어업(CGN), 외끌이대형저인망어업(TL_One boat)이 포함된다. 본 연구의 분석 자료는 통계청 국가통계포털의 어업생산동향조사와 등록어선통계를 이용하였다.

참조기를 어획하는 분석대상 8개 업종의 최근 5년간의 평균 어획량은 약 25,801ton으로, 전체 연근해어업의 참조기 어획량 25,972ton의 약 99.34%를 차지하는 것으로 확인되었다. 업종별 참조기 어획 비중을 살펴보면, 2023년 기준 최근 5년간 근해자망어업이 약 64.88%, 근해안강망어업이 14.84%, 연안자망어업이 약 7.96%를 차지하는 것으로 분석되었다.

[Fig. 1]에서 볼 수 있듯 참조기 어획량 추이를 살펴보면, 어획량은 1990년대 중반부터 점차 감소하는 추세를 보였으나, 2010년대 초부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 특히, 2010년에는 59,226ton이라는 높은 어획량을 기록하였으며, 이는 주로 근해자망어업의 어획량 증가에 기인한 것으로 나타났다.

근해자망어업의 경우, 1990년 599ton에서 2010년 24,134ton으로 증가하였고, 이후 변동을 보이며 2023년에는 8,593ton을 기록하였다. 이러한 증



[Fig. 1] Trends in yellow croaker catches by gear from 1990 to 2023.

가는 어구 기술의 발전과 해양환경의 변화 등이 주요 원인인 것으로 판단된다. 반면, 연안개량안강망어업, 서남해구외끌이중형저인망어업, 쌍끌이대형저인망어업은 어획량 감소 추세를 보여, 이는 미성어의 과도한 어획, 어업 규제 및 불법 단속의 한계, 해양환경의 변화 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 보여진다.

2. 어획노력량의 표준화

본 연구에서는 Gavaris의 일반선형모형 분석을 위해 1990년부터 2022년까지의 33개 연도와 8개 연근해어업 업종자료를 활용하였다. 분석에서 사용된 연도 변수와 업종 변수는 요인변수로 지정하였으며, 1990년의 CPUE 데이터를 기준으로 삼았다. 또한, 연도별 더미변수와 업종별 더미변수를 활용하여 서로 상이한 어구 및 어법을 사용하는 8개의 다른 업종의 어획노력량을 동일한 단위로 표준화하였다.

분석 결과, F-통계량은 23.68, 모형이 통계적으로 유의미함을 나타냈으며, 결정계수(R^2)는 0.84로 모형이 데이터의 약 84%를 설명하고, 조정된 결정계수(Adjusted R^2)는 0.77로, 많은 설명변수를

사용함으로써 발생하는 결정계수의 상승치를 조절하였음에도 여전히 높은 설명력을 보여주고 있다.

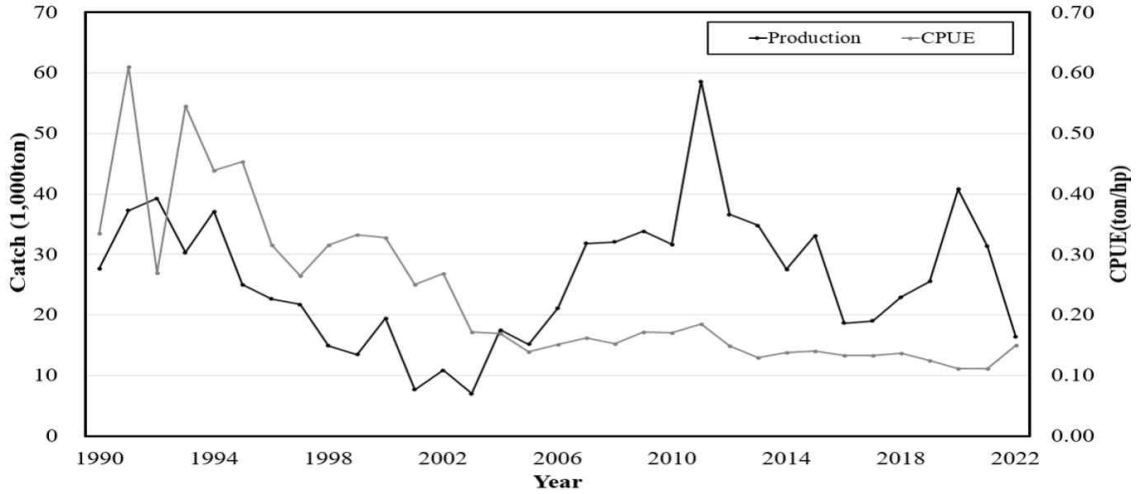
또한, 표준화를 위해 적용된 40개의 변수 중 t-통계량의 p-value가 0.1보다 작은, 즉 10% 이내에서 통계적으로 유의한 변수는 37개로 나타났다.

<Table 4> Result of Gavaris GLM

Model	$\frac{R^2}{(R^2)}$	F-stat. (Prob.)	Statistically Significant Variables (Prob. < 0.10)
Gavaris	0.8048	7.0333	37
GLM	(0.7708)	(0.0000)	

Note: * denotes a 10% significance level, ** denotes a 5% significance level, *** denotes a 1% significance level..

어획노력량은 1990년부터 증가하여 1992년에는 145,598hp까지 증가하였으나 이후 감소하여 2001년에는 30,692hp까지 급감하였다. 그러나 2007년 이후부터는 100,000hp 이상을 유지하였고, 2011년에 들어서는 315,784hp까지 급증하기도 하였다. 2011년 이후 잠시 주춤했던 어획노력량은 2016년부터 다시 증가하여 2020년에는 367,916hp로 최고점을 기록하기도 하였다.



[Fig. 2] Trends in yellow croaker production and standardized CPUE from 1990 to 2022.

그러나 최근 어획량이 감소하면서 2022년 기준 109,128hp 수준을 나타내고 있다. 이러한 어획노력량의 극심한 변동은 어업관리 정책의 변화, 어선기술의 발전, 해양환경의 변화, 참조기 자원량의 변화 등 여러 요인의 복합적 작용 결과로 해석될 수 있다.

한편, CPUE는 [Fig. 2]에서 보듯이 전반적으로 감소하는 추세를 보였는데, 이는 시간이 지남에 따라 동일한 어획 노력으로 얻을 수 있는 어획량이 계속 감소하고 있음을 의미한다. 이러한 결과는 어획 기술의 발전에도 불구하고 단위 노력량 어획량이 줄고 있다는 것으로 참조기 자원이 1990년대 이후부터 계속 감소하고 있다는 신호라 볼 수 있다. 따라서 정부는 참조기 자원의 지속 가능한 이용을 위한 참조기 자원 관리에 관한 구체적인 자원회복 정책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

3. 참조기 자원평가

참조기 자원평가는 베이지안 추론을 기반으로 한 BSS 모형을 적용하였다. 본 연구는 1990년부터 2022년까지의 참조기를 어획하는 8개 업종에 대한 어획량과 Gavaris(1980)의 일반선형모형

(GLM)을 통해 표준화된 CPUE 자료를 활용하였다. 본 모형은 수산자원평가 분야에서 매개변수들의 사전 분포를 설정한 후, 관측 가능한 데이터를 바탕으로 사후 분포를 추정하는 과정으로 분석이 이루어졌다. 이러한 접근방법은 과정오차와 관측오차를 모두 고려하여, 매개변수 추정 시 발생할 수 있는 불확실성을 충분히 반영하고, 그 결과로 높은 신뢰도를 가진 자원평가 결과를 도출할 수 있게 한다는 이점이 있다. 이를 통해 분석 과정에서 얻어진 결과는 참조기 자원 관리에 있어 중요한 정보를 제공하며, 정책 결정 시 과학적 근거로 활용될 수 있다.

분석에 사용된 사전 정보로는 참조기의 본원적 성장률을 추정하기 위한 범위 설정에 필요한 ‘Resilience’ 자료가 포함되어 있다. 해당 자료는 FishBase에서 공개된 정보를 기반으로 하였으며, 참조기의 사전 본원적 성장률은 0.57(95% Confidence Interval: 0.37~0.85)로 확인되어 이를 적용하였다.

BSS 모형을 통한 추정 결과, 참조기의 본원적 성장률(r)은 0.45(95% CI: 0.31~0.64), 어획능률계수(q)는 0.000001570(95% CI: 0.000001030~0.000002293), 환경수용능력(k)은 341,230ton(95%

CI: 228,927~539,071ton)로 나타났다. 또한 최대지속적자원량(B_{MSY})은 약 170,615ton(95% CI: 114,463~269,535ton), 최대지속적어획량(Y_{MSY})은 약 38,355ton(95% CI: 29,421~52,452ton), 최대지속적어획노력량(F_{MSY})은 약 143,269hp(95% CI: 110,876~190,334hp)으로 분석되었다.

<Table 5> BSS model analysis results

	(unit: %, kg, hp)		
	2.5%	50%	97.5%
r	0.3115	0.4494	0.6421
q	0.000001030	0.000001570	0.000002293
k	228,926,953	341,229,705	539,070,953
B_{MSY}	114,463,476	170,614,853	269,535,476
Y_{MSY}	29,421,485	38,354,961	52,452,135
F_{MSY}	110,876	143,269	190,334

2018년부터 2022년까지의 최근 5년간 투입된 어획노력량은 약 232,974hp로, 추정된 F_{MSY} 를 초과하는 어획노력량을 투입하는 것으로 나타났다. 이는 어획노력량의 과도한 투입에도 불구하고 어획량이 Y_{MSY} 수준을 달성하지 못하는 것으로, 참조기 자원이 감소하고 있음을 시사한다.

4. 동태적 최적어획량 추정

생물경제학 모형은 어획노력량과 어획 효율성의 변화를 고려하여 자원량과 어획량의 변동을 예측하는 기법으로, 어업별 수입과 비용을 바탕으로 미래의 어획량 변화를 전망하고, 이를 통해 경제주체들의 경제적 영향을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 참조기 자원의 동태적 최적어획량 및 어획노력량 추정을 위해 BSS 모형의 참조기 자원평가 결과를 활용하여 생물경제학 모형을 구축하였다. 또한, 분석대상 8개 업종의 평균 비용은 수협중앙회 수산경제연구원의 어업경영조사를 참고하여 마력 단위당 비용을 산출하였으며, 참조기의 평균 가격은 통계청 국가통계포털의 어

업생산동향조사를 참고하였다. 이를 국가통계포털의 신선어류 생산자물가 지수 기준연도인 2015년 가격으로 실질화하였다. 각 연도별로 세 가지 어업의 실질화된 마력 단위당 비용과 생산 가격을 가중 평균한 결과, 평균 비용(c)은 911,622원, 평균 가격(p)은 6,973원으로 추정되었다. 본 연구에서는 한국개발연구원(KDI)이 발표한 예비타당성 조사 자료에 근거해 4.5%의 사회적 할인율을 적용하였다(Cho and Nam, 2018).

<Table 6> Technological and biological estimates and economic parameters

Parameter	Yellow croaker
q	0.000001570
k (kg)	341,229,705.2
r (%)	0.449372179
c (KRW)	911,622.7963
p (KRW)	6,973.237192
δ (%)	4.5

참조기어업의 이윤이 극대화되는 동태적 최적어업 수준을 분석한 결과, 최적자원량(B^*)은 약 202,208ton, 최적어획노력량(F^*)은 116,632hp, 최적어획량(Y^*)은 약 37,020ton으로 분석되었다.

<Table 7> Optimal stock level, fishing efforts and catch

Optimum	Yellow croaker
B^* (kg)	202,208,170
F^* (hp)	116,632
Y^* (kg)	37,020,317

분석 결과, 참조기를 어획하는 8개 업종의 어업인이 참조기 어획으로부터 이윤을 극대화하려면 분석된 최대지속적어획노력량(143,269hp)보다도 낮은 수준의 어획노력량 투입이 필요함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 연근해 참조기 자원의 지속 가능한 관리 방안을 모색하기 위해 BSS 모형과 해밀토니안 접근법을 사용하여 최적어획량과 최적어획노력량을 분석하였다.

우선, 참조기 어종의 생물학적 자원량을 추정하기 위해 어획량과 CPUE 자료를 바탕으로 상위 8개 연근해어업 업종의 데이터를 활용해 자원평가를 수행하였으며, 이후, 자원평가 결과와 경제적 파라미터를 결합하여 동태적 최적어획량과 최적어획노력량을 추정하였다.

분석에 따르면, 참조기의 최대지속적어획량(Y_{MSY})은 약 38,355ton, 최대지속적어획노력량(F_{MSY})은 약 143,269hp로 추정되었다. 이러한 결과는 최근 5년간의 평균 어획량(약 25,972ton) 및 평균 어획노력량(226,334hp)을 비교할 때, 참조기 자원이 남획되고 있음을 시사한다. 과도한 어획노력량이 투입되고 있음에도 불구하고 MSY 수준에 미치지 못하는 생산량이 어획되고 있으므로, MSY 수준 달성을 위해서는 약 36.70% (83,065hp)를 줄여야 하는 것으로 나타났다.

다음으로, 참조기 자원의 지속 가능한 관리를 위해 생물학적인 측면과 아울러 어업인들의 경제적 이익도 중요한 고려사항이다. 따라서 본 연구에서는 해밀토니안 기법으로 동태적 최적어획수준을 추정하였으며, 분석 결과 최적어획량(Y^*)은 약 37,020ton, 최적어획노력량은 약 116,632hp로 분석되었다. 이는 참조기 조업을 통한 이윤 극대화를 위해서는 최근 5년간의 평균 어획노력량의 48.46%(109,702hp)를 감소시켜야 한다는 것을 의미한다. 특히 최근 들어 지속적인 자원 감소, 경기 둔화, 고물가로 인한 참조기를 비롯한 수산물 소비 부진은 참조기를 어획하는 어업인의 소득 정체로까지 이어질 수 있어, 이에 대한 구체적인 어업관리방안 수립이 요구된다. 이를 위해서는 자원의 지속적 이용을 위한 MSY에 기반한 TAC

제도의 정착도 중요하지만, 어업인의 소득을 보장하는 MEY 중심의 시장 지향형 어업관리제도 도입도 필요함을 시사한다.

그러나 급격한 어획량 제한이나 어획노력량 조절과 같은 자원 관리 조치는 어업인들의 생계에 큰 영향을 미칠 수 있으므로, 이를 평가하고 경제적 균형을 유지하는 것이 필수적이다. 따라서 이러한 자원 관리 정책은 어업인들의 경제적 상황을 보호하면서도 자원의 지속 가능성을 보장하는 방향으로 설계되어야 하며, 이와 관련된 후속 연구가 수행될 필요가 있다. 특히, 자원 관리 조치가 어업인들의 경제적 안정에 미치는 장기적인 영향을 심층적으로 분석하는 연구가 요구된다. 이에 우리나라 연근해 참조기 자원 및 어획량에 관한 연구는 연근해어업의 중요한 지표로서 특정 업종에 따른 어획 데이터를 분석하여 어업 관리 및 자원 보호 전략 수립에 기여할 수 있을 것으로 보여진다.

본 연구의 한계로 첫째, 참조기는 한국과 중국 그리고 일본 세 국가가 공유하는 경계왕래성 어종으로 국가별 수산자원관리 정책에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 특히 중국의 참조기 어획량이 큰 비중을 차지하고 있으나, 본 연구에서는 주변국의 어획량 및 어획노력량을 고려한 분석을 수행할 수 없었다는 한계점이 존재한다. 이에 향후 동 어종의 자원관리를 위한 국제적 협력과 데이터의 공유가 필요할 것으로 여겨진다.

둘째, 기후변화의 영향, 해양환경 변화, 불법어업 활동의 영향 등을 참조기 자원평가에 고려하지 못한 점을 들 수 있다. 향후 연구에서는 환경적 변수를 보다 정교하게 다루고, 다양한 시나리오를 고려한 모델링을 통해 분석의 정확성을 높이는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Cho HS and Nam JO(2020). The Dynamic Optimal Fisheries Management for Spanish Mackerel,

- Environmental and Resource Economics Review, 29(3), 363~388.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2020.29.3.363>
- Cho HS(2024). TAC System Effect Analysis and Production Efficiency Estimation Based on Stock Assessment Using the BSS Model - Focusing on Inshore and Offshore Fisheries -, Doctoral dissertation, Pukyong National University.
- Choi MJ(2020). A bioeconomic analysis of small yellow croaker for planning effective management policy, Marster's thesis, Pukyong National University.
- Clark CW and Munro GR(1975). The economics of fishing and modern capital theory: a simplified approach. *Journal of environmental economics and management*, 2(2), 92~106.
- Conrad JM(1999). *Resource economics*. Cambridge University Press.
- FishBase(2024). Retrieved from <http://fishbase.org/> on May 14.
- Froese R, Demirel N, Coro G, and Winker H (2021). User guide for CMSY++.
- Froese R, Demirel N, Coro G, Kleisner KM and Winker H(2017). Estimating fisheries reference points from catch and resilience. *Fish and Fisheries*, 18(3), 506~526.
<https://doi.org/10.1111/faf.12190>
- Froese R, Winker H, Coro G, Palomares ML, Tsikliras AC, Dimarchopoulou D, Touloumis K, Demirel N, Vianna MS, Scarcella G, Schijns R, Liang C and Pauly, D. (2023). New developments in the analysis of catch time series as the basis for fish stock assessments: The CMSY++ method. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*, 53, 173~189.
<https://10.3897/aiep.53.105910>.
- Gavaris S(1980). Use of a multiplicative model to estimate catch rate and effort from commercial data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(12), 2272~2275.
- Hyun DM(2023.11.17). Incheon Yellow Croaker Catch Volumes Fluctuate... Declining for Two Consecutive Years. Retrived
<https://www.incheontoday.com/news/articleView.html?idxno=236559> on May 23.
- Kang DY, Jo KC, Lee JH, Kang HW, Kim HC and Kim GH(2006). Annual reproductive cycle of wild female yellow croaker, *Larimichthys polyactis*. *Journal of Aquaculture*, 19(3), 188~196.
- Kim IS, Choi Y, Lee CL, Lee YJ, Kim BJ and Kim JH(2005). *Illustrated book of Korean fishes*. Kyo-Hak Publishing Co. Ltd., Seoul, Korea, 339.
- Korean Statistical Information Service (2024a) Producer price index. <http://kosis.kr> Accessed 23 May 2024.
- Korean Statistical Information Service(2024b). Fishery management survey. <http://kosis.kr> Accessed 23 May 2024.
- Meyer R and Millar RB(1999). Bayesian stock assessment using a state - space implementation of the delay difference model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(1), 37~52.
- Nam JO, Sim SH and Kwon OM(2015). Estimating Optimal Harvesting Production of Yellow Croaker Caught by Multiple Fisheries Using Hamiltonian Method, *The Journal of Fisheries Business Administration*, 46(2), 59~74.
- National Institute of Fisheries Science(2011). Yellow Croaker Fishery Resource Recovery Project [Press release]. National Institute of Fisheries Science, Republic of Korea.
- Quinn TJ and Deriso RB(1999). *Quantitative fish dynamics*. University of Oxford, 560.
- Schaefer M(1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bulletin of the Inter-American- Tropical Tuna Commission* 1, 27~56.
- Verhulst PF(1838). Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondence mathematique et physique*, 10, 113~129.

• Received : 24 September, 2024

• Revised : 17 October, 2024

• Accepted : 25 October, 2024