

CMSY 및 BSS 모델을 활용한 한국의 고등어 자원평가 연구

홍재범 · 김도훈[†]

부경대학교(대학원생) · [†]부경대학교(교수)

A Study on Stock Assessment of Chub Mackerel(*Scomber japonicus*) in South Korea Using CMSY and BSS Models

Jae-Beum HONG · Do-Hoon KIM[†]

Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

This study attempted to assess the stock status of chub mackerel(*Scomber japonicus*), which is one of commercially important fish species in South Korea. Recent studies on stock assessment of chub mackerel have been done, but they have several limitations such as setting up prior information and distributions for major variables. In this study, stock assessment models, Monte Carlo method (CMSY) and Bayesian state-space (BSS) method, that can be analyzed even in limited data and based on prior information and distributions with relatively clear evidence were used. To evaluate the stock status of chub mackerel, annual changes in the amount of biomass and the ratio of the amount of biomass in the last year to B_{MSY} (the biomass which can produce maximum sustainable yield) were estimated. Results showed that the status of chub mackerel was assessed to be 'Grossly overfished' by CMSY model and 'Overfished' by BSS model, respectively. That is, the biomass of chub mackerel is decreasing and the current level of biomass is much lower than that of B_{MSY} .

Key words : Stock assessment, Monte carlo method, Bayesian state-space, Chub mackerel, Prior distribution

I. 서론

고등어(*Scomber japonicus*)는 한국의 연안과 근해를 포함한 전 대양의 열대 및 온대 해역에 분포한다(NIFS, 2021). 고등어는 멸치, 오징어와 함께 한국 해면어업 생산량의 대부분을 차지하는 대표 수산물로, 한국 국민들이 가장 선호하는 어류 중 하나이다(Kim, 2017).

2020년 기준 한국의 고등어 생산량은 77,401톤으로, 해면어업 총 어류 생산량의 약 11%를 차지하고 있다. 생산금액은 약 1,636억 원으로 갈치,

멸치, 참조기 다음으로 많으며, 해면어업 총 어류 생산금액의 약 7%를 차지하고 있다(KOSIS, 2021). 그리고 업종별 고등어 생산량 비중을 살펴보면, 대형선망어업이 전체의 85.8%(66,444톤)로 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 다음으로 정치망어업 3.4%(2,644톤), 소형선망어업 2.7%(2,057톤), 근해자망어업 2.2%(1,689톤), 그리고 쌍끌이대형저인망어업 2.1%(1,634톤) 등으로 구성되어 있다(KOSIS, 2021).

고등어는 일시 다획성 어종으로 생산량의 변동이 심한 특징을 가지고 있다(Jang et al., 2015).

[†] Corresponding author : 051-629-5954, delaware310@pknu.ac.kr

※이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음

고등어 생산량은 1970년 38,256톤을 시작으로 매년 증가하는 추세를 나타내며 1996년 415,003톤으로 최대치를 기록하였다. 하지만 1997년 이후부터 현재까지 지속적으로 감소하고 있다(KOSIS, 2021). 이러한 고등어 어획량 감소에 따른 자원관리의 필요성으로 TAC (Total Allowable Catch) 제도를 포함한 다양한 자원관리수단들이 적용되고 있다. 구체적으로 4월 1일부터 6월 30일 기간 중 1개월 간 고등어 어획이 금지되어 있으며, 전장 21센티미터 이하의 고등어에 대한 어획이 금지되어 있다(MOLEG, 2021). 그리고 1999년부터 고등어에 대한 TAC 제도가 운용되고 있다(FIRA, 2021).

효과적인 수산자원관리를 위해서는 수산자원에 대한 평가가 이루어져야 한다(Choi et al., 2019; Suman et al., 2021). 고등어에 대해서는 최근 자원평가를 위한 다양한 시도가 이루어졌다. Park and Kwon(2019)은 1977년부터 2015년까지의 대형선망어업의 고등어 어획량과 양망횟수 자료를 활용하여 최대 엔트로피 기법 (Maximum Entropy Approach, MEA)으로 고등어 자원평가를 실시하였다. 분석 결과, 최대지속적생산량 (Maximum Sustainable Yield, MSY)은 148,624톤 수준으로 추정되었으며, MSY를 유지할 수 있는 자원량 수준(B_{MSY})에 비해 현재의 고등어 자원량은 낮은 수준으로 추정되었다. Jung(2019)은 1976년부터 2017년까지의 연근해어업 고등어 어획량과 대형선망의 양망횟수 자료를 활용하여 Bayesian state-space (BSS) 모델로 고등어 자원평가를 실시하였다. 분석 결과, MSY는 174,298톤으로 추정되었고, 최근 고등어 자원량은 감소하고 있으나 B_{MSY} 보다는 높은 수준인 것으로 평가되었다.

Park and Kwon(2019) 그리고 Jung(2019)의 연구에서 사용된 자원평가모델은 상이하지만, 분석에 있어서는 공통점이 있다. 즉, MEA와 BSS 모델은 자원평가 결과를 도출하기 위해 주요 변수들의 초기값에 대한 사전적 분포에 대한 가정이 필요하고, 자원평가 과정에서 발생할 수 있는 과정오

차와 관측오차를 모두 고려할 수 있다(Choi and Kim, 2019). 하지만 두 모델 모두 주요 변수들의 모수를 추정하는 과정에서의 한계점이 존재한다.

MEA 모델을 이용한 Park and Kwon(2019)에서는 주요 변수들의 모수를 직접 추정하는 것이 아니라 모수들의 범위를 임의로 삼등분하여 설정하고, 모수가 삼등분된 값을 가질 확률변수를 추정한다. 즉, 주요 변수들의 모수에 대해 제약조건의 범위를 tri-uniform distribution으로 설정하는데, 예를 들어 0에서부터 1까지의 범위를 설정하는 모수의 경우에는 $[0, 0.5, 1]$ 로 설정한다(Pyo, 2006; Tendaupenyu and Pyo, 2017). 이러한 tri-uniform distribution을 설정하여 임의로 정해진 3개의 값에 대한 확률변수를 추정하는데 있어 불확실성이 큰 한계가 있다. Jung(2019)의 경우에는 주요 변수들의 모수를 추정하기 위해 연구자가 임의로 설정한 사전 정보를 활용하였다. Jung(2019)에서 활용한 BSS 모델에서는 특히 주요 변수들에 대한 사전분포 설정이 가장 중요한 부분 중의 하나로 (McAllister et al., 2001; Millar, 2002; Van Dongen, 2006; Choi and Kim, 2020), 임의로 가정한 사전분포 설정에 있어 불확실성이 큰 한계가 있다.

최근 분석 자료가 부족한 상황에서 어획량 자료와 주요 변수들에 대한 비교적 타당하고, 근거 있는 사전 정보를 활용하는 CMSY 자원평가모델 (Froese et al., 2017; Ren and Liu, 2020; Liang et al., 2020)을 이용한 연구가 다수 이루어지고 있다. Liang et al.(2020)은 한국의 고등어를 비롯하여 한국, 중국, 일본에서 어획되는 15개 어종을 대상으로 CMSY 및 BSS 모델을 활용하여 자원평가를 실시하였고, 모델별 분석 결과가 유사하게 추정되었다. 분석에 있어서는 한국 고등어 자원평가를 위해 1970년부터 2002년까지의 어획량 자료 및 1995년부터 2002년까지의 CPUE 자료가 활용되었다. 분석 결과, 한국의 고등어 자원은 남획상태 (overfished)인 것으로 평가되었다. 그리고 연구의 결론에서 CMSY 및 BSS 모델을 통한 분석을 위해서는 신뢰할 수 있는 장기간의 어획량

자료가 필요함을 제시하였다.

이러한 점에서 보다 신뢰할 수 있는 고등어 자원평가를 위해서는 기존 자원평가모델의 한계를 극복할 수 있는 주요 변수들에 대한 사전적 분포의 설정이 필요하고, 활용 가능한 분석 자료의 최대 기간 범위를 포함한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 고등어 자원에 대한 비교적 타당하고 근거 있는 사전 정보를 활용하고, CPUE 자료 확보의 한계가 있음에도 불구하고 최대한 활용 가능한 어획량 자료를 병행하여 고등어 자원상태를 평가해 보고자 한다. 구체적으로 본 연구에서는 분석 방법으로는 CMSY 모델과 BSS 모델을 모두 이용하고, 분석 결과를 비교해 보았다. 또한 선행 연구에서 추정된 결과와도 비교·분석하여 현재 한국의 고등어 자원상태를 추정해 보았다.

II. 연구 방법

1. 고등어 어업 현황

고등어 어획량은 1970년 기준 38,256톤을 시작으로 지속적으로 증가하였으며, 1970년대 중반 이후에는 약 10만 톤 수준을 넘어섰다. 그리고 이후에도 증가하여 1980년대 후반에는 약 15만

톤 수준을 기록하였다. 1990년대로 들어서면서 어획량의 감소 추세가 나타났지만, 1994년에는 약 20만 톤 수준을 넘었고, 1996년에는 최대치인 415,003톤을 기록하였다. 하지만 최대치를 기록한 이후 2000년대 초반까지 약 10만 톤에서 20만 톤 수준으로 감소하였다. 이후 연간 어획량의 증감 변동이 있지만, 전반적으로 감소하는 추세를 보이고 있다(KOSIS, 2021).

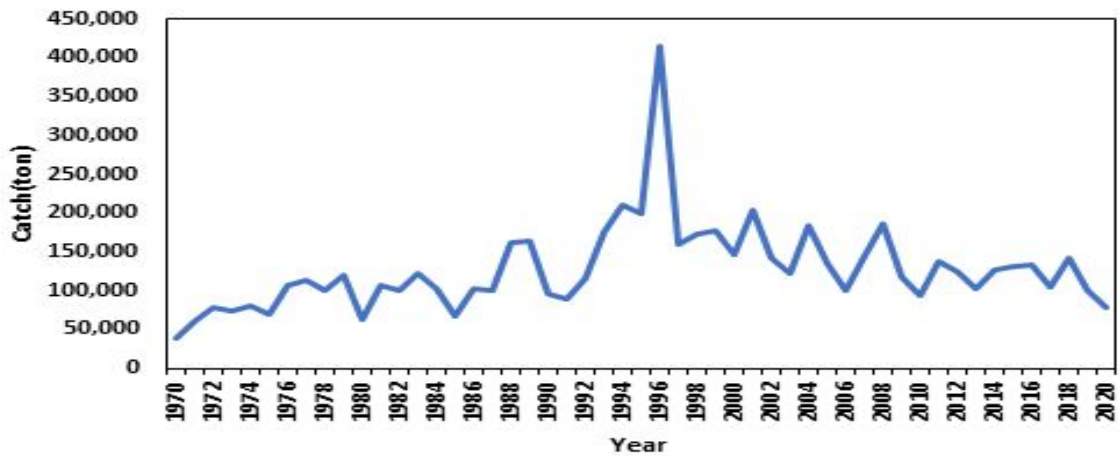
한국의 업종별 고등어 어획 현황을 살펴보면, <Table 1>에서 보는 바와 같이, 최근 5개년(2016년-2020년) 평균 총 111,424톤 중 대형선망어업이 전체 어획량의 88.5%로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 다음으로는 정치망 4.4%, 소형선망 1.7% 등의 순으로 나타났다.

고등어의 경우 한국과 인접한 중국과 일본에서도 어획이 이루어지고 있다. 일본의 경우 한·중·일 3개 국가 중에서 최근 일부 연도를 제외하고 고등어 어획이 가장 많이 이루어지고 있다. 일본의 경우 1950년 177,900톤을 시작으로 지속적으로 어획량이 증가하는 추세를 보이며, 1978년 최대치인 1,625,753톤을 기록하였다. 하지만 이후 현재까지 다소 감소하는 추세를 보이다 최근에는 약 50만 톤 수준에서 큰 변화는 보이지 않고 있다. 중국의

<Table 1> Catch of chub mackerel by fishery from 2016 to 2020

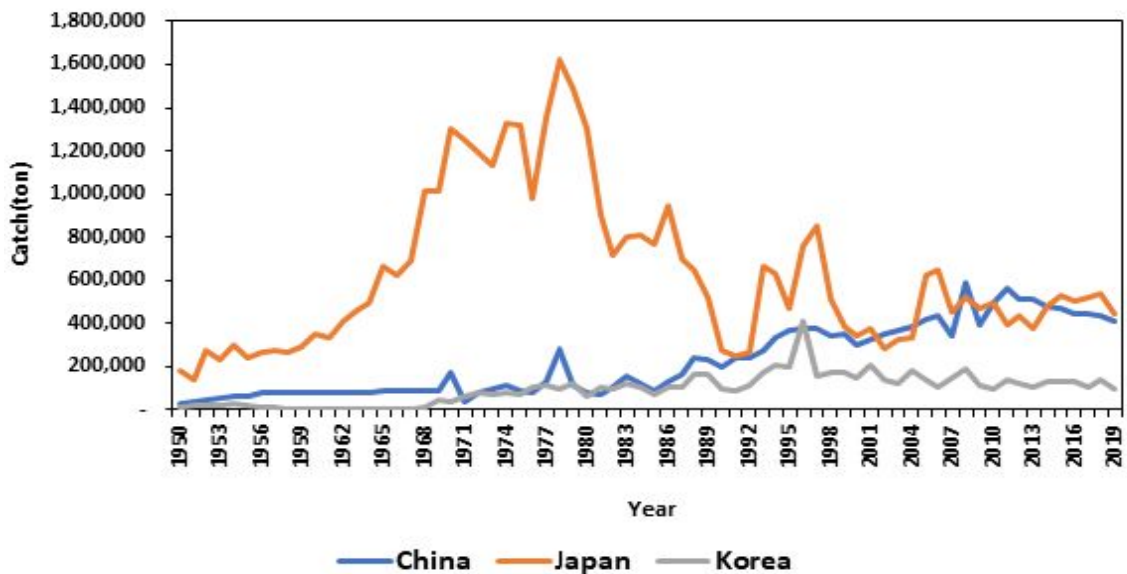
Fishery	2016 (ton)	2017 (ton)	2018 (ton)	2019 (ton)	2020 (ton)	Average (ton)	Rate (%)
Large Purse Seine	127,089	91,546	120,067	87,991	66,444	98,627	88.5%
Set Net	1,008	2,962	12,403	6,300	1,689	4,872	4.4%
Small Purse Seine	2,464	1,257	2,304	1,318	2,057	1,880	1.7%
Drift Gill Net	630	714	849	1,179	2,644	1,203	1.1%
Large Pair Bottom Trawl	463	2,390	577	379	1,634	1,089	1.0%
etc.	1,545	5,000	5,331	3,955	2,933	3,753	3.4%
Total	133,199	103,869	141,531	101,122	77,401	111,425	100.0%

Source : KOSIS(2021)



(Source : KOSIS(2021))

[Fig. 1] Catch of chub mackerel from 1970 to 2020.



(Source : FAO(2021))

[Fig. 2] Catch of Chub mackerel by country from 1950 to 2020.

고등어 어획량은 1950년 27,200톤을 시작으로 현재까지 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있으며, 2010년대 초반에는 3개 국가 중 가장 많은 고등어 어획량을 기록하기도 하였다(FAO, 2021).

앞서 서론에서 언급한 바와 같이, 고등어에 대해서는 1999년부터 TAC 제도가 적용되었으며, 현재까지 TAC 대상어종으로서 자원관리가 이루어지고 있다(FIRA, 2021). 고등어 TAC 소진율을

살펴보면, 1999년 및 2008년의 경우를 제외하고는 모두 TAC 수준 이하에서 어획이 이루어졌다. 구체적으로 TAC 제도가 적용된 1999년 이후 2019년까지의 평균 소진율은 79% 수준이다(MOF, 2021). 고등어 어획량은 최근 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있으며, TAC 소진율 또한 최근 감소하는 추세로 나타나고 있다. 이러한 점에서 현재의 TAC 할당량이 고등어 자원관리를 위해 적절한 수준인지에 대한 재검토도 필요하다.

2. 분석 방법

CMSY 모델은 활용 가능한 분석 자료가 제한적인 상황 하에서 베이지안 (bayesian) 분석 방법을 구현한 것이기 때문에 CMSY 모델 분석 결과는 동일한 베이지안 방법으로 활용한 BSS 모델 분석 결과와 비교하는 것이 적절하다(Froese et al., 2017). 따라서, 본 연구에 있어서도 CMSY 모델을 활용한 고등어 자원평가 결과를 비교하기 위해 어획량 자료 외에 CPUE의 자료를 병행하여 잉여생산량모델을 기반으로 한 BSS 모델에 의한 자원평가도 추가적으로 실시하였다.

BSS 모델은 베이지안 추론을 바탕으로 자원평가를 수행하는 것을 의미한다. 베이지안 추론은 관측된 자료와 모수 모두에 확률모형을 사용하고, 관측된 자료에 포함된 정보와 사전 정보(분포)를 결합하여 사후분포를 계산한 후 이를 근거로 통계적 추론을 수행하는 방법이다(Meyer and Millar, 1999; Kim, 2013; Choi and Kim, 2019). BSS 모델의 장점으로 정보적 사전 분포와 단기간 자료의 활용을 통한 분석 혹은 누락된 연도가 있는 단편적인 CPUE 자료를 활용한 분석 등이 가능하다(Froese et al., 2019).

CMSY 및 BSS 모델은 일반적으로 활용되는 Schaefer 모델에서 가정한 바와 같이, 자원량의 증가는 로지스틱 함수 형태를 가지는 것으로 가정한다(Schaefer, 1954; 1957). 이에 따라 다음 해의 자원량은 식 (1)과 같은 형태로 나타낼 수 있

다(Froese et al., 2017; Liang et al., 2020).

$$B_{t+1} = B_t + r(1 - B_t/k)B_t - C_t \dots\dots\dots (1)$$

여기서, B_t 는 t년도의 자원량, r 은 본원적 성장률, k 는 환경수용력, 그리고 C_t 는 t년도의 어획량을 각각 의미한다. 자원량이 환경수용력(k)에 대비하여 0.25 이하로 고갈된 경우에는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다(Froese et al., 2017).

$$B_{t+1} = B_t + 4 \frac{B_t}{k} r(1 - B_t/k)B_t - C_t < 0.25 \dots\dots\dots (2)$$

CMSY 모델은 Martell and Froese (2013)의 Catch-MSY 모델에서 발전된 것으로, 어획량 자료와 어종의 Resilience를 기반으로 자원량 및 어획율 (exploitation rate), MSY, 본원적 성장률(r), 그리고 최대자원량 수준인 환경수용력(k)을 추정할 수 있다. 특히 본원적 성장률과 환경수용력에 대해서는 Monte Carlo 방법을 통해 가능한 'r-k' 쌍의 범위를 추정한다. 여기서 가능한 범위라는 것은 추정된 자원량이 관측된 어획량 자료 및 사전에 추정된 자원량의 범위와 비교하여 양립할 수 있는 경우를 의미한다(Froese et al., 2017).

본원적 성장률(r)에 대한 사전 정보 및 범위는 FishBase(www.fishbase.org)를 통해 어종별 Resilience 자료를 근거로 설정할 수 있다(Froese and Pauly, 2021). 여기서, Resilience는 본원적 성장률(r)의 범위에 따라 <Table 2>에서와 같이 4단계로 구분된다(Froese et al., 2000; Froese et al., 2017; Froese and Pauly 2021).

<Table 2> Prior ranges for parameter r based on FishBase

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

Source : Froese et al.(2017), Froese and Pauly(2021)

환경수용력(k)에 대한 사전적 범위의 하한(k_{low}) 및 상한(k_{high})은 식 (3)과 같이, 활용하는 어획량 자료 중에서 최대치($\max(C)$)를 기준으로 본원적 성장률(r) 값의 범위에 따라 결정되도록 하였다. 그리고 사전 자원량의 수준이 높은 경우에는 환경수용력의 사전적 범위 설정에 식 (4)을 적용하였다(Froese et al., 2017).

$$k_{low} = \max(C)/r_{high}; k_{high} = 4\max(C)/r_{low} \cdots \cdots (3)$$

$$k_{low} = 2\max(C)/r_{high}; k_{high} = 12\max(C)/r_{low} \cdots (4)$$

그리고 자원량에 대한 사전적 범위는 상대적인 자원량 수준(B/k)에 따라 구분하여 <Table 3>과 같이 설정하였다(Froese et al., 2017).

<Table 3> Prior ranges for biomass relative to k

Prior biomass	B/k
Low	0.01 - 0.4
Medium	0.2 - 0.6
High	0.5 - 0.9

Source : Froese et al.(2017)

가능한 ‘ r - k ’ 쌍의 추정에 있어서는 우선 사전적 범위 내에서 임의 (random)의 ‘ r - k ’ 쌍이 선택된다. 이후 사전적 자원량의 범위로부터 첫 번째 연도의 자원량이 선택되고, 다음 연도의 자원량을 계산하기 위해 식 (1) 혹은 식 (2)이 사용된다. 이러한 반복적 계산과정에서 예측 자원량 수준이 아주 작거나, 사전적인 자원량 범위를 벗어나는 경우 등에는 ‘ r - k ’쌍은 제거되게 된다(Froese et al., 2017; Liang et al., 2020). 그리고 가능한 ‘ r - k ’쌍을 이변량 플롯(bivariate plot)에 나타내면 삼각형 모양으로 나타나게 되며, 이 중 가장 가능성이 높은 ‘ r - k ’쌍은 일반적으로 삼각형의 끝 부근에서 발생하게 된다(Froese et al., 2017; Liang et al., 2020).

다음으로 BSS 모델의 추정을 위해서는 Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 방법으로 매개 변수

의 확률분포를 샘플링 하는 JAGS 프로그램 (Plummer, 2003)을 활용하였다(Millar and Meyer, 1999; Froese et al., 2017). 여기서, 주요 변수들(r , k 등)의 사후분포 추정을 위해서는 다차원적인 적분 계산이 필요하다. 하지만 다차원적 적분 계산을 수치적으로 수행하는 것이 거의 불가능하기 때문에 이때 활용되는 방법이 MCMC 방법이다 (Millar and Meyer, 2000; Choi and Kim, 2019). 즉, MCMC 방법은 다차원적 적분 계산을 통계적으로 수행하는 방법이다. 하지만 다차원의 결합 확률분포에 대해서는 랜덤포본의 생성이 어렵기 때문에 다른 변수들의 조건부확률분포로부터 변수를 하나씩 순차적으로 추출하는 Gibbs 샘플링을 활용한다(Lunn et al., 2000; Kery and Schaub, 2011; Choi and Kim, 2019).

본 연구에서는 BSS 모델을 이용하여 고등어 자원평가를 수행하는데 있어 세부적인 사항은 Froese et al.(2017)과 동일하게 설정하였다. 즉, 60,000개의 표본을 추출하고, 이 중 사후분포에 수렴하지 못하는 초기 표본들의 영향을 제거하기 위해서 30,000개의 표본을 번인(burn-in) 하였다 (Froese et al., 2017; Choi and Kim, 2019). 그리고 이러한 표본추출 과정에서는 표본 간의 자기상관 문제가 발생할 수 있으며(Choi and Kim, 2019), 높은 자기상관은 정상분포로의 수렴 속도를 느리게 하는 문제점을 발생시킬 수 있다(Seo et al., 2019). 본 연구에 있어서는 이러한 자기상관 문제를 해결하기 위해 매 10번째 값을 사용하였다.

이러한 CMSY 및 BSS 모델을 이용하여 고등어 자원평가 결과를 도출하고, 선행연구인 Palomares et al.(2018)과 Liang et al.(2020)의 분석 결과와 비교하였다. 선행연구들에서는 아래 <Table 4>에 제시된 바와 같이, 분석 대상 어종의 B_{MSY} 대비 마지막 연도 자원량 비율을 기준으로 현재의 자원상태를 평가하였다.

<Table 4> Definition of stock status based on B/B_{MSY}

Stock status	B/B_{MSY}
Healthy	≥ 1
Slightly overfished	0.8 - 1.0
Overfished	0.5 - 0.8
Grossly overfished	0.2 - 0.5
Collapsed	< 0.2

Source : Palomares et al.(2018), Liang et al.(2020)

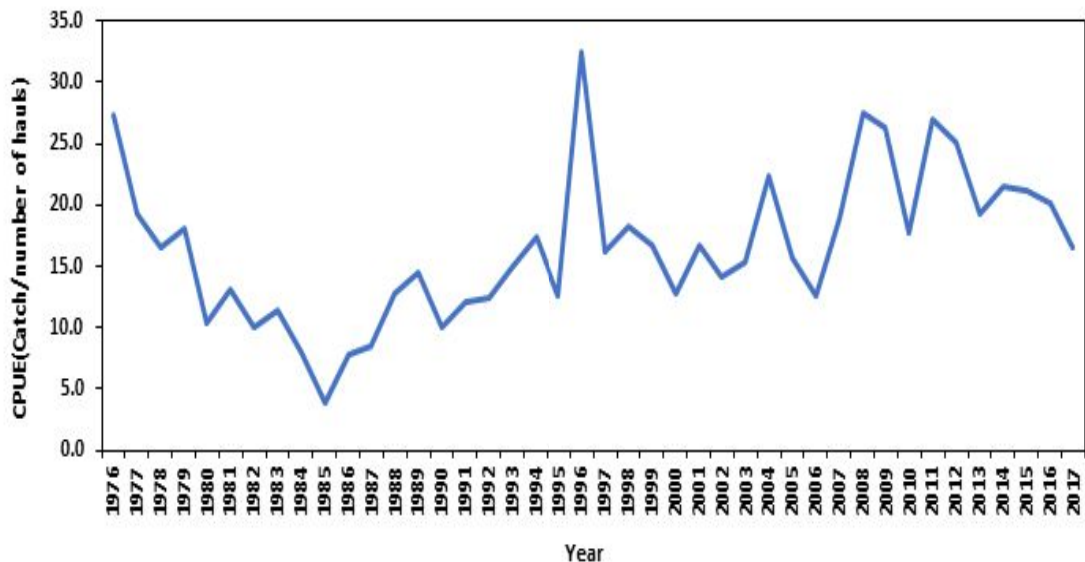
3. 분석 자료

CMSY 및 BSS 모델을 이용한 고등어 자원평가를 위해서는 고등어 어획량, 자원량 혹은 CPUE 그리고 Resilience 등에 대한 자료가 필요하다. 어획량 자료는 한국의 해면어업에서 어획되는 고등어 어획량 자료를 활용하였다. 어획량 자료의 범위는 통계청 국가통계포털을 통해 확보

가능한 최대 기간인 1970년부터 2020년까지 총 51개년 자료를 활용하였다.

CPUE 자료의 경우 선행연구의 결과들과 비교하기 위해 고등어 어획량의 대부분을 차지하는 대형선망어업의 양망횟수로 계산된 고등어 CPUE 자료를 활용하는 것이 타당하다. Park and Kwon(2019)의 경우 1977년부터 2015년까지 39개년간의 자료를 활용하였고, Jung(2019)의 경우 1976년부터 2017년까지 42개년간의 자료를 활용하였다. Jung(2019)에서 상대적으로 최근까지 더 많은 기간의 CPUE 자료를 포함하고 있으므로 Jung(2019)의 CPUE 자료를 활용하였다.

Resilience 자료는 CMSY 및 BSS 모델 이용 시 어종별 본원적 성장률(r) 값을 추정하기 위한 사전적 범위를 설정하는데 필요하다. 본 연구의 분석 대상 어종인 고등어의 경우 FishBase에서 사전적 r 값은 0.48(95% 신뢰구간 : 0.32 - 0.73) 그리고 Resilience는 Medium으로 제시되어 있어 이를 참고하였다.



(Source : Jung(2019))

[Fig. 3] Changes of CPUE for chub mackerel from 1976 to 2017.

Ⅲ. 연구 결과

CMSY 및 BSS 모델을 이용한 고등어 자원평가 결과는 아래 <Table 5>에서 보는 바와 같다. CMSY 모델 분석 결과, 2020년 기준 고등어 자원량은 344,657톤으로 추정되었다. 이는 B_{MSY} (864,841톤) 대비 40% 수준으로 자원상태는 심각하게 남획된 수준 (Grossly overfished)으로 평가되었다. 그리고 BSS 모델 분석 결과, 2020년 기준 고등어의 자원량은 442,660톤 수준으로 추정되었다. 이는 B_{MSY} (729,751톤) 대비 61% 수준으로 자원상태는 남획된 수준 (Overfished)인 것으로 평가되었다.

즉, CMSY 및 BSS 모델에 의한 고등어 자원상태는 조금 다르게 나타났으나, 현재 고등어 자원수준이 B_{MSY} 에 비해 낮은 남획상태라는 점은 공통적으로 추정되었다. 구체적으로 [Fig. 4]를 살펴

보면, CMSY 모델에 의해 추정된 고등어 자원량은 지속적으로 감소한 것으로 나타났다. 이에 반해, BSS 모델에 의해 추정된 고등어 자원량은 연도별 증감을 반복하면서 CMSY 모델 결과에 비해 변동이 큰 것으로 나타났다. 하지만 두 모델 모두 2010년 이후 고등어의 자원량이 지속적으로 감소하는 동일한 추세를 보여주었다.

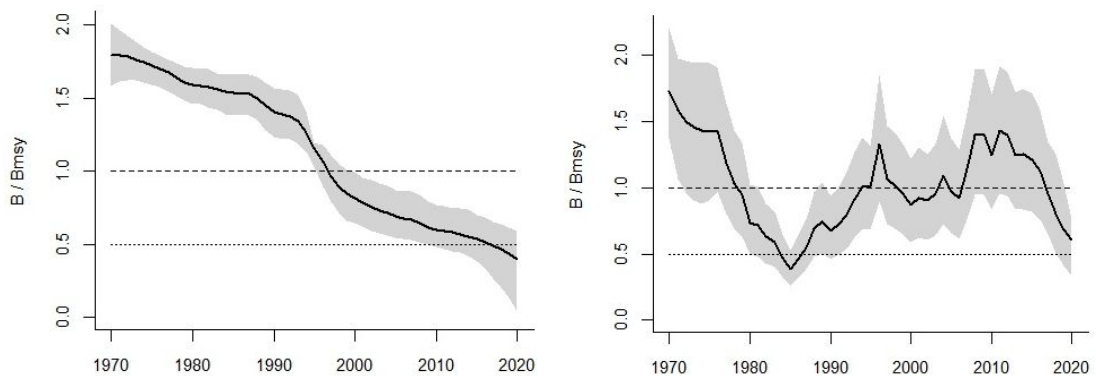
고등어의 자원상태를 보다 정확히 파악하기 위해 연도별 자원량 변동과 함께 어획사망률을 함께 고려한 Kobe Plot 추정 결과를 보면 [Fig. 5] 및 [Fig. 6]과 같다. CMSY 및 BSS 모델에 의한 분석 결과, 앞서도 설명된 바와 같이, 동일하게 2020년 현재 고등어 자원상태는 적색 영역에 있는 것으로 나타났다.

구체적으로 CMSY 모델의 경우 적색 영역에 있을 확률이 95.2%, BSS 모델의 경우에는 53.1%로 추정되었다.

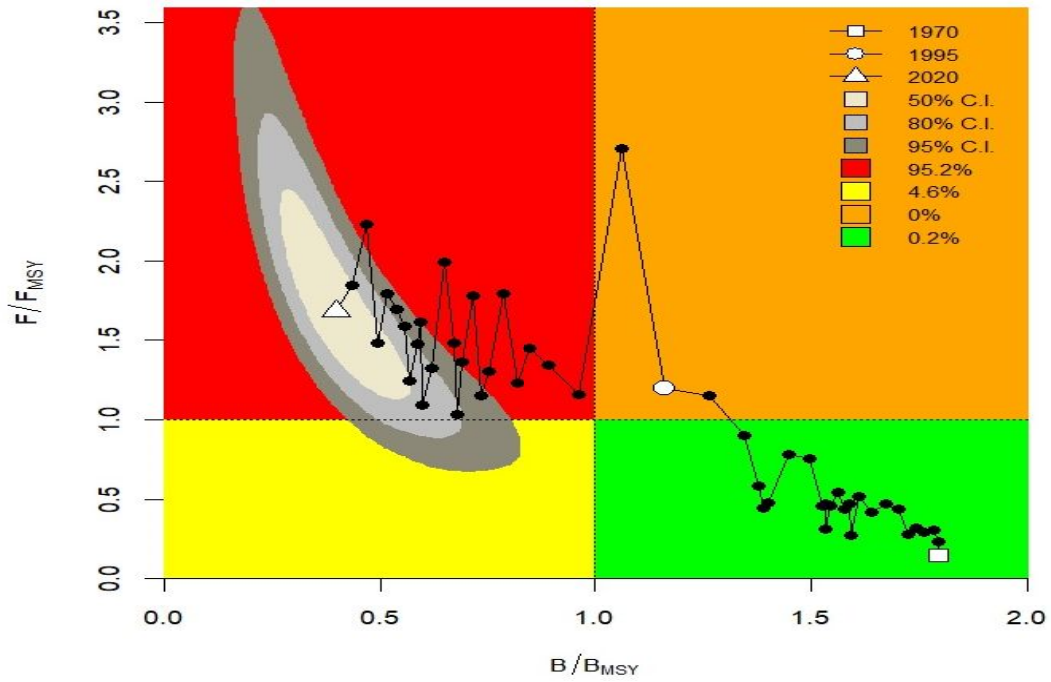
<Table 5> Result of CMSY and BSS models

Model	r	k	MSY	B_{2020}/B_{MSY} (Stock status)
CMSY	0.33 (0.23-0.50)	1,729,681 (1,273,353-2,349,542)	142,038 (123,113-166,522)	0.40 (Grossly Overfished)
BSS	0.42 (0.27-0.66)	1,459,501 (968,405-2,199,642)	153,440 (118,320-198,984)	0.61 (Overfished)

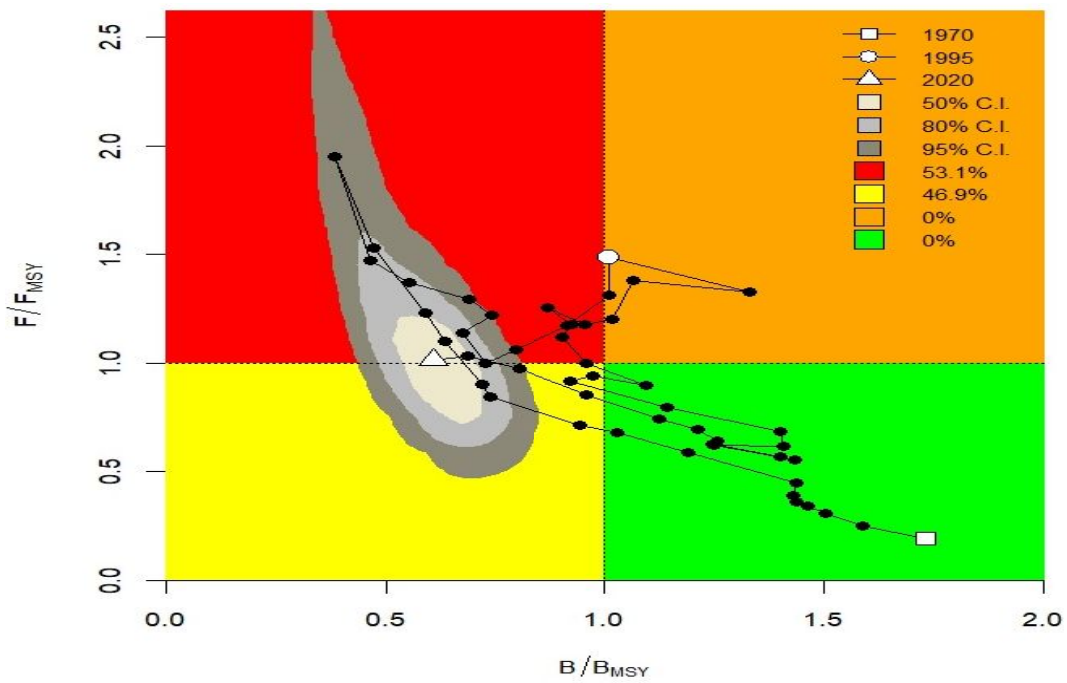
Note: Estimates of r, k, and MSY are median values, and parentheses mean 95% lower and upper confidence intervals.



[Fig. 4] Changes of chub mackerel biomass by stock assessment model(left : CMSY, right : BSS).



[Fig. 5] Result of Kobe plot by CMSY model.



[Fig. 6] Result of Kobe plot by BSS model.

이와 같이, CMSY 및 BSS 모델을 이용하여 한국의 고등어 자원상태를 분석한 결과, 현재 고등어의 자원은 지속적으로 감소하고 있으며, MSY를 달성할 수 있는 자원량 (B_{MSY}) 수준에 비해 낮은 상태인 것으로 추정되었다.

IV. 결 론

본 연구에서 추정된 고등어 자원평가 결과는 최근 이루어진 선행연구들의 결과와 유사하게 나타났다. 특히, 고등어 자원이 감소하고 있는 추세는 Jung(2019)에서도 유사하게 추정되었다. 하지만 본 연구에서는 고등어 자원량이 B_{MSY} 수준 이하로 감소한 것으로 추정된 반면, Jung(2019)에서는 B_{MSY} 수준 이상에서 감소하고 있는 것으로 추정되어 본 연구 결과와 차이가 있다. 이러한 차이는 BSS 모델 추정에 있어 주요 변수들에 대한 사전적 정보를 설정하는 방법에 따른 차이인 것으로 판단된다. 그리고 Park and Kwon(2019)에서는 최근 고등어 자원량 수준이 B_{MSY} 수준에 비해 낮은 것으로 추정되어 본 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다.

국외논문으로 한국의 고등어 자원량을 평가한 Liang et al.(2020)의 연구와 비교해 보면, B_{MSY} 대비 자원량의 비율이 0.64로 추정되어 본 연구에서의 BSS 모델 결과와 거의 유사한 것으로 나타났다. 즉, 최근 한국 고등어 자원량이 B_{MSY} 수준에 비해 낮은 것으로 추정된 점에서 본 연구 및 Park and Kwon(2019)과 유사하게 나타났다. 하지만 Liang et al.(2020)에서는 1970년부터 2002년까지의 어획량 자료를 활용한 점에서 본 연구와 동일한 현재 시점의 고등어 자원상태를 직접적으로 비교하기에는 다소 한계가 있다.

고등어 자원평가에 대한 최근 선행연구들을 비교해 보면, 분석 방법 및 자료 그리고 분석 기간 등의 차이에 따라 결과가 모두 상이함을 알 수 있다. 하지만, 본 연구와 선행연구들을 비교한 결

과 한국의 고등어 자원은 최근 감소 추세에 있으며, MSY를 달성하기 위한 자원량 수준에 비해 낮은 상태인 것으로 추정할 수 있다.

한국에서는 고등어 자원관리를 위해 TAC 제도를 포함하여 다양한 자원관리수단들이 적용되고 있다. 하지만 이러한 정책적 노력에도 불구하고, 본 연구 결과에서와 같이 고등어 자원은 감소하고 있고, 최근의 실질적인 어획량 또한 감소하고 있다. 고등어 TAC 소진율은 2019년 65% 그리고 2020년 59% 수준으로 고등어 자원관리를 위한 TAC 할당량이 실제 어획량에 비해 높게 설정되어 있음을 알 수 있다. 따라서 향후 실효성 있는 고등어 자원관리를 위해서는 적정 TAC 수준에 대한 재검토가 필요할 것이다.

본 연구에서는 고등어의 자원상태를 파악하기 위해 한국 국내의 어획량 및 CPUE 자료 등을 활용하였다. 하지만, 앞서 살펴본 바와 같이, 인접한 중국에서 고등어 어획량이 지속적으로 증가하고 있으며, 일본의 어획량 또한 소폭 증가하고 있다. 하지만 최근 한국의 고등어 어획량은 감소 추세로 나타나고 있다. 이와 같이, 고등어는 회유성 어종이라는 점에서 인접한 국가의 고등어 어획이 한국의 어획량 변화에 크게 영향을 주고 있다. 따라서 실질적인 고등어 자원상태를 평가하기 위해서는 향후 한·중·일 고등어 어획량 및 어획노력량 등의 자료를 모두 반영한 자원평가가 도모되어야 할 것이다. 이를 바탕으로 개별 국가별로 수행한 고등어 자원평가 결과를 함께 검토해 나간다면 보다 신뢰할 수 있는 고등어 자원상태를 파악하고, 효과적인 자원관리 정책을 수립·운영할 수 있을 것이다.

References

- Choi JH, Kim DH, Choi MJ, Kang HJ, Seo YI and Lee JB(2019). Stock assessment and management of blackthroat seaperch *Doederleinia seaperch* using Bayesian state-space model. J Korean Soc Fish

- Ocean Technol, 55(2), 95~104.
<http://dx.doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.2.095>.
- Choi MJ and Kim DH(2020). Assessment and Management of Small Yellow Croaker (*Larimichthys polyactis*) Stocks in South Korea. Sustainability, 12(19), 8257.
<https://doi.org/10.3390/su12198257>.
- Choi MJ and Kim DH(2019). Comparing Surplus Production Models for Selecting Effective Stock Assessment Model: Analyzing Potential Yield of East Sea, Republic of Korea. Ocean and Polar Research, 41(3), 183~191.
<http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2019.41.3.183>.
- FAO(2021). Fishery and Aquaculture Statistics. Global capture production 1950-2019 (FishstatJ). In: FAO Fisheries Division [online]. Rome. Updated 2021.
www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en. Accessed 21 Jun 2021.
- Froese R. and Pauly D. eds(2021). FishBase. World Wide Web electronic publication.
www.fishbase.org, version (02/2021), Accessed 20 Jun 2021.
- Froese R, Demirel N, Coro G and Winker H(2019). A Simple User Guide for CMSY+ and BSM (CMSY_2019_9f.R).
- 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, Palomares MLD and Pauly D(2000). Estimation of life-history key facts of fishes. FishBase 2000: Concepts, Design and Data Sources, 167~175.
- Jang YS, Park KS and Lee JP(2015). A Study of Fisheries Distribution Margin and Performance; Focused on the case of Mackerel. J. Fish. Bus. Adm, 46(3), 143~161.
<http://dx.doi.org/10.12939/FBA.2015.46.3.143>.
- Jung YR(2019). A Bayesian state-space production model for Korean chub mackerel (*Scomber japonicus*) stock. Thesis for the Degree of Master of Science, Pukyong National University.
- Kery M, and Schaub M(2011). Bayesian population analysis using WinBUGS: a hierarchical perspective. Academic Press. Cambridge, UK, 55.
- Kim BT(2017). A study on the Consumption Characteristics of Mackerel by Origin. Ocean Policy Research, 32(1), 185~207.
- Kim DH(2013). Bayesian statistics using R and WinBUGS. Freedom Academy, Paju, 384. 87-248.
- Korea Fisheries Resources Agency (FIRA)(2021).
<http://www.fira.or.kr>. Accessed 24 Jun 2021.
- Korea Ministry of Government Legislation (MOLEG) (2021).
<https://www.law.go.kr>. Accessed 26 Jun 2021.
- KOSIS(2021). Fishery production survey.
<https://kosis.kr>. Accessed 20 Jun 2021.
- Liang C, Xian W and Pauly D(2020) Assessments of 15 exploited fish stocks in Chinese, South Korean and Japanese waters using the CMSY and BSM methods. Frontiers in Marine Science, 7, 623. 10.3389/fmars.2020.00623.
- Lunn DJ, Thomas A, Best N and Spiegelhalter D(2000). WinBUGS-a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility. Statistics and computing, 10(4), 325~337.
<https://doi.org/10.1023/A:1008929526011>.
- Martell S and Froese R(2013). A simple method for estimating MSY from catch and resilience. Fish and Fisheries 14(4), 504~514.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2012.00485.x>.
- McAllister MK, Pikitch EK and Babcock EA(2001). Using demographic methods to construct Bayesian priors for the intrinsic rate of increase in the Schaefer model and implications for stock rebuilding. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 58(9), 1871~1890.
<https://doi.org/10.1139/f01-114>.
- 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.
<https://doi.org/10.1139/f98-146>.
- Millar RB(2002). Reference priors for Bayesian fisheries models. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 59(9), 1492~1502.
<https://doi.org/10.1139/f02-108>.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF)(2021).
<http://125.60.51.142/unify>. Accessed 19 Jul 2021.
- National Institute of fisheries Science (NIFS)(2021).
<https://www.nifs.go.kr/frcenter>. Accessed 24 Jun

- 2021.
- Palomares ML, Froese R, Derrick B, Noel SL, Tsui G, Woroniak J and Pauly D(2018). A preliminary global assessment of the status of exploited marine fish and invertebrate populations. A Report Prepared By The Sea Around US For OCEANA (Washington, DC: OCEANA). 1~64.
- Park YS and Kwon OS(2019). Optimal Management of Mackerel in Korea: A Maximum Entropy Approach, *Environmental and Resource Economics Review*, 28(2), 277~306.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2019.28.2.277>.
- Plummer M(2003). JAGS: A program for analysis of Bayesian graphical models using Gibbs sampling. In *Proceedings of the 3rd international workshop on distributed statistical computing*, 124(125.10), 1~10.
- Pyo HD(2006). A comparative analysis of surplus production models and a maximum entropy model for estimating the anchovy's stock in Korea. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 18(1), 19~30.
- Ren QQ and Liu M(2020). Assessing northwest Pacific fishery stocks using two new methods: the monte Carlo Catch-MSY (CMSY) and the bayesian schaefer model (BSM). *Frontiers in Marine Science*, 7, 430.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00430>
- Schaefer MB(1954) Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, 1(2): 23~56.
- Schaefer MB(1957). A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter Am. Trop. Tuna Comm. Bull.* 2, 243-285.
- Seo YM, Park JH and Choi YY(2019). Comparison of Bayesian Methods for Estimating Parameters and Uncertainties of Probability Rainfall Distribution. *Journal of Environmental Science International*, 28(1), 19~35.
<https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.1.19>
- Suman A, Chodriah U, Kang B and Zhang CI(2021). Stock assessment and management implications of three lobster species in Gunungkidul waters, Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, 211, 105780.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105780>.
- Tendaupenyu IH and Pyo HD(2017). A Comparative Analysis of Maximum Entropy and Analytical Models for Assessing Kapenta (*Limnothrissa miodon*) Stock in Lake Kariba. *Environmental and Resource Economics Review*, 26(4), 613~639.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2017.26.4.613>
- Van Dongen S(2006). Prior specification in Bayesian statistics: three cautionary tales. *Journal of theoretical biology*, 242 (1), 90~100.
<https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2006.02.002>.
-
- Received : 23 September, 2021
 - Revised : 11 October, 2021
 - Accepted : 18 October, 2021