

# 연령구조평가모델 하의 MSY 계산에서 Steepness와 자연사망률의 영향 분석

윤정현 · 김진우<sup>1</sup> · 강희중<sup>1</sup> · 현상윤<sup>2\*</sup>

부경대학교 해양생물학과, <sup>1</sup>국립수산과학원 연구해자원과, <sup>2</sup>부경대학교 자원생물학전공

## The Influence of Steepness and Natural Mortality Rate on the MSY Calculation in an Age-structured Model

Jung Hyun Yoon, Jinwoo Gim<sup>1</sup>, Heejung Kang<sup>1</sup> and Saang-Yoon Hyun<sup>2\*</sup>

Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 48503, Republic of Korea

<sup>1</sup>Coastal Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 48503, Republic of Korea

It is challenging to simultaneously estimate parameters in a stock-recruitment relationship, steepness, and natural mortality rate with the other parameters within an age-structured assessment model even in a data-rich situation. Such a problem leads to uncertainty in estimates of management references such as maximum sustainable yield (MSY), which are affected by those components. The objective of this study was to evaluate the effects of those parameters on MSY by analyzing the process of estimating the MSY. For illustration, we used two data sets: The chub mackerel *Scomber japonicus* in the Korean waters and the yellowtail flounder *Limanda ferruginea* in the Southern New England-Mid Atlantic. As a result, the natural mortality rate influenced spawning stock biomass per recruit, yield per recruit, and MSY, while steepness affected MSY. A sensitivity analysis enabled us to estimate the natural mortality rate and steepness. The optimal set of steepness and natural mortality was 1.0 and 0.37 per year for the chub mackerel, and 0.35, and 0.8 per year for the yellowtail flounder, respectively.

Keywords: Age-structured model, MSY, Steepness, Natural mortality rate, Stock-recruitment model

### 서론

연령구조평가모델에서 최대지속가능한 어획량(maximum sustainable yield, MSY)은 산란-가입 관계식의 모수인 steepness와 자연사망률에 크게 영향을 받는다(Hilborn and Walters, 2013). Steepness란 어획이 전혀 없는 상태에서 어미(산란자원)가 생산하는 자어(가입)에 대해서 20%의 어미가 생산하는 자어의 비율이라고 정의되었다(Mace and Doonan, 1988). 즉, 정확한 MSY 추정을 위해서는 모집단을 대표하는 steepness와 자연사망률 값을 필요로 한다. 하지만 자료의 부족, 가입의 환경으로부터의 영향 등으로 인해서 steepness와 자연사망률을 연령구조평가모델 내에서 다른 모수들과 함께 추정하기란 어렵다. 이를 위해 많은 연구자들은 자원평가 수행 시, steepness와 자

연사망률을 임의의 값으로 가정을 하거나(Legault and Brooks, 2013), steepness의 경우 메타 분석(meta-analysis) 방법을 이용하여 추정하거나(Dorn, 2002; He and Field, 2019), 생활사 모수를 활용하여 추정하였다(Myers et al., 1999; Mangel et al., 2013). 자연사망률 또한 생활사 모수를 활용하여 추정하거나 모델 안에서 추정 해왔다(Pauly, 1980; Hoening, 1983; Miller and Hyun, 2018). 하지만 여전히 두 모수의 추정은 불확실하다. 이와 같이 steepness와 자연사망률 추정치의 신뢰성이 불명확하다면, MSY 값 또한 정확하지 않을 것이다. 이에 steepness와 자연사망률이 MSY의 추정에 어떤 영향을 미치는 지에 대해서 수학적으로 밝히는 것은 중요하다.

본 연구에서는 수산자원평가모델 중 연령구조평가모델의 MSY 계산과정을 검토하며, steepness와 자연사망률이 MSY

\*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5929 Fax: +82. 51. 629. 5951

E-mail address: shyunuw@gmail.com



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.2024.0292>

Korean J Fish Aquat Sci 57(3), 292-301, June 2024

Received 8 March 2024; Revised 4 April 2024; Accepted 15 April 2024

저자 직위: 윤정현(대학원생), 김진우(박사 후 인턴 연구원), 강희중(연구사), 현상윤(교수)

에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해서 한국 연근해에 서식하는 고등어(*Scomber japonicus*)와 Southern New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리가자미(*Limanda ferruginea*) 자료를 이용하였다. 두 개체군은 서로 확연히 다른 생태적 특징을 가지고 있다. 즉, 각 개체군을 대표하는 steepness와 자연사망률이 크게 다르기 때문에, steepness와 자연사망률에 따른 MSY의 변동성을 살펴보기 위해서 두 개체군을 선택하였다. 본 연구는 MSY 계산에서 steepness와 자연사망률의 영향을 설명하면서, 지속 가능한 어업 관리를 위한 두 모수의 중요성을 논하고자 한다.

### 재료 및 방법

예시로 쓰인 한국 연근해에 서식하는 고등어의 경우 통계청에서 연도별 총어획량(2000–2022년)을 수집(KOSTAT, 2000–2022)하였고, 국립수산물품질관리원으로부터 대형선망어업에서 수집된 고등어의 연도별 단위노력당어획량(catch-per-unit-effort, CPUE) 자료(2000–2022년), 연령별 체장분포 자료(연도 미상), 체장빈도자료(2000–2022년), 연도별 어체 측정 및 성숙도 자료(2005–2022년)를 제공받았다. 우리나라의 고등어 어획량 중 매년 약 90%는 대형선망을 통해 어획된다. 따라서 본 연구에서는 대형선망어업으로 어획된 고등어의 체장빈도자료가 모집단 어획물의 체장빈도분포를 대변한다고 가정하였다. 체장빈도자료와 연령별 체장분포자료를 이용하여 연도별 연령별 연령조성자료로 변환하여 연구에 사용되었다. 또한 모든 연도의 어체 측정 및 성숙도 자료를 일반화선형모형(generalized linear model)을 이용해 체장에 대한 일반화된 선형회귀식을 만들어 연도별 연령별 성숙률로 변환하여 연구에 사용하였다.

New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리가자미의 연도별 연령별 어획량(1973–2021년), 연도별 연령별 survey indices (NEFSC\_spring, 1973–2021년; NEFSC\_fall, 1973–2021년; NEFSC\_winter, 1992–2007년; NEFSC\_spring은 2020년 조사를 실행하지 않았고, NEFSC\_fall은 2017년, 2020년 조사를 실행하지 않았다), 연도별 연령별 성숙률(1973–2021년), 연령별 연도별 평균 체중(1973–2021년) 자료는 NOAA (1973–2021년)에서 수집하였다.

자연사망률과 steepness에 의한 MSY의 변동성을 분석하기 위해서 연령구조평가모델인 NOAA의 ASAP (<https://noaa-fisheries-integrated-toolbox.github.io/ASAP>) 모델을 사용하여 분석하였다. 해당 모델은 부록에 기술되어 있다. 대상 개체군의 가장 적합한 자연사망률과 steepness 쌍을 찾기 위해서, 자연사망률과 steepness를 바꿔가며 음의 우도함수값에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 고등어의 경우, steepness [0.3, 1.0], 자연사망률 [0.05, 1.4] per year 범위에서 진행하였고, 노랑꼬리가자미의 경우, steepness [0.25, 1.0], 자연사망률 [0.05, 1.4] per year 범위에서 진행하였다.

### MSY 계산 방법

연령구조평가모델에서 MSY를 계산하기 위해서 먼저 가입개체수당 산란자원량(spawning stock biomass per recruit,  $SSB_{PR}$ )과 가입개체수당 어획량(yield per recruit,  $YPR$ )을 계산해야 한다.  $SSB_{PR}$ 이란 한 연급군의 모든 산란자원량을 해당 연급군의 가입개체수로 나눈 값이다. ASAP에서는 시계열의 마지막 연도의 MSY를 계산하기 위해서 마지막 연도의  $SSB_{PR}$ 을 계산한다. 이를 위해 마지막 연도의 산란자원량( $SSB$ )을 먼저 계산해야 한다. 그 식은 다음과 같다. 그리고 마지막 연도의 가입개체수( $R$ ), 평균 체중( $w$ )과 성숙률( $m$ )의 평형상태를 가정한다.

$$SSB_{T,a}(F) = \begin{cases} R_T \cdot w_{f,T,a} \cdot m_{T,a} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,a}), \text{ where } a=1 \\ R_T \cdot [\prod_{i=1}^{a-1} \exp(-Z_{T,i})] \cdot w_{f,T,a} \cdot m_{T,a} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,a}), \text{ where } 2 \leq a \leq A-1 \\ R_T \cdot \frac{[\prod_{a=1}^{A-1} \exp(-Z_{T,a})]}{1 - \exp(-Z_{T,A})} \cdot w_{f,T,A} \cdot m_{T,A} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,A}), \text{ where } a=A \end{cases} \dots(1)$$

$SSB_{T,a}(F)$ 는 마지막 연도, 연령  $a$ 의 산란자원량,  $R_T$ 는 마지막 연도의 가입개체수,  $w_{f,T,a}$ 는 암컷의 마지막 연도, 연령  $a$ 의 평균 체중,  $m_{T,a}$ 는 마지막 연도, 연령  $a$ 의 성숙률,  $p_{SSB}$ 는 일 년 중 어떤 시기의 산란자원량인지 계산하기 위한 비율(e.g. 7월 1일의 산란자원량을 구하기 위해서는  $p_{SSB} = \frac{6}{12}$ 로 사용한다.),  $A$ 는 마지막연령(plus age group)이다.

$Z_{T,a} = M + F_T \cdot sel_a$ 이고,  $M$ 은 자연사망률,  $F_T$ 는 마지막 연도의 어획사망률,  $sel_a$ 는 연령  $a$ 의 어구선택성이다.  $SSB_{PR}$ 은 다음과 같다.

$$SSBPR_T(F) = \frac{\sum_{a=1}^{6+} SSB_{T,a}(F)}{R_T} = w_{f,T,1} \cdot m_{T,a,1} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,1}) + \sum_{a=2}^{A-1} [\{ \prod_{i=1}^{a-1} \exp(-Z_{T,i}) \} \cdot w_{f,T,a} \cdot m_{T,a} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,a})] + \frac{[\prod_{a=1}^{A-1} \exp(-Z_{T,a})]}{1 - \exp(-Z_{T,A})} \cdot w_{f,T,A} \cdot m_{T,A} \cdot \exp(-p_{SSB} \cdot Z_{T,A}) \dots(2)$$

$SSBPR_T(F)$ 는 마지막 연도의  $SSB_{PR}$ 이다. 두 번째로  $YPR$ 을 계산한다.  $YPR$ 이란 한 연급군의 모든 연령의 어획량( $Y$ )을 가입개체수로 나눈 값이다.  $SSB_{PR}$ 과 마찬가지로 시계열의 마지막 연도의  $YPR$ 만을 계산한다. 이를 위해 Baranov equation을 이용하여 어획개체수( $C$ )를 구해야 한다. 어획량 또한 MSY 계산을 위해서 가입개체수의 평형상태를 가정한다.

$$C_{T,a} = \begin{cases} R_T \cdot \frac{F_T \cdot sel_a}{Z_{T,a}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,a})), \text{ where } a=1 \\ R_T \cdot [\prod_{i=1}^{a-1} \exp(-Z_{T,i})] \cdot \frac{F_T \cdot sel_a}{Z_{T,a}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,a})), \text{ where } 2 \leq a \leq A-1 \\ R_T \cdot \frac{[\prod_{a=1}^{A-1} \exp(-Z_{T,a})]}{1 - \exp(-Z_{T,A})} \cdot \frac{F_T \cdot sel_A}{Z_{T,A}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,A})), \text{ where } a=A \end{cases} \dots\dots(3)$$

$C_{T,a}$ 는 마지막 연도, 연령  $a$ 의 어획개체수이다. 위의 식(3)에 마지막 연도의 연령별 평균체중을 곱하여, 어획량( $Y$ )을 구할 수 있다.

$$Y_{T,a}(F) = \begin{cases} R_T \cdot \frac{F_T \cdot sel_a}{Z_{T,a}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,a})) \cdot w_{T,a}, \text{ where } a=1 \\ R_T \cdot [\prod_{i=1}^{a-1} \exp(-Z_{T,i})] \cdot \frac{F_T \cdot sel_a}{Z_{T,a}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,a})) \cdot w_{T,a}, \text{ where } 2 \leq a \leq A-1 \\ R_T \cdot \frac{[\prod_{a=1}^{A-1} \exp(-Z_{T,a})]}{1 - \exp(-Z_{T,A})} \cdot \frac{F_T \cdot sel_A}{Z_{T,A}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,A})) \cdot w_{T,A}, \text{ where } a=A \end{cases} \dots\dots(4)$$

$Y_{T,a}(F)$ 는 마지막 연도, 연령  $a$ 의 어획량이다.  $YPR$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$YPR_T(F) = \frac{\sum_a Y_{T,a}(F)}{R_T} = \frac{F_T \cdot sel_1}{Z_{T,1}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,1})) \cdot w_{T,1} + \sum_{a=2}^{A-1} [\{\prod_{i=1}^{a-1} \exp(-Z_{T,i})\} \cdot \frac{F_T \cdot sel_a}{Z_{T,a}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,a}))] \cdot w_{T,a} + \frac{[\prod_{a=1}^{A-1} \exp(-Z_{T,a})]}{1 - \exp(-Z_{T,A})} \cdot \frac{F_T \cdot sel_A}{Z_{T,A}} \cdot (1 - \exp(-Z_{T,A})) \cdot w_{T,A} \dots\dots(5)$$

$YPR_T(F)$ 는 마지막 연도의  $YPR$ 이다.  $SSBPR$ 과  $YPR$ 을 구하고, 이를 이용하여 산란자원량을 계산해야 한다. 이를 위해서 Beverton-Holt 관계식에 가입개체수의 평형상태를 가정해야 한다. 가입개체수의 평형상태를 가정한 Beverton-Holt 관계식은 다음과 같다.

$$R_T = \frac{\alpha \cdot SSB_{T,*}}{\beta + SSB_{T,*}} \dots\dots(6)$$

$SSB_{T,*} = \sum_a SSB_{T,a}$ 이다. 이때,  $\alpha, \beta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{4hR_0}{5h-1}, \beta = \frac{SSBPR_T(1-h)}{R_0(5h-1)} \dots\dots(7)$$

다음 과정으로 식 (2)와 식 (6)을 이용해서 산란자원량을 표현한다.

$$SSB_{T,*} = \alpha \cdot SSBPR_T(F) - \beta \dots\dots(8)$$

식 (2)와 식 (7)에서 계산된 산란자원량을 이용해서 가입개체수를 구한다.

$$R_T(F) = \frac{SSB_{T,*}}{SSBPR_T(F)} = \alpha - \frac{\beta}{SSBPR_T(F)} \dots\dots(9)$$

계산된  $YPR$ 과 계산된 가입개체수를 이용해서 어획량을 구한다

$$Y_T(F) = YPR_T(F) \cdot R_T(F) = YPR_T(F) \cdot (\alpha - \frac{\beta}{SSBPR_T(F)}) \dots\dots(10)$$

이렇게 계산된 어획량의 최고 지점에 해당되는 어획량을  $MSY$ 라고 지칭한다.

### 결 과

#### 한국 연근해에 서식하는 고등어

자연사망률이 같고 steepness가 다른 경우, 어획사망률에 따른  $SSBPR$ , 어획사망률에 따른  $YPR$ 의 차이가 없었고, steepness가 같고 자연사망률이 다른 경우에는 차이가 났다. 어획사망률에 따른 어획량의 경우, 자연사망률이 같고 steepness가 다를 때, steepness가 증가할수록  $MSY$ 는 감소하였고, steepness가 같고 자연사망률이 다를 때, 자연사망률이 증가할수록  $MSY$ 는 증가하였다(Fig. 1). Steepness와 자연사망률에 따른  $MSY$ 의 변동을 살펴보면 steepness가 0.5, 0.6일 때를 제외하고 자연사망률이 증가함에 따라  $MSY$ 는 감소하다 증가하는 경향이 있었다. Steepness가 0.5일 때는  $MSY$ 가 증가하다 감소하였다 다시 증가하였고, steepness가 0.6일 때는  $MSY$ 가 감소, 증가, 감소, 증가하였다. 자연사망률이 0.05 per year 이상, 0.3 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서  $MSY$ 는 감소하는 경향이 있었고, 자연사망률이 0.35 per year 이상, 1.25 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서  $MSY$ 는 감소하다 증가하였다. 그리고 자연사망률이 1.3 per year 이상, 1.4 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서  $MSY$ 는 증가하였다(Fig. 2).

#### Southern New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리가자미

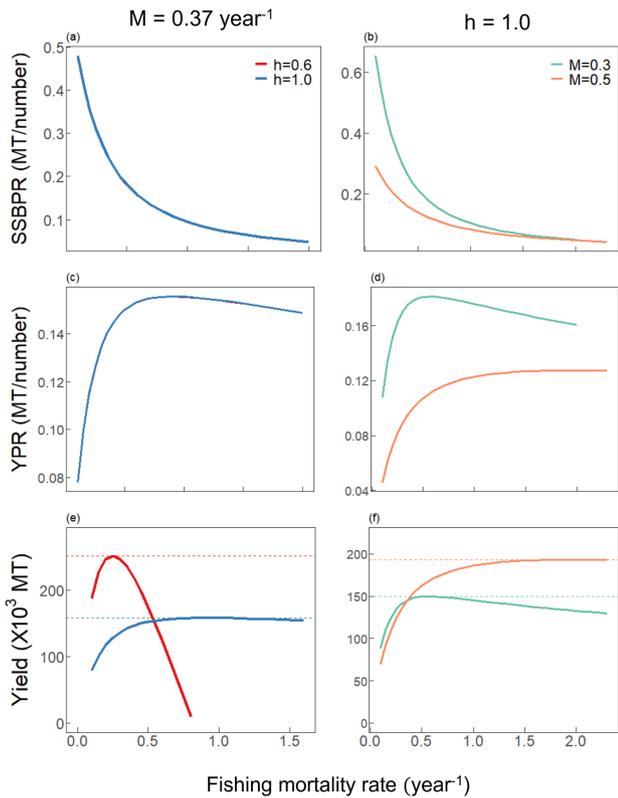


Fig. 1. Spawning stock biomass per recruit (SSBPR), yield per recruit (YPR) and yield under different combinations of natural mortality rate and steepness for chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters. Left panels (a, c, e) illustrate those with fixed natural mortality rate and varying steepness whereas right panels (b, d, f) illustrate those with varying natural mortality rates and fixed steepness.

자연사망률이 같고 steepness가 다른 경우, 어획사망률에 따른 SSBPR, 어획사망률에 따른 YPR이 차이가 없었고, steepness가 같고 자연사망률이 다른 경우에는 차이가 났다. 어획사망률에 따른 어획량의 경우, 자연사망률이 같고 steepness가 다를 때에 steepness가 증가할수록 MSY가 증가하였으며, steepness가 같고 자연사망률이 다를 경우엔 자연사망률이 증가할수록 MSY가 증가하였다(Fig. 3). Steepness와 자연사망률에 따른 MSY의 변동을 살펴보면 steepness가 0.25부터 0.45까지는 자연사망률이 증가함에 따라 대체적으로 MSY는 증가하는 경향이 있었고, steepness가 0.5부터 1.0까지는 자연사망률이 증가함에 따라 MSY가 감소하다 증가하는 경향이 있었다. 자연사망률이 0.05 per year 이상, 0.3 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서 MSY는 감소하는 경향이 있었고, 자연사망률이 0.35 per year 이상, 0.5 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서 MSY는 감소하다 증가하였다. 그리고 자연사

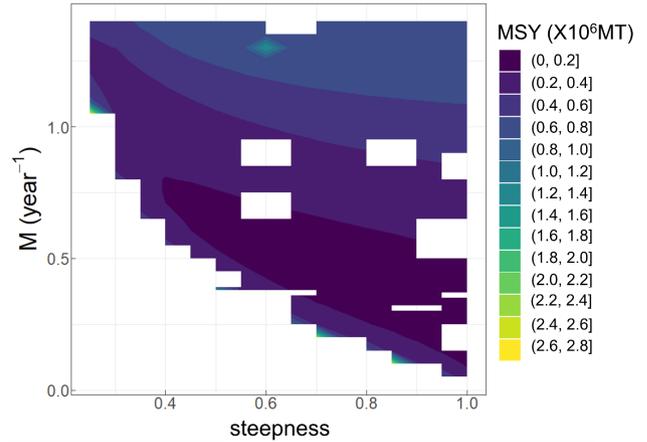


Fig. 2. MSY for chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters. MSY, Maximum sustainable yield.

망률이 0.55 per year 이상, 1.4 per year 이하에서는 steepness가 증가함에 따라서 MSY는 증가했다(Fig. 4).

예시로 사용된 개체군들에게 적합한 steepness와 자연사망률 쌍 분석

한국 연근해에 서식하는 고등어의 경우 자연사망률 0.37 per year, steepness 1.0인 쌍에서 목적함수 값이 가장 낮았다. Southern New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리자미의 경우 자연사망률 0.8 per year, steepness 0.35인 쌍에서 목적함수 값이 가장 낮았다(Fig. 5). 목적함수는 식 (A.19)이다.

고찰

가입은 산란자원량뿐만 아니라 해양 환경에 의해서도 결정된다. 많은 어류들은 초기 생활사 시기에 부유생물 시기를 가진다. 이 시기의 생물들은 유영 능력 없이 해류를 따라 부유하고, 크기가 작기 때문에 환경적 변화에 더 민감하여, 가입은 해양 환경에 의해서도 결정될 수 있다. 특히 forage fish의 경우 가입이 산란 자원량보다 해수면 온도나 먹이 풍부도와 같은 환경에 더 많은 영향을 받는다고 알려져 있다(Essington et al., 2015; Szuwalski and Hilborn, 2015; Lindegren et al., 2018). 즉 steepness가 1이라고 여겨질 수 있다. 여기서 forage fish란 동물성 플랑크톤을 먹이로 하는 어류로 대형 어류, 바닷새, 해양 포유류와 같은 상위 영양 수준의 포식자에게 에너지를 전달함으로써 해양 생태계에서 중요한 역할을 하고, 전 세계 어업의 약 20%를 차지할 정도로 생태적으로, 경제적으로 중요한 어종들이다(Essington et al., 2015; Szuwalski et al., 2019). 그렇기 때문에 어종의 forage fish의 해당 여부에 따라서 산란-가입 관계가 달라질 수 있음을 유의하여 수산자원평가에 적용하여야 한다.

한국 연근해에 서식하는 고등어의 경우 0-300 m에 서식하는

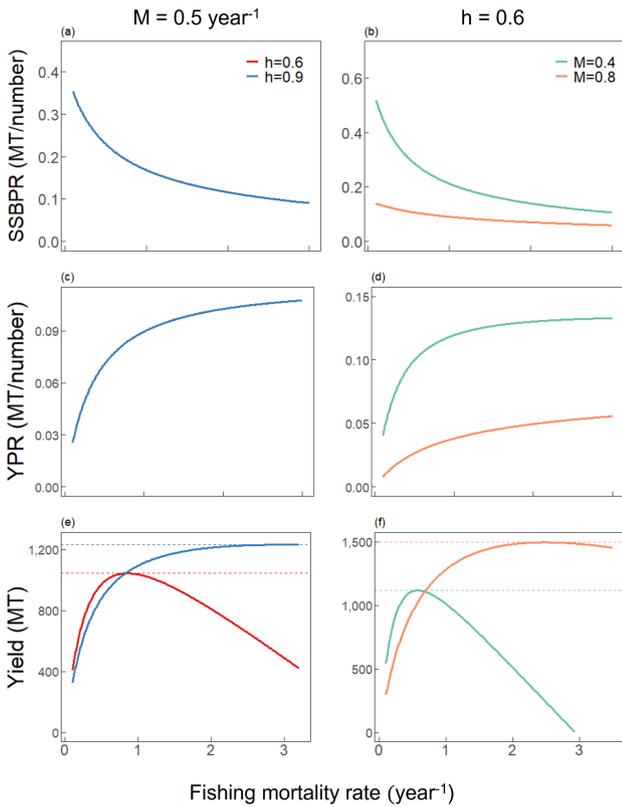


Fig. 3. Spawning stock biomass per recruit (*SSBPR*), yield per recruit (*YPR*) and yield under different combinations of natural mortality rate and steepness for yellowtail flounder *Limanda ferruginea* in Southern New England-Mid Atlantic. Left panels (a, c, e) illustrate those with fixed natural mortality rate and varying steepness whereas right panels (b, d, f) illustrate those with varying natural mortality rates and fixed steepness.

유영 어류(pelagic fish)이고, 알 또한 부유란으로 해양 환경이 가입에 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있었고, 많은 연구들에서는 고등어를 forage fish로 분류하여(Szuwalski and Hilborn, 2015; Hilborn et al., 2017; Richards et al., 2018), 고등어의 가입은 해양 환경에 큰 영향을 받는다고 예상할 수 있었다. 이러한 예상과 같이 민감도 분석 결과 또한 steepness가 1.0으로 해당 개체군의 가입은 산란자원에 상관없이 환경에 의해 결정되는 것을 시사한다. 다른 예시로 이용된 Southern New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리가자미의 경우 20–100 m의 얇은 곳에서 서식하고, 저서성 어류(demersal fish)이며, 해저에서 침성란을 방란한다. 또한 해당 개체군의 주된 먹이는 갑각류와 갯지렁이들로 forage fish로 분류되지 않는다(Link et al., 2002). 따라서 가입에 대한 해양 환경의 영향이 고등어에 비해서 적을 것이라고 예상된다. 이러한 예상과 같이 민감도 분석 결과 또한 steepness가 0.35으로 해당 개체군의 가입은 산란자

원에 크게 영향을 받는다고 해석할 수 있다.

고등어 개체군의 선행연구를 살펴보면 Kuriyama et al. (2023)에서는 미국의 태평양 연안에 서식하는 고등어의 steepness가 0.75로 가정하여 자원평가를 수행하였다. Kim (2021)에서는 한국 연근해에 서식하는 고등어의 자연사망률을 0.11 per year과 0.13 per year으로 추정되었고, 같은 개체군을 대상으로 한 Gim et al. (2020)에서는 자연사망률을 0.38 per year으로 추정하였다. 본 연구의 민감도 분석 결과와 Gim et al. (2020)은 같은 연구구조평가모델을 사용하였고, 민감도 분석 방법을 이용해 자연사망률을 추정하여 상이한 결과를 확인할 수 있었다. Southern New England-Mid Atlantic 노랑꼬리가자미의 선행연구는 Thorson (2020)에서는 가자미목(Pleuronectiformes)의 steepness를 0.76으로 추정하였다. Miller and Brooks (2021)에서는 Southern New England-Mid Atlantic 노랑꼬리가자미의 steepness를 0.53으로 추정하였다. NOAA에서는 Southern New England-Mid Atlantic 노랑꼬리가자미의 자원평가를 위해서 자연사망률을 0.2 per year로 가정하여 수행하여 왔고(Cadrin, 2003), 근접한 지역인 Georges Bank에 서식하는 노랑꼬리가자미의 자연사망률은 0.963 per year (1세), 0.689 per year (2세), 0.585 per year (3세), 0.534 per year (4세), 0.513 per year (5세), 0.514 per year (6세), 0.538 per year (7세), 0.592 per year (8세), 0.696 per year (9세), 0.908 per year (10세)으로 추정되었다(Alade et al., 2014). 노랑꼬리가자미의 선행연구결과와 본 연구의 결과와는 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다.

여러 연구에서 steepness와 자연사망률은 약한 음의 상관관계를 가진다고 밝혔다(Legault and Palmer, 2016; Punt et al., 2021; Taylor et al., 2022). 본 연구의 민감도 분석 결과 또한 한국 연근해의 고등어의 Southern New England-Mid Atlantic에 서식하는 노랑꼬리가자미에 비해서 steepness는 높았고, 자연사망률은 낮아 선행 연구의 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 식 (2)를 Beverton-Holt 관계식으로 다시 정리해보면 다음과 같이 정리할 수 있다:

$$h = \frac{\frac{\alpha \cdot 0.2 \cdot SSB_0}{\beta + 0.2 \cdot SSB_0}}{\frac{\alpha \cdot SSB_0}{\beta + SSB_0}} = \frac{0.2\beta + 0.2 \cdot SSB_0}{\beta + 0.2 \cdot SSB_0} \dots \dots \quad (11)$$

$$\lim_{SSB_0 \rightarrow 0} h = 0.2, \quad \lim_{SSB_0 \rightarrow \infty} h = 1.$$

$SSB_0$ 는 미어회상항에서의 산란자원량이다. 위와 같이 표현할 수 있고, 자연사망률이 증가하면  $SSB_0$ 는 감소할 것이기 때문에, 자연사망률과 steepness는 서로 반비례한다고 해석할 수 있다. 본 연구의 결과 또한 자연사망률이 상대적으로 낮은 고등어의 경우 steepness가 높았고, 자연사망률이 상대적으로 높은 노랑꼬리가자미의 경우 steepness가 낮았다. 여러 선행연구 결

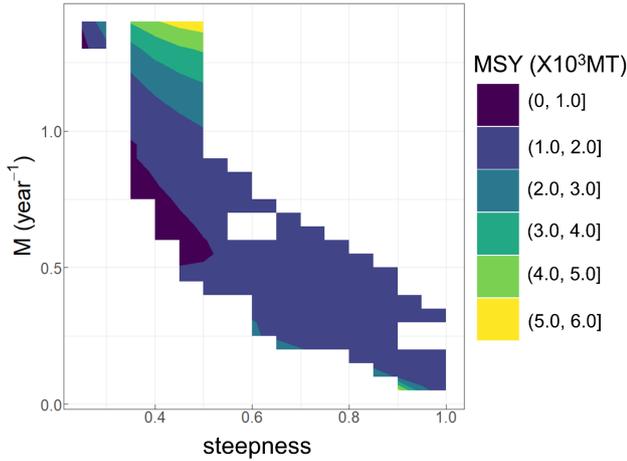


Fig. 4. MSY for yellowtail flounder *Limanda ferruginea* in Southern New England-Mid Atlantic. MSY, Maximum sustainable yield.

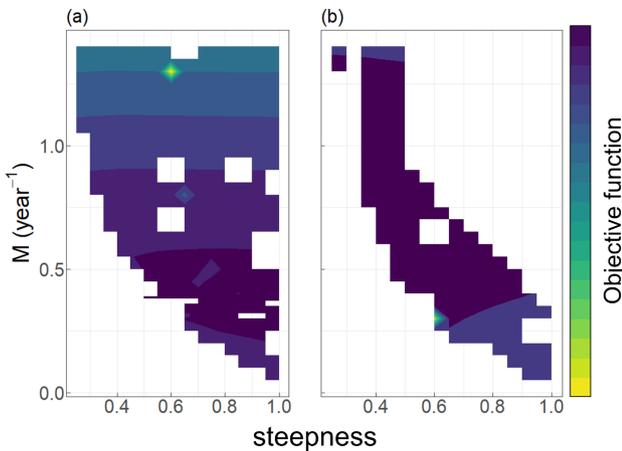


Fig. 5. Objective function values for chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters (panel a) and yellowtail flounder *Limanda ferruginea* in Southern New England-Mid Atlantic (panel b)

과와 본 연구의 민감도 분석 결과가 일치한 점을 통해 자료의 부족으로 steepness와 자연사망률을 모델 내에서 추정하기 어려운 경우, 민감도 분석을 통해서도 신뢰할 수 있는 결과를 도출할 수 있다는 것을 확인하였다.

Steepness, 자연사망률과 MSY의 관계를 살펴보면(Fig. 2, Fig. 4), 두 개체군 모두 어떤 지점에서 자연사망률이 낮거나 높을 때 MSY가 커졌다. 자연사망률이 낮은 경우에는 개체군의 크기가 커져 MSY가 크다고 해석할 수 있다. 반면, 자연사망률이 높을 때 MSY가 큰 것은  $R_0$ 와 관련이 있다.  $R_0$ 란 산란-가

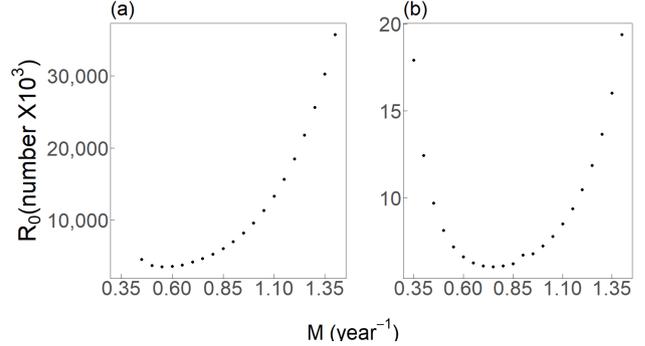


Fig. 6. Relationship between  $M$  (natural mortality rate) and  $R_0$  (number of unfished recruitment) for chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters (panel a) and yellowtail flounder *Limanda ferruginea* in Southern New England-Mid Atlantic (panel b).

입 관계식의 모수 중 하나로, 미어확상황에서의 가입개체수를 나타낸다. MSY를 계산하는 과정에서  $R_0$ 가 어떤 영향을 미치는지 살펴보면 식 (10)를 식 (7)을 이용해  $R_0$ 와  $h$ 로 나타내면  $Y_t(F) = YPR_t(F) \cdot \frac{4 \cdot h \cdot R_0}{5h-1} - \frac{1-h}{R_0(5h-1)}$ 로 나타낼 수 있다. 즉,  $\frac{4 \cdot h \cdot R_0}{5h-1}$ 는 커지고,  $\frac{1-h}{R_0(5h-1)}$ 는 작아진다. 또한  $YPR_t(F)$ 는 대부분 1보다 작은 값이다. 그리하여  $R_0$ 가 커지면 MSY 또한 커진다. 자연사망률이 커지면 Fig. 6과 같이  $R_0$ 는 감소했다가 증가한다. 즉, 자연사망률이 커졌을 때, MSY가 같이 커지는 경향이 있다.

Steepness로 재모수화한 산란-가입 모델이 문제가 있다는 의견들이 있다(Miller and Brooks, 2021; Brooks, 2024). 이 연구들에서 주목하는 것은 steepness 값이 시기에 따라 달라질 수도 있는데, 하나의 값을 사용한다는 것이다. Steepness 계산을 위해서는  $R_0$  혹은  $SSB_0$ 가 필요하다. 실제로는 steepness와  $R_0$  또는  $SSB_0$ 는 매년 추정될 수 있는데, 임의의 한 연도의 값만 사용하는 것이 문제라고 지적하고 있다. 또한 steepness를 Bayesian 방법을 이용해서 추정할 시에, prior로 인해서 steepness 추정치에 큰 편향이 생길 수 있다. 이러한 이유들로 인해서 산란-가입 관계식의 steepness 재모수화보다 기존의  $\alpha, \beta$ 를 모수로 하는 산란-가입 관계식을 이용하는 것이 더 바람직하다고 발표하였다. 하지만 산란-가입 관계식의 기존 모수인  $\alpha, \beta$ 를 추정하기 어려운 경우, steepness는 값의 범위가 작고, 단위가 없어 메타 분석이 용이하여 기존의  $\alpha, \beta$ 를 모수로 하는 산란-가입 관계식의 좋은 대안이 되어왔다. 그리고 steepness 값을 통해서 개체군의 생산성을 직관적으로 이해할 수 있으므로 steepness에 대한 연구는 이루어져야 한다.

본 연구는 연령구조모델의 모수인 steepness와 자연사망률이 MSY에 미치는 영향을 평가하여, 연령구조모델 연구를 위한 기초 연구가 될 것이다. 또한 더 정확한 MSY의 추정을 위해서 모델 내에서 steepness와 자연사망률을 추정하는 것이 필요한데 이는 현재 학계에서 중요하게 연구되는 주제이다. 하지만 이를 위해서 장기간의 과학조사(survey) 자료 특히 연령조성자료

(예, 연도별 어획개체수 내 연령조성; 연도별 과학조사 서베이 인덱스내 연령조성, 등)가 필요하다. 더 효율적인 자원관리를 위해서 국내에도 양질의 자료 수집이 필요하다.

## 사 사

본 연구는 2023년도 부경대학교 자율창의학술연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 사용된 데이터는 한국 통계청(<https://kosis.kr/index/index.do>), NOAA(<https://apps-nefsc.fisheries.noaa.gov/saw/sasi.php>)에서 수집하였으며, 국립수산과학원에서 제공받았습니다.

## References

- Alade L, McElroy D and Towle E. 2014. Re-evaluation of Georges Bank yellowtail flounder natural mortality based on life history approaches. Northeast Fisheries Science Center, Woods Hole, MA, U.S.A.
- Brooks EN. 2024. Pragmatic approaches to modeling recruitment in fisheries stock assessment: A perspective. *Fish Res* 270, 106896. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2023.106896>.
- Cadrin SX. 2003. Stock Assessment of Yellowtail Flounder in the Southern New England Mid-Atlantic area. Northeast Fisheries Science Center reference document 03-02, National Marine Fisheries Service, Woods Hole, MA, U.S.A.
- Dorn MW. 2002. Advice on West Coast rockfish harvest rates from Bayesian meta-analysis of stock– recruit relationships. *N Am J Fish Manag* 22, 280-300. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2002\)022<0280:AOWCRH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2002)022<0280:AOWCRH>2.0.CO;2).
- Essington TE, Moriarty PE, Froehlich HE, Hodgson EE, Koehn LE, Oken KL, Siple MC and Stawitz CC. 2015. Fishing amplifies forage fish population collapses. *Proc Natl Acad Sci* 112, 6648-6652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422020111>.
- Gim J, Hyun S and Lee JB. 2020. Management reference points for Korea chub mackerel *Scomber japonicus* stock. *Korean J Fish Aquat Sci* 53, 942-953. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0942>.
- He X and Field JC. 2019. Effects of recruitment variability and fishing history on estimation of stock-recruitment relationships: Two case studies from US west coast fisheries. *Fish Res* 217, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2018.06.001>.
- Hilborn R, Amoroso RO, Bogazzi E, Jensen OP, Parma AM, Szuwalski C and Walters CJ. 2017. When does fishing forage species affect their predators?. *Fish Res* 191, 211-221. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2017.01.008>.
- Hilborn R and Walters CJ. 2013. Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics and Uncertainty. Springer New York, NY, U.S.A. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3598-0>.
- Hoening JM. 1983. Empirical use of longevity data to estimate mortality rates. *Fish Bull* 82, 898-903.
- Kim D. 2021. (A) State-space length-based assessment model for the Korea chub mackerel (*Scomber japonicus*) stock. M.S. Thesis, Pukyong National University, Busan, Korea.
- KOSTAT (Statistic Korea). 2000-2022. Statistical Database Fishery Production Survey. Retrieved from [https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT\\_1EW0003&vw\\_cd=MT\\_ZTITLE&list\\_id=K2\\_7&scrId=&seqNo=&lang\\_mode=ko&obj\\_var\\_id=&itm\\_id=&conn\\_path=MT\\_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do](https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EW0003&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=K2_7&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do) on on 11 Mar, 2022.
- Kuriyama PT, Zwolinski JP, Akselrud CA and Hill KT. 2023. Assessment of Pacific mackerel (*Scomber japonicus*) for US management in the 2023-24 and 2024-25 fishing years. NOAA Technical Memorandum NMFS SWFSC 688, National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington D. C., U.S.A. <https://doi.org/10.25923/cyh2-j145>.
- Legault CM and Brooks EN. 2013. Can stock–recruitment points determine which spawning potential ratio is the best proxy for maximum sustainable yield reference points?. *ICES J Mar Sci* 70, 1075-1080. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fst105>.
- Legault CM and Palmer MC. 2016. In what direction should the fishing mortality target change when natural mortality increases within an assessment?. *Can J Fish Aquat Sci* 73, 349-357. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2015-0232>.
- Lindegren M, Van Deurs M, MacKenzie BR, Worsøe Clausen L, Christensen A and Rindorf A. 2018. Productivity and recovery of forage fish under climate change and fishing: North Sea sandeel as a case study. *Fish Oceanog* 27, 212-221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/fog.12246>.
- Link JS, Bolles K and Milliken CG. 2002. The feeding ecology of flatfish in the Northwest Atlantic. *J Northw Atl Fish Sci* 30, 1-17. <https://doi.org/10.2960/J.v30.a1>.
- Mace PM and Doonan IJ. 1988. A Generalized Bioeconomic Simulation Model for Fish Population Dynamics. New Zealand Fishery Assessment Research Document 88/4. Fisheries Research Center, Wellington, New Zealand.
- Mangel M, MacCall AD, Brodziak J, Dick E, Forrest RE, Pourzand R and Ralston S. 2013. A perspective on steepness, reference points, and stock assessment. *Can J Fish Aquat Sci* 70, 930-940. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-0372>.
- Miller TJ and Brooks EN. 2021. Steepness is a slippery slope. *Fish Fish* 22, 634-645. <https://doi.org/10.1111/faf.12534>.
- Miller TJ and Hyun SY. 2018. Evaluating evidence for alternative natural mortality and process error assumptions using a state-space, age-structured assessment model. *Can J Fish Aquat Sci* 75, 691-703. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2017-0035>.
- Myers RA, Bowen KG and Barrowman NJ. 1999. Maximum reproductive rate of fish at low population sizes. *Can J Fish Aquat Sci* 56, 2404-2419. <https://doi.org/10.1139/f99-201>.

- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 1973-2021. Stock Assessment Support Information. Retrieved from <https://apps-nefsc.fisheries.noaa.gov/saw/sasi.php> on 2 Mar, 2023.
- Pauly D. 1980. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. ICES J Mar Sci 39, 175-192. <https://doi.org/10.1093/icesjms/39.2.175>.
- Punt AE, Castillo-Jordán C, Hamel OS, Cope JM, Maunder MN and Ianelli JN. 2021. Consequences of error in natural mortality and its estimation in stock assessment models. Fish Res 233, 105759. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105759>.
- Richards DJ, Renaud L, Agarwal N, Starr Hazard E, Hyde J and Hardiman G. 2018. De Novo hepatic transcriptome assembly and systems level analysis of three species of dietary fish, *Sardinops sagax*, *Scomber japonicus*, and *Pleuronichthys verticalis*. Genes 9, 521. <https://doi.org/10.3390/genes9110521>.
- Szuwalski CS, Britten GL, Licandeo R, Amoroso RO, Hilborn R and Walters C. 2019. Global forage fish recruitment dynamics: A comparison of methods, time-variation, and reverse causality. Fish Res 214, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.01.007>.
- Szuwalski CS and Hilborn R. 2015. Environment drives forage fish productivity. Proc Natl Acad Sci 112, E3314-E3315. <https://doi.org/10.1073/pnas.1507990112>.
- Taylor N, Sharma R and Arocha F. 2022. A Stochastic prior on steepness for Atlantic swordfish derived from life history information. Collect Vol Sci Pap ICCAT 79, 693-704.
- Thorson JT. 2020. Predicting recruitment density dependence and intrinsic growth rate for all fishes worldwide using a data-integrated life-history model. Fish Fish 21, 237-251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/faf.12427>.

부 록

ASAP 모델 구조 기술

로그 스케일의 어획량이 정규분포를 따른다고 가정하였다. 로그 스케일의 어획량의 분산은 변동 계수(coefficient of variation)를 이용해서 입력값으로 고정하였다.

$$\log Y_t^{obs} \sim Normal(\log(\hat{Y}_t), \sigma_{\log Y}^2) \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\hat{Y}_t = \sum_a \frac{N_{t,a} \cdot F_t \cdot sel_a \cdot (1 - e^{-Z_{t,a}})}{Z_{t,a}} \cdot w_{t,a} \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\sigma_{\log Y}^2 = \log(CV_{\log Y}^2 + 1) \dots\dots\dots (A.3)$$

$Y_t^{obs}$ 는 관측된  $t$ 연도의 어획량,  $\hat{Y}_t$ 는 예측된  $t$ 연도의 어획량,  $\sigma_{\log Y}^2$ 는 로그 스케일의 어획량의 분산,  $N_{t,a}$ 는  $t$ 년도  $a$ 연령의 개체수,  $F_t$ 는  $t$ 연도의 어획사망률,  $sel_a$ 는  $a$ 연령의 어구선택성,  $Z_{t,a} = M + F_t \cdot sel_a$ 이고,  $M$ 은 자연사망률,  $w_{t,a}$   $t$ 연도의  $a$ 연령의 평균 체중,  $CV_{\log Y}$ 는 관측된 로그스케일의 어획량의 변동 계수이다.

로그 스케일의 CPUE 혹은 survey indices가 정규분포를 따른다고 가정하였다. 로그 스케일의 CPUE의 분산은 변동계수를 이용해서 입력값으로 고정하였다. 고등어의 경우 CPUE의 시점은 1월 1일로 가정하였고, 노랑꼬리가자미의 경우 NEFSC\_winter, NEFSC\_spring, NEFSC\_fall의 시점은 3월 1일, 4월 1일, 10월 1일로 가정하였다.

$$\log I_{s,t}^{obs} \sim Normal(\log(\hat{I}_{s,t}), \sigma_{\log I_s}^2) \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\hat{I}_{s,t} = q_s \cdot \sum_{a=1}^A [N_{t,a} \cdot (1 - e^{-\frac{indm_s}{12} \cdot Z_{t,a}}) \cdot w_{t,a} \cdot sel_{s,t,a}] \dots\dots\dots (A.5)$$

$$\sigma_{\log I_s}^2 = \log(CV_{\log I_s}^2 + 1) \dots\dots\dots (A.6)$$

$I_{s,t}^{obs}$ 는 survey  $s$ , 관측된  $t$ 연도의 CPUE 혹은 survey index,  $\hat{I}_{s,t}$ 는 예측된 survey  $s$ ,  $t$ 연도의 survey index 혹은 CPUE,  $\sigma_{\log I_s}^2$ 는 survey  $s$ 의 로그 스케일의 survey indices 혹은 CPUE의 분산,  $q_s$ 는 survey  $s$  혹은 CPUE의 catchability,  $indm_s$ 는 survey  $s$  혹은 CPUE의 조사를 진행한 시기(달),  $sel_{s,t,a}$ 는 survey  $s$ ,  $t$ 연도,  $a$ 연령의 survey 어구선택성,  $CV_{\log I_s}$ 는 관측된 로그 스케일의 survey  $s$  혹은 CPUE의 변동 계수이다.

로그 스케일의 연도별 연령별 CPUE 혹은 survey indices는 다항분포를 따른다고 가정하였다. 로그 스케일의 CPUE의 분산은 표본 크기를 이용해서 입력값으로 고정하였다.

$$I_{s,t} \sim multinomial(k_{s,t}, \hat{r}_{s,t}) \dots\dots\dots (A.7)$$

$$\hat{r}_{s,t,a} = \frac{I_{s,t,a}}{\sum_a \hat{I}_{s,t,a}} \dots\dots\dots (A.8)$$

$I_{s,t}$ 는 survey  $s$ ,  $t$ 연도의 관측된 survey indices의 연령 분포의 벡터이고,  $k_{s,t}$ 는 survey  $s$ ,  $t$ 연도의 표본 크기이고,  $\hat{r}_{s,t}$ 는 survey  $s$ ,  $t$ 연도의 예측된 survey indices의 연령 분포의 벡터이다.

어획개체수의 연령 분포는 다항분포를 따른다고 가정하였다.

$$A_t \sim multinomial(n_t, \hat{p}_t) \dots\dots\dots (A.9)$$

$$\hat{p}_{t,a} = \frac{C_{t,a}}{\sum_a \hat{C}_{t,a}} \dots\dots\dots (A.10)$$

$A_t$ 는  $t$ 연도의 관측된 어획개체수의 연령 분포의 벡터이고,  $n_t$ 는  $t$ 연도의 표본 크기이고,  $\hat{p}_t$ 는  $t$ 연도의 예측된 어획개체수의 연령 분포의 벡터이고,  $C_{t,a}$ 는  $t$ 연도,  $a$ 연령의 관측된 어획개체수,  $\hat{C}_{t,a}$ 는  $t$ 연도,  $a$ 연령의 예측된 어획개체수이다.

로그 규모의 가입개체수는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 또한 고등어의 산란 시점은 1월 1일로 가정하였고, 노랑꼬리가자미의 산란 시점은 5월 31일로 가정하였다.

$$\log R_t \sim Normal(\log(\hat{R}_t), \sigma_{\log R}^2) \dots\dots\dots (A.11)$$

$$\hat{R}_{t+1} = \frac{\alpha \cdot SSB_t}{\beta + SSB_t} \dots\dots\dots (A.12)$$

$$\sigma_{\log R}^2 = \log(CV_{\log R}^2 + 1) \dots\dots\dots (A.13)$$

$R_t$ 는  $t$ 연도의 가입개체수,  $\hat{R}_t$ 는 예측된  $t$ 연도의 가입개체수,  $\sigma_{\log R}^2$ 는 로그 스케일의 가입개체수의 분산,  $CV_{\log R}$ 는 로그 스케일 가입개체수의 변동 계수이다.

해당 모델에서 어구선택성을 결정하는 모수( $\alpha_{sel}, \beta_{sel}$ ), 어획사망률을 결정하는 모수( $F_1, F_{devs,t}$ ), 매 연도의 가입개체수를 결정하는 모수( $R_{devs}$ ), 첫 번째 연도의 개체수를 결정하는 모수( $N_{year1 dev}$ ), 어구별 어획 상수( $q_g$ ), 어획이 없는 상태의 가입개체수( $R_0$ )와 survey indices의 선택성( $sel_{s,t,a}$ )을 자유 모수로써 추정한다.

해당 모델에서 어획량에 대한 우도 함수, CPUE 혹은 survey indices에 대한 우도 함수, CPUE 혹은 survey indices의 연령 분포에 대한 우도 함수, 가입개체수에 대한 페널티 우도 함수, 어획개체수의 연령 분포에 대한 우도 함수는 아래와 같다.

$$L_Y = \prod_{t=1}^T Normal(\log(Y_t) | \log(\hat{Y}_t), \sigma_{\log Y}^2) \dots\dots\dots (A.14)$$

$$L_{I_s} = \prod_{t=1}^T Normal(\log(I_{s,t}) | \log(\hat{I}_{s,t}), \sigma_{\log I_s}^2) \dots\dots\dots (A.15)$$

$$L_S = \prod_{s=1}^S \left[ \prod_{t=1}^T (k_t! \cdot \prod_x \frac{\hat{r}_{t,a}^{r_{t,a}}}{r_{t,a}!}) \right] \dots\dots\dots (A.16)$$

$$L_R = \prod_{t=1}^T \text{Normal}(\log(R_t) | \log(\hat{R}_t), \sigma_{\log R}^2) \dots (A.17)$$

$$L_A = \prod_{t=1}^T (n_t! \cdot \prod_x \frac{\hat{p}_{t,a}^{p_{t,a}}}{p_{t,a}!}) \dots\dots\dots (A.18)$$

*Normal*(*X* | *Y*, *Z*)는 기댓값 *Y*, 분산 *Z*를 가지는 *X*의 정규분포를 뜻한다. 자유 모수들을 추정하기 위해서 위의 모든 우도함수들을 결합한 결합 우도함수를 이용하였다. 더 자료에 잘 맞는 모수를 추정하기 위해서 가중치를 적용하였고, 연령분포에 대한 우도함수의 경우는 표본 크기를 가중치라고 해석할 수 있다.

$$L = \lambda_Y \cdot \{-\log(L_Y)\} + \lambda_I \cdot \{-\log(L_I)\} + \{-\log(L_S)\} + \lambda_R \cdot \{-\log(L_R)\} + \{-\log(L_A)\} \dots (A.19)$$

$\lambda_Y$ 는 어획량에 대한 우도함수의 가중치,  $\lambda_I$ 는 survey *s*의 survey indices 혹은 CPUE에 대한 우도함수의 가중치,  $\lambda_R$ 는 가입 개체수에 대한 우도함수의 가중치이다. 본 연구의 목적은 정확한 자원평가가 아닌 steepness와 자연사망률에 대한 MSY의 변동을 검토하는 것이므로 각 우도함수에 대한 변동 계수, 표본 크기, 가중치는 임의로 설정하였고(Appendix Table 1, Appendix Table 2), 노랑꼬리가자미의 각 survey의 변동계수와 survey의 표본 크기는 다운받은 데이터의 것을 그대로 사용하였다 (<https://apps-nefsc.fisheries.noaa.gov/saw/sasi.php>).

Appendix Table 1. Input values for stock assessment of chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters

Input component	Fixed value
CV of yield	0.1
CV of index	0.1
CV of recruitment	0.6
Sample size of age proportion for index	-
Sample size of age proportion for catch	25
Weight of likelihood for yield	3.5
Weight of likelihood for index	2
Weight of likelihood for recruitment	0.6

CV, Coefficient of variation.

Appendix Table 2. Input values for stock assessment of yellow-tail flounder *Limanda ferruginea* in Southern New England-Mid Atlantic

Input component	Fixed value
CV of yield	0.1
CV of recruitment	0.6
Sample size of age proportion for index	NEFSC_spring 20 NEFSC_fall 20 NEFSC_winter 20
Weight of likelihood for yield	1
Weight of likelihood for index	NEFSC_spring 1 NEFSC_fall 1 NEFSC_winter 1
Weight of likelihood for recruitment	0.3

CV, Coefficient of variation.