

모의실험을 통한 남해 멸치(*Engraulis japonicus*)의 어획조건에 따른 가 입당 생산 분석

이경환 · 고성길 · 정석근*

제주대학교 해양생명과학과

Simulation-based Yield-per-recruit Analysis of Pacific Anchovy *Engraulis japonicus* in the Korea Strait with Varying Fisheries Regulations

Kyunghwan Lee, Seonggil Go and Sukgeun Jung*

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

To evaluate the consequences of possible fisheries regulations of anchovy *Engraulis japonicus* in the Korea Strait, we developed and applied a simulation-based yield-per-recruit (Y/R) model that considered temperature-dependent growth and size-dependent mortality, covering the egg to adult stages. We projected changes in commercial yield and egg production of anchovy with respect to varying biological reference points of 1) the instantaneous fishing mortality, 2) the minimum fork length of anchovy allowed to catch for protecting smaller anchovy ($L_{c,min}$), and 3) the maximum fork length allowed to catch for protecting bigger anchovy ($L_{c,max}$). Our Y/R model showed that the anchovy yield will be maximized at ca. 1.4×10^6 tons when $L_{c,min}$ ranges between 42-60 mm or at ca. 0.8×10^6 tons when $L_{c,max}$ ranges from 88-160 mm. At $L_{c,min}=30$ mm, the present minimum length of catch, our simulations indicated that the anchovy yield can reach a maximum of 1.2×10^6 tons in the long-term when the present fishing effort, which annually yields ca. 0.2×10^6 tons of anchovy, can be increased by a factor of 28. We expect that our simulation-based Y/R model can be applied to other commercially-important small pelagic species in which the traditional Beverton-Holt Y/R model is difficult to apply.

Key words: Pacific anchovy, *Engraulis japonicus*, Yield-per-recruit analysis, Stock assessment

서 론

멸치(*Engraulis japonicus*)는 청어목 멸치과에 속하는 연안 난류성 소형 부어류로 우리나라 영해를 포함한 북서태평양과 중앙태평양에서 수심 27-170 m, 수온 6.5-22℃에 큰 무리를 지어 서식하며, 성장과 성숙이 빠르고 계절 회유와 연중 분리부성란을 산란하는 특징을 가지는 어류다(Yamada et al., 2007; Bacha and Amara, 2009; Oh et al., 2009; Yasue et al., 2010). 멸치는 우리나라에서 상업적으로 중요한 어종으로 분류될 뿐만 아니라 해양생태계에서 다랑어나 고래와 같은 대형 해양생물의 주요 먹이가 됨으로써 동물플랑크톤과 육식성 생물로 이루어진 상위 영양단계를 연결하는 중간 영양단계에 위치한 중요한 어종으로 평가된다(Pauly et al., 1998; Zhao et al., 2003; Kim et al., 2013; Zhou et al., 2015).

우리나라 모든 해역에서 멸치 어업이 이루어지지만 대부분 상업적 어획활동은 남해 통영 연안에서 가장 높으며, 권현망과 저인망, 유자망을 이용한 어획량이 우리나라 멸치 전체 어획량의 절반 이상을 차지한다고 알려져 있다(Jung, 2008; Kim et al., 2015; Jung et al., 2016). 우리나라 멸치 연간 어획량은 1992년 11만톤 이후 어획량이 증가하기 시작하여 2015년까지 19만톤 이상의 어획량이 유지 되었으나 2011년 29만톤 이후 최근까지 감소하여 2016년 14만톤으로 낮은 어획량을 나타냈다(MOF, 2017). 멸치 어업권을 두고 업종간 지역간 갈등이 끊이지 않아 수산자원관리 대상어종에 포함시키려는 시도가 있었으나 아직까지 멸치 자원평가나 관련 관리 방안 연구는 거의 전무한 실정이다. 최근까지 멸치에 대한 국내 연구로 Cha (1990)와 Hwang et al. (2006)의 연령과 성장 연구와 Kim and Kang (1992)의 산

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0437>



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 50(4) 437-446, August 2017

Received 26 July 2017; Revised 8 August 2017; Accepted 14 August 2017

*Corresponding author: Tel: +82. 64. 754.3 424 Fax: +82. 64. 756. 3493

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

란과 생태, Kim (1983)과 Kim and Choi (1988), Lee and Go (2002), Hwang et al. (2007)의 난·자치어의 분포에 대한 연구, Park and Cha (1995)와 Kim et al. (2013), Kim et al. (2017)의 먹이생물에 대한 연구가 진행되었으며, Kim et al. (2004)과 Cho and Kim. (2006), Oh et al. (2009)의 유전자 분석 연구, Jung et al. (2008)의 수온변화에 따른 멸치의 성장과 포란수, 사망률 추정 연구가 진행되었다. 멸치 자원량 평가 및 추정 연구로 Choi et al. (2001)의 계량어담 및 트롤조사를 이용한 현존량 추정 연구, Choi and Kim (1988)의 남해안 멸치 재생산 연구, Kim et al. (2002)의 완도해역 수온 변화와 멸치 어획량 변동 관계 연구, Jung (2008)의 모델을 이용한 자원량 변동 평가 연구 및 Jung et al. (2016)의 생물-물리 결합모델을 이용한 멸치 자원 분포 변동 예측 연구, Kim and Lo (2001)의 계절별 알 생산량과 산란에 참여하는 성어량 추정 연구와 Kim et al. (2015)의 어획 자료와 수리 모델을 이용한 시간에 따른 멸치 어획 자원량 변동 평가 모델개발 연구가 진행되었다.

우리나라 주변에 서식하는 멸치를 대상으로 최근 국외에서 진행된 연구는 크게 2개의 개체군으로 구분하여 1)우리나라 황해와 동중국해에 서식하는 멸치와 2)일본 해역 동쪽에 서식하는 개체군으로 구분되어 연구가 진행되었다. 우리나라 황해와 동중국해에 서식하는 멸치에 대하여 최근 진행된 연구는 Zheng et al. (2015)의 유전자 분석 연구, Zhou et al. (2015)의 태평양 10년 주기(PDO)와 멸치 개체군의 크기 변동 관계 연구가 진행되었다. 일본 해역에 서식하는 멸치 개체군을 대상으로 진행된 연구는 Suhara et al. (2013)의 재생산 특성 연구, Hayashi et al. (2016)의 일본 북쪽 해역의 멸치 난 분포 연구, Takeshige et al. (2015)와 Yasue et al. (2016)의 기후변화에 따른 해양환경 변화가 멸치 초기 생활사에 미치는 영향 평가 연구가 진행되었다.

국내외 연구 동향에서 볼 수 있듯이 생물학적 특성이나 기후 변화와 같은 환경변화가 멸치 생물학적 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 되어있으나 정작 멸치를 두고 일어나는 업종간, 지역간 어업 분쟁을 해결하고 지속가능한 멸치 어업에 필요한 수산자원관리 계획개발에 필요한 멸치 자원 평가와 생물학적 기준점 설정에 관한 연구는 거의 전무하다.

따라서, 이 연구에서는 효율적인 멸치 자원 관리를 위해 수산 자원 평가 방법 중 하나인 가입당 생산모델을 우리나라 남해 멸치에 적용하려고 한다. 최근까지 가입당 생산 모델을 이용하여 진행된 자원평가 연구는 Zhang et al. (1992)의 참조기 자원평가 연구, Park et al. (2000)의 연근해 갈치 자원 변동 평가 연구, Ko et al. (2008)와 Cha and Jung (2012)의 제주 오분자기와 진해만 대구 가입당 생산량 분석 연구가 진행 되었지만 아직까지 멸치를 비롯한 수명이 짧고 산란기간이 긴 다양한 소형 부어류에 대한 수산어종의 가입당 생산연구는 부족한 상황이며 이에 대한 연구가 필요한 상황이다.

가입당 생산 모델은 해양환경변동은 해마다 크게 달라지나 수십년 장기적인 규모에서 보면 일정하고(stationary) 따라서 연

간 재생산량이 일정하다는 가정아래 해당 어종의 자원상태를 진단하고 효율적인 어획관리가 이루어지기 위한 어획개시연령 및 어획개시체장, 적정어획사망계수를 제시하여 지속가능한 수산자원 관리를 위한 생물학적 기준점을 제공 하는 방법이다. 전통적 가입당 생산모델은 본 버틀란피 성장식을 바탕으로 Beverton and Holt (1957)가 제시한 방법으로 평가하였으며, 그 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{Y}{R} = F \exp(-M(t_c - t_r)) W_{\infty} \sum_{n=0}^3 \left(\frac{U_n \exp(-nK(t_c - t_{\theta}))}{F + M + nK} \right) [1 - \exp(-(F + M + nK)(t_L - t_c))] \dots \dots \dots (1)$$

여기서, F 는 순간어획사망계수, M 은 순간자연사망계수, t_c 는 어획개시연령, t_r 은 어장가입연령, W_{∞} 는 이론적 최대체중, K 는 성장계수, t_{θ} 는 체장이 0일 때의 이론적 시간, t_L 는 최고연령, $U_0=1$, $U_1=3$, $U_2=3$, $U_3=1$ 을 의미한다.

그러나 지난 60년 동안 수산자원평가에 쓰여온 Beverton and Holt (1957)가 제시한 모델을 멸치 가입당 생산량 추정 연구에 적용하기에는 다음의 문제점이 있다. 1)Beverton and Holt (1957)가 제시한 가입당 생산량 추정 방정식(1)에서 자연사망계수 M 은 고정적인 값으로 자연사망률이 일정하다는 가정 아래 계산되어 일반 자연상태에서 체장과 연령에 따른 자연사망률 변동을 반영하지 못하며, 2)평가 대상 자원은 대개 1세 이상의 개체이며 특정 산란기간에 산란하는 것으로 가정하여 평가하지만 짧은 수명을 가지는 멸치는 유생단계인 체장 약 30 mm 부터 어획이 이루어지며(Jung, 2008) 그 자연사망률 변동이 크고(Jung et al., 2008) 연중 산란 하는 특성으로 산란기를 특정 시기에 국한시키기 힘들다. 이러한 생물학적 특성 차이 때문에 Beverton and Holt (1957)가 제시한 가입당 생산량 추정 방정식을 그대로 멸치에 적용하기에는 문제점이 있다. 또한, Beverton and Holt (1957)가 제시한 방법은 최소어획체장보다 큰 개체를 어획하는 미성어를 보호하는 조건을 전제로 평가하는 방법이므로, 효율적인 멸치 자원 관리를 위해 어획 규제의 또 다른 방법으로 볼 수 있는 성어를 보호하는 조건인 최대어획체장 보다 작은 개체의 어획을 허용하는 경우 생물학적 기준점을 제시하는 데는 쓸 수가 없다.

따라서 이 연구에서는 지속가능한 멸치 자원 관리를 위해 우리나라 해역 중 멸치 어획량이 가장 높은 남해에서 수온 계절 변화에 따라 달라지는 멸치 성장과 체장에 따라 달라지는 생존률을 반영한 가입당 생산량을 추정하는 시뮬레이션 방법을 개발하고 적용하였다. 이 시뮬레이션을 통하여 1)최소어획체장 이상 크기의 멸치를 어획하는 방법과 또 하나의 어업 규제 방식으로 볼 수 있는 2)최대어획체장 이하 크기의 멸치를 어획하는 방식의 두 가지 조건을 이용하여 적정 어획 관리를 위한 어획사망률과 어획체장에 관한 생물학적 기준점을 제시하고자 한다.

자료 및 방법

연구 대상 해역

우리나라 해역 중 멸치 어획량이 가장 높은 것으로 알려진 남해를 대상으로(Fig. 1, b of Jung et al., 2008) 가입당 생산량을 평가하였다. 모델에 반영된 멸치 생물학적 특성과 월별 수온변화는 동일해역 및 남해를 대상으로 연구한 결과를 반영하였다. 월별 수온 변화와 멸치 성장, 체장에 따른 순간자연사망계수는 Jung et al. (2008), 초기 알 부화시간은 Kim and Lo (2001), 멸치 체장과 체중 관계는 Choi and Kim (1988), 개체당 포란수는 Kim and Kang (1992)이 연구한 방정식을 사용하였다.

접근방법

따라서 본 연구는 Jung et al. (2008)과 Cha and Jung (2012)이 보고한 체장 변화에 따른 추정 순간자연사망계수와 가입당 생산량 도출 방정식을 이용하여 가입당 생산량을 평가하였다.

가정

멸치의 가입당 생산량 평가 시뮬레이션은 아래의 조건을 가정하였다.

- 1) 멸치의 최대 수명은 3년(0-2세)이다(Jung, 2008).
- 2) 개체의 성장과 알의 부화시간은 수온에 영향을 받는다(Jung et al., 2008).
- 3) 부화된 멸치의 순간자연사망계수는 체장에 반비례한다(Jung et al., 2008).
- 4) 멸치의 산란은 연중 매일 일어나며, 알 생산량은 해마다 일정하다.
- 5) 부화된 알의 암컷과 수컷의 비율은 1:1이다(Jung et al., 2008).
- 6) 멸치의 성어와 미성어는 체장 80 mm를 기준으로 구분되며(Kim and Lo, 2001), 성어부터 산란에 참여한다.

이러한 가정을 바탕으로 순간어획사망계수(F) 0-0.05 day⁻¹와 최소어획체장($L_{c,min}$) 및 최대어획체장($L_{c,max}$) 0-160 mm을 변화시키면서 총 3년 동안 일별 시뮬레이션을 통해 멸치 가입당 생산량을 도출했다.

일별 시뮬레이션

시뮬레이션 시작은 1월 1일부터 3년간 일단위로 실행하였으며, 모델에 반영된 조건은 아래와 같다. 여기서 적용되는 d 는 날짜를(1-1,095 day), i 는 i 번째 동일 발생일급군($i=1-365$ th daily cohort)을 나타낸다.

수온과 성장

멸치 알의 부화와 성장은 일별로 계산 하였으며, 모든 개체의 부화와 성장은 일별 수온 변화에 영향을 받는다고 가정하였다. 남해 연안의 계절별 수온은 Jung et al. (2008)이 1996년 정선관

측 자료(NFRDI) 204-207, 400 라인의 10 m 수온자료를 이용하여 일별 수온 변동을 보고한 아래의 방정식으로 계산하였다.

$$T_d = 18.28 - 5.67 \sin[2\pi(d+31.4)/365] \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 T_d 는 d 날짜에 수온(℃)을 의미한다. 수온에 따른 멸치 알 부화시간은 Kim and Lo (2001)가 보고한 아래의 방정식을 이용하였다.

$$h_i = 40.46 \exp(-0.1167 * T_i) * 9^{1.14/24} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서 h_i 는 i 번째 일급군의 알 부화시간을 의미하며, T_i 는 방정식(2)의 T_d 와 의미가 동일하다. 멸치의 수온에 따른 성장은 Kim and Lo (2001)와 동일 연구해역으로 날짜별 수온(T_d)에 따른 성장을 평가하여 계수를 추정본 베히만방정식(Jung et al., 2008)을 이용하여 평가하였으며, 그 방정식과 성장계수 추정 방정식은 아래와 같다.

$$K_d = 0.00044 + 0.00017 * T_d \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$L_{i,d+1} - L_{i,d} = \begin{cases} K_d * (L_{\infty} - L_{i,d}) & \text{if } d \geq h_i \\ 0 & \text{if } d < h_i \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서 K_d 는 성장계수(mm, day⁻¹), L_{∞} 는 멸치의 이론적 최대 체장(mm), $L_{i,d}$ 는 d 날짜에 i 번째 일급군의 체장을 의미하며, 만약 d 가 h_i 보다 작으면 부화 전 단계로 구분하여 시간에 따른 체장 변화율은 0으로 계산된다. 여기서 부화 직후의 길이 L_0 는 Kim (2007)이 보고한 1.5 mm를 적용하였다.

부화한 멸치의 체중은 체장에 영향을 받으며, Choi and Kim (1988)이 평가한 체장-체중 관계 방정식 계수를 이용하여 시간에 따른 멸치 체중 변화를 반영 하였다.

$$W_{i,d} = 0.004 * (L_{i,d}/10)^{3.2748} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $W_{i,d}$ 는 d 날짜에 i 번째 일급군 멸치 습중 체중(g)을 나타낸다.

순간자연사망계수와 순간전사망계수

본 연구 3)번 가정에 따라 멸치의 순간자연사망계수는 체장에 반비례 하며, 그 식은 Jung et al. (2008)이 보고한 방정식 계수를 사용하였다.

$$M_{i,d} = 1.24 \text{ mm day}^{-1} / L_{i,d} \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 $M_{i,d}$ 는 d 날짜에 i 번째 일급군 멸치의 순간자연사망계

수를 의미하며(day⁻¹), 여기에 대응하는 순간전사망계수 $Z_{i,d}$ 는 다음 두 식과 같다.

$$Z_{i,d} = \begin{cases} M_{i,d} + F & \text{if } L_{i,d} \geq L_{c,min} \\ M_{i,d} & \text{if } L_{i,d} < L_{c,min} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8-1)$$

$$Z_{i,d} = \begin{cases} M_{i,d} + F & \text{if } L_{i,d} \leq L_{c,max} \\ M_{i,d} & \text{if } L_{i,d} > L_{c,max} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

여기서 $Z_{i,d}$ 는 d 날짜에 i 번째 일급군 멸치의 순간전사망계수(day⁻¹)를 나타내는데, 식 8-1은 최소어획체장 $L_{c,min}$ 보다 작은 개체를 어획 금지하고, 식 8-2는 최대어획체장 $L_{c,max}$ 보다 큰 개체를 어획 금지 할 때를 나타낸다.

일별 멸치 성어 산란 참여율

모델을 이용해 가입당 생산량을 추정하기 위한 초기 알 수는 Jung et al. (2008)이 보고한 산란에 참여하는 암컷 한 마리가 한 번 산란시 산란하는 평균 알 생산량(batch fecundity, $N_0=4,449$)을 반영하였으며, 성어 중 일별 암컷의 산란 참여율은 Kim and Kang (1992)이 조직학적 생식소 분석 연구를 통해 보고한 최대 산란기(5월)와 성숙 암컷 개체 중 산란에 참여하는 비율(20%), Jung et al. (2008)이 Fig. 4에 보고한 멸치 한 마리의 월별 평균 산란 참여 횟수 자료 중 5월을 기준으로 추정된 방법을 이용하여 1년간 일별 산란 참여 비율(P_i , 여기서 $i=1-365$ day)을 계산하였다(Fig. 1).

일급군 개체수

일급군 초기 개체수는 일별 산란 참여율을 반영하여, 다음의 방정식으로 계산하였다.

$$N_{i,0} = N_0 * P_i \quad \dots\dots\dots (9)$$

여기서 $N_{i,0}$ 는 i 번째 일급군의 초기 개체수, N_0 는 산란에 참여하는 암컷 한 마리가 한 번 산란시 산란하는 알 생산량(Jung et al., 2008), P_i 는 i 날짜에 산란 참여율(Fig. 1)을 나타낸다.

일별 개체수와 어획 개체수

모델에 반영된 일급군별 일별 개체수와 어획 개체수의 변화는 다음의 방정식으로 일급군 별로 계산하였다.

$$N_{i,d+1} = N_{i,d} * S_{i,d} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$S_{i,d} = \exp(-Z_{i,d}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

여기서 $N_{i,d+1}$ 와 $N_{i,d}$ 는 i 번째 동일 발생일급군의 $d+1$ 날짜와 d

날짜에 개체수, $S_{i,d}$ 는 i 번째 일급군의 d 날짜에 생존율을 나타낸다. 일별 일급군별 어획 개체수는 Gulland (1965)의 어획 방정식 중 어획 사망 개체수 도출 방정식으로 계산하였다(King, 2013).

$$N_{catch,i,d} = (F/Z_{i,d-1} - N_{i,d-1} \exp(-Z_{i,d-1})) \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서 $N_{catch,i,d}$ 는 d 날짜, i 번째 일급군의 어획 개체수를 나타낸다. 이 때 멸치의 최대 수명을 3년이라고 가정했을 때 1년 동안 태어났던 365개 일급군들이 일생동안 어획되는 개체수는 다음과 같다.

$$N_{total\ catch} = \sum_{i=1}^{365} \sum_{d=i}^{1095} N_{catch,i,d} \quad \dots\dots\dots (13)$$

가입당 생산량

각 멸치 일급군 가입당 생산량(g)은 다음의 방정식으로 계산하였다(Cha and Jung, 2012).

$$Y_{i,d} = N_{catch,i,d} * W_{i,d-1} \quad \dots\dots\dots (14)$$

여기서 $Y_{i,d}$ 는 d 날짜, i 번째 일급군의 가입당 생산량을 나타낸다. 습중 무게로 나타낸 총 가입당 생산량(Y : ton)은 다음과 같다.

$$Y = \sum_{i=1}^{365} \sum_{d=i}^{1095} Y_{i,d} / 10^6 \quad \dots\dots\dots (15)$$

일별 알 생산량

가입을 마친 암컷 멸치가 자라서 산란을 할 수 있는 체장 80 mm 이상의 성어로 자라 평생 낳을 수 있는 포란수를 추정하기 위해서 우선 Kim and Kang (1992)이 보고한 체중-포란수 관계로 평가하였으며, 그 방정식은 아래와 같다.

$$e_{i,d} = \begin{cases} 42.813 * W_{i,d}^{1.883} & \text{if } L_{i,d} \geq 80 \text{ mm} \\ 0 & \text{if } L_{i,d} < 80 \text{ mm} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (16)$$

여기서 $e_{i,d}$ 는 i 번째 일급군의 d 날짜에 멸치 한 마리의 포란수를 의미하며 $e_{i,d}$ 는 가정 6)에 따라 가량이 체장 80 mm 이상 개체가 산란에 참여하는 것으로 계산하였다.

일별 알 생산 개수는 가정 5)와 6)을 통하여 일급군별 산란에 참여 가능한 개체수를 구하였으며, 일별 산란참여 비율(Fig. 1)을 반영하여 아래의 방정식으로 일별 일급군별 알 생산 개수($E_{i,d}$)를 계산하였다.

$$E_{i,d} = e_{i,d} * N_{i,d} * P_d \quad \dots\dots\dots (17)$$

총 가입당 알 생산량은 아래의 방정식으로 계산하였다.

$$E = \sum_{i=1}^{365} \sum_{d=i}^{1095} E_{i,d} \quad \dots\dots\dots (18)$$

가입당 생산량과 알 생산량 보정

모델에서 도출된 총 가입당 생산량 Y 와 알 생산량 E 는 보정 계수를 이용하여 실제 멸치 성어 자원량 및 알 생산량과 가깝도록 보정하였다. 보정계수는 Kim and Lo (2001)가 추정한 멸치 성어 자원량 평가 결과 중 최근과 가장 가까운 1990-1994년 남해 여름 멸치 성어 자원량(490×10^3 mt) 추정 결과(Table 10 of Kim and Lo, 2001)를 반영하여 계산하였다.

$$B = \sum_{i=1}^{365} \sum_{d \in \{196, 561, 926\}} N_{adult,i,d} * W_{i,d} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$N_{adult,i,d} = \begin{cases} N_{i,d} & \text{if } L_{i,d} \geq 80 \text{ mm} \\ 0 & \text{if } L_{i,d} < 80 \text{ mm} \end{cases} \text{ where } d = 196, 561, 926 (0-2 \text{ age}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

여기서, d 는 여름을 대표하는 날짜로 가정한 0-2세 각 연령의 7월 15일이며, B 는 어획이 없을 시 7월 15일 가랑이 체장 80 mm 이상의 멸치 성어 생체량을 나타낸다.

$$R = SSB/B \quad \dots\dots\dots (21)$$

여기서 R 은 보정계수, SSB 는 Kim and Lo (2001)가 추정한 여름 성어 자원량이며, 총 가입당 생산량은 아래의 방정식으로 계산하였다.

$$Y_{total} = R * Y \quad \dots\dots\dots (22)$$

여기서 Y_{total} 는 보정계수가 반영된 총 가입당 생산량(ton)을 나타낸다. 또한, 가입당 알 생산량은 아래의 방정식으로 계산하였다.

$$E_{total} = R * E \quad \dots\dots\dots (23)$$

여기서 E_{total} 는 보정계수가 반영된 총 가입당 알 생산량을 나타낸다.

모델 평가 조건

멸치 가입당 생산량 평가 모델을 통하여 미성어를 우선적으로

보호하는 어업형태인 최소어획체장($L_{c,min}$) 이상 개체 어획 조건과 성어를 우선으로 보호하는 최대어획체장($L_{c,max}$) 이하 개체를 어획하는 경우 1)순간어획사망계수($F, 0-0.05 \text{ day}^{-1}$), 2) $L_{c,min}$ 또는 $L_{c,max}$ (0-160 mm)에 따라 가입당 생산량 변화와 생산량이 최대가 되는 지점인 순간어획사망계수(F_{max})와 그 때의 생산량 Y_{max} , 생산량 곡선의 초기 기울기가 10%가 되는 지점인 순간어획사망계수($F_{0.1}$)와 그 때의 생산량 $Y_{0.1}$, 알 생산량을 평가하였다.

결 과

가입당 생산량

평가된 멸치 일별 산란 참여 비율은 여름인 6-8월(150-210일)에 높은 산란 참여율(P_i)을 나타냈다(Fig. 1). 변수인 F 0-0.05 day^{-1} , $L_{c,min}$ 0-160 mm의 범위에서 달라질 때 시뮬레이션 모델로 평가한 남해 멸치의 가입당 생산량(Y/R)은 Fig. 2와 같다. 미성어를 우선으로 보호하는 조건(최소어획체장 이상 크기의 멸치 어획)의 가입당 생산량 변화는 F 와 $L_{c,min}$ 가 증가할수록 가입당 생산량도 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈으며 F 가 0.03 day^{-1} 이상 일 때 $L_{c,min}$ 42-60 mm에서 약 150-159만톤의 최대 생산량을, $L_{c,min}$ 120 mm 이상에서는 F 에 관계없이 생산량이 0인 것으로 나타났다(Fig. 2a). 성어를 우선으로 보호하여 어획할 경우(최대어획체장 이하 크기의 멸치 어획) 두 변수가 증가할수록 가입당 생산량도 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈으며, F 가 0.02 day^{-1} 이하 일 때 $L_{c,max}$ 88-160 mm에서 약 80-81만톤의 가장 높은 생산량을, F 에 관계없이 $L_{c,max}$ 가 낮아질수록 가입당 생산량이 줄어드는 특징을 나타냈다(Fig. 2b).

F_{max} 와 $F_{0.1}$ 추정 및 비교

현재 $L_{c,min}$ 로 보고된 30 mm (Jung, 2008)을 기준으로 생산량 곡선의 초기 기울기가 10%가 되는 $F_{0.1}$ 에 따른 예측 잠재생산량은 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 경우 $F_{0.1}$ 이 0.016

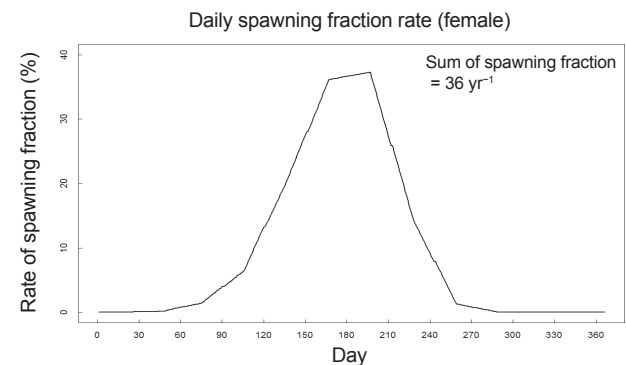


Fig. 1. Estimated daily spawning fraction rate of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* in the Korea Strait.

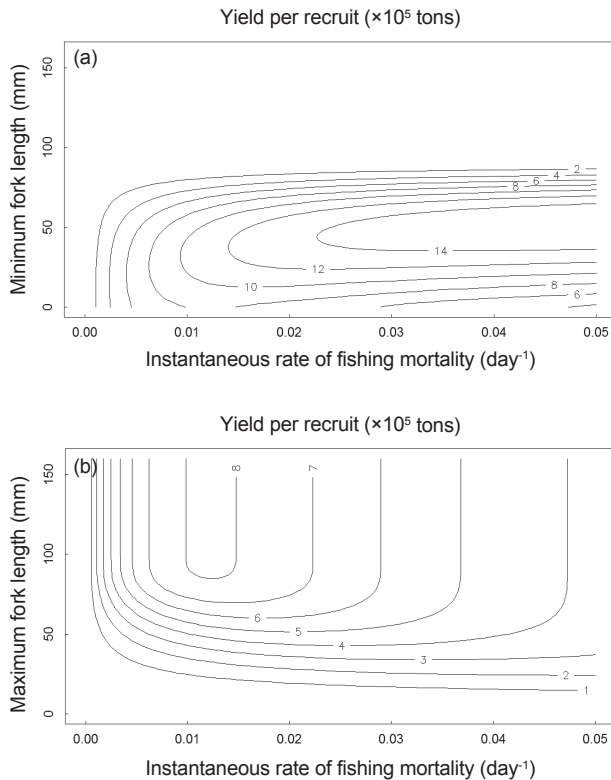


Fig. 2. Yield per recruit of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* with varying instantaneous fishing mortality and varying (a) minimum fork length of allowed catch (smaller fish are protected and bigger fish are allowed for commercial catch); (b) maximum fork length of allowed catch (bigger fish are protected and smaller fish are allowed for commercial catch).

day⁻¹일 때 가입당 생산량 $Y_{0.1}$ 은 약 122만톤으로 나타났으며, 가입당 최대생산량(Y_{max})은 F_{max} 가 0.028 day⁻¹일 때 131만톤으로 나타났다(Fig. 3a). 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 $F_{0.1}$ 이 0.028 day⁻¹일 때 가입당 생산량 $Y_{0.1}$ 은 약 24만톤으로 나타났으며, 가입당 최대생산량(Y_{max})은 F_{max} 가 0.038 day⁻¹일 때 약 25만톤으로 나타났다(Fig. 3b).

가입당 알 생산량

가입당 생산 모델로 평가된 F 와 $L_{c,min}$ 및 $L_{c,max}$ 에 따른 남해안 멸치의 가입당 알 생산량은 Fig. 4와 같다. 본 시뮬레이션에서 평가한 어획이 없을 시($F=0$, $T_c=0$) 알 최대 생산량은 약 8×10^9 개로 평가 되었으며, $L_{c,min}$, $L_{c,max}$ 와 F 에 따른 알 생산량은 두 조건에서 정반대의 결과를 나타냈다. 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건의 경우 $L_{c,min}$ 는 클수록 F 는 낮을수록 알 생산량이 증가하였으며, 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 $L_{c,max}$ 와 F 가 낮을수록 알 생산량이 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 현재 최소어획체장으로 보고된 30 mm (Jung, 2008)

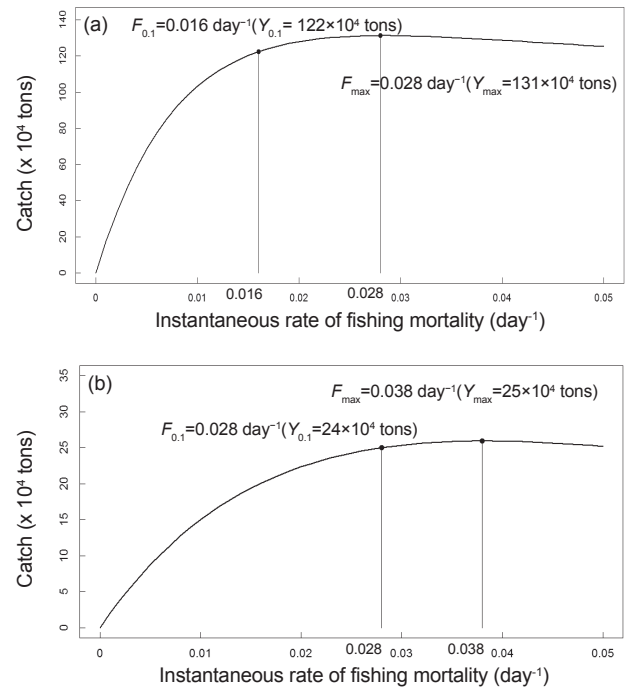


Fig. 3. Yield per recruit curves of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* with varying instantaneous fishing mortality when (a) minimum fork length of allowed catch=30 mm; (b) maximum fork length of allowed catch=30 mm. $F_{0.1}$ is a reference point of instantaneous fishing mortality where the slope of the yield per recruit curve corresponds to 10% of the initial slope at the origin and $Y_{0.1}$ is the corresponding catch; F_{max} is a reference point of instantaneous fishing mortality where the slope of the yield per recruit curve equals zero and Y_{max} is the corresponding catch.

을 기준으로 알 생산량은 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건의 경우 F 에 따른 알 생산량은 8×10^8 - 8×10^9 개로 나타났으며, 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 F 에 따른 알 생산량은 2×10^4 - 8×10^9 개로 나타났다.

고 찰

어획 조건에 따른 가입당 생산량

본 연구에서 개발한 시뮬레이션을 활용한 가입당생산 모델로 미성어를 우선으로 보호하거나 반대로 성어를 우선으로 보호하는 두 가지 시나리오에서 가입당 생산량(Y/R), 알 생산량과 가입당 생산량이 최대가 되는 지점인 순간어획사망계수(F_{max})와 생산량 곡선의 초기 기울기가 10%가 되는 지점인 순간어획사망계수($F_{0.1}$)를 평가하였다. 평가된 두 조건의 가입당 생산량(Y/R), 알 생산량, F_{max} 와 $F_{0.1}$ 의 값의 차이를 나타냈다. 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 경우 가입당 생산량은 $L_{c,min}$ 가 42-60 mm에서 약 150-159만톤의 최대 생산량을 나타내었

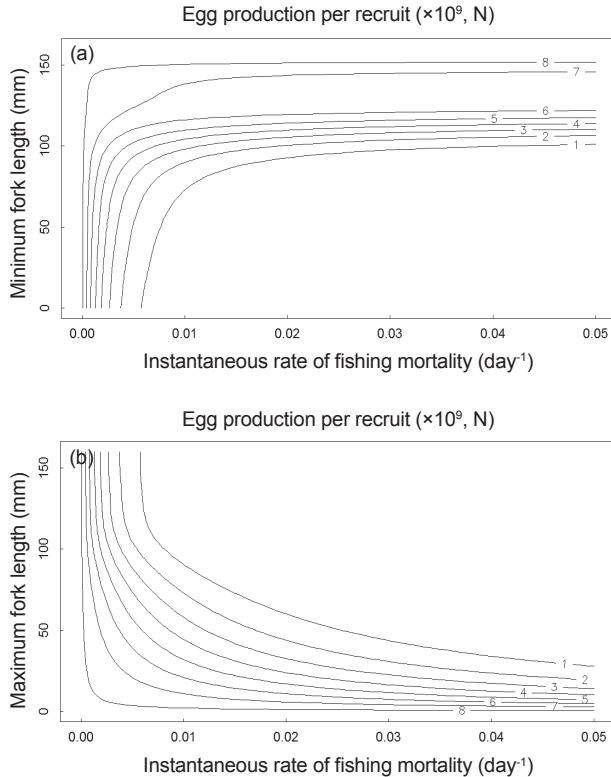


Fig. 4. Egg production per recruit of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* with varying instantaneous fishing mortality and varying (a) minimum fork length of allowed catch (smaller fish are protected and bigger fish are allowed for commercial catch), (b) maximum fork length of allowed catch (bigger fish are protected and smaller fish are allowed for commercial catch).

으며, 순간어획사망계수(F)가 높을수록 생산량이 높은 반면 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 가입당 생산량은 $L_{c,max}$ 가 88-160 mm에서 약 80-81만톤의 가장 높은 생산량을 나타냈다. 두 조건 모두 $L_{c,min}$, $L_{c,max}$ 와 F 가 증가할수록 가입당 생산량이 증가하다 감소하는 경향을 나타내었지만 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건은 가입당 생산량이 F 의 변화 보다 $L_{c,min}$ 에 따라 크게 달라졌으며, 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 $L_{c,max}$ 의 변화보다 F 의 변동에 가입당 생산량이 더 크게 달라지는 차이를 나타냈다. 두 조건에 따른 최대생산량 차이는 미성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 성어를 우선으로 보호하며 어획하는 것 보다 약 1.9배 어획량이 높은 것으로 나타났다. 따라서 미성어를 우선으로 보호하는 관리방안이 성어를 우선으로 보호하려는 방안보다 장기적으로 멸치 어획고를 증대시키는데 유리하다고 평가를 내렸다.

어획시작 체장에 따른 가입당 생산량 변동 비교

자원관리를 위한 수량적 수치 중 하나로 평가되는 생산량 곡

선에 대해 기율기가 초기 기율기의 10% 되는 지점인 $F_{0.1}$ 을 이용하여 $L_{c,min}$ 와 $L_{c,max}$ 에 따른 생산량을 비교하면(Fig. 2), 미성어를 우선으로 보호하는 조건의 경우 현재 $L_{c,min}$ 기준인 30 mm을 10 mm 올릴 시 가입당 생산량이 약 8% 증가할 것으로 나타났으며, 10 mm 낮추어 어획 시 약 12% 생산량이 감소할 것으로 나타났다(Fig. 2a). 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 현재 $L_{c,max}$ 30 mm을 10 mm 올리면 성어 생산량이 약 45% 증가할 것으로 나타났으며, 10 mm 내릴 시 약 37% 성어 생산량이 감소할 것으로 나타났다(Fig. 2b). 어획체장 30 mm을 기준으로 두 어획조건을 비교해보면 미성어를 보호하는 조건이 성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건보다 생산량이 약 80% 높게 나타났으며, 어획체장을 증가 시키거나 감소시켜도 미성어를 보호하는 조건의 생산량이 더 높은 것으로 나타났다. 또한 동일 어업방식 내에서도 두 어업방식 모두 어획체장을 높임에 따라 생산량도 높아지는 것으로 나타났지만 가입당 생산량에서 상당한 차이가 나타났다. 이는 가입당 생산량 도출 방정식 (13)과 같이 개체당 무게를 반영하여 계산 되기 때문에 어획개체 중 성어의 비율이 높은 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 어획 방식에서 상대적으로 높은 생산량이 나타난 것으로 예상할 수 있다.

어획 조건별 알 생산량 비교

본 모델에서 사용된 성숙 체장 Kim and Lo (2001)과 성장을 평가한 본 버틀란피 방정식 Jung et al. (2008)을 이용하여 산란에 참여하는 연령을 역추적 하면 멸치는 부화 후 최소 7개월(212일)이 되어야 산란에 참여 하는 것으로 나타났으며, 이는 NFRDI (2010)에 보고된 산란참여 연령(6개월)과 비슷하게 나타났다. 가입당 알 생산량을 평가한 Fig. 4에 따르면 어획이 없을 경우 멸치의 1년 동안 최대 알 생산량은 8×10^9 개로 나타났다. 어획방식 별 알 생산량은 미성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 $L_{c,min}$ 가 증가할수록 F 는 줄어들수록 알 생산량이 높아졌으며, 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 $L_{c,max}$ 가 감소할수록 F 는 줄어들수록 알 생산량이 높아지는 것으로 나타났다. 두 어획방식에 따른 알 생산량을 비교하기 위해 현재 $L_{c,min}$ 로 보고된 30 mm (Jung, 2008)을 기준으로 알 생산량을 비교하면 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건의 경우 F 의 변화에 따라 8×10^8 - 8×10^9 개로 나타났으며, 성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 알 생산량은 2×10^4 - 8×10^9 개로 미성어를 우선으로 보호하며 어획할 경우 성어를 우선으로 보호하며 어획할 때 보다 알 생산량이 높은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 각 조건 별 산란에 참여하는 개체의 비율 차이에 의해 나타난 결과로 예상할 수 있으며, 미성어를 우선으로 보호하는 어획방법에서는 $L_{c,min}$ 가 높을수록 산란에 참여하는 개체가 많아지고 성어를 우선으로 보호하는 어획방법에서는 $L_{c,max}$ 가 낮을수록 산란에 참여하는 개체가 많아지기 때문에 나타난 것으로 짐작할 수 있다. 따라서 장기적으로 보았을 때 성어를 우선으로 보호할

때보다는 미성어를 우선으로 보호할 때 멸치 어획고도 증대될 뿐만 아니라 어미가 낳는 알 개수도 늘어날 것이라고 평가했다.

가입당 생산량 모델에 따른 멸치 자원 관리

최근까지 수산자원 평가를 위해 일반적으로 사용되는 Beverton and Holt (1957)가 제시한 가입당 생산모델은 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건하에서만 수산자원 변동을 평가하지만 본 연구는 Beverton and Holt (1957)가 제시한 가입당 생산모델을 바탕으로 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건 뿐만 아니라 성어를 우선으로 보호하며 어획하는 조건을 가정하여 조건 별 멸치 자원의 어획량과 알 생산량의 변화를 모의실험을 통해 평가하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 최소어획체장을 규정하여 미성어를 우선으로 보호하며 어획하는 현행 적용 어획 규제가 어획 규제의 또 다른 방법으로 적용될 수 있는 산란에 참여하는 성어를 우선으로 보호하며 어획하는 것보다 가입당 생산량과 알 생산량이 높은 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서 평가한 최소어획체장 30 mm를 기준으로 가입당 생산량 변화(Fig. 3a)를 최근 멸치 어획량인 2010-2010년도 평균 어획량(MOF, 2017) 22만 톤과 비교하면 현재 어획량에 따른 F 는 0.001 수준으로 가입당 최대생산량(Y_{max})을 나타내는 131만톤($F=0.028$)에 도달하기 위해서는 현재보다 약 28배의 추가적인 노력량이 필요한 것으로 평가된다. 따라서, 지금보다 멸치 어획 노력량을 늘려도 멸치 자원을 남획하지 않고 더 많은 어획량을 얻을 수 있을 것으로 평가되지만 이는 우리나라에서 멸치 어획은 대한해협 전체에서 골고루 잡히는 것이 아니라 수심 10 m 이심의 통영 연안에 집중해서 어획되는 경향이 있는데 이러한 경향은 멸치잡이 어선들이 연료비와 같은 사회경제적 요인에 따라 어업비용 대비 수익을 최대화 하기 위해 멸치가 분포하는 해역 중 일부 범위인 육지에 가깝고 멸치가 밀집한 얕은 연안역에서 주로 조업 하기 때문으로 보인다(Fig. 5, b of Jung et al., 2016). 따라서 멸치 가격이 폭등하지 않는 한 현재 어획 노력량을 28배 올린다는 것은 현실적으로 불가능할 것으로 보인다.

연구의 한계점과 문제점

본 연구는 이전 연구자들이 평가한 멸치 생물학적 특성 및 연간 수온 변화 평가 연구결과를 바탕으로 시뮬레이션 하여 멸치 가입당 생산량을 평가 하였다. 본 연구에서 평가된 모델의 가입당 생산량은 성어의 기준을 어떻게 잡느냐에 따라 가입량이 크게 변하게 되는 단점을 가지고 있다. 따라서, 최근 진행된 멸치의 성장과 성숙 평가 연구 결과를 바탕으로 추가적인 가입당 생산량 분석 연구가 필요하며, 우리나라 멸치 가입당 생산량 평가 연구 부족으로 다른 연구 결과와 비교 할 수 없는 한계점을 가지고 있다. 멸치 가입당 생산량을 추정하기 위해 적용한 가정과 방정식의 상수는 이전 연구자들에 의해 연구된 자료를 이용하여 평가를 하였다. 하지만 멸치는 체장의 크기나 산란시기에 따라 분포범위가 달라져 서로 다른 서식 해양환경에 의해 성장과

산란력에 차이를 나타낼 뿐만 아니라 이러한 특성치들이 20-30년전에 이루어진 조사결과를 토대로 평가되었기 때문에 자연사망률과 산란력에 대한 연구의 불확실성이 존재한다(Lee et al., 1995; Takasuka et al., 2005; Jung, 2008). 따라서 과거와 비교하여 새롭게 환경이 바뀐 우리나라 전 해역에서 채집된 멸치 난자치어와 성어에 대한 분석과 추가적인 서식 환경별, 계절별 멸치 자원평가 연구를 통해 자연사망률, 자원량, 산란 특성치를 시간적으로나 공간적으로 더 정밀하게 추정하여 불확실성을 정량화할 필요가 있다(Takasuka et al., 2005).

추가연구

본 연구에서 평가된 결과는 어업에 드는 연료비를 비롯한 여러가지 경제적인 비용을 감안하지 않고 일정하게 증가하는 어획 노력량에 따른 생산량을 평가한 것이다. 따라서, 실제 어업에서 나타나는 순간어획사망계수 범위 추정 연구와 본 연구 결과를 바탕으로 최근 감소하는 멸치 자원의 효율적인 관리를 위한 새로운 최소어획체장 규제 연구가 필요하다. 또한, 멸치는 큰 개체보다 크기가 작은 개체(30-45 mm)가 경제적 가치가 더 큰 어종으로(Jung et al., 2008) 가입당 생산량 평가 연구와 함께 어획 시기별, 어획되는 멸치 크기 별 경제적 가치가 반영된 어획 생산 가치 평가 연구가 필요하다. 다양한 수산 어종의 효율적인 관리를 위해 살오징어, 고등어, 전갱이와 같이 멸치와 생물학적 특성이 비슷한 어종을 대상으로 본 연구에서 제시한 시뮬레이션을 활용한 가입당 생산 모델이 지속가능한 어업을 가져다줄 수 있는 생물학적 기준점을 평가하고 관련 방안을 개발하는데 확장되기를 바란다.

사 사

이 논문을 심사해주신 심사위원회께 감사드립니다. 이 논문은 2016학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

- Bacha M and Amara R. 2009. Spatial, temporal and ontogenetic variation in diet of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) on the Algerian coast (SW Mediterranean). *Estuar Coast Shelf Sci* 85, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.08.009>.
- Beverton RJH and Holt SJ. 1957. Fisheries investigation series II. In: On the dynamics of exploited fish populations. Chapman and Hall, London, UK, 533.
- Cha HK and Jung S. 2012. Simulation-based yield-per-recruit analysis of Pacific cod *Gadus macrocephalus* in Southeastern Korean coastal waters. *Korean J Fish Aquat Sci* 45, 493-498. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2012.0493>.
- Cha SS. 1990. Age and growth of anchovy (*Engraulis japonica*) juvenile in the coastal waters of Chonnam, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 23, 385-393.

- Cho ES and Kim JI. 2006. Mitochondrial DNA polymorphism of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus* Temminck & Schlegel) collected from the Korean offshore and inshore waters. J Life Sci 16, 812-827.
- Choi SG, Kim JY, Kim SS, Choi YM and Choi KH. 2001. Biomass estimation of anchovy (*Engraulis japonicus*) by acoustic and trawl surveys during spring season in the Southern Korean waters. J Kor Soc Fish Res 4, 20-29.
- Choi YM and Kim JY. 1988. Reproduction of anchovy, *Engraulis japonicus* (Houttuyn) in the Southern coastal waters of Korea. Bull Natl Fish Res Dev Agency 41, 27-34.
- Gulland J. 1965. Survival of the youngest stages of fish and its relation to year-class strength. ICNAF 6, 363-371.
- Hayashi A, Zhang K, Saruwatari T, Kawamura T and Watanabe Y. 2016. Distribution of eggs and larvae of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Pacific waters off Northern Japan in summer. Fish Sci 82, 311-319. <http://dx.doi.org/10.1007/s12562-015-0966-4>.
- Hwang SD, Song MH, Lee TW, McFarlane GA and King JR. 2006. Growth of larval Pacific anchovy *Engraulis japonicus* in the Yellow sea as indicated by otolith microstructure analysis. J Fish Biol 69, 1756-1769. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1095-8649.2006.01244.x>.
- Hwang SD, McFarlane GA, Choi OI, Kim JS and Hwang HJ. 2007. Spatiotemporal distribution of Pacific anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the West sea of Korea. J Fish Technol 10, 74-85.
- Jung S. 2008. Simulation-based daily cohort analysis of Pacific anchovy (*Engraulis japonicus*) in Southern Korean coastal waters. Fish Res 93, 280-288. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.05.005>.
- Jung S, Hwang SD and Kim J. 2008. Fecundity and growth-dependent mortality of Pacific anchovy (*Engraulis japonicus*) in Korean coastal waters. Fish Res 93, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.02.004>.
- Jung S, Pang IC, Lee JH and Lee K. 2016. Climate-change driven range shifts of anchovy biomass projected by biophysical coupling individual based model in the marginal seas of East Asia. Ocean Sci J 51, 563-580. <https://dx.doi.org/10.1007/s12601-016-0055-3>.
- Kim HJ, Jeong JM, Park JH and Baek GW. 2017. Feeding habits of larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Eastern Jinhae bay, Korea. Korean J Fish Aquat Sci 50, 92-97. <http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2017.0092>.
- Kim JY. 1983. Distribution of anchovy eggs and larvae off the Western and Southern coasts of Korea. Bull Korean Fish Soc 16, 401-409.
- Kim JY, Cho ES and Kim WJ. 2004. Population genetic structure of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) in Korean waters based on mitochondrial 12S ribosomal RNA gene sequences. J Life Sci 14, 938-950. <http://dx.doi.org/10.5352/JLS.2004.14.6.938>.
- Kim JY, Jeong HC, Kim H and Kang S. 2015. Forecasting the monthly abundance of anchovies in the South sea of Korea using a univariate approach. Fish Res 161, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.08.017>.
- Kim JY and Choi YM. 1988. Vertical distribution of anchovy, *Engraulis japonica* eggs and larvae. Bull Korean Fish Soc 21, 139-144.
- Kim JY and Kang YJ. 1992. Spawning ecology of anchovy, *Engraulis japonica*, in the Southern waters of Korea. Bull Korean Fish Soc 25, 331-340.
- Kim JK, Choi OI, Chang DS and Kim JI. 2002. Fluctuation of bag-net catches off Wando, Korea and the effect of sea water temperature. J Korean Fish Soc 35, 497-503. <http://doi.org/10.5657/kfas.2002.35.5.497>.
- Kim J and Lo NCH. 2001. Temporal variation of seasonality of egg production and the spawning biomass of Pacific anchovy, *Engraulis japonicus*, in the Southern waters of Korea in 1983-1994. Fish Oceanogr 10, 297-310. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2001.00175.x>.
- Kim MJ, Youn SH, Kim JY and Oh CW. 2013. Feeding characteristics of the Japanese anchovy, *Engraulis japonicus* according to the distribution of zooplankton in the coastal waters of Southern Korea. Korean J Environ Biol 31, 275-287. <http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.275>.
- King M. 2007. Stock assessment. In: Fisheries Biology, Assessment and Management II. John Wiley and Sons, Iowa, U.S.A., 254-255.
- Ko JC, Yoo JT, Choi YM, Kim JW and Im YJ. 2008. Fisheries management of an abalone *Haliotis diversicolor* in the Eastern coastal waters of Jeju island using yield-per-recruit model. Korean J Malacol 24, 143-151.
- Lee MA, Lee KT and Shiah GY. 1995. Environmental factors associated with the formation of larval anchovy fishing grounds in the coastal waters of southwest Taiwan. Mar Biol 124, 621-625.
- Lee SJ and Go YB. 2002. Distribution of the eggs and larvae of anchovy, *Engraulis japonica*, and its relationships with environmental factors around Jeju strait in summer. Korean J Ichthyol 14, 222-233.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2017. Fisheries information service. Retrieved from <http://www.fips.go.kr/> on 16 Aug 2017.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2010. *Engraulis japonicus*. In: Ecology and fishing ground of fisheries resources in Korean waters. NFRDI, Busan, Korea, 110.
- Oh TY, Kim JI, Seo YI and Cho ES. 2009. The population genetic structure of the Japanese anchovy (*Engraulis japonicus* Temminck & Schlegel) in the West, South and East seas of Korea based on microsatellite DNA analysis. J Life Sci 19, 174-178.
- Park CS, Lee DW, Kim ZG and Kang YJ. 2000. Stock assess-

- ment and management of the Hairtail, *Trichiurus lepturus* Linnaeus, in Korean waters. J Kor Soc Fish Res 3, 29-38.
- Park KJ and Cha SS. 1995. Food organisms of postlarvae of Japanese anchovy (*Engraulis japonica*) in Kwangyang bay. J Korean Fish Soc 28, 247-252.
- Pauly D, Trites AW, Capuli E and Christensen V. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. ICES J Mar Sci 55, 467-481. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1997.0280>.
- Suhara M, Mori Y, Mihara Y, Yamamoto M, Kawabata A, Takahashi M, Katsukawa Y, Katayama S, Yamashita Y, Kawamura T and Watanabe Y. 2013. Comparison of reproductive traits of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* among sea areas around Japan. Nippon Suisan Gakkaishi 70, 813-822.
- Takeshige A, Miyake Y, Nakata H, Kitagawa T and Kimura S. 2015. Simulation of the impact of climate change on the egg and larval transport of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) off Kyushu island, the Western coast of Japan. Fish Oceanogr 24, 445-462. <http://doi.org/10.1111/fog.12121>.
- Takasuka A, Oozeki Y, Kubota H, Tsuruta Y and Funamoto T. 2005. Temperature impacts on reproductive parameters for Japanese anchovy: comparison between inshore and offshore waters. Fish Res 76, 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2005.07.003>.
- Yamada U, Tokimura M, Horikawa H and Nakabo T. 2007. *Engraulis japonicus*. In: Fishes and fisheries of the East China and Yellow seas. Tokai University press, Tokyo, Japan, 223-225.
- Yasue N, Doiuchi R, Yoshimoto Y and Takeuchi T. 2010. Diet of late larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in the Kii Channel, Japan. Fish Sci 76, 63. <https://doi.org/10.1007/s12562-009-0181-2>.
- Yasue N, Harada S and Takasuka A. 2016. Seasonal variability in the development of Japanese anchovy during the transition from larval to juvenile stages. Mar Ecol Prog Ser 562, 135-146. <https://doi.org/10.3354/meps11942>.
- Zhang CI, Kim S and Yoon SB. 1992. Stock assessment and management implications of small Yellow croaker in Korean waters. Bull Korean Fish Soc 25, 282-290.
- Zhao X, Hamre J, Li F, Jin X and Tang Q. 2003. Recruitment, sustainable yield and possible ecological consequences of the sharp decline of the anchovy (*Engraulis japonicus*) stock in the Yellow sea in the 1990s. Fish Oceanogr 12, 495-501. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2003.00262.x>.
- Zheng W, Zou L and Han Z. 2015. Genetic analysis of the populations of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* from the Yellow sea and East China sea based on mitochondrial cytochrome B sequence. Biochem Syst Ecol 58, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2014.12.007>.
- Zhou X, Sun Y, Huang W, Smol JP, Tang Q and Sun L. 2015. The pacific decadal oscillation and changes in anchovy populations in the Northwest Pacific. J Asian Earth Sci 114, 504-511. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.06.027>.