

모의실험을 통한 한국 연근해 고등어(*Scomber japonicus*)의 가입당 생산 분석

이경환 · 고성길 · 정석근*

제주대학교 해양생명과학과

Simulation-based Yield-per-recruit Analysis of Chub Mackerel *Scomber japonicus* in Korean Waters

Kyunghwan Lee, Seonggil Go and Sukgeun Jung*

Department of Marin Life Science, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Chub mackerel *Scomber japonicus* is an economically important pelagic species in the western North Pacific. In the last 50 years, the annual total catch in Korean waters showed large fluctuations, ranging from 100 to 420×10³ tons. To provide a biological reference point for management of chub mackerel, we applied a simulation-based yield-per-recruit (Y/R) model that considered both temperature-dependent growth and size-dependent mortality. We estimated the fisheries yield with respect to varying biological reference points and environmental conditions, including 1) the instantaneous rate of fishing mortality (F), 2) length of fish at first capture (L_c), and 3) water temperature. The result of our analysis showed that the Y/R could be greatest when the L_c ranges from 19-27 cm and F ranges from 1.48–2.00 yr⁻¹. Y/R increases with increased water temperature between 15 and 23 °C. We suggest targeting an L_c of 17 cm (age=0.6 years) under the assumed current of F=0.48 yr⁻¹ for maximizing the chub mackerel harvest. Further analysis considering spawning and recruitment processes are required to provide biological reference points to ensure the sustainability of chub mackerel fisheries in Korean waters.

Key words: Chub mackerel, Potential yield, Fisheries management, Stock assessment

서론

고등어(*Scomber japonicus*)는 농어목 고등어과에 속하는 어류로 우리나라를 비롯한 일본, 중국 및 아열대와 온대해역 대륙붕의 수심 10-100 m, 수온 15 °C 내외에 분포하는 부어류다(Yamada et al., 2007; NFRDI, 2010). 우리나라 주변 해역의 고등어는 쿠로시오 난류 어군과 태평양 어군으로 나뉘며, 쿠로시오 어군은 동중국해에서 우리나라 황해와 동해, 태평양 어군은 일본 태평양 연안에 분포한다(Watanabe et al., 2002). 우리나라에서 어획하는 어군은 쿠로시오 어군으로 2-4월 동중국해 남해와 일본 서부 해역에 산란하며, 봄과 여름에 우리나라 황해와 동해로 북상하고 가을과 겨울에 동중국해로 남하하는 회유형태를 나타낸다(Hiyama et al., 2002; Yamada et al., 2007; NFRDI, 2010). 고등어는 성장이 빠른 어종으로 부화 후 약 1년

만에 성숙체장에 도달하며, 1세는 28 cm, 2세는 32.7 cm, 3세는 36.7 cm, 4세가 되면 39.4 cm 까지 성장하는 것으로 알려져 있다(Hwang et al., 2008b; Yoon et al., 2008).

고등어, 전갱이(*Trachurus japonicus*), 정어리(*Sardinops melanostictus*)와 같은 회유성 어종의 어획량은 생물학적 특성이나 어장환경 여건에 따라 큰 변동을 보인다(Cha et al., 2002; Watanabe et al., 2002). 우리나라 고등어는 1999년부터 연간 어획할 수 있는 어획량을 설정하여 자원을 관리하는 총허용어획량(total allowable catch, TAC) 대상어종으로 대부분 선망어업에 의하여 제주도를 중심으로 한국 남해, 동해남부, 황해남부 해역 그리고 제주도 이남의 동중국해에서 어획되며 어획량은 1970년대부터 1995년까지 연간 약 10-20만톤, 1996년에 약 42만톤까지 증가하였으나 2000년에는 15만톤 수준으로 감소하였다(Cha et al., 2002; Lee and Kim, 2011; Oh et al., 2016). 우

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0313>



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.

Korean J Fish Aquat Sci 51(3) 313-320, June 2018

Received 16 May 2018; Revised 5 June 2018; Accepted 11 June 2018

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 754. 3424 Fax: +82. 64. 756. 3493

E-mail address: sukgeun.jung@gmail.com

리나라 고등어 어장 분포는 월별 차이를 나타냈는데 5-6월 제주도 주변 해역에서 어장이 형성되어 8월에는 황해중부해역, 12월에는 황해 어장이 소멸되고 동해남부로 이동하는 패턴을 나타냈다(Cha et al., 2002; Lee and Kim, 2011). 이는 Jung et al. (2014)이 보고한 수온이 고등어 주요 서식 위도 변동에 미치는 영향과 Lee and Kim (2011)의 월별 어장 크기변동 연구 결과에 따라 동중국해 고등어 어군 분포 변동은 쿠로시오 해류의 확장 과 축소에 영향을 받아 나타나는 차이로 해석할 수 있다.

최근까지 진행된 우리나라 주변해역 고등어에 대한 국내 연구로 Choi et al. (2000)와 Hwang et al. (2008b)의 성장평가 연구와 Cha et al. (2002)의 성숙과 산란 연구, Yoon et al. (2008)의 섭이특성 연구, Lee et al. (2016)와 Jung et al. (2013)의 제주도 해역 난·차지어 분포 및 난의 비중과 수직분포 연구, Park et al. (2008)의 난 발달과 성장에 따른 자어 형태학적 특성 평가 연구, Hwang et al. (2008a)의 수온과 염분 변동이 난과 자어 발달에 미치는 영향 평가 연구가 진행되었다. 고등어 자원량 변동 평가 연구로 Cho et al. (1984)의 고등어 어획량 변동과 해양구조와의 관계 연구, Kim et al. (1999)의 해양환경요인 변동과 고등어의 어획량 장기 변동 분석 연구, Jung et al. (2014)의 기후 변화에 따른 고등어 주요 서식장 위도 변동 연구, Lee and Kim (2011)의 대형선망어업 자료를 이용한 고등어 어획변동 연구가 진행되었다. 국내에서 진행된 우리나라 주변해역 고등어 자원 평가 및 관리를 위한 생물학적특성치 추정 연구는 Shin (1981)의 생산을 추정 연구와 Choi et al. (2004a)의 어획개시 연령 및 순간사망계수 추정 연구, Choi et al. (2004b)의 자원평가 모델을 이용한 최대 지속적생산량(maximum sustainable yield) 및 최대 지속적 생산량을 유지하기 위한 어획노력량 등을 평가한 연구가 진행되었다. 동중국해 어군을 대상으로 국외에서 진행된 연구는 Chen et al. (2009)의 해양환경 변수를 이용한 고등어 주요 서식장 예측 모델 개발 연구와 Hiyama et al. (2002)의 수온변동과 고등어 자원 변동 관계 연구, Kamimura et al. (2015)의 자치어의 성장과 가입량의 관계 연구, Yukami et al. (2009)의 고등어 산란장 추정 연구가 있다. 국내외 연구동향에서 볼 수 있듯이 고등어 초기생활사 및 생물학적 특성 연구와 해양환경 변동과 관련한 자원변동 연구는 다양하게 진행 되었지만 고등어 자원 관리를 위한 생물학적 기준점 평가 연구는 상대적으로 부족한 상황이다.

어류의 성어는 유영능력을 가지고 있기 때문에 이상적인 서식 환경을 선택할 수 있지만 초기생활사인 알과 자어는 해양환경 변화에 취약한 시기이며, 유영능력이 미약하기 때문에 분포 및 가입과 성장은 해류와 수온, 염분과 같은 해양환경 변동에 많은 영향을 받는다(Brochier et al., 2009; Gilbert et al., 2010; Kim et al., 2011). 따라서, 본 연구는 이전 연구자들에 의해 초기 성장에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나인 수온을 반영하여 자어의 성장이 평가된 성장식과 연구 문헌으로 보고된 이석 자료를 이용하여 자어와 미성어·성어 시기의 성장을 각각 평가하고

최소어획체장과 수온변동에 따른 가입당 생산량 분석 연구에 적용함으로써 최근 감소하는 고등어 자원의 적정 어획을 위한 생물학적 기준점을 제시하고자 한다.

자료 및 방법

접근방법

고등어 가입당 생산량을 평가하기 위해 Go et al. (2018)과 Hwang et al. (2008b)이 연구하고 보고한 자료를 이용하여 자어와 미성어·성어 시기의 성장을 각각 평가하고 가랑이체장(fork length, cm)을 기준으로한 최소어획체장과 수온변동에 따른 가입당 생산량을 평가하였다.

고등어 가입당 생산량 변동 평가 시뮬레이션

최소어획체장(L_c , first catch length) 15-30 cm, 어획사망계수(F) 0-2 yr⁻¹에서 고등어 가입당 생산량(Y/R)을 비교하기 위해 다음의 조건으로 평가하고 생물학적 평가 기준으로 사용되는 초기 곡선의 기울기가 10%되는 지점인 $F_{0.1}$ 과 가입당 최대생산량을 가져오는 F_{max} 를 평가 하였다(Beverton and Holt, 1957; Deriso, 1987).

- 1) 고등어 평균 산란수온 20°C (NFRDI, 2010)에서 최소어획체장(L_c)과 어획사망계수(F) 변동에 따른 가입당 생산량을 평가함.
- 2) 1)과 동일한 어획체장 조건에서 우리나라 연평균 고등어 어업 어획강도로 추정되는 어획사망계수(F) 0.48 yr⁻¹ (NFRDI, 2005)일 때 L_c 변동에 따른 가입당 생산량 변동을 평가함.
- 3) 수온변동에 따른 가입당생산량을 평가하기 위해 고등어 최소어획체장(L_c) 15 cm일 때 NFRDI (2010)가 보고한 산란수온(15-23°C) 변동에 따른 가입당 생산량 변동을 평가함.

가정

고등어 가입당 생산분석을 위해 다음의 조건을 가정하였다.

- 1) 고등어의 수명은 최대 6년이다(NFRDI, 2010).
- 2) 고등어 자어의 성장은 수온에 영향을 받는다(Kim et al., 2011).
- 3) 자어와 미성어·성어의 구분 체장은 1.5 cm (standard length)를 기준으로 구분한다(Hunter and Kimbrell, 1980).
- 4) 부화한 고등어의 성장에 따른 순간자연사망계수는 체장에 반비례한다(Jung et al., 2009).
- 5) 분석을 위한 초기 난의 수는 10,000마리로 정한다.

일별 시뮬레이션

시뮬레이션은 6년을 기준으로(0-2,190 day) 일 단위로 평가 하였으며, 평가에 적용한 생물학적 특성은 다음의 과정으로 도출하여 적용하였다.

성장

Go et al. (2018)과 Hwang et al. (2008b)이 보고한 자료를 이용하여 고등어 자어와 미성어·성어 시기의 성장을 각각 평가하였다.

자어의 성장은 고펜츠(Gompertz) 성장식(Nancy, 1983)을 이용하였으며 가정 2)에 따라 수온별 자어의 성장이 잘 나타나 있는 Hunter and Kimbrell (1980)의 자료(Table 1 in Hunter and Kimbrell, 1980)를 이용하여 Go et al. (2018)이 평가한 성장계수(α)를 사용하여 평가하였다.

$$L_t = L_\infty / (L_0 / L_\infty)^{\exp(-\alpha * t)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\alpha = 0.0028 * e^{0.0971 * T} \quad \dots\dots\dots(2)$$

여기서 L_∞ 는 개체의 이론적 최대체장(cm), L_t 는 t 날짜의 체장(fork length, cm), t는 날짜($t=0-2,190$ day), α 는 성장계수, L_0 는 부화시 길이이다. 본 연구에서 L_∞ 는 미성어·성어시기의 성장을 평가한 본 버틀란피 성장식에서 평가된 계수를 적용하였으며, L_0 는 Hunter and Kimbrell (1980)이 보고한 태평양 고등어 부화 직후의 길이 0.31 cm를 적용하였다. 수온이 반영된 성장을 평가 하기 위해 Go et al. (2018)는 성장계수 α 를 수온에 대한 함수로 정의하였으며, 여기서 T는 수온(°C)을 의미한다.

자어의 일별 체장 변화는 고펜츠 성장식을 시간(t)으로 미분한 다음의 방정식으로 계산하였으며, t+1 날짜의 체장 L_{t+1} 는 다음의 방정식으로 도출하였다.

$$dL/dt = \alpha * L_t * \ln(L_t / L_\infty) * \ln(L_\infty / L_0) / \ln(L_0 / L_\infty) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$L_{t+1} = L_t + (dL/dt) \quad \dots\dots\dots(4)$$

여기서 α 는 식(2)와 동일하며, t+1 날짜의 체장은 t 날짜의 체장과 시간에 따른 체장의 변화율(dL/dt)에 따라 도출된다.

미성어·성어 시기의 성장은 Hwang et al. (2008b)이 보고한 0-4세 고등어 이석 자료를 이용하여 본 버틀란피 성장식으로 연령(year)에 따른 체장(FL)의 변화를 계산하였다.

$$L_t = L_\infty * (1 - \exp(-K * (t - t_0))) \quad \dots\dots\dots(5)$$

여기서, L_t 와 L_∞ , t의 의미는 자어 성장 평가에 적용한 고펜츠 성장식과 동일하며, K는 성장계수다. 길이가 0일 때의 이론적 시간 t_0 는 아래의 식으로 도출하여 적용하였다(Jung et al. 2009).

$$t_0 = 1/K * \ln(1 - L_0 / L_\infty) \quad \dots\dots\dots(6)$$

여기서, L_0 는 식(1)과 동일하다.

고등어 미성어와 성어는 선호하는 수온을 따라 능동적으로 이동할 수 있으므로 수온 변화에 따른 성장을 고려하지 않는 성장식을 적용하였으며, 일별 체장 변화율을 평가하기 위해 시간(t)로 미분한 본 버틀란피 성장식을 썼다.

$$dL/dt = K * (L_\infty - L_t) \quad \dots\dots\dots(7)$$

체중

일별 고등어 체중은 Choi et al. (2000)이 보고한 고등어 체장(FL)-체중(W) 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$W_t = 0.0044 * L_t^{3.362} \quad \dots\dots\dots(8)$$

여기서 W_t 는 t날짜의 개체별 체중이다.

순간자연사망계수와 순간전사망계수

본 연구 가정 4)에 따라 일별 순간자연사망계수는 Jung et al. (2009)이 보고한 방법을 따라 다음과 같은 식으로 추정하였다.

$$M_t = 0.1009 / L_t \text{ d}^{-1} \quad \dots\dots\dots(9)$$

여기서 M_t 는 t 날짜의 일별 순간자연사망계수(d^{-1})를 의미한다. 일별 순간어획사망계수는 아래의 식으로 계산하였다.

Table 1. Variation of $F_{0.1}$, F_{max} and $L_{c,max}$ with respect to varying water temperature condition (15, 17, 18, 23°C) during the early life stages of chub mackerel *Scomber japonicus*

Water temperature (°C)	$F_{0.1}$ (yr^{-1} , at $L_c=15$ cm)	F_{max} (yr^{-1} , at $L_c=15$ cm)	$L_{c,max}$ (at $F=0.48$ yr^{-1})	$L_{c,max}$ (at $F=0.87$ yr^{-1})
15	0.83	1.65	17 cm	20 cm
17	0.83	1.65	17 cm	20 cm
18	0.84	1.65	17 cm	20 cm
23	0.83	1.65	17 cm	20 cm

$F_{0.1}$, instantaneous rate of fishing mortality (F) at which the corresponding slope of yield-per-recruit curve equals to the 10% of the initial slope at the origin ($F=0$); F_{max} , the value of F at which the yield-per-recruit is maximized; L_c , the fork length at first capture; $L_{c,max}$, the value of L_c at which the yield-per-recruit is maximized when $F=0.48$ yr^{-1} (NFRDI, 2005) and 0.87 yr^{-1} (Choi et al., 2004b).

$$F_t = \begin{cases} F/365 & \text{if } L_t \geq L_c \\ 0 & \text{if } L_t < L_c \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

여기서 F_t 는 t 날짜의 순간어획사망계수를 L_c 는 최소어획체장이며, 연간 어획사망계수(yr^{-1})를 일 단위(d^{-1})로 계산하여 시물레이션에 적용하였다. 일별 순간전사망계수는 아래의 식으로 계산하였다.

$$Z_t = \begin{cases} M_t + (F/365) & \text{if } L_t \geq L_c \\ M_t & \text{if } L_t < L_c \end{cases} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 Z_t 는 t 날짜의 순간전사망계수이다.

일별 개체수와 가입당 생산량

시물레이션에 반영한 일별 개체수 변화는 다음의 방정식으로 계산하였다.

$$N_t = N_{t-1} * \exp(-Z) \dots\dots\dots (12)$$

여기서 N_t 는 t 날짜의 생존 개체수다. 일별 가입당 생산량은 Gulland (1965)의 어획방정식에 일별 개체의 체중을 반영하여 다음의 방정식으로 계산하였다(King, 2013).

$$Y_t = (F/Z) * N_t * (1 - \exp(-Z)) * W_t \dots\dots\dots (13)$$

여기서 Y_t 는 t 날짜의 가입당 생산량(g)이다. 6년동안 시물레이션한 고등어 가입당 총 생산량은 다음의 방정식으로 계산하였다.

$$Y = \sum_{d=0}^{2,190} Y_t \dots\dots\dots (14)$$

결 과

최소어획체장에 따른 가입당 생산량

고등어 평균 산란수온 20℃에서 시물레이션으로 평가한 최소어획체장(L_c) 15-30 cm, 어획사망계수(F) 0-2 yr^{-1} 에서 고등어 가입당 생산량은 L_c 19-27 cm, F 1.48-2 yr^{-1} 에서 약 1,830-1,925 g으로 최대생산량을 나타냈으며, L_c 와 관계없이 $F=0.04 yr^{-1}$ 이하에서는 200 g이하의 낮은 생산량을 나타냈다. 최소어획체장별 가입당 생산량은 $L_c=15-17$ cm일 때 F 의 증가에 따라 가입당 생산량이 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈지만 $L_c=18-30$ cm에서는 F 의 증가에 따라 지속적으로 가입당 생산량이 증가하였다(Fig. 1). 최소어획체장별 $F_{0.1}$ 은 $L_c=15, 20, 25, 30$ cm일 때 0.83, 1.02, 1.27, 1.56 (yr^{-1})로 L_c 가 증가함에 따라 $F_{0.1}$ 도 함께 증가하는 것으로 나타났다. F_{max} 는 $L_c=15-17$ cm에서 1.76, 1.8, 1.97 (yr^{-1})로 나타났으며, $L_c=18-30$ cm에서는 2

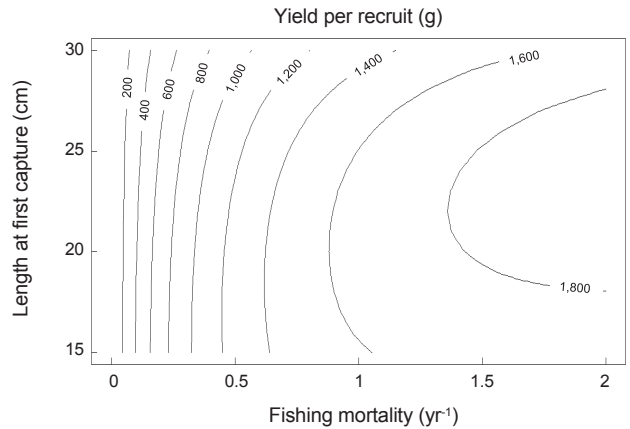


Fig. 1. Yield per recruit of chub mackerel *Scomber japonicus* with the varying length at first capture (L_c) and fishing mortality (F) when water temperature is assumed to be 20℃ for the growth during the larval stage (<1.5 cm in standard length).

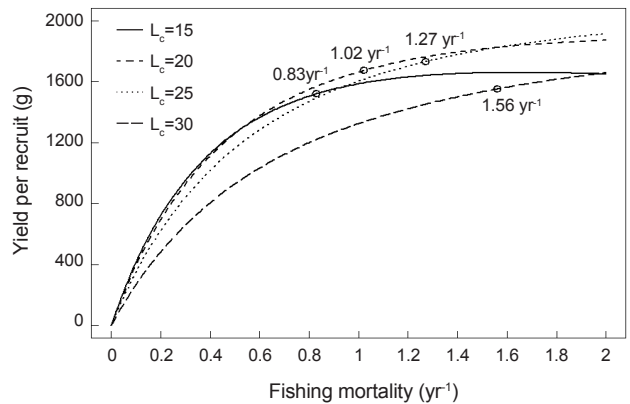


Fig. 2. Yield per recruit curve of chub mackerel *Scomber japonicus* varying with the length at first capture ($L_c=15, 20, 25, 30$ cm) and the corresponding values of $F_{0.1}$. $F_{0.1}$, the value of F at which the corresponding slope of yield-per-recruit curve equals to the 10% of the initial slope at the origin ($F=0$).

yr^{-1} 이상으로 나타났다(Fig. 2).

우리나라 고등어 어업 어획강도에서 최소어획체장 변동에 따른 가입당 생산량

NFRDI (2005)가 보고한 우리나라 연평균 고등어 어업의 어획사망계수(F)에서 최소어획체장(L_c) 변동에 따른 가입당 생산량 변동은 905-1,244.7 g으로 나타났으며, L_c 가 17 cm일 때 1,244.7 g으로 최대생산량을 나타냈다(Fig. 3).

수온변동에 따른 가입당 생산량

NFRDI (2010)가 보고한 산란수온 범위에서 가입당 생산량 변화는 현재 $L_c=15$ cm를 가정하면, 수온과 F 가 증가할수록 생

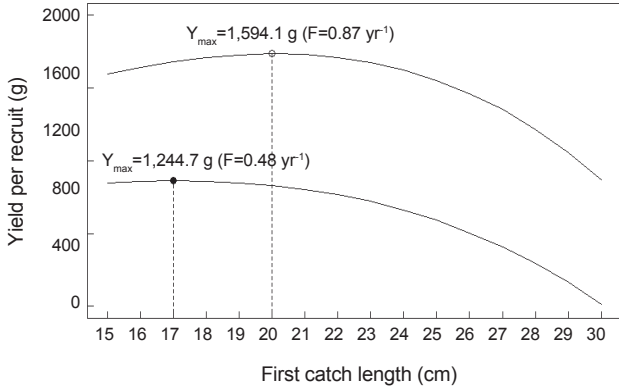


Fig. 3. Yield-per-recruits of chub mackerel *Scomber japonicus* at the reported fishing mortality of 0.48 yr^{-1} and 0.87 yr^{-1} with the varying length at first capture ranging from 15 to 30 cm in fork length. Y_{\max} is the maximum yield.

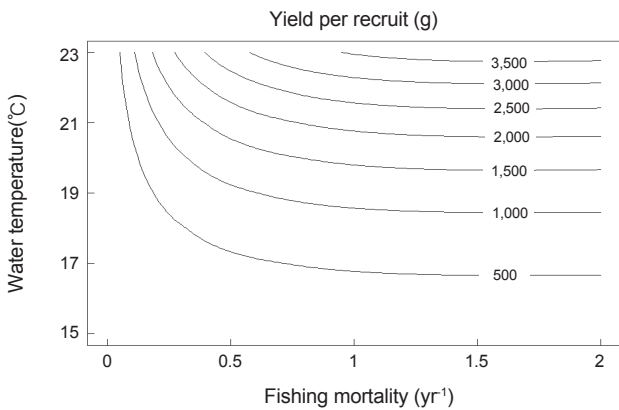


Fig. 4. Yield of chub mackerel *Scomber japonicus* with varying water temperature and instantaneous rate of fishing mortality (F) when the length at first capture=15 cm and the maximum length of the larva, whose growth is assumed temperature-dependent, is assumed to be 1.5 cm.

산량도 함께 증가하는 것으로 나타났으며, 수온 15-18°C에서 약 200-800 g, 19-20°C에서 약 1,110-1,650 g, 21-22°C에서 약 2,200-2,800 g, 23°C에서 3,702 g으로 최대생산량(F_{\max})을 나타냈다(Fig. 4). 수온 별 $F_{0.1}$ 과 F_{\max} 의 생산량은 최저 산란수온 15°C에서 $F_{0.1}$ 은 $F=0.83 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 208 g, F_{\max} 는 $F=1.65 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 227 g으로 나타났다. 산란 최적수온 17°C와 18°C에서 $F_{0.1}$ 은 $F=0.83, 0.84 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 가입당 생산량은 519, 765 g으로 각각 나타났으며, F_{\max} 는 $F=1.65 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 567, 833 g으로 나타났다. 평가 수온 중 가장 높은 23°C에서 $F_{0.1}$ 은 $F=0.83 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 가입당 생산량은 3,390 g으로 나타났으며, F_{\max} 는 $F=1.65 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 가입당 생산량은 3,702 g으로 수온이 증가함에 따라 $F_{0.1}$ 과 F_{\max} 지점의 생산량이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5).

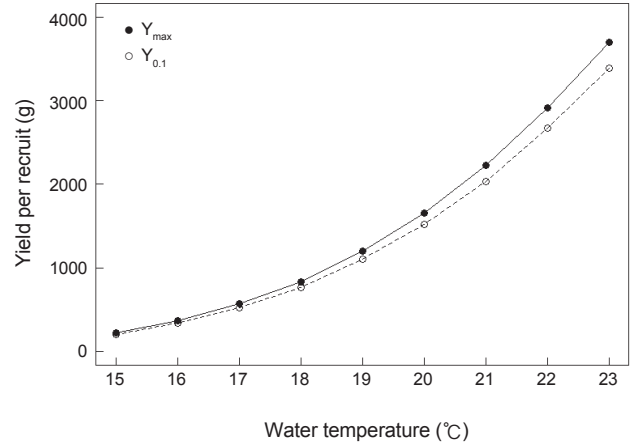


Fig. 5. Yield ($Y_{0.1}$ and Y_{\max}) of chub mackerel *Scomber japonicus* with varying water temperature. $Y_{0.1}$ and Y_{\max} are the yields corresponding to the instantaneous rates of fishing mortality (F) are $F_{0.1}$ and F_{\max} . $F_{0.1}$, the value of F at which the corresponding slope of yield-per-recruit curve equals to the 10% of the initial slope at the origin ($F=0$); F_{\max} , the value of F at which the yield-per-recruit is maximized.

고찰

최소어획체장 변동에 따른 가입당 생산량 비교

이전 연구자들이 연구하고 보고한 고등어 생물학적 특성 자료와 가입당 생산량평가 방법을 이용하여 최소어획체장(L_c) 15-30 cm, 어획사망계수 $F=0-2 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 우리나라 고등어 자원 가입당 생산량(Y/R)과 생산량 곡선의 기울기가 초기기울기의 10%되는 지점의 순간어획사망계수($F_{0.1}$), 생산량이 최대가 되는 지점의 순간어획사망계수(F_{\max})을 평가하고 비교하였다. 본 연구에서 평가한 시뮬레이션에 따르면 최소어획체장 변동에 따른 가입당 생산량은 $L_c=19-28 \text{ cm}$, $F=1.36-2 \text{ yr}^{-1}$ 일 때 1,800 g 이상의 높은 생산량을 나타냈으며, $F=0.36 \text{ yr}^{-1}$ 이상에서 L_c 의 길이가 클수록 가입당 생산량이 늘어나는 것으로 나타났다. 시뮬레이션결과 Fig. 1에서 NFRDI (2005)가 추정하는 우리나라 연평균 고등어 어업 어획사망계수($F=0.48 \text{ yr}^{-1}$)에서 최소어획체장 변동에 따른 가입당 생산량은 최대 생산량을 나타낸 $L_c=17 \text{ cm}$ 를 기준으로 최소어획체장을 높이거나 낮출 경우 가입당 생산량은 줄어들고, 시뮬레이션 범위 내의 가장 높은 $L_c=30 \text{ cm}$ 와 가입당 생산량의 차이는 1.37 배 나는 것으로 나타났다.

최소어획체장 변동에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{\max} 비교

최소어획체장(L_c) 변동에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{\max} 를 비교하기 위해 대표 $L_c=15, 20, 25, 30 \text{ cm}$ 일 때 어획사망계수(F) 변화에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{\max} 을 평가하고 L_c 변동에 따른 생산량을 비교하였다. L_c 별

$F_{0.1}$ 은 $L_c=25$ cm, $F=1.27$ yr⁻¹일 때 1,730 g으로 최대의 생산량을 나타냈으며, $L_c=15-25$ cm 체장에서서는 L_c 의 증가에 따라 $F_{0.1}$ 지점의 생산량이 증가하였지만 $L_c=25$ cm 이상에서는 F 의 증가에 따라 $F_{0.1}$ 지점의 가입당 생산량이 감소하는 차이를 나타냈다. 평가된 L_c 별 F_{max} 은 $L_c=15$ cm, $F=1.65$ yr⁻¹일 때 1,659 g으로 최대의 생산량을 나타냈지만 $L_c=20, 25, 30$ cm에서 F_{max} 은 2 yr⁻¹이상으로 F 의 증가에 따라 가입당 생산량도 지속적으로 증가하여, 본 시뮬레이션에서 적용한 F 의 값을 더 늘려도 최대생산량은 늘어날 것으로 예측된다.

고등어 적정 어획체장과 어획연령 추정

NFRDI (2005)가 추정한 우리나라 연평균 고등어 어업의 어획사망계수($F=0.48$ yr⁻¹)에서 가입당 생산량이 가장 높았던 $L_c=17$ cm의 연령을 추정하기 위해 Choi et al. (2000)와 Hwang et al. (2008b)이 우리나라 고등어를 대상으로 성장을 평가한 본 버틀란피 성장식을 이용하여 연령을 평가하고 비교하였다. Choi et al. (2000)와 Hwang et al. (2008b)이 평가한 성장식을 이용하여 추정한 $L_c=17$ cm의 연령은 0.4세와 1세로 평가되며, 본 연구에서 자어와 미성어·성어시기를 구분하여 적용한 방정식을 이용하여 연령을 평가하면 0.6세로 Choi et al. (2000)의 연구결과 보다 성장이 느리게, Hwang et al. (2008b)의 연구결과 보다는 성장이 빠르게 나타나 추정 연령에 차이를 나타냈다. 따라서, 우리나라 고등어 최대 생산량을 위한 적정 최소어획체장과 최소어획연령은 본 연구에서 평가한 17 cm, 0.6세부터 어획할 때 최대의 생산량을 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

최대 가입당 생산량을 위한 최소어획연령 비교

적정어획연령 평가 연구로 Choi et al. (2004b)의 연령별 어획사망계수(F) 변동에 따른 가입당 생산량 평가 연구에 따르면, $F=0.87$ yr⁻¹, 어획개시연령=2.67세 일 때 최대의 가입당 생산량이 나타났으며, 본 연구결과 비교하여 최대의 가입당 생산을 위한 추정 연령은 2.07세 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 Choi et al. (2004b)가 고등어 어획 강도로 적용한 $F=0.87$ yr⁻¹와 본 연구에서 고등어 어업 어획강도로 적용한 $F=0.48$ yr⁻¹의 차이에서 나타난 결과로 예측된다. 두 연구의 가입당 생산량 추정에 있어 어획사망계수 F 는 높을수록 크기가 작은 개체들을 우선적으로 어획하기 때문에 어획가능 성어의 어획개체수가 줄어들고 체중이 반영된 가입당 생산량 또한 줄어들게 된다. 따라서, F 가 높은 Choi et al. (2004b)의 연구에서 최대의 가입당 생산량을 얻기 위한 어획개시연령이 본 연구보다 높게 나타난 것으로 예측된다(Fig. 3).

수온변동에 따른 가입당 생산량 변동 비교

산란장 수온(15-23°C) 범위 중 최소 수온 15°C일 때 생산량은 약 200 g, 가장 높은 수온인 23°C일 때 생산량은 약 3,600 g으로 18배 차이 나는 것으로 평가된다. 이러한 차이는 본 연구에서 적용한 산란장 수온을 반영한 자어 시기 성장 평가 방정식

의 성장계수 α 에 의해 나타난 결과로 수온이 높을수록 초기 성장이 빨라지며, 식(9)에 의해 자연사망률은 체장에 반비례 하여 수온이 높고 성장이 빠를수록 자연사망률이 줄어들게 된다. 따라서, 수온이 높고 성장이 빠를수록 자연사망률은 줄어들게 되고 어획할 수 있는 개체수가 늘어나면서 생산량 또한 증가하는 것으로 예측된다.

산란장 수온변동에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 비교

시뮬레이션으로 평가한 수온변동에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 지점의 생산량을 비교하기 위해 고등어 대표 산란장 수온 범위(15, 17, 18, 23°C)에서 최소어획체장(L_c) 변동에 따른 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 를 비교하면 각각 0.83-0.84 yr⁻¹, 1.65 yr⁻¹로 변동이 거의 없지만 생산량은 수온의 증가와 함께 증가하는 것으로 예측되었다(Table 1, Fig. 4). 시뮬레이션으로 평가한 수온 범위 중 18°C 이하의 수온과 산란장 수온 중 가장 높은 수온인 23°C에서 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 에서 생산량은 최대 16배 차이를, 적정 산란수온의 생산량과는 6.5배 차이를 나타냈다. 수온이 증가할수록 수온 별 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 의 차이는 없는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 앞서 평가한 수온의 증가에 따른 성장률 증가가 생산량에 미치는 영향과 동일한 원인에서 나타난 결과로 예측된다.

산란장 수온변동에 따른 최소어획체장 변동 비교

시뮬레이션으로 평가한 Fig. 4에 따라 최대생산량(Y_{max})을 가져올 수 있는 최소어획체장($L_{c,max}$)이 수온에 따라 어떻게 달라지는지를 평가하기 위해 NFRDI (2005)가 보고한 고등어 어업 어획사망계수 $F=0.48$ yr⁻¹와 Choi et al. (2004b)가 평가한 고등어 어업 어획사망계수 $F=0.87$ yr⁻¹일 때 대표 산란장 수온 범위 (15, 17, 18, 23°C)에 따른 $L_{c,max}$ 의 변동을 비교하면, 두 어획사망계수 조건에서 수온변동에 따른 Y_{max} 지점의 체장은 17 cm와 20 cm로 평가되며, 수온의 변동과 관계없이 일정하고 수온의 증가에 따라 생산량만 증가하는 것으로 나타났다(Table 1). 따라서, 생산량을 최대화 하기 위한 최소어획체장의 변동은 수온보다 어획사망계수 F 의 변동에 영향을 받으며, F 가 높을수록 최대생산량을 가져올 수 있는 최소어획체장도 증가하는 것으로 평가할 수 있다.

연구의 한계점과 문제점

우리나라 연평균 고등어 어업 어획강도로 추정한 어획사망계수에서 적정 최소어획체장을 평가하고 그 연령을 비교하기 위해 Choi et al. (2000)와 Hwang et al. (2008b)의 우리나라 고등어 성장 평가 연구결과와 비교하였다. 하지만, Choi et al. (2000)와 Hwang et al. (2008b)는 이석의 윤문 자료와 회귀분석을 바탕으로 한 본 버틀란피 방정식을 이용하여 자어와 미성어·성어 시기의 성장을 함께 평가한 반면, 본 연구는 자어와 미성어·성어 시기를 구분하고 환경 변수인 수온의 영향을 고려하여 평가한 콤포즈 방정식과 본 버틀란피 방정식으로 평가하였다. Hwang et al. (2008b)의 방정식에 의한 추정 연령은 본 연구

와 동일 자료를 사용 하였지만 평가 방정식의 차이에 의해 연령 추정치에 차이를 나타냈다. 따라서, 본 연구와 같이 고등어 개체의 성장을 구분하여 평가한 연구결과를 이용하여 추가적 가입당 생산분석과 최소어획체장과 연령을 평가한 연구 결과와 함께 비교하여 적절한 고등어 자원 관리를 위한 생물학적 기준점을 제시하는 연구가 필요하다.

추가연구

본 연구에서 평가한 가입당 생산량은 성숙한 개체에 의한 재생산은 배제하고 일정 개체수의 성장에 따른 가입당 생산량을 평가하였다. 지속가능한 고등어 이용을 위한 수산자원관리에 필요한 생물학적 기준점을 정하려면 가입당 생산뿐만 아니라 성어 고등어의 산란 특성과 가입 과정들을 고려한 추가 분석이 필요하다. 따라서, 성숙 개체 고등어의 체장 변화에 따른 포란 수 변화 연구와 함께 재생산이 반영된 추가적인 가입당 생산분석 연구가 필요하며, 적절한 고등어 자원의 어획과 관리를 위해 몸 크기 별 시장 가격을 반영하여 최대의 경제적 가치를 얻을 수 있는 가입당 생산량 평가 연구를 통해 어린 개체의 남획을 방지하고 지속적인 고등어 자원 어획을 위한 어획 기준점을 마련할 필요가 있다.

사 사

이 논문을 심사해주신 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 2017학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

Beverton RJH and Holt SJ. 1957. Fisheries investigation series II. In: On the dynamics of exploited fish populations. Chapman and Hall, London, UK, 533.

Brochier T, Colas F, Lett C, Echevin V, Cubillos L, Tam J, Chlaida M, Mullon C and Fréon P. 2009. Small pelagic fish reproductive strategies in upwelling systems: An natal homing evolutionary model to study environmental constraints. *Prog Oceanogr* 83, 261-269. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.044>.

Cha H, Choi Y, Park J, Kim J and Sohn M. 2002. Maturation and spawning of the chub mackerel, *Scomber japonicus* Houttuyn in Korean waters. *J Kor Soc Fish Res* 5, 24-33.

Chen X, Li G, Feng B and Tian S. 2009. Habitat suitability index of chub mackerel (*Scomber japonicus*) from July to September in the East China sea. *J Oceanogr* 65, 93-102. <https://doi.org/10.1007/s10872-009-0009-9>.

Cho G, Hong C and Kim Y. 1984. The relationship between the fishing grounds and oceanographic condition associated with fluctuation of mackerals catches in the East China sea. *Bull Kor Fish Tech Soc* 20, 83-90.

Choi Y, Park J, Cha H and Hwang K. 2000. Age and growth of common mackerel, *Scomber japonicus* Houttuyn. *J Kor Soc Fish Res* 3, 1-8.

Choi Y, Zhang C, Kim Y, Baik C and Park Y. 2004a. Ecological characteristics and biomass of chub mackerel, *Scomber japonicus* Houttuyn in Korean waters. *J Kor Soc Fish Res* 6, 79-89.

Choi Y, Zhang C, Lee J, Kim J and Cha H. 2004b. Stock assessment and management implications of chub mackerel, *Scomber japonicus* in Korean waters. *J Kor Soc Fish Res* 6, 90-100.

Deriso R. 1987. Optimal $F_{0.1}$ criteria and their relationship to maximum sustainable yield. *Can J Fish Aquat Sci* 44, 339-348. <https://doi.org/10.1139/f87-335>.

Gilbert CS, Gentleman WC, Johnson CL, DiBacco C, Pringle JM and Chen C. 2010. Modelling dispersal of sea scallop (*Placopecten magellanicus*) larvae on Georges Bank: The influence of depth-distribution, planktonic duration and spawning seasonality. *Prog Oceanogr* 87, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.021>.

Go S, Lee K and Jung S. 2018. Abstract, Ann Meet. *Kor Soc Ocaenogr* 111.

Gulland J. 1965. Survival of the youngest stages of fish and its relation to year-class strength. *Int Comm NW Atlant Fish* 6, 363-371.

Hiyama Y, Yoda M and Ohshimo S. 2002. Stock size fluctuations in chub mackerel (*Scomber japonicus*) in the East China sea and the Japan/East sea. *Fish Oceanogr* 11, 347-353. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2002.00217.x>.

Hunter JR and Kimbrell CA. 1980. Early life history of Pacific mackerel, *Scomber japonicus*. *Fish Bull* 78, 89-101.

Hwang H, Kim D, Park M, Yoon S and Lee Y. 2008a. Effects of water temperature and salinity on the egg and larval of chub mackerel *Scomber japonicus*. *J Aquacult* 21, 234-238.

Hwang S, Kim J and Lee T. 2008b. Age, growth and maturity of chub mackerel off Korea. *N Am J Fish Manage* 28, 1414-1425. <https://doi.org/1414-1425.10.1577/M07-063.1>.

Jung K, Kang S, Cha HK, Choi KH and Myksvoll MS. 2013. Buoyancy and vertical distribution of mackerel *Scomber japonicus* eggs in Korean waters. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 957-965. <https://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2013.0957>.

Jung S, Choi I, Jin H, Lee D, Cha H, Kim Y and Lee J. 2009. Size-dependent mortality formulation for isochronal fish species based on their fecundity: An example of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the Eastern coastal areas of Korea. *Fish Res* 97, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.01.004>.

Jung S, Pang I, Lee J, Choi I and Cha HK. 2014. Latitudinal shifts in the distribution of exploited fishes in Korean waters during the last 30 years: a consequence of climate change. *Rev Fish Biol Fish* 24, 443-462. <https://doi.org/10.1007/s11160-013-9310-1>.

- Kamimura Y, Takahashi M, Yamashita N, Watanabe C and Kawabata A. 2015. Larval and juvenile growth of chub mackerel *Scomber japonicus* in relation to recruitment in the Western North Pacific. *Fish Sci* 81, 505-513. <https://doi.org/10.1007/s12562-015-0869-4>.
- Kim J, Kang Y and Jeong H. 1999. Long-term variations in population biomass of mackerel, *Scomber japonicus* and environmental factors in Korean waters. *J Kor Soc Fish Res* 2, 92-100.
- Kim S, Lee J, Shin H, Lee Y, Kang S, Lee C and Jung S. 2011. Environment factors affecting recruitment. In: *Fisheries oceanography*. Pukyong National University press, Busan, Korea, 132-136.
- King M. 2013. Stock assessment. In: *Fisheries Biology, Assessment and Management II*. John Wiley and Sons, Iowa, U.S.A., 254-255.
- Lee H and Kim H. 2011. Variation of fisheries conditions of mackerel (*Scomber japonicus*) fishing ground for large purse seine fisheries. *J Kor Soc Fish Tech* 47, 108-117. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2011.47.2.108>.
- Lee S, Kim J and Han S. 2016. Distribution of mackerel, *Scomber japonicus* eggs and larvae in the coast of Jeju island, Korea in spring. *J Kor Soc Fish Tech* 52, 121-129. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.2.121>.
- Nancy CHL. 1983. Temperature dependent growth of yolk-sac North anchovy larvae. In: *Report of re-estimation of three parameters associated with anchovy egg and larval abundance: temperature dependent incubation time, yolk-sac growth rate and egg and larval retention in mesh nets*. NOAA Technical Memorandum NMFS Report, California, U.S.A., 8-9.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2010. *Scomber japonicus*. In: *Ecology and fishing ground of fisheries resources in Korean waters*. NFRDI, Busan, Korea, 31.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2005. Spawning biomass per recruit. In: *Stock assessment and fishery evaluation report of year 2006 TAC-based fisheries management in the adjacent Korean waters*. NFRDI, Busan, Korea, 23.
- Oh T, Shim K, Seo Y, Kwon D, Kang S and Lim C. 2016. A study on resource utilization and management of chub mackerel, *Scomber japonicus* consider to proximate composition. *J Kor Soc Fish Tech* 52, 130-140. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.2.130>.
- Park C, Yeon I, Choi N, Heo S, Han K and Lee W. 2008. Egg development and morphology of larva and juvenile of the chub mackerel, *Scomber japonicus*. *Dev Reprod* 12, 207-213.
- Shin S. 1981. Estimation of the survival rate in fish population-mackerel and horse mackerel in the coastal waters of Korea. *Bull Kor Fish Soc* 14, 253-259.
- Watanabe C, Yatsu A and Watanabe Y. 2002. Changes in growth with fluctuation of chub mackerel abundance in the Pacific waters off central Japan from 1970 to 1997. In: *Report of PICES Scientific report 20*. PICES (North Pacific Marine Science Organization), Sidney, Canada, 60-62.
- Yamada U, Tokimura M, Horikawa H and Nakabo T. 2007. *Scomber japonicus*. In: *Fishes and fisheries of the East China and Yellow seas*. Tokai University press, Tokyo, Japan, 972-973.
- Yoon S, Kim D, Baek G and Kim J. 2008. Feeding habits of chub mackerel (*Scomber Japonicus*) in the South sea of Korea. *J Kor Fish Soc* 41, 26-31. <http://doi.org/10.5657/kfas.2008.41.1.026>.
- Yukami R, Ohshimo S, Yoda M and Hiyama Y. 2009. Estimation of the spawning grounds of chub mackerel *Scomber japonicus* and spotted mackerel *Scomber australasicus* in the East China sea based on catch statistics and biometric data. *Fish Sci* 75, 167-174. <https://doi.org/10.1007/s12562-008-0015-7>.