

모의실험을 통한 한국 동해 도루묵(*Arctoscopus japonicus*)의 자연사망 계수 조건에 따른 가입당 생산 분석

이경환 · 서호영¹ · 조기필^{2*}

전남대학교 ICT수산자원관리연구소, ¹전남대학교 해양융합과학과, ²강원대학교 시소프트웨어학과

Simulation-based Yield-per-recruit Analysis of Sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea Subjected to Natural Mortality Conditions

Kyunghwan Lee, Ho Young Soh¹ and Giphil Cho^{2*}

Fishery Resource Management Research Institute based on ICT, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

¹Department of Ocean Integrated Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Republic of Korea

²Department of Artificial Intelligence & Software, Kangwon National University, Samcheok 25913, Republic of Korea

To estimate the biological reference points, suitable for fisheries management of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea, we simulated the yield-per-recruit (Y/R) from age 0 to 6 (0–2,555 days). The stimulation was based on two instantaneous natural mortality conditions: size-dependent (M_t , d^{-1}) and constant (M_{cons} , d^{-1}); Subsequently, the biological reference points of the two mortality conditions was compared. M_t decreased from 0.0075 d^{-1} to 0.0018 d^{-1} depending on growth, and M_{cons} remained constant at 0.0011 d^{-1} for all ages. Our Y/R model showed that the maximum yield of M_{cons} was 14 times higher than that of the M_t . The length at first capture to maximize the harvest at the $F_{0.1}$ points of the two natural mortality conditions was $L_{c,t}=10.2$ cm (TL) and $L_{c,cons}=17$ cm (TL). We concluded that M_t was more suitable for estimating M than M_{cons} ; this is because $L_{c,t}$ showed minimal difference from the current fishing regulations (11 cm, TL), and M_t reflected more biological characteristics than M_{cons} . We suggest that 10.2 cm and 0.8 as the suitable length at first capture and corresponding age, respectively for efficient fisheries management of sandfish.

Keywords: Sandfish, Biological reference point, Length at first capture, Natural mortality

서론

도루묵(*Arctoscopus japonicus*)은 농어목 도루묵과에 속하는 어류로 우리나라 동해를 비롯한 일본 혼슈 북부 해역, 사할린, 캄차카반도, 알래스카 대륙붕의 수온 1.5–13°C에 분포하며, 한국과 일본에서 경제적으로 중요한 냉수성 저어류로 구분된다 (Tsukamoto and Shima, 1990; Sakuramoto et al., 1997; Watanabe et al., 2005; Tian et al., 2006; Kim et al., 2015). 우리나라 도루묵은 겨울철(11–12월) 산란을 위해 수심 1–10 m의 얇은 강원 연안으로 몰려와 모자반, 잘피와 같은 해조류 줄기에 난

경 3.1–3.4 mm의 둥근 알 덩어리를 부착시킨다(Myoung et al., 1989; Lee et al., 2006; An et al., 2011). 산란 후 봄철 수심 약 100–200 m인 깊은 곳으로 이동하여 강원 연안에서 울산 연안 까지 넓게 분포하였다가 가을철 산란을 위해 다시 북상하는 산란회유를 한다(An et al., 2011; Yang et al., 2012). 유전자 분석에 따른 동해(East Sea) 도루묵 계군은 크게 우리나라 동해, 일본 혼슈 북부 해역, 홋카이도 남쪽 해역 3개의 계군으로 나뉘며, 우리나라 동해 계군과 일본의 홋카이도 계군은 유전적으로 뚜렷한 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다(Shirai et al., 2006; Kim et al., 2015). 도루묵은 2006년 수산자원 회복계획의 초기

*Corresponding author: Tel: +82. 33. 570. 6375 Fax: +82. 33. 570. 6589

E-mail address: giphil@kangwon.ac.kr



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.2023.0331>

Korean J Fish Aquat Sci 56(3), 331-340, June 2023

Received 20 February 2023; Revised 16 May 2023; Accepted 19 May 2023

저자 직위: 이경환(박사후연구원), 서호영(교수), 조기필(조교수)

시범 대상 종으로 시작하여 2009년부터는 주요 대상 어업인 동해구기선저인망과 동해구트러어업에 대해 연간 어획량을 할당하고 관리하는 총허용어획량(total allowable catch, TAC) 대상 어종 중 하나다(Choi and Kim, 2012; Kim, 2015). 1970년부터 도루묵 연간 어획량 변화를 10년 단위 평균으로 살펴보면 1970년대 10,950톤의 높은 어획량에서 1980년대 5,604톤, 1990년대 2,831톤, 2000년대 2,611톤까지 감소한 이후 점차 증가하여 2010년대 4,920톤을 나타냈다. 하지만, 최근 연간 어획량은 2016년 7,497톤의 최대생산량을 나타낸 이후 2021년 2,760톤 수준으로 점차 감소하는 경향을 나타냈다(MOF, 2022).

가입당 생산량 모델은 어종별 생물학적 특성을 기반으로 최소 어획체장(length at first capture, L_c)과 어획사망계수(F) 변동에 따른 생산량을 평가하여 해당 어종의 자원상태를 진단하고 효율적인 어획 관리가 이루어지기 위한 어획개시연령 및 어획개시체장과 같은 생물학적 기준점을 평가하는 모델로 Beverton and Holt (1957)가 제시한 방법으로 평가하고 있다. 하지만, Beverton and Holt (1957)가 제시한 식에서 자원의 감소 요인 중 자연사망률을 뜻하는 자연사망계수(M)는 모든 연령에서 일정한 것으로 가정하여 고정적인 값으로 계산하기 때문에 자연현상에서 나타나는 체장과 연령에 따른 자연사망률 변동을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다(Lee et al., 2017).

어류의 자연사망률은 초기생활기(알, 자 치어 시기)에 미약한 유영능력으로 인해 해양환경 변동에 취약하고 포식자로부터 회피 능력이 낮아 가장 높으며, 성장에 따른 운동성 향상은 알맞은 서식처를 선택하기 위한 능력을 증가시켜 포식자에 의한 선택적 사망이 감소하는 것으로 알려져 있다(Pauly, 1980; Peterson and Wroblewski, 1984; McGurk, 1986; Blaxter, 1992; Perry et al., 2005). Meekan et al. (2006)는 성장에 따라 자연사망률이 감소하는 현상을 “Bigger is better 가정”으로 정리하였다. 자연사망에 의한 생물자원의 감소는 일반적으로 M으로 표시하며, 해당 어종의 성장, 성숙을 평가하기 위한 매개변수와 최대 연령과 같은 생물학적 특성치를 반영하여 평가하고 있다(Alverson and Carney, 1975; Pauly, 1980; Zhang and Megrey, 2006). 우리나라에서도 어종별 성장 특성을 반영한 자연사망계수를 추정하기 위해 멸치, 고등어 등 경제적으로 중요한 어종을 대상으로 체장 변동을 기반으로 한 연구가 수행되었다(Jung et al., 2008, 2009; Cho et al., 2020; Go et al., 2020).

최근까지 진행된 우리나라 동해 도루묵에 대한 국내 연구로 난 발생 및 자 치어 형태(Myoung et al., 1989), 연령에 따른 성장과 성숙(Lee and Kang, 2006; Lee et al., 2006; Yang et al., 2008), 위 내용물 조사를 통한 식성(Lee et al., 2007; Kang et al., 2019; Jin et al., 2022), 산란 특성(An et al., 2011), 회유에 따른 분포 특성 평가(Yang et al., 2012, 2013)와 유전자분석을 통한 동해(East Sea) 도루묵 계군 분석(Kim et al., 2015)연구가 수행되었다.

이외 도루묵 자원관리 및 평가를 위한 성장에 따른 자연사망

계수 추정 연구(Cho et al., 2020), 자원량 추정 연구(Lee et al., 2009), 도루묵 자원회복과 관리를 위한 자원생물학적 특성치 평가(Lee, 2007) 및 TAC제도 정책 평가 연구(Kim, 2015)가 수행되었다. 동해(East Sea) 도루묵에 대해 최근 국외에서 진행된 연구는 도루묵 일 단위 초기 성장(Tsukamoto and Shima, 1990), 유전자분석을 통한 계군 분석(Shirai et al., 2006), 자 치어의 수직분포와 식성(Komoto et al., 2011), 우리나라 동해와 일본 혼슈 북부 해역의 자원량 변동(Sakuramoto et al., 1997; Watanabe et al., 2005, 2006, 2011) 평가 연구가 수행되었다. 국내·외 연구 동향에서 볼 수 있듯이 동해(East Sea) 도루묵의 생물학적 특성에 대한 연구와 자원량 변동을 평가하기 위한 연구는 지속적으로 수행되었지만 적절한 도루묵 자원 이용을 위한 어획기준점 평가 연구는 상대적으로 부족하다. 수산자원 회복사업 시행 이후 증가하던 우리나라 도루묵 어획량은 2016년을 기점으로 점차 감소하여 최근 수산자원 회복사업 기준 목표 어획량인 5,000톤(Choi and Kim, 2012) 이하를 유지하고 있어 현행 도루묵 어획 기준을 진단하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 어류는 유영능력이 발달할수록 자연사망률이 감소하기 때문에 Meekan et al. (2006)가 제시한 자연사망계수 가정과 전통적 가입당 생산분석에 적용하는 자연사망계수 조건에서 적정 어획 기준점을 각각 평가하고 현행 어획 기준과 비교하여 어떤 자연사망계수 평가 방법이 어종별 어획 관리를 위한 어획 기준 설정에 적합한 방법인지 비교하는 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구는 우리나라 주변 해역 중 주요 분포 해역인 동해의 도루묵을 대상으로 과거에 수행한 생물학적 특성 평가 연구자료를 이용하여 시간에 따른 성장을 평가하고 1) 성장에 따라 자연사망계수가 감소하는 조건과 2) 전 연령의 자연사망사망계수가 일정한 조건에서 가입당 생산량을 추정하는 모의 시뮬레이션을 각각 수행하였다. 이 시뮬레이션을 통해 두 가지 자연사망계수 조건에 따른 가입당 생산량을 평가하고 생물학적 기준점별 생산량을 비교하여 최근 감소하는 도루묵 자원의 적정 어획 관리를 위한 기준점을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

접근방법

도루묵 가입당 생산량을 평가하기 위해 Lee and Kang (2006)이 보고한 연령별 체장(body length, BL) 자료를 전장(total length, TL)으로 변환하여 암컷과 수컷을 함께 고려한 성장과 두 가지 자연사망계수 조건에 따른 가입당 생산량을 각각 평가하고 비교하였다.

도루묵 가입당 생산량 평가 시뮬레이션

L_c 1–25 cm, 어획사망계수(F) 0–2 yr⁻¹에서 두 자연사망계수 조건에 따른 도루묵 가입당 생산량(Y/R)을 비교하기 위해 생물학적 기준점으로 사용되는 초기 곡선의 기울기가 10% 되는

지점인 $F_{0.1}$ 과 가입당 생산량이 최대가 되는 F_{max} 를 평가하였다 (Beverton and Holt, 1957; Deriso, 1987).

1) 전 연령에 대해 자연사망계수가 성장에 반비례하여 감소하는 조건(M_t)과 일정한 조건(M_{cons})일 때, Y/R을 각각 평가하고 생물학적 기준점별 Y/R을 비교하였다.

2) 두 자연사망계수 조건에서 최소어획전장(L_c)변동에 따른 $F_{0.1}$ 지점의 생산량을 비교하여 L_c 별 Y/R이 가장 높은 지점을 평가하고 현행 도루묵 어획 규제인 전장(TL)인 11 cm (Lee and Lee, 2018)와 비교하였다.

가정

- 1) 도루묵 최대 연령은 7년이다(0-6세; Lee et al., 2009).
- 2) 시간이 0일 때 길이를 의미하는 L_0 는 부화직후 자어 TL 1.09 cm를 적용하였다(Myoung et al., 1989).
- 3) 도루묵 초기 개체수(N_0)는 Lee et al. (2006)이 보고한 도루묵 성어 BL 14-23 cm의 평균 포란수 1,187개로 가정하였다.

일별 시뮬레이션

시뮬레이션은 7년간 일 단위(0-2,555 days)로 실행하였으며, 평가에 적용한 생물학적 특성은 다음의 과정으로 계산하여 적용하였다.

성장

도루묵의 연령에 따른 성장을 현행 어획 규제 단위로 적용하고 있는 TL을 기준으로 평가하기 위해 Lee and Kang (2006)이 보고한 연령별 암컷과 수컷 BL을 Lee et al. (2006)이 보고한 TL-BL 관계식(식 1)에 반영하여 암컷과 수컷을 함께 고려한 연령별 평균 TL을 계산하였다(Table 1).

$$TL=1.1455 \times BL+0.0069 \dots\dots\dots (1)$$

도루묵 일별 TL 변화율은 본 버틀란피 성장식을 시간 t (0-2,555 days)로 미분한 식을 사용하였다(식 2).

$$dL/dt=K \times (L_{\infty}-L_t) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, 본 버틀란피 성장식의 매개변수인 L_{∞} 는 개체의 이론적 최대전장(cm)을 의미하고, K는 성장계수, L_t 는 t일의 개체

TL을 의미한다. 식 (2)의 L_{∞} 와 K는 Table 1의 연령별 TL을 활용하여 비선형인 본 버틀란피 성장식의 매개변수를 선형으로 회귀 분석하여 추정하는 Walford 방법으로 평가하였다(Zhang, 2010). t+1 날짜의 TL L_{t+1} 은 식 (3)으로 계산하였다.

$$L_{t+1}=L_t+(dL/dt) \dots\dots\dots (3)$$

체중

도루묵 일별 체중(weight, W)은 다음의 TL-W 관계 방정식으로 계산하였다.

$$W_t=\alpha \times L_t^{\beta} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, W_t 는 t일의 개체별 체중을 의미하고 α 와 β 는 TL-W 관계 평가식의 매개변수를 의미한다. 매개변수 α 와 β 는 Lee and Kang (2006)이 보고한 연령별 암컷과 수컷 BL을 식 (1)에 대입하여 TL으로 변환(Table 2) 후 체중과의 관계를 최소자승법에 기반한 비선형회귀분석(nonlinear least squares, nls)으로 추정하였다.

순간자연사망계수와 순간전사망계수

시뮬레이션 조건 1)의 자연사망계수 조건에 따른 Y/R을 비교하기 위해 성장에 반비례하는 순간자연사망계수 M_t (d^{-1})는 Cho et al. (2020)가 도루묵 TL을 기준으로 개발한 방정식을 사용하여 일별로 계산하였다(식 5-1).

$$M_t=q/(K \times L_{\infty}) \ln(\exp(K(((t+1)/365)-t_0)-1)/\exp(K((t/365)-t_0)-1))(d^{-1}) \dots\dots\dots (5-1)$$

여기서, t는 0-2,555일(7년)까지의 일자를 의미하고 M_t 는 t일의 일별 순간자연사망계수(d^{-1})를 의미한다. L_{∞} , K와 t_0 는 Walford 방법으로 추정한 본 버틀란피 방정식의 매개변수 값이며, q는 상수로 Cho et al. (2020)가 평가한 15.23를 대입하여 계산하였다.

전체연령에 대해 자연사망계수가 일정한 M_{cons} (d^{-1})는 M_t 를 평가하기 위해 적용한 성장식 매개변수를 동일하게 반영하여 평가하기 위해 Zhang and Megrey (2006)이 제시한 방정식을 사용하여 일별로 계산하였다(식 5-2). Zhang and Megrey (2006)은 어종별 생태적 특성을 표영성(31종)과 저서성(60종)

Table 1. Estimated mean total length of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East sea of Korea, based on averaged body length by age, considering both male and female

Age	Body length (cm)			Total length (cm)
	Male	Female	Average	
1	10.16	9.05	9.61	11.01
2	13.04	13.25	13.15	15.06
3	15.04	16.8	15.92	18.24
4	16.71	18.98	17.85	20.45

Table 2. Age-specific total length of male and female sandfish in the East Sea of Korea, estimated by body length

Age	Total length (cm)	
	Male	Female
1	11.65	10.37
2	14.94	15.18
3	17.24	19.25
4	19.15	21.75

으로 구분하여 자연사망계수를 추정하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$M_{\text{cons}} = \left(\frac{\beta K}{\exp(K(t_{\text{mb}} - t_0) - 1)} \right) / 365 \dots\dots\dots (5-2)$$

$$t_{\text{mb}} = C_i \times t_{\text{max}} \dots\dots\dots (5-3)$$

여기서, M_{cons} 은 일정한 일 단위(d^{-1}) 순간자연사망계수를 의미하며, β 는 TL-W 관계에서 평가한 매개변수 β 를 사용하였다. 성장계수 K 와 길이가 0 cm일 때의 시간 t_0 는 Walford 방법으로 추정된 본 버틀란피 성장 방정식 매개변수 값을 사용하였다. Zhang and Megrey (2006)는 식 (5-3)에서 계수 C_i 를 최대 연령(t_{max})과 자원량이 최대인 연령(t_{mb})의 비로 정의하여 유영성 어종은 0.302 (31종 평균), 저서성 어류는 0.44 (60종 평균)로 평가하였다. 본 연구에서 계수 C_i 는 저서 어종으로 구분되는 도루묵의 생태적 특성을 반영하여 0.44을 사용하였다(Tian et al., 2006; Watanabe et al., 2011). t_{max} 는 7년(0-6세)을 반영하여 계산하였다.

$$F_t = \begin{cases} F/365 & \text{if } L_t \geq L_c \\ 0 & \text{if } L_t < L_c \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

일별 순간어획사망계수(d^{-1})는 식 (6)으로 평가하였다. 여기서, F_t 는 일 단위 순간어획사망계수(d^{-1})를 의미하며, L_t 는 t 일 (0-2,555 days)의 개체 TL, L_c 는 최소어획전장을 의미한다. 일 단위 순간전사망계수(d^{-1})는 아래의 식으로 계산하였다.

$$Z_t = \begin{cases} (M_t \text{ or } M_{\text{cons}}) + F_t & \text{if } L_t \geq L_c \\ (M_t \text{ or } M_{\text{cons}}) & \text{if } L_t < L_c \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

여기서 Z_t 는 t 일의 순간전사망계수(d^{-1})이다.

일별 개체수와 가입당 생산량

자연사망과 어획사망을 반영한 일별 개체수 변화는 다음의 방정식으로 계산하였다.

$$N_t = N_{t-1} \times \exp(-Z_{t-1}) \dots\dots\dots (8)$$

여기서 N_t 는 t 일의 생존 개체수를 의미한다. 일별 가입당 생산량은 Gulland (1965)의 어획방정식에 일자 별 개체의 체중을 반영한 아래의 식으로 계산하였으며(King, 2013), Y_t 는 t 일의 가입당 생산량을 의미한다.

$$Y_t = (F_t/Z_t) \times N_t \times (1 - \exp(-Z_t)) \times W_t \dots\dots\dots (9)$$

M_t 와 M_{cons} 의 조건에서 7년(0-2,555 days)동안 시뮬레이션한 도루묵 총 가입당 생산량은 다음의 방정식으로 각각 계산하였다.

$$Y = \sum_0^{2,555} Y_t \dots\dots\dots (10)$$

여기서 Y 는 7년간 일별 시뮬레이션한 가입당 생산량의 총 합을 의미한다.

계산 프로그램

Walford 방법으로 추정된 도루묵의 본 버틀란피 성장 방정식 매개변수는 Excel 프로그램의 회귀 분석을 활용하여 계산하였으며, 도루묵 TL-W 관계, 순간자연사망계수(d^{-1}) 및 가입당 생산량 평가 시뮬레이션은 R (4.1.2.)통계프로그램으로 평가하였다.

결 과

성장

Lee and Kang (2006)의 자료를 활용하여 Walford 방법으로 암컷과 수컷을 함께 고려한 우리나라 동해 도루묵 추정 본 버틀란피 성장식은 다음과 같다(Fig. 1).

$$L_t = 27.16(1 - \exp(-0.29(t + 0.78))) \dots\dots\dots (11)$$

연령별 암컷과 수컷을 함께 고려하여 식 (4)를 nls로 평가한 TL-W 관계 매개변수 α 는 0.0037, β 는 3.29로 평가되었으며(식 12), TL별 W 의 변화는 Fig. 2와 같다.

$$W_t = 0.0037 \times L_t^{3.29} \dots\dots\dots (12)$$

순간자연사망계수

두 자연사망계수 평가 조건에서 성장에 따른 순간자연사망계

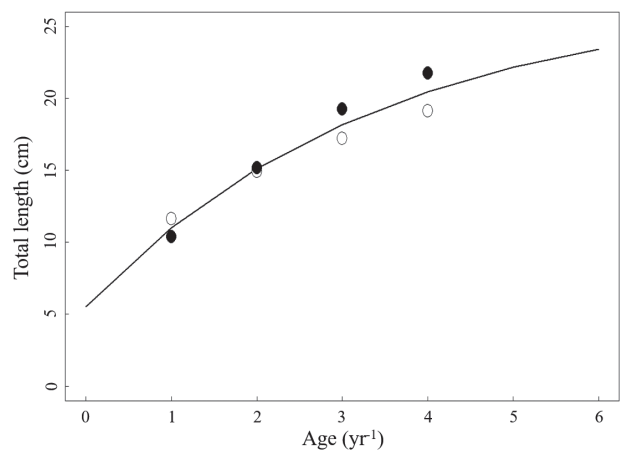


Fig. 1. The von Bertalanffy growth curve of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea, combining both sexes, derived from the mean total length by age. The coefficients of the growth curve were estimated using the Walford method. ○, Male; ●, Female.

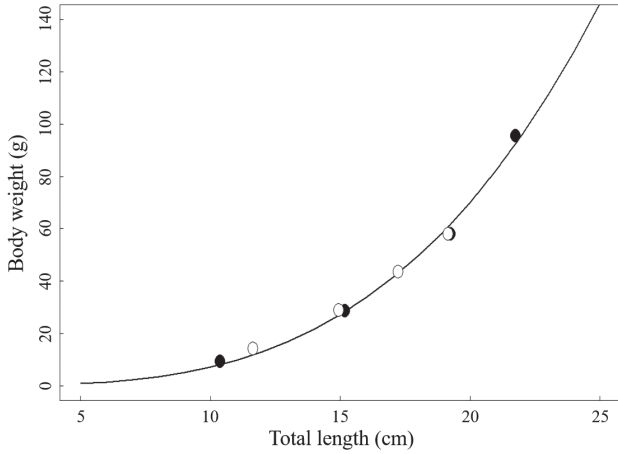


Fig. 2. Relationship between total length and body weight estimated using the non-linear regression method for sandfish in the East Sea of Korea. ○, Male; ●, Female.

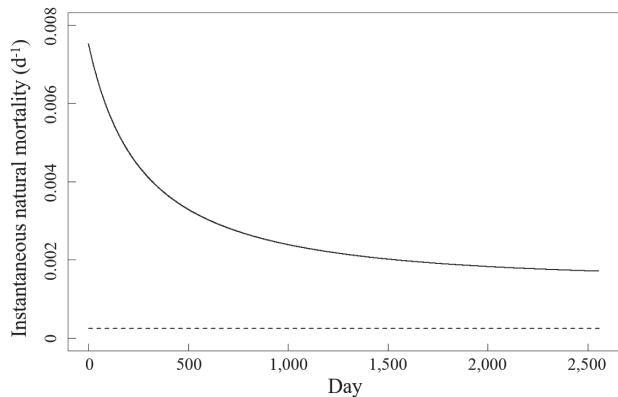


Fig. 3. Changes in M_i (solid line) and M_{cons} (dotted line) of sandfish under two instantaneous natural mortality conditions from 0 to 2,555 day.

수(d^{-1}) 평가 결과 Cho et al. (2020)의 방법에 따른 0-6세 일별 M_i 는 0.0075-0.0017 d^{-1} 로 평가되며 성장에 따른 TL이 증가함에 따라 급격히 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 전체 연령에 대해 순간자연사망계수(d^{-1})가 일정한 M_{cons} (Zhang and Megrey, 2006)는 0.0011 d^{-1} 로 평가되었다(Fig. 3).

가입당 생산량 시뮬레이션

L_c 1-25 cm, 어획사망계수(F) 0-2 yr^{-1} 의 조건에서 두 가지 자연사망계수 추정 방법에 따라 각각 평가한 도루묵 가입당 생산량 평가 시뮬레이션(7년) 결과 M_i 의 조건에서 가입당 생산량은 $L_{c,i}$ 가 8.8-12.7 cm, F가 1.33-2 yr^{-1} 일 때 약 853.6-930.65 g으로 높은 생산량을 나타냈다(Fig. 4a). M_{cons} 의 조건에서 가입당 생산량은 $L_{c,cons}$ 가 14.1-19.7 cm, F가 0.81-2 yr^{-1} 일 때 약

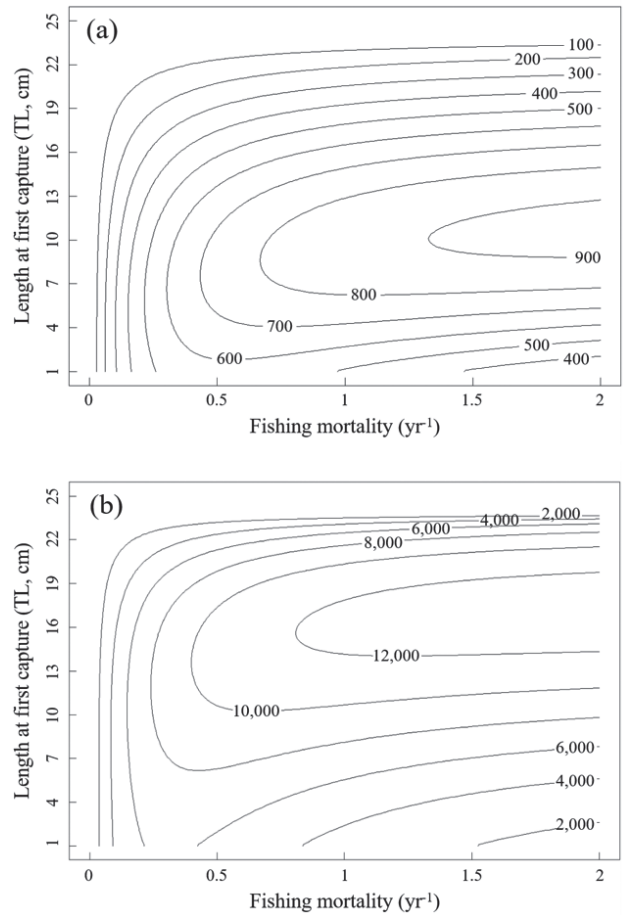


Fig. 4. Yield per recruit of sandfish in the East Sea of Korea with the varying length at first capture (L_c , cm in TL) and fishing mortality (F, yr^{-1}) of two different conditions: (a) size-dependent instantaneous natural mortality (M_i , d^{-1}), and (b) constant instantaneous natural mortality (M_{cons} , d^{-1}). TL, Total length.

10,043.97-12,976.34 g으로 높은 생산량을 나타냈다(Fig. 4b). 두 자연사망계수 조건 모두 L_c 가 23.8 cm보다 높을 경우 F에 관계없이 가입당 생산량이 0으로 나타났다.

적정 어획 기준점 평가

자연사망계수 조건별 적정 어획 기준점을 평가하기 위해 L_c 변동에 따른 생산량 곡선의 기울기가 10%가 되는 $F_{0.1}$ 지점의 생산량($Y_{0.1}$) 변화를 평가한 결과는 Fig. 5와 같다. M_i 를 적용했을 때 $F_{0.1}$ 지점의 생산량은 $L_{c,i}$ 가 증가함에 따라 점차 증가하여 10.2 cm에서 가장 높은 가입당 생산량을 나타냈으며, 이후 점차 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 5a). M_{cons} 를 적용했을 때 $F_{0.1}$ 지점의 생산량은 $L_{c,cons}$ 가 증가함에 따라 점차 증가하여 17 cm일 때 최대 생산량을 나타낸 이후 점차 감소하였으며, 약 21 cm 이후 급격한 생산량 감소를 나타냈다(Fig. 5b).

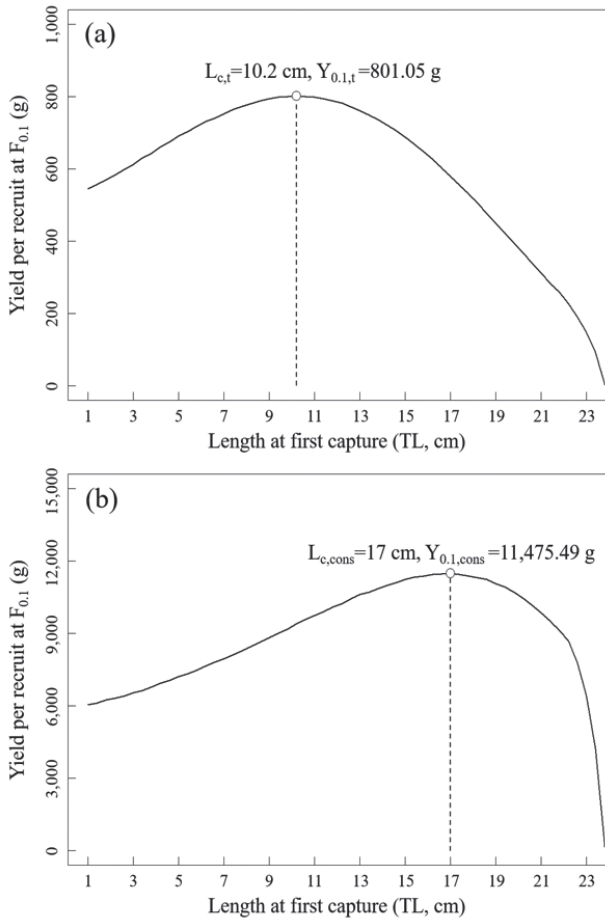


Fig. 5. Changes in yield at $F_{0.1}$ points of sandfish with varying length at first capture ($L_{c,t}$ cm in TL) of two different conditions: (a) size-dependent instantaneous natural mortality (M_t , d^{-1}), and (b) constant instantaneous natural mortality (M_{cons} , d^{-1}). $F_{0.1}$ represents a biological reference point of corresponding to 10% of the slope of the yield per recruit curve at the origin ($F=0$), and $Y_{0.1}$ is the corresponding yield. TL, Total length.

생물학적 기준점별 생산량

M_t 와 M_{cons} 의 조건에서 평가한 적정 어획 기준 전장별($L_{c,t}$, $L_{c,cons}$) $F_{0.1}$ 과 이때의 생산량 $Y_{0.1}$, 가입당 생산량이 최대가 되는 F_{max} 와 이때의 생산량 Y_{max} 는 Fig. 6와 같다. M_t 의 조건에서 적정 어획기준 전장으로 평가된 10.2 cm ($L_{c,t}$)을 기준으로 $F_{0.1,t}$ 는 $0.71 yr^{-1}$, 이 때의 가입당 생산량 $Y_{0.1,t}$ 은 801.05 g으로 나타났으며, 가입당 최대생산량은 $F_{max,t}$ 가 $2 yr^{-1}$ 일 때 928.35 g으로 나타났다(Fig. 6a). M_{cons} 조건에서 적정 어획기준 전장으로 평가된 17 cm ($L_{c,cons}$)을 기준으로 $F_{0.1,cons}$ 는 $0.72 yr^{-1}$, 이 때의 가입당 생산량 $Y_{0.1,cons}$ 은 11,475.49 g으로 나타났으며, 가입당 최대 생산량 $Y_{max,cons}$ 는 $F_{max,cons}$ 가 $2 yr^{-1}$ 일 때 약 12,971.11 g을 나타냈다(Fig. 6b).

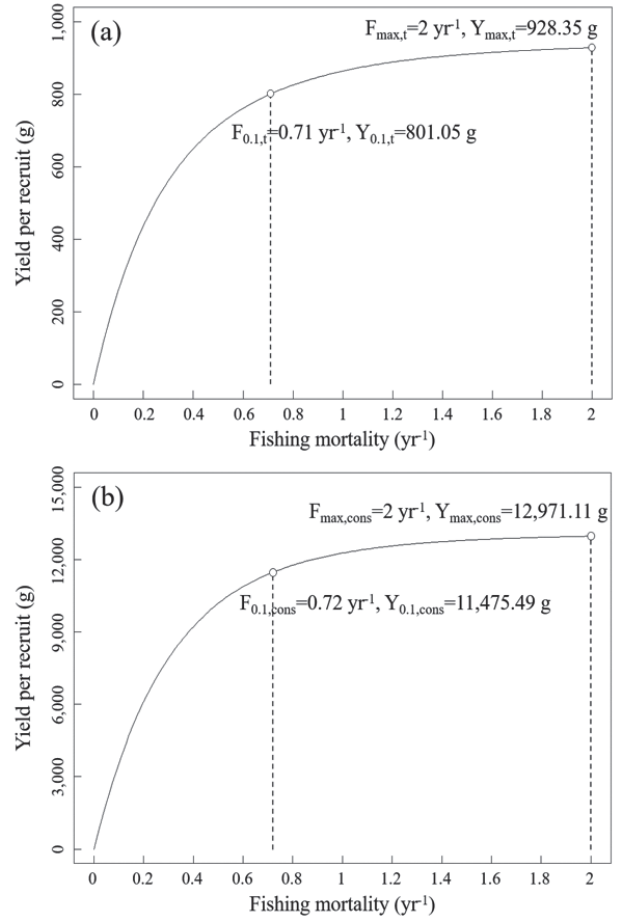


Fig. 6. Yield per recruit curves of sandfish with varying fishing mortality of two different conditions: (a) $L_{c,t} = 10.2$ cm (TL) and size-dependent instantaneous natural mortality (M_t , d^{-1}), and (b) $L_{c,cons} = 17$ cm (TL) and constant instantaneous natural mortality (M_{cons} , d^{-1}). F_{max} represents a reference point where the slope of the yield per recruit curve equals zero, and Y_{max} is the corresponding yield. TL, Total length.

고 찰

순간자연사망계수 비교

두 가지 자연사망계수 조건에서 시뮬레이션을 이용한 가입당 생산량을 평가하기 위해 과거 문헌에서 보고한 자연사망계수 평가식을 활용하여 우리나라 동해 도루묵의 시간에 따른 순간자연사망계수(d^{-1}) 변화를 평가하였다. M_t 의 일별 순간자연사망계수는 발생 초기(0 day) M_{cons} 보다 약 $0.0064 d^{-1}$ 높게 나타났으며, 성장에 따라 차이가 지속적으로 감소하였다.

우리나라 동해 도루묵을 대상으로 두 순간자연사망계수(d^{-1}) 조건(M_t , M_{cons})에서 어획 조건에 따른 가입당 생산량(Y/R)과 생물학적 기준점으로 구분되는 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 을 평가하고 이때의

가입당 생산량($Y_{0.1}$, Y_{max})을 비교하였다.

최대 가입당 생산량 비교

시물레이션 조건($L_c=1-25$ cm, $F=0-2$ yr⁻¹)에서 최대 가입당 생산량은 M_{cons} 의 적용이 M_t 보다 약 14배 더 높게 나타났다. 이러한 최대 가입당 생산량의 차이는 일별 생존하는 개체수의 차이에서 나타난 결과로 예상할 수 있다. 초기생활사 시기 상대적으로 순간자연사망계수(d^1)가 높은 M_t 는 M_{cons} 보다 시간에 따른 생존 개체수가 급격히 줄어들기 때문에 체중으로 환산되어 계산되는 가입당 생산량(Y/R)에서 큰 차이를 나타낸 것으로 평가할 수 있다.

현행 최소어획전장 규정과 비교

우리나라 동해 도루묵은 자원관리를 위해 최소어획전장을 11 cm (Lee and Lee, 2018)로 규정하여 어획을 관리하고 있다. M_t 와 M_{cons} 일 때 시물레이션별 $F_{0.1}$ 을 기준으로 가입당 생산량이 최대가 되는 어획 전장을 현행규정과 비교하면 M_t 는 0.8 cm 낮게, M_{cons} 는 6 cm 더 높게 나타나 M_t 의 적용이 M_{cons} 보다 현행 어획 기준 전장과 가깝게 나타났다. 또한, M_{cons} (식 5-2)는 개체의 성장과 해양 환경변수 중 수온만을 반영하여 자연사망계수를 평가하지만 M_t (식 5-1)는 재생산과 어획에 대한 영향을 추가로 고려한 식으로 M_{cons} 보다 개체군 변동을 설명하기 위해 더 많은 변수를 반영한 식으로 볼 수 있다(Cho et al., 2020). 따라서, 해양수산자원의 어종별 자원관리를 위한 기준을 평가하기 위해 M_{cons} 보다 M_t 의 적용이 더 적합한 것으로 볼 수 있다.

M_t 조건에서 어획기준 전장별 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 지점의 생산량 비교

M_t 조건의 시물레이션에서 현행 최소어획전장이 11 cm일 때, $F_{0.1}$ 는 0.75 yr⁻¹, 이때의 가입당 생산량 $Y_{0.1}$ 은 798.08 g으로 나타났으며, 가입당 최대생산량은 F_{max} 가 2 yr⁻¹일 때 930.11 g으로 나타났다(Table 3). M_t 의 조건에서 $L_c=11$ cm를 $L_{c,t}$, $L_{c,cons}$ 로 추정된 10.2 cm와 17 cm의 $F_{0.1}$ 과 F_{max} 지점의 생산량($Y_{0.1}$, Y_{max})을 비교하면, $L_{c,t}$ 의 $F_{0.1}$ 에 도달하기 위해 F 는 0.04 yr⁻¹, L_c 를 0.8 cm를 낮추더라도 0.38% 더 높은 생산량을 얻을 수 있지만 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났으며, $L_{c,cons}$ 의 $F_{0.1}$ 에 도달하기 위해서는 현행 어획 기준보다 F 를 1.4배 높이기 위한 노력이 필

요하지만 그 때의 생산량은 27.36% 감소하는 것으로 나타났다 (Table 3). 모든 어획 기준 전장에서 F_{max} 가 2 yr⁻¹로 나타나 F 를 증가시키면 가입당 생산량은 더욱 증가할 것으로 예측할 수 있다 (Table 3). Table 3를 통해 도루묵 어획 관리를 위한 기준점 평가 시 최소어획전장 기준을 $L_{c,cons}$ 로 적용할 경우 현행 최소어획 전장, $L_{c,t}$ 와 비교하여 $F_{0.1}$ 지점에 도달하기 위해 추가적인 노력 (F)이 필요하지만 이때의 생산량은 오히려 감소하여 비효율적인 어업 활동을 초래할 수 있는 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 우리나라 동해 도루묵 어획 관리를 위한 적정 최소어획전장은 10.2 cm이며, 식 (11)을 반영한 이때의 어획 개시 연령은 약 0.8 세로 평가할 수 있다.

L_c 별 가입당 생산량 비교

도루묵 자원의 어획 관리를 위한 최소어획전장 평가 연구로 Lee (2007)는 16.8 cm (TL), 수산자원회복사업을 운영하고 있는 NIFS (2023)는 수컷 도루묵의 군성숙전장을 기준으로 13 cm (TL)를 권고하고 있다. 여기서, Lee (2007)의 연구에 따른 16.8 cm는 연령별 가입당 생산량이 가장 높게 나타난 2.5세 (Fig. 11 in Lee, 2007)를 Lee (2007)가 제시한 성장식과 본 연구의 TL-BL 관계식(식 1)을 활용하여 계산하였다. 본 연구 결과와 비교하기 위해 M_t 의 시물레이션 조건에서 Lee (2007)와 NIFS (2023)이 제시한 어획 기준 전장별 $F_{0.1}$ 지점의 생산량 $Y_{0.1}$ 을 평가하면, L_c 가 13 cm일 때 $F_{0.1}$ 는 0.85 yr⁻¹, $Y_{0.1}$ 는 761.61 g으로 나타났으며, L_c 가 16.8 cm일 때 $F_{0.1}$ 는 1.07 yr⁻¹, $Y_{0.1}$ 는 592.08 g으로 나타났다(Fig. 7). $L_{c,t}$ 의 최소어획전장을 13 cm로 증가시킬 경우 $F_{0.1}$ 지점에 도달하기 위해 F 를 0.14 yr⁻¹ 증가시키기 위한 추가적인 노력이 필요하지만 생산량은 약 4.92% 감소할 것으로 나타났다. L_c 를 16.8 cm로 증가시킬 경우 F 를 0.36 yr⁻¹ 증가시키기 위한 추가적인 노력이 필요하지만 이때의 생산량은 약 26.09% 감소하는 것으로 나타났다. 두 L_c 조건 모두 $F_{0.1}$ 에 도달하기 위해 $L_{c,t}$ 보다 높은 어획노력량이 필요하지만 그때의 생산량은 $L_{c,t}$ 보다 낮은 것을 확인할 수 있다(Fig. 7). 생물학적 특성을 기반으로 한 시물레이션 평가 결과 $L_{c,t}$ 는 군성숙전장을 기준으로 한 어획 기준보다 낮아 상대적으로 더 완화된 어업 규제 기준으로 볼 수 있기 때문에 산란기에 연안으로 몰려오는 개체를 대상으로 이루어지는 연안자망어업과 수십 100-200 m 내외에서 연중 조업이 이루어지는 동해구기선 저인망어업(Yang et al., 2012)의 어획 규제 기준을 구분하여 관리할 필요가 있다.

연구의 한계점과 문제점

본 연구에서 적용한 순간자연사망계수(d^1) M_t 와 M_{cons} 변동은 20년 전에 이루어진 연구결과와 자료를 토대로 평가한 본 버틀란 피 성장식 매개변수(L_{∞} , K , t_0)로 결정되며, $F_{0.1}$ 을 기준으로 한 어획 관리 전장 L_c 변동에 영향을 미친다. 따라서, 최근 진행된 도루묵 성장 파라미터 연구결과를 반영하여 순간자연사망계수 (d^1)와 적정 L_c 를 추정하고 본 연구에서 평가한 $L_{c,t}$ 와 비교하여

Table 3. Comparison of biological reference points ($F_{0.1}$, F_{max}) and corresponding yield ($Y_{0.1}$, Y_{max}) with respect to varying L_c (10.2, 11, 17 cm)

	Size-dependent instantaneous natural mortality (M_t , d^1)		
	10.2 cm	11 cm	17 cm
$F_{0.1}$	0.71 yr ⁻¹	0.75 yr ⁻¹	1.08 yr ⁻¹
$Y_{0.1}$	801.05 g	798.08 g	579.72 g
F_{max}	2 yr ⁻¹	2 yr ⁻¹	2 yr ⁻¹
Y_{max}	928.35 g	930.11 g	662.29 g

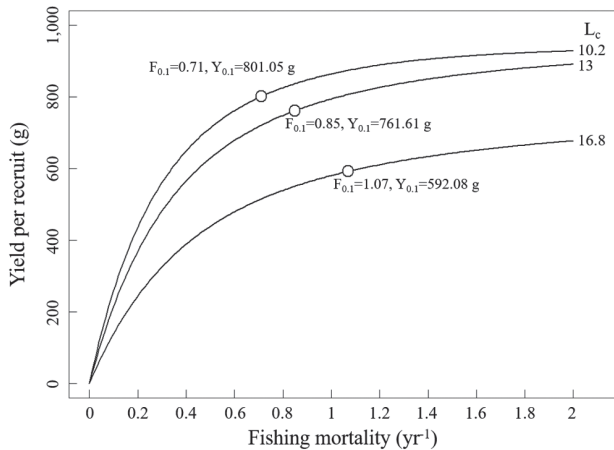


Fig. 7. Yield per recruit curve of sandfish varying with the length at first capture ($L_c=10.2, 13, 16.8$ cm) under condition of size-dependent instantaneous natural mortality (M_t, d^{-1}), and the corresponding yield of $F_{0.1}$.

어획 관리 기준의 적절성을 비교하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 우리나라 동해 도루묵에 대한 성장 평가 연구는 Lee and Kang (2006)과 Lee (2007)는 BL을 기준으로, Yang et al. (2008)은 가랑이체장(fork length, FL)을 기준으로 평가하였으나 현재 도루묵 자원관리를 위한 어획 기준은 TL을 기준으로 규정하고 있기 때문에 과거 자료를 TL로 변환하여 연령별 평균 TL과 W로 평가한 결과는 불확실성이 존재한다. 따라서, 자료 변환에 따른 불확실성을 줄이기 위해 TL을 기준으로 측정된 개체별 자료를 반영하여 생물학적 특성을 평가하고 어획 관리 기준점을 제시하기 위한 연구가 필요하다.

추가연구

본 연구 결과를 통해 M_t 와 M_{cons} 로 평가한 L_c 는 뚜렷한 차이를 나타냈으며, 현행 어획 규제 전장과 $F_{0.1}$ 지점의 생산량에서 비슷한 결과를 나타낸 M_t 의 적용이 어획 관리를 위한 기준 전장 평가에 적합한 방법으로 평가할 수 있다. 전통적 가입당 생산량 모델의 M 은 M_{cons} 를 가정 하지만(Zhang et al., 1992; Lee, 2007; Kwon et al., 2010), 지금은 컴퓨터 기술의 비약적 발달과 함께 전 연령에 대한 자연사망률을 고정하지 않고 초기생활사에서 최대 연령까지 일별 M 을 평가할 수 있게 되었다(Cha and Jung, 2012). 우리나라 주요 어업 어종 중 경제적으로 중요한 일부 어종을 대상으로 성장에 따른 자연사망률 추정 연구가 진행되었으며(Jung et al., 2008, 2009; Cho et al., 2020), 이러한 결과를 가입당 생산량 추정 시뮬레이션에 반영하여 단일 어종별 자원관리를 위한 생물학적 기준점 평가 연구가 진행되었다(Lee et al., 2017, 2018). 따라서, 연간 어획량을 설정하여 어획을 관리하는 TAC 어종을 대상으로 일 단위 자연사망률 추정 연구가 확장될 필요가 있다.

본 연구에서 평가한 L_c 를 통해 도루묵 자원의 어획 관리를 위한 현행 규제 전장($L_c=11$ cm)은 적절하게 설정되어 있는 것으로 볼 수 있다. 해양환경 요인 중 수온은 해양 어류의 난 부화와 초기 성장에 영향을 미치며 해당 어종 자원의 가입량 변동과 관계가 있는 것으로 연구되었다(Sakuramoto et al., 1997; Hwang et al., 2008; Chung et al., 2013; Kamimura et al., 2015; Yoo et al., 2015; Choi et al., 2020; Go et al., 2020). 지난 47년간(1968–2014년) 우리나라 인근 해역 중 도루묵이 산란장으로 이용하는 동해 연안의 표층 수온 상승률은 $0.047^{\circ}C/year$ 로 가장 높게 나타나 온난화 경향이 지속적으로 나타났다(Yoon et al., 2017; Park et al., 2019). 따라서, 최근 감소하는 도루묵 어획량의 원인을 밝히기 위해 동해 연안의 해양환경 변동과 자원량 변동의 관계를 평가하기 위한 추가 연구가 필요하다.

또한, 개체군 변동을 고려한 생물학적 기준점을 정하기 위해 재생산(가입)이 반영(Russell, 1931)된 가입당 생산분석 연구가 이루어진다면 도루묵 자원의 지속적 이용을 위한 구체적인 생물학적 기준점을 제시할 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

이 논문을 심사해주신 심사위원께 감사드립니다. 이 논문은 2023년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20180384, 수산전문인력양성).

References

- Alverson DL and Carney MJ. 1975. A graphic review of the growth and decay of population cohorts. ICES J Mar Sci 36, 133-143. <https://doi.org/10.1093/icesjms/36.2.133>.
- An HC, Lee KH, Lee SI, Park HH, Bae BS, Yang JH and Kim JB. 2011. Behaviour habitats of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus* approaching toward the Eastern coastal waters of Korea in the spawning season. J Fish Mar Sci Edu 23, 35-42.
- Beverton RJH and Holt SJ. 1957. Fisheries investigation series II. In: On the Dynamics of Exploited Fish Populations. Chapman and Hall, London, U.K., 533.
- Blaxter JHS. 1992. The effect of temperature on larval fishes. Neth J Zool 42, 336-357. <https://doi.org/10.1163/156854291X00379>.
- 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. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2012.0493>.
- Cho G, Kim D, Jung S, Jung IH and Kim S. 2020. Estimating age-specific natural mortality for sandfish in the Eastern coastal waters of Korea. Mathematics 8, 1612. <https://doi.org/10.3390/math8091612>.
- Choi J, Han GS, Lee KW, Byung SG, Lim HJ and Kim HS. 2020. Effect of water temperature on the egg hatch and early growth of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*). Korean

- J Ichthyol 32, 78-83. <https://doi.org/10.35399/ISK.32.2.6>.
- Choi JY and Kim DH. 2012. An exploratory study on determining optimal fishing effort and production levels of danish seine fishery under the sandfish stock rebuilding plan. J Fish Bus Adm 43, 1-9. <https://doi.org/10.12939/FBA.2012.43.1.001>.
- Chung S, Kim S and Kang S. 2013. Ecological relationship between environmental factors and Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) catch in the Southern East/Japan Sea. Anim Cells Syst 17, 374-382. <https://doi.org/10.1080/19768354.2013.853693>.
- Deriso RB. 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>.
- Go S, Lee K and Jung S. 2020. A temperature-dependent growth equation for larval chub mackerel (*Scomber japonicus*). Ocean Sci J 55, 157-164. <https://doi.org/10.1007/s12601-020-0004-z>.
- Gulland JA. 1965. Survival of the youngest stages of fish and its relation to year-class strength. Int Comm NW Atlant Fish 6, 363-371.
- Hwang HK, Kim DH, Park MW, Yoon SJ and Lee YH. 2008. Effects of water temperature and salinity on the egg and larval of chub mackerel *Scomber japonicus*. J Aquaculture 21, 234-238.
- Jin S, Kim DG, Seong GC, Kang DY, Lee JE, Park H, Yang H, Soh HY and Baek GW. 2022. Feeding habits of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the coastal waters of East Sea, Korea. Korean J Ichthyol 34, 113-118. <https://doi.org/10.35399/ISK.34.2.5>.
- 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, 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>.
- 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>.
- Kang DY, Ko AR, Jeong JM and Baek GW. 2019. Diet composition of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the coastal waters of East Sea, Korea. J Korean Soc Fish Ocean Technol 55, 320-326. <https://doi.org/10.3796/KS-FOT.2019.55.4.320>.
- Kim DH. 2015. Evaluating the TAC policy in the sandfish stock rebuilding plan. J Fish Bus Adm 46, 29-39. <http://doi.org/10.12939/FBA.2015.46.1.029>.
- Kim EM, Kang HS, Kang JH, Kim DG, An CM, Lee HW and Park JY. 2015. Genetic relationships of sandfish (*Arctoscopus japonicus*) from five different areas of Korea and Japan based on mitochondrial DNA and microsatellite analyses. J Life Sci 25, 1204-1213. <https://doi.org/10.5352/JLS.2015.25.11.1204>.
- King M. 2013. Stock assessment. In: Fisheries Biology Fisheries Biology, Assessment and Management II. John Wiley and Sons, Ames, IA, U.S.A., 254-255.
- Komoto R, Kudou H and Takatsu T. 2011. Vertical distribution and feeding habits of Japanese sandfish (*Arctoscopus japonicus*) larvae and juveniles off Akita Prefecture in the Sea of Japan. Aquaculture Sci 59, 615-630. <https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.59.615>.
- Kwon DH, Chang DS, Lee SJ, Koo JH and Kim BY. 2010. Stock assessment and management of turban shell, *Turbo (Batillus) cornutus* lightfoot, 1786 in Jeju coastal waters, Korea. Korean J Malacol 26, 291-296.
- Lee CS and Lee SG. 2018. Cases of fishery co-management in Korea: 'Fishery closures' of fisheries cooperatives. J Fish Bus Adm 49, 29-47. <http://dx.doi.org/10.12939/FBA.2018.49.3.029>.
- Lee HW, Kang YJ, Huh SH and Baek GW. 2007. Feeding habits of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea, Korea. Korean J Ichthyol 19, 44-50.
- Lee HW and Kang YJ. 2006. Age determination and growth using the transverse section method of otoliths sandfish, *Arctoscopus japonicus*, in the Eastern Sea of Korea. Ocean Polar Res 28, 237-243. <https://doi.org/10.4217/OPR.2006.28.3.237>.
- Lee HW. 2007. Fishery biology of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea. Ph.D. Dissertation, Pukyong National University, Buasn, Korea.
- Lee HW, Kim JH and Kang YJ. 2006. Sexual maturation and spawning in the sandfish *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea. Korean J Fish Sic 39, 349-356. <https://doi.org/10.5657/kfas.2006.39.4.349>.
- Lee K, Go S and Jung S. 2017. Simulation-based yield-per-recruit analysis of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* in the Korea strait with varying fisheries regulations. Korean J Fish Aquat Sci 50, 437-446. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0437>.
- Lee K, Go S and Jung S. 2018. Simulation-based yield-per-recruit analysis of chub mackerel *Scomber japonicus* in Korean waters. Korean J Fish Aquat Sci 51, 313-320. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0313>.
- Lee SI, Yang JH, Yoon SC, Chun YY, Kim JB, Cha HK and Choi YM. 2009. Biomass estimation of sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus*, in Korean waters. Korean J Fish Aquat Sci 42, 487-493. <https://doi.org/10.5657/kfas.2009.42.5.487>.
- McGurk MD. 1986. Natural mortality of marine pelagic fish

- eggs and larvae: Role of spatial patchiness. *Mar Ecol Prog Ser* 34, 227-242.
- Meekan MG, Vigliola L, Hansen A, Doherty PJ, Halford A and Carleton JH. 2006. Bigger is better: Size-selective mortality throughout the life history of a fast-growing clupeid, *spratelloides gracilis*. *Mar Ecol Prog Ser* 317, 237-244. <https://doi.org/10.3354/meps317237>.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2022. Fisheries Information Service. Retrieved from <https://www.mof.go.kr/statPortal/cate/partStat.do> on Nov 22, 2022.
- Myoung JG, Kim JM and Kim YU. 1989. Egg development and morphology of sand fish, *Arctoscopus japonicus* (Steindachner) larvae and juveniles reared in the laboratory. *Bull Korean Fish Soc* 22, 129-137.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2023. Fisheries Regulation of Sandfish. Retrieved from <https://www.nifs.go.kr/main.do> on Jan 16, 2023.
- Park MH, Song JY, Han IS and Lee JS. 2019. A study of long-term trends of SST in the Korean seas by reconstructing historical oceanic data. *Korean Soc Mar Environ Saf* 25, 881-897. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2019.25.7.881>.
- 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>.
- Perry AL, Low PJ, Ellis JR and Reynolds JD. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308, 1912-1915. <https://doi.org/10.1126/science.1111322>.
- Peterson I and Wroblewski JS. 1984. Mortality rate of fishes in the pelagic ecosystem. *Can J Fish Aquat Sci* 41, 1117-1120. <https://doi.org/10.1139/f84-131>.
- Russell ES. 1931. Some theoretical considerations on the "overfishing" problem. *ICES J Mar Sci* 6, 3-20. <https://doi.org/10.1093/icesjms/6.1.3>.
- Sakuramoto K, Kitahara T and Sugiyama H. 1997. Relationship between temperature and fluctuations in sandfish catch (*Arctoscopus japonicus*) in the coastal waters off Akita Prefecture. *ICES J Mar Sci* 54, 1-12. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1996.0164>.
- Shirai SM, Kuranaga R, Sugiyama H and Higuchi M. 2006. Population structure of the sailfin sandfish, *Arctoscopus japonicus* (Trichodontidae), in the Sea of Japan. *Ichthyol Res* 53, 357-368. <https://doi.org/10.1007/s10228-006-0356-0>.
- Tian Y, Kidokoro H and Watanabe T. 2006. Long-term changes in the fish community structure from the Tsushima warm current region of the Japan/East Sea with an emphasis on the impacts of fishing and climate regime shift over the last four decades. *Prog Oceanogr* 68, 217-237. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.02.009>.
- Tsukamoto K and Shima Y. 1990. Otolith daily increment in sandfish. *Nippon Suisan Gakk* 56, 1083-1087. <https://doi.org/10.2331/suisan.56.1083>.
- Watanabe K, Sakuramoto K, Minami T and Suzuki N. 2006. Population dynamics and catch forecasts of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the Western Sea of Japan. *Bull Jpn Soc Fish Oceanogr* 70, 221-228.
- Watanabe K, Sakuramoto K, Sugiyama H and Suzuki N. 2011. Dynamics of two sailfin sandfish (*Arctoscopus japonicus*) stocks in the Sea of Japan, and their management. *Can J Fish Aquat Sci* 68, 458-468. <https://doi.org/10.1139/F10-161>.
- Watanabe K, Sugiyama H, Sugishita S, Suzuki N and Sakuramoto K. 2005. Estimating and monitoring the stock size of sandfish *Arctoscopus japonicus* in the Northern Sea of Japan. *Fish Sci* 71, 776-783. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2005.01027.x>.
- Yang JH, Yoon SC, Park JH, Choi YM, Lee JB and Yoon BS. 2013. Distribution and migration of larval and juvenile sandfish *Arctoscopus japonicus* in the coastal waters off Gangwondo, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 46, 649-652. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0649>.
- Yang JH, Lee SI, Cha HK, Yoon SC, Chang DS and Chun YY. 2008. Age and growth of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea of Korea. *J Korean Soc Fish Ocean Tech* 44, 312-322. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2008.44.4.312>.
- Yang JH, Lee SI, Park KY, Yoon SC, Kim JB, Chun YY, Kim SW and Lee JB. 2012. Migration and distribution changes of the sandfish, *Arctoscopus japonicus* in the East Sea. *J Korean Soc Fish Ocean Tech* 48, 401-414. <http://doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.4.401>.
- Yoo HK, Byun SG, Yamamoto J and Sakurai Y. 2015. The effect of warmer water temperature of walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) larvae. *Korean Soc Mar Environ Saf* 21, 339-346. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.4.339>.
- Yoon SC, Youn SH, Shim MJ and Yoon YY. 2017. Characteristics and variation trend of water mass in offshore of the East Coast of Korea during last 10 years. *J Korean Soc Mar Environ Energy* 20, 193-199. <https://doi.org/10.7846/JKOS-MEE.2017.20.4.193>.
- 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.
- Zhang CI. 2010. Age and growth of fisheries resource. In: *Marine Fisheries Resource Ecology*. Pukyong National University Press, Busan, Korea, 224-227.
- Zhang CI and Megrey BA. 2006. A revised alverson and carney model for estimating the instantaneous rate of natural mortality. *Trans Am Fish Soc* 135, 620-633. <https://doi.org/10.1577/T04-173.1>.