

## 기름가자미 어업관리방안 평가를 위한 생물경제학적 분석

- 동해구외끌이증형저인망어업을 대상으로 -

최지훈 · 강희중 · 임정현<sup>1</sup> · 김도훈<sup>2\*</sup>

국립수산과학원 연근해자원과 연구원, <sup>1</sup>국립수산과학원 원양자원과 연구원, <sup>2</sup>부경대학교 해양수산경영학과 교수

## A bioeconomic analysis on evaluation of management policies for Blackfin flounder *Glyptocephalus stelleri*

- In the case of eastern sea danish fisheries -

Ji-Hoon CHOI, Hee Joong KANG, Jung Hyun LIM<sup>1</sup> and Do-Hoon KIM<sup>2\*</sup>

Researcher, Coastal Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

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

<sup>2</sup>Professor, Department of Marine & Fisheries Business and Economics, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

In this study, the Bayesian state-space model was used for the stock assessment of the Blackfin flounder. In addition, effective measures for the resource management were presented with the analysis on the effectiveness of fisheries management plans. According to the result of the analysis using the Bayesian state-space model, the main biometric value of Blackfin flounder was analyzed as 1,985 tons for maximum sustainable yield (MSY), 23,930 tons for carrying capacity (K), 0.000007765 for catchability coefficient (q) and 0.31 for intrinsic growth (r). Also the evaluation on the biological effect of TAC was done. The result showed that the Blackfin flounder biomass will be kept at 14,637 tons 20 years later given the present TAC volume of 1,761 tons. If the Blackfin flounder TAC volume is set to 1,600 tons, the amount of biomass will increase to 16,252 tons in the future. Lastly, the biological effectiveness of the policy to reduce fishing effort was assessed. The result showed that the Blackfin flounder biomass will be maintained at 13,776 tons if the current fishing efforts (currently hp) level is set and maintained. If the fishing effort is reduced by 20%, it will increase to 17,091 tons in the future. The analysis on the economic effect of TAC showed that NPV will be the lowest at 1,486,410 won in 2038, 20 years after the establishment of 2,500 tons of TAC volume. If the TAC volume is set at 2,000 tons, NPV was estimated to be the highest at 2,206,522,000 won. In addition, the analysis on the economic effect of the policy to reduce the amount of fishing effort found that NPV will be 2,235,592,000 won in 2038, 20 years after maintaining the current level of fishing effort. If the fishing effort is increased by 10%, NPV will be the highest at 2,257,575 won even though the amount of biomass will be reduced.

Keywords: Bayesian state-space model, Bioeconomic model, Maximum sustainable yield, *Glyptocephalus stelleri*, Fisheries management

\*Corresponding author: [delaware310@pknu.ac.kr](mailto:delaware310@pknu.ac.kr), Tel: +82-51-720-5954

## 서론

최근 전 세계적으로 수산자원의 감소로 인해 수산자원회복 및 관리에 대한 문제가 대두되고 있다. 우리나라 연근해 어획량은 1996년 약 8,740만톤으로 최대어획량을 기록한 후 지속적으로 감소하여 2016년 약 7,980만톤 수준으로 파악되었다(FAO, 2018). 국내의 경우에도 연근해 수산자원이 지속적으로 감소하기 시작하여 2016년에는 연근해어획량이 백만 톤 이하로 어획량이 감소하였다(KOSIS, 2018).

이러한 상황에서 우리나라는 수산자원회복 및 관리를 위해 지난 2006년부터 수산자원회복계획을 수립하여 수산자원을 관리하고 있다. 수산자원회복계획은 어종별로 자원평가를 통해 남획 상태 수준 및 남획이 진행 중인 어종들에 대하여 일정기간 동안 목표 자원량의 수준으로 회복시키는 방안이다. 2006년에 4개 어종인 낙지, 도루묵, 오분자기, 그리고 꽃게를 시범으로 시작하여(MOF, 2014) 현재에는 총 16개 어종에 대한 수산자원회복이 수립 시행 중에 있다.

효과적인 수산자원회복계획을 위해 계획을 수립 전에 대상어종의 현 자원상태 및 어획노력량 수준에 대한 자원평가를 통하여 수산자원관리에 대한 목표가 정확히 수립되어 저야 한다(Kim et al., 2008).

현재 기름가자미(*Glyptocephalus stelleri*)는 동해구의 끝이중형저인망, 연안자망 등에서 주로 어획되고 있으며 동해안에서 중요한 상업 어종 중 하나이다. 동해안에 분포하는 가자미류는 생김새가 비슷하고, 각 지역마다 부르는 명칭이 상이하여 분류하기 어려운 실정이다. 또한 수협에서 위판되고 있는 가자미류들도 각 종류별로 어획량이 집계되는 것이 아니라 가자미류로 통합적으로 집계되고 있어 각 가자미에 대한 정확한 어획량 파악하기가 힘든 현실이다.

하지만 기름가자미는 다른 가자미류들에 비해 생김새로 분류하기가 상대적으로 쉬워 2015년부터 기름가자미 코드(110007)가 신설되어 분리 집계하고 있다. 그 결과 정확한 기름가자미 어획량을 파악할 수 있다(Choi et al., 2016).

기름가자미는 2007년 자원회복대상종으로 포함되어 현재까지 꾸준히 관리되고 있다. 현재까지 권고안 내용으로 연안자망어업의 기름가자미 포획금지체장 신설(20 cm) 및 동해구외끝이중형저인망의 어선세력 감축 등이 진행되고 있다(NIFS, 2019). 기름가자미에 대한 선

행연구의 경우, 과정오차 모델을 이용하여 자원상태를 평가하고 있다(Sohn et al., 2013).

보다 효과적인 기름가자미의 자원회복계획 수립을 위해서는 신뢰성 있는 자원평가 모델을 통한 자원상태의 평가가 필요하다. 또한 신뢰성 있는 자원평가 모델의 결과를 활용한 어업관리방안의 효과에 대한 분석을 통해 최적의 어업관리방안을 제시되어야 한다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 수산자원회복대상종 중의 하나인 기름가자미의 자원회복 및 관리를 위해 현재 국외 및 국제수산 기구에서 널리 활용되고 있으며, 하와이 바다거북, 대서양 홍상어, 남대서양 날개다랑어 자원평가에 적용되어 분석되고 있는 Bayesian State-space 모델을 활용하여 기름가자미의 자원상태를 평가 하고자 한다(Millar and Meyer, 2000b; McAllister et al., 2001; Chaloupka and Balazs, 2007; McAllister, 2014; Winker et al., 2018; ICCAT, 2018).

더 나아가 Bayesian State-space 모델의 자원평가 결과를 활용하여 기름가자미 어업관리방안(TAC, 어획노력량 저감)들에 대한 효과를 분석하고자 한다. 어업관리방안별 효과를 분석하기 위해 생물경제모델(Bioeconomic model)을 사용하여, 기름가자미 어업관리방안들에 대한 생물학적 그리고 사회경제학적 효과를 분석하고자 한다(Davis, 2010; Holland, 2010; Kim, 2015; Choi, 2019). 또한 민감도 분석을 통한 어업관리방안별 최적의 자원관리기준점을 제시하고자 한다.

마지막으로 기름가자미 시장가격 및 어업비용 변화에 따른 동해구외끝이중형저인망의 어업수익이 영(0)이 되는 최소 어획량 수준을 분석하여, 향후 동해구외끝이중형저인망의 기름가자미의 TAC 설정을 대비한 정책적 근거자료를 제시하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 기름가자미 어업현황

Fig. 1은 2016~2018년 3년 동안의 기름가자미 어업별 어획 비율을 나타낸 것이다. 조사결과, 동해구외끝이중형저인망의 경우 약 53% 가장 큰 어획 비율을 차지하는 것으로 파악되었다. 그 다음으로 연안자망은 약 27%, 서남해구외끝이중형저인망은 약 9%, 그리고 근해자망은 약 6% 순으로 파악되었다.

이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 기름가자미

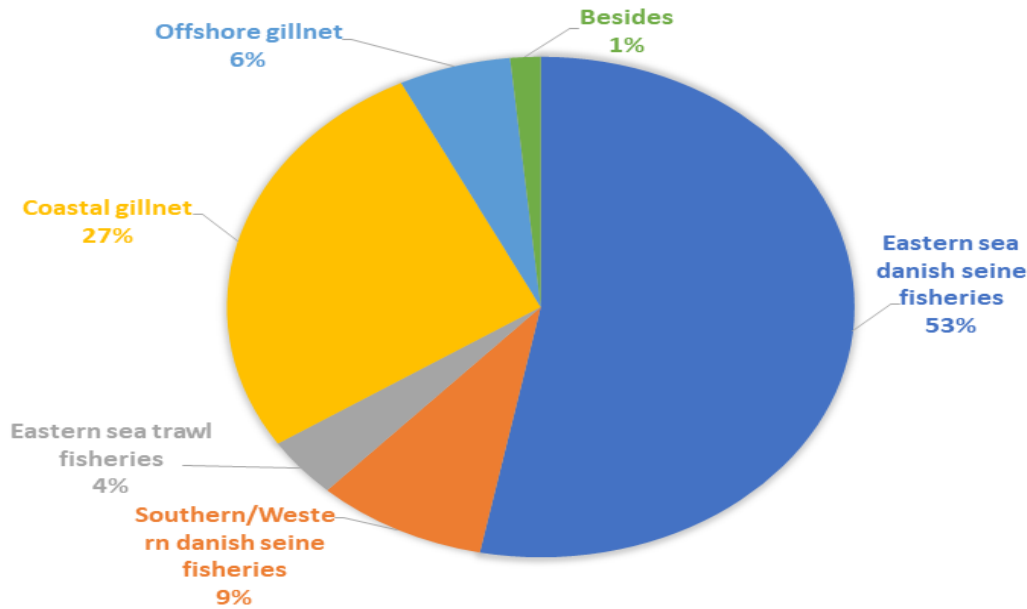


Fig. 1. Catch proportion of blackfin flounder by fishing type caught in the East sea of Korea in 2016~2018.

Table 1. Proportion of Blackfin flounder in Righteye flounders by region and fishery from 2015 to 2018

	Eastern Sea Danish fisheries (Gangwon)	Eastern Sea Danish fisheries (Gyeongbuk)	Coastal gillnet (Gangwon)	Coastal gillnet (Gyeongbuk)
Righteye flounders	498	1,090	629	81
Blackfin flounder	608	1,388	1,507	1,113
Ratio	82%	79%	42%	7%

어획 비율이 가장 큰 동해구외끌이중형저인망을 대상으로 분석하고자 한다.

기름가자미 어업별 어획비율이 가장 높은 동해구외끌이중형저인망과 그 다음으로 높은 연안자망을 대상으로 2015년 이전의 어획량을 추정하고자 한다. 2015년 이전의 기름가자미 어획량을 추정하기 위해 2015년부터 2018년까지 4년 동안의 통계청(KOSIS, 2018)에서 수집된 지역(강원, 경북)별, 어업(동해구외끌이중형저인망, 연안자망)별 가자미류에서 기름가자미 차지하는 비율은 Table 1과 같이 나타낼 수 있다.

#### 분석 자료

Bayesian State-space 모델을 활용한 기름가자미 자원 평가를 위해 어획량 자료와 어획노력량 자료가 필요하다. Table 2는 동해구외끌이중형저인망에서 어획된 기름가자미 어획량과 어획노력량(Horse power, hp)을 나

Table 2. Catch amount and fishing effort (hp) of the Eastern Sea Danish Seine fishery on blackfin flounder

Year	Catch (m/t)	hp
2004	1,176	16,914
2005	1,531	17,142
2006	1,410	18,544
2007	1,226	18,656
2008	1,569	25,776
2009	1,694	16,557
2010	2,442	19,441
2011	2,800	16,659
2012	2,445	16,963
2013	2,515	16,588
2014	2,331	17,822
2015	1,621	17,011
2016	1,580	16,784
2017	1,388	17,360
2018	1,761	17,518

Table 3. Trip cost of Eastern Sea Danish fisheries from 2015~2017

(unit: thousand won)

Year	Production Maintenance	Labor	Selling	Depreciation	Miscellaneous cost	Total
2015	140,488	207,520	17,409	28,458	44,061	437,936
2016	108,768	214,045	30,038	19,984	45,647	418,482
2017	113,849	221,664	27,952	23,687	40,438	427,590
Average	121,035	214,410	25,133	24,043	43,382	428,003

타내고 있다. 2004년부터 2014년까지는 역 추정된 기름가자미 어획량을 사용하였고, 2015년부터 2018년까지는 통계청에서 집계한 어획량을 사용하였다(KOSIS, 2018). 분석 기간을 2004년부터 설정한 이유는 2004년 이전의 동해구외끌이중형저인망의 척수 자료가 불확실성이 있다고 판단하였기 때문이다.

동해구외끌이중형저인망에 의해 어획된 기름가자미의 어획량을 보면, 2004년 1,716톤으로 시작하여 2011년 2,800톤으로 증가하였다. 2012년 이후 감소하여 2018년 1,761톤 수준으로 파악되었다. 동해구외끌이중형저인망의 노력량(hp) 경우, 2004년 16,914 hp로 시작하여 2008년 25,779 hp로 증가하였다. 그 이후 감소하기 시작하여 2018년 17,518 hp 수준으로 파악되었다.

기름가자미 생물경제모델 분석을 위해 기름가자미 시장가격 및 동해구외끌이중형저인망의 어업비용자료가 필요하다. 2018년 기름가자미 시장가격(단가)은 kg당 4,701 원으로 나타났다(Fisheries Information Service, 2018). Table 3은 2015~2017년까지 한국수산자원공단에서 조사한 근해어업실태조사부분의 동해구외끌이중형저인망에 대한 어업비용 자료를 정리한 것이다. 동해구외끌이중형저인망의 3년 평균 출어비용은 척당 428,003천원으로 조사되었다(Korea Fisheries Resources Agency, 2018).

2015~2017년도 3년 동안 평균 동해구외끌이중형저인망의 총 어획금액에서 기름가자미 어획금액 비율은 약 24% 조사되었다.

**분석 방법**

**자원동태 모델(잉여생산량 모델)**

자원동태 모델 중 잉여생산량 모델은 자원의 가입량, 성장률, 자연 사망률을 하나의 잉여생산의 개념으로 합한 형태로서 식 (1)과 같이 정의된다.

$$B_{y+1} = B_y + g(B_y) - C_y \tag{1}$$

식 (1) 에서  $B_y$ 는  $y$ 년도 초의 자원량이고,  $g(B_y)$ 는 자원

의 성장생산 함수,  $C_y$ 는  $y$ 년도의 어획량을 의미한다. 성장생산 함수에 대한 가정에 따라 자원동태 모델의 형태가 식 (2)~(4)와 같이 보다 구체적으로 결정될 수 있다.

$$g(B_y) = rB_y \left( 1 - \frac{B_y}{K} \right) \tag{2}$$

$$g(B_y) = rB_y \text{Ln}(K) \left[ 1 - \left( \frac{\text{Ln}(B_y)}{\text{Ln}(K)} \right) \right] \tag{3}$$

$$g(B_y) = \frac{r}{p} B_y \left[ 1 - \left( \frac{B_y}{K} \right)^p \right] \tag{4}$$

여기서, 성장함수 중 식 (4)는 Pella and Tomlinson에 의해 고안된 성장함수로,  $r$ 은 본원적 성장률,  $K$ 는 환경 수용력, 그리고  $p$ 는 성장함수의 형태를 결정하는 매개변수를 의미한다. 특히 Pella and Tomlinson (1969) 함수는 보다 포괄적인 성장함수로,  $p$ 의 값의 변동에 따라 성장함수의 형태를 변동시킬 수 있다. 예를 들어,  $p=1$ 로 가정한다면 식 (2)과 동일한 형태가 되어 Schaefer (1954) 함수를 도출할 수 있고,  $p$ 를 0에 근사시키면 식 (3)과 같은 Fox (1970)의 성장 함수를 도출할 수 있다. 위 식(4)의 성장함수를 식 (1)에 대입하면 다음의 식 (5)과 같은 자원동태 함수로 나타낼 수 있다.

$$B_{y+1} = B_y + \frac{r}{p} B_y \left[ 1 - \left( \frac{B_y}{K} \right)^p \right] - C_y \tag{5}$$

잉여생산량 모델에서는 통상적으로 어획능률과 자원량의 관계는 일정하다고 가정한다(Hdaaon, 2010). 이에 따라, 어획량( $C_y$ )을 어획노력량( $E_y$ )으로 나누면 식 (6)과 같은 단위노력당어획량( $I_y$ )을 구할 수 있고, 자원량( $B_y$ )과의 관계를 파악할 수 있다.

$$I_y = \frac{C_y}{E_y} = qB_y \tag{6}$$

여기서,  $C_y$ 는  $y$ 연도의 어획량,  $E_y$ 는  $y$ 연도의 어획노력량,  $I_y$ 는  $y$ 연도의 단위노력당어획량(Catch per unit effort, CPUE), 그리고  $q$ 는 어획능률계수(catchability coefficient)를 나타낸다.

**Bayesian State-space 모델**

Bayesian State-space 모델은 과정오차 및 관측오차를 동시에 고려하여 분석 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 자료의 불확실성 고려하여 신뢰도 높은 자원평가 결과를 도출할 수 있다. Bayesian 추론을 통해 식 (1)에서 발생하는 과정오차와 식 (6)에서 발생하는 관측오차를 모두 고려하여 자원량을 추정하는 모델이다. Bayesian 추론은 관측된 자료와 모수 모두에 확률 모형을 사용하여 추론하는 방법으로 Bayesian 추론을 위해 식 (2)와 (6)의 함수를 재구성하면 다음과 같다. 추정에서 오차는 로그정규분포를 따르는 것으로 가정하였고, 표본추출의 과정에서 생물계수 간의 상관관계를 감소시키기 위해 자원량 ( $B_y$ )을  $K$ 에 대한 자원량의 비율 ( $P_y = B_y/K$ )로 재구성하여 추정하였다(Millar and Meyer, 2000a).

$$P_1|\sigma^2 = e^{u_0}$$

$$P_y|P_{y-1}, K, r, \sigma^2 = (P_{y-1} + rP_{y-1}(1 - P_{y-1}) - \frac{C_{y-1}}{K})e^{u_y} \quad (7)$$

$$I_y|P_y, q, \tau^2 = qKP_y e^{v_y} \quad (8)$$

Bayesian 추론은 관측치 자료와 사전정보를 결합시켜 사후분포를 계산하고 사후분포를 바탕으로 모수를 추정하는 방법이다. 우선 모수에 대한 사전분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 사전분포에 대하여 내적 성장률( $r$ )과 환경수용력( $K$ )에 대해서는 정보적 사전분포(informative prior distribution)를 가정하였다.  $r$ 의 경우 로그정규분포(lognormal distribution) 설정하였으며,  $K$ 의 경우 역로그정규분포(inverse-lognormal distribution) 설정하였다. 어획능률계수에는 무정보적 사전분포(non-informative prior distribution)로 역감마분포(inverse-gamma distribution)를 설정하였다. Millar and Meyer(2000a)를 참고하였다.

$$p(k, r, q, \sigma^2, \tau^2, P_1, \dots, P_N) = p(K)p(r)p(q)p(\sigma^2)p(\tau^2)p(P_1|\sigma^2) \quad (9)$$

$$\times \prod_{y=1}^N p(P_{y+1}|P_y, K, r, \sigma^2)$$

다음으로 생물계수가 특정한 값을 가질 경우 관측된 CPUE이 발생할 확률은 식 (10) 같이 나타낼 수 있는데 이를 우도라고 한다.

$$p(I_1, \dots, I_N | K, r, q, \sigma^2, \tau^2, P_1, \dots, P_N) = \prod_{y=1}^N p(I_y | P_y, q, \tau^2) \quad (10)$$

Bayesian 정리에 이용해 사전확률 (9)와 우도 (10)을 이용하여 사후분포를 추정할 수 있다.

$$p(K, r, q, \sigma^2, \tau^2, P_1, \dots, P_N, I_1, \dots, I_N)$$

$$= p(K)p(r)p(q)p(\sigma^2)p(\tau^2)p(P_1|\sigma^2) \quad (11)$$

$$\times \prod_{y=2}^N p(P_y|P_{y-1}, K, r, \sigma^2) \prod_{y=1}^N p(I_y|P_y, q, \tau^2)$$

하지만 위와 같이 추정하는 모수가 다차원적일 경우에는 이를 수치적으로 계산하는 것은 불가능하다. 이를 해결하기 위해 이용되는 방법으로 마코브체인 몬테카를로(Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 기법이다. MCMC 기법은 변수들의 다차원적 사후분포를 통계적으로 추정하는 기법으로 추출된 변수들의 우도를 가지고 사후분포를 확률론적으로 추정하는 기법이다.

마코브체인 몬테카를로는 단계별로 새로운 변수들의 후보군들을 무작위로 생성한다. 그러나 다차원의 결합 확률분포의 경우에는 임의의 표본을 생성하기 어려워 각 변수들의 조건부확률분포로부터 표본을 순차적으로 생성하게 되는데 이를 깃스 샘플링이라고 한다. 깃스 샘플링을 이용한 마코브체인 몬테카를로 과정 중에는 사후분포를 추정하는 다양한 알고리즘이 존재하는데, WinBUGS 프로그램(1.4.3, 영국)은 변수 각각의 분포형태에 따라 적합한 알고리즘을 사용하여 사후분포를 도출한다(Gilks and Wild, 1992; Neal, 1997; Lunn et al., 2000, Choi et al., 2019).

$$\text{simulate } K^{(1)} \sim f(K|r^{(0)}, \dots, \tau^{(0)}, P_1^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}, I_1^{(0)}, \dots, I_n^{(0)}),$$

$$\text{simulate } r^{(1)} \sim f(r|K^{(1)}, q^{(0)}, \dots, \tau^{(0)}, P_1^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}, I_1^{(0)}, \dots, I_n^{(0)}),$$

$$\vdots$$

$$\text{simulate } I_n^{(1)} \sim f(I_n|K^{(1)}, r^{(1)}, \dots, \tau^{(1)}, P_1^{(1)}, \dots, P_n^{(1)}, I_1^{(1)}, \dots, I_{n-1}^{(1)}), \quad (12)$$

위 과정을  $m$ 번 반복하면 각각의 변수에 대한 사후분포를 추정이 가능하다.



$$K(\theta^{(m+1)}, \theta^{(m)}) = \prod_{i=1}^n f(K^{(m+1)} | r^{(m+1)}, \dots, \tau^{2^{(m+1)}}, P_1^{(m+1)}, \dots, P_n^{(m+1)}, I_1^{(m+1)}, \dots, I_n^{(m+1)}) \quad (13)$$

집스샘플링을 사용하여 마코브체인 몬테카를로는 결과적으로는 사후분포를 추정할 수 있으나 초기값을 임의적으로 설정해야한다. 그렇기 때문에 초기값이 정확하게 파악되지 않을 경우에는 추출과정 중에 초기표본들은 사후분포에 수렴하지 못하는 문제가 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추출한 표본 중에 사후분포에 수렴하기 전의 추출된 표본들을 버리고(burn-in) 사후평균을 계산하면 초기값의 영향을 감소시킬 수 있다 (Bolker, 2008).

### 어업경제 모델

기름가자미 TAC 제도의 효과 분석을 위해 연간 TAC 할당량 범위는 2018년도 어획량 수준인 1,761톤 기준으로 +30%, +20%, +10%, -10% 그리고 -20% 설정하였다. 그리고 추가적으로 어획노력량의 저감 방안 효과를 분석하기 위해 현재 동해구외끝이중형저인망 마력수인 17,518 hp 기준으로 어획노력량을 +20%, +10%, -10%, -20%, 그리고 -30%로 설정하였다.

구체적인 효과 분석에서는 생물학적 효과 및 사회경제학적 효과에 대한 향후 20년 후인 2038년 기름가자미의 자원량, 어획량 그리고 순현재가치(Net present value, NPV)값 변화를 추정하고자 한다.

동해구외끝이중형저인망어업 기름가자미의 생물경제모델에서 어업수익은 2018년 동 어업에 의해 어획된 기름가자미의 어획량( $H_t$ )과 평균 시장가격( $p$ )을 곱하여 계산한 것으로 다음의 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TR_t = H_t \cdot p \quad (14)$$

동해구외끝이중형저인망의 어업비용은 최근 2018년 경영실태조사(FIRA, 2018) 결과에 나타난 어업비용 자료를 사용하여 기름가자미 어획에 사용되는 마력당 평균 비용( $c$ )과 마력수( $hp$ )의 곱으로 다음의 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TC_t = c \cdot hp_t \quad (15)$$

연간 동해구외끝이중형저인망 어업수익에서 어업비용을 차감하면 연간 어업이익(Total price, TP)을 계산할 수 있다. 어업관리방안 시행에 따른 향후 어획량 및 자원량 변화에 따라 어업이익은 매년 다르게 되고, 이를 현재가치로 환산하여 어업관리방안별 어업이익을 평가할 수 있다.

본 연구에서는 어업관리방안별 효과분석을 위한 기간 설정을 향후 20년으로 설정하였다. 효과분석 기간을 20년간 설정한 이유는 분석기간을 10년간 하였을 경우 현재 상태의 자원량 및 NPV값의 크게 변동이 없어 향후 20년 후로 설정하였다. 현재가치 환산을 위해 정부에서 시행하는 예비타당성조사의 총괄지침에 따른 사회적 이자율은 4.5% 가정하였다. 즉, 향후 20년간 발생할 연간 어업이익을 4.5%의 사회적 이자율로 할인한 합(NPV)은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{(TR_t - TC_t)}{(1+i)^t} \quad (16)$$

사회경제적 요인 변화에 따른 민감도 분석을 위해 2018년도 기름가자미의 평균 시장가격(kg/won)은 4,701원으로 계산되었다. 평균 시장가격 4,701원 기준으로 변화율은 -30%에서 +30% 범위에서 변화 수준에 따른 민감도 분석을 하고자 한다. 또한 어업비용 변화에 따른 최소 어획량 수준을 추정해 보았다. 어업비용의 변화율은 -30%에서 +30% 범위에서 변화 수준을 설정하였다.

## 결 과

### 기름가자미 어획량을 역 추정한 분석결과

2015년 이전의 기름가자미 어획량을 역 추정한 결과, 지역별, 어업별 가자미류에서 기름가자미 비율은 동해구외끝이중형저인망의 경우 강원지역은 약 82% 이고, 경북지역은 약 79% 이었다. 동해구외끝이중형저인망의 경우, 대부분의 가자미류가 기름가자미인 것으로 파악되었다. 연안자망의 경우 강원지역은 약 42%, 경북지역은 약 7% 이었다. 경북연안자망의 경우 기름가자미가 차지하는 비율이 낮은 것으로 파악되었다.

2015~2018년 지역별, 어업별 가자미류에서 기름가자미 비율을 대입해서 2004~2014년 동안의 기름가자

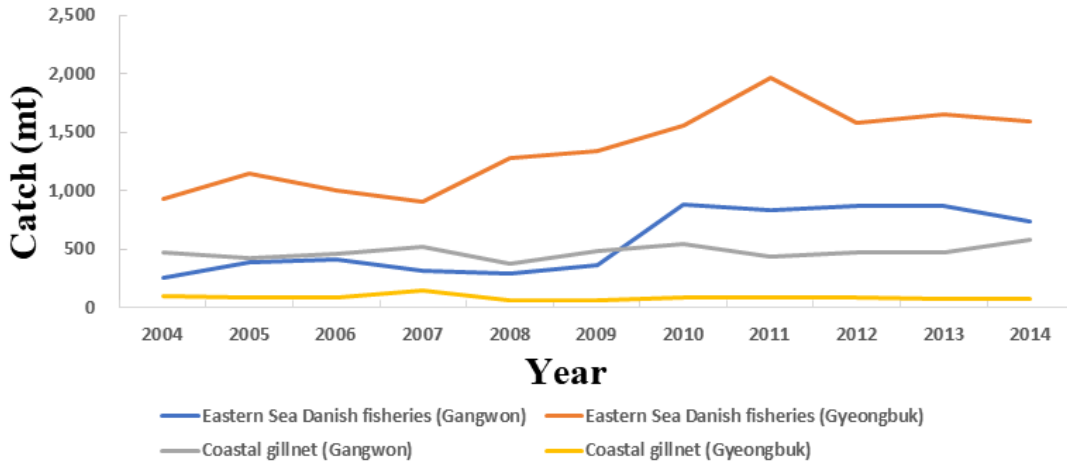


Fig. 2. Estimated catch amount of blackfin flounder in the East Sea of Korea from 2004 ~ 2014.

미 어획량을 역 추정해본 결과 Fig. 2와 같다.

**Bayesian State-space 모델 분석결과**

Bayesian State-space 모델은 깃스샘플링을 사용한 Bayesian 추론에 특화된 WinBUGS (bayesian inference using gibbs sampling) 프로그램을 사용하여 결과를 도출하였다(Choi et al., 2019). 모델의 분석을 위해서 200,000

개의 표본을 추출하였고, 이 중에서 사후분포에 수렴하지 못하는 초기샘플들의 영향을 제거하기 위해 초기 10,000 개의 표본을 번인(burn-in)을 통해 제외시켰다. 그리고 샘플 변수들의 자기상관을 제거하기 위해 매 50번째 샘플을 추출하여 분석결과를 도출하였다.

Bayesian State-space 모델의 검증 방법 중 하나는 시도표를 파악하는 것으로 추정하는 주요 파라미터 값들

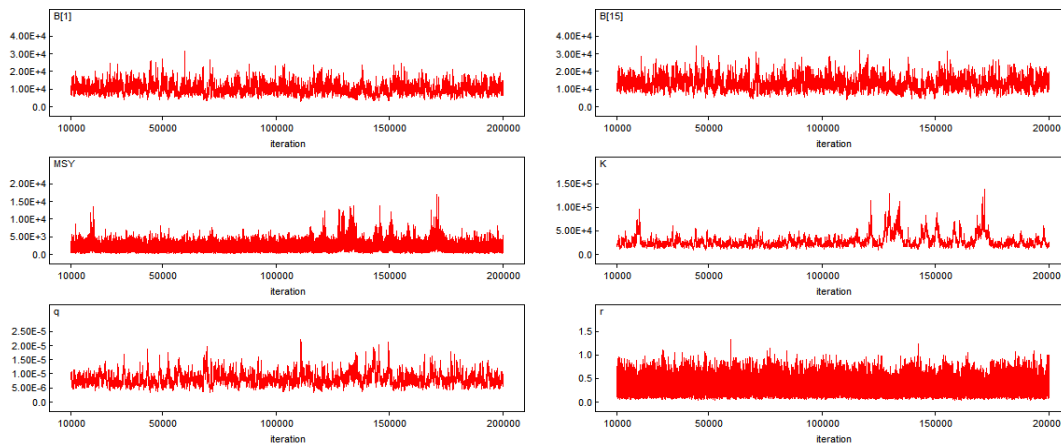


Fig. 3. Trace plots of biomass, r, q, K and MSY.

Table 4. Standard error and MC error of r, q, K, MSY and Biomass

Parameter	Biomass (2004)	Biomass (2018)	Intrinsic growth	Catchability coefficient	Carrying capacity	MSY
Standard Error	2,662	3,429	0.1333	0.0000002	13,080	1072
MC Error	94.65	123.4	0.002113	0.00000008	568.6	29.05
MC / SE	3.56%	3.60%	1.59%	3.79%	4.35%	2.71%

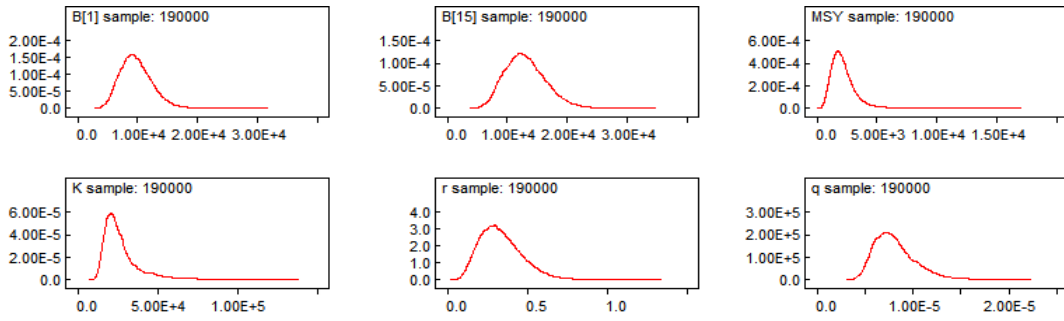


Fig. 4. Posterior densities of r, q, K, MSY, B (2004) and B (2017).

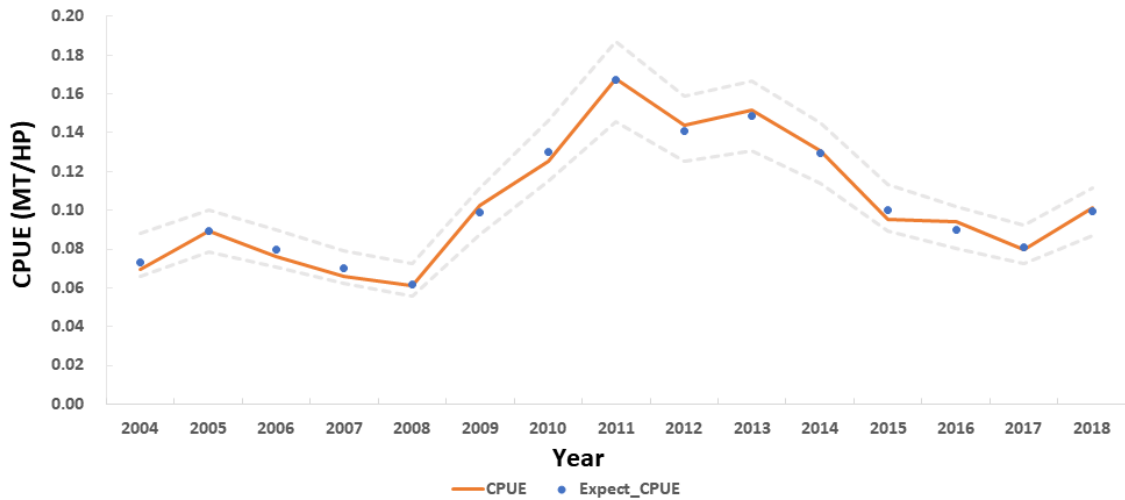


Fig. 5. CPUE with 95% confidence interval from the posterior predictive distribution in the Bayesian State-space model.

Table 5. Model estimates of blackfin flounder by the Bayesian State-space model

Parameter	Bayesian State-space model		
	2.5%	Median	97.5%
MSY (mt)	775	1,985	4,882
BMSY (mt)	7,015	11,965	32,965
B (mt)	7,313	12,770	20,590
K	14,030	23,930	65,930
q	0.000004889	0.000007765	0.00001339
r	0.12	0.31	0.63

의 일정한 형태나 경향을 보이지 않고, 백색잡음의 형태를 가지면 모델이 적합하다고 판단한다. 기름가자미에 대한 Bayesian State-space 모델의 추정 결과, 자원량(B)과 환경수용력(K), 어획능률계수(q), 본원적성장률(r) 그리고 최대지속생산량(MSY)의 모든 추정치들의 시도표가 일정한 형태를 보이지 않고 백색잡음의 형태를 보여

적합한 것으로 분석되었다(Fig. 3).

또 다른 검증방법으로 추정된 주요 생물계수들의 값의 몬테카를로 오차가 사후표준오차의 5% 수준 미만일 경우에 모델의 유의성을 판단할 수 있다(Spiegelhalter et al., 2003; Choi et al., 2019). Bayesian State-space 모델의 추정결과, 추정된 모든 주요 생물계수들의 몬테카



를로 오차가 사후 표준오차의 5% 미만인 것으로 파악되어 모델의 유의성이 우수한 것으로 분석되었다(Table 4).

Bayesian State-space 모델을 통해 도출된 사후분포를 통해 자원량, 주요 생물계수, 그리고 CPUE 변화 등을 추정하였다. Fig. 4와 같이 추정된 사후분포들의 형태가 비대칭이기 때문에 평균값은 대표성이 떨어지는 것으로 판단하여 중앙값을 대표 추정치로 분석에 사용하였다(Choi et al., 2019).

Bayesian State-space 모델의 연도별 실제 CPUE와 사후분포에 의해 추정된 CPUE를 비교·분석한 결과, 모든 CPUE의 실제 관측치가 사후 예측분포의 95%구간 안에 포함되어 있는 것으로 파악되었다(Fig. 5).

Bayesian State-space 모델의 경우 추정 모델의 자원량을 환경수용력에 대한 자원량의 비율로 재구성함으로써 생물계수들 간의 상관관계를 감소시킬 수 있다(Millar and Meyer, 2000b). 추정과정에서 설정한 생물계수 값에 대한 사전분포로 생물계수 값을 추정함으로써 불확실성을 감소시킬 수 있다(McAllister et al., 2001). 또한 각각의 생물계수에 대한 분포를 추정함으로써 생물계수들의 상관관계로 인한 변화의 범위를 고려할 수 있다.

다음으로 주요 생물계수 값에 대한 분포를 추정함으로써 생물계수들의 상관관계로 인하여 변화하는 범위를 고려할 수 있다. Bayesian State-space 모델 추정 결과, 기름가자미의 주요 추정 값들의 95% 신뢰구간 범위는 MSY(최대지속적생산량)는 775~4,882톤, K(환경수용

력)는 14,030~65,930톤,  $q$ (어획능력)는 0.000004889~0.00001339, 그리고  $r$ (본원적성장률)의 경우에는 0.12~0.63 범위를 갖는 것으로 분석되었다(Table 5). 중앙값으로 MSY는 1,985톤, K는 23,930톤,  $q$ 는 0.000007765, 그리고  $r$ 의 경우에는 0.31로 분석되었다.

### 기름가자미 어업관리방안에 대한 효과분석

현재 기름가자미는 자원회복계획 대상어종이지만, TAC 대상어종은 아니다. 하지만 향후 효과적인 기름가자미 자원관리를 위해서는 어획량 관리방안을 고려해야 한다. 그리고 향후 TAC 제도가 확대될 것으로 예상되므로 기름가자미에 대한 TAC 제도 실시의 효과를 분석해 보았다(MOF, 2019).

TAC 제도의 생물학적 효과분석 결과, 현재 어획량 수준과 같이 1,761톤으로 설정되어 지속된다면 기름가자미 자원량이 20년 후에는 14,637톤으로 유지하는 추

Table 6. Biological results of blackfin flounder bioeconomic analysis by TAC scenario

TAC	Stock Biomass (ton)	Catch (ton)
Status Quo	14,637	1,761
+30%	533	2,289
+20%	8,227	2,113
+10%	12,175	1,937
-10%	16,832	1,585
-20%	17,995	1,409

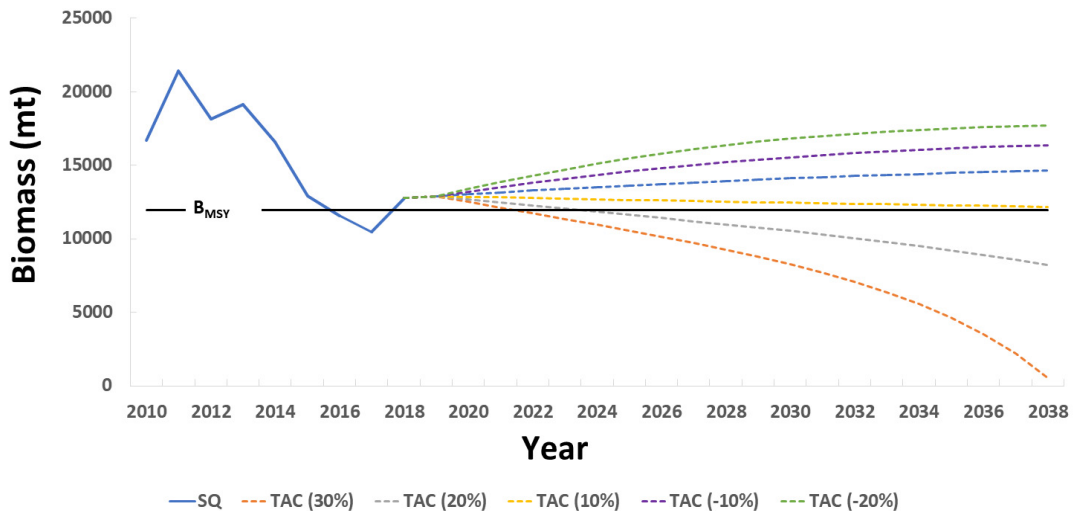


Fig. 6. Forecasting changes in the biomass of Blackfin flounder by TAC scenario.

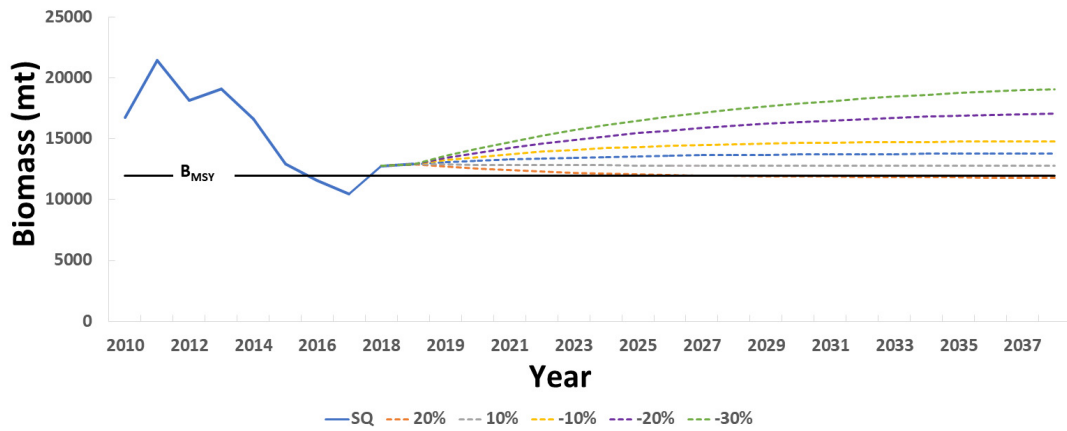


Fig. 7. Forecasting changes in the biomass of Blackfin flounder by fishing effort reduction scenario.

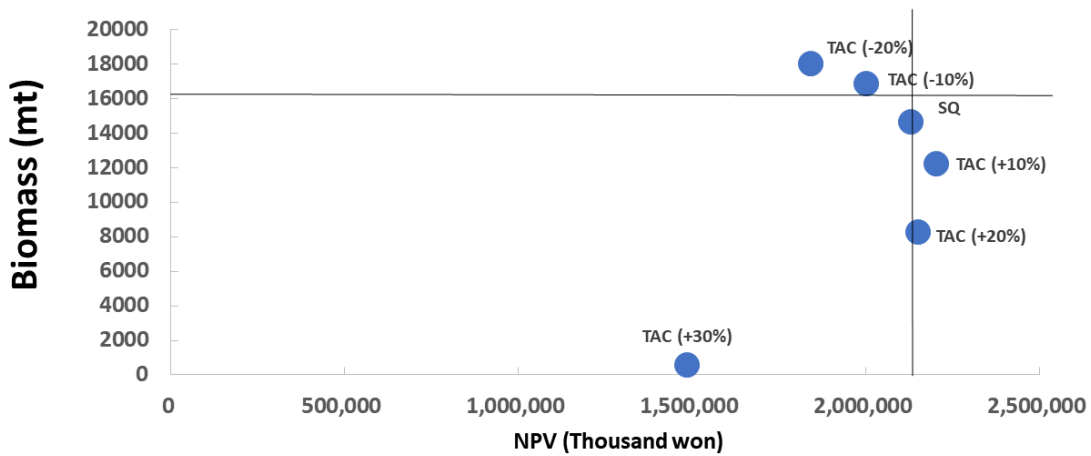


Fig. 8. Comparison of results by Blackfin flounder bioeconomic model (TAC).

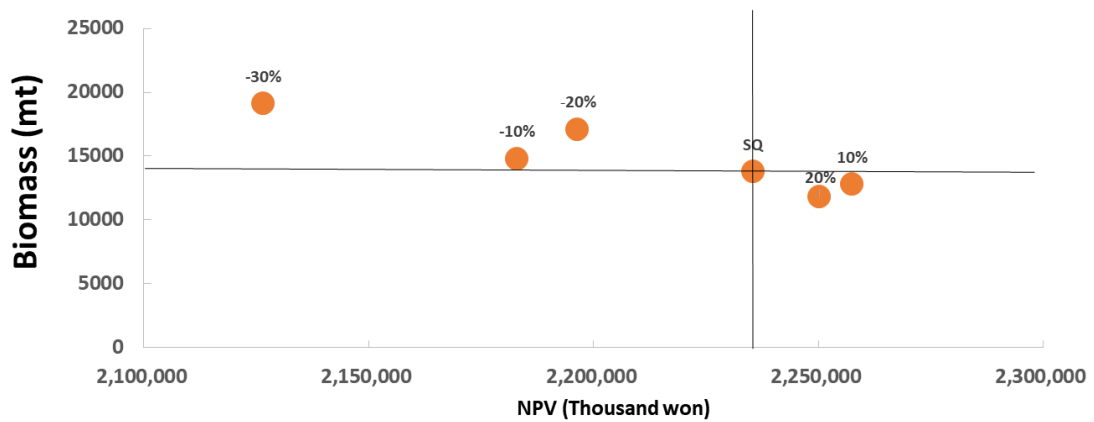


Fig. 9. Comparison of results by Blackfin flounder bioeconomic model (Fishing power).

**Table 7. Biological results of blackfin flounder bioeconomic analysis by fishing effort reduction scenario**

Effort	Stock Biomass (ton)	Catch(ton)
Status Quo	13,776	1,857
+20%	11,799	1,909
+10%	12,782	1,895
-10%	14,778	1,793
-20%	17,091	1,843
-30%	19,088	1,801

세로 평가되었다. 하지만 기름가자미 TAC 설정을 현재 어획량 기준 10% 감소시킬 경우 향후 16,832톤으로 자원량은 증가되는 것으로 추정되었다(Table 6)(Fig. 6).

한편, 어획노력량 저감 방안의 생물학적 효과분석 결과, 현재 어획노력량(현재hp) 수준으로 설정되어 지속될 경우 기름가자미 자원량이 13,776톤으로 유지하는 추세로 평가되었다. 하지만 어획노력량을 20% 감소시킬 경우 향후 자원량이 17,091톤으로 증가하는 것으로 분석되었다(Table 7)(Fig. 7).

TAC 제도의 사회경제학적 효과분석 결과, TAC 설정을 현재 어획량 기준 10% 증가시킬 경우 시 20년 후인 2038년 NPV는 1,486,410천원으로 가장 낮은 수준으로 분석되었다. 10% 증가시킬 경우 NPV는 2,206,522천원으로 가장 높은 것으로 추정되었지만, 자원에는 악영향을 미치는 것으로 분석되었다.

어획노력량 저감 방안의 사회경제학적 효과분석 결과, 현재 어획노력량 수준으로 유지되면, 20년 후인 2038년 NPV는 2,235,592천원으로 수준으로 추정되었다. 하지만 어획노력량을 10% 증가시킬 경우 NPV는 2,257,575천원으로 가장 높은 수준으로 추정되었다(Fig. 8)(Fig. 9).

기름가자미의 어업관리방안들에 대한 생물학적 그리고 사회경제학적 효과분석 결과를 요약하면, TAC 할당량이 현재 수준인 1,761톤으로 유지될 경우 기름가자미 자원량이 유지하는 것으로 추정되었다. 따라서 향후 기름가자미 TAC 설정 시 현재 어획량 수준 이하의 범위에서 설정해야 자원관리 효과가 있는 것으로 추정되었다. 또한 사회경제효과로서 NPV값은 현재 어획량 기준 10% 증가 시킬 경우 가장 높은 수준으로 분석되었지만, 자원의 악영향을 미치는 것으로 분석되었다.

어획노력량 저감 방안의 경우, 현 수준에서 20% 감소

할 경우 자원량이 보다 증가하고, NPV 또한 높은 수준으로 추정되었다. 현재 동해구외끝이중형저인망 기름가자미에 있어서는 어획노력량 저감을 위한 금어기, 어선 감척사업, 조업일수 제한 등 다양한 어업관리방안들이 시행 중에 있다. 2017년도 기준 동해구외끝이중형저인망 평균 조업일수는 182일 수준이다. 어획노력량 저감 방안의 분석결과에 따라 어획노력량을 20% 감소시킬 경우 연간 조업일수는 146일로 분석된다.

**시장가격 변화에 따른 민감도 분석결과**

동해구외끝이중형저인망의 기름가자미 경제적 요인에 따른 최소 어획량 수준을 분석하기 위해 시장가격의 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

분석결과, 현재 기름가자미 2018년 시장가격 787톤으로 분석되었다. 여기서 시장가격 변화율은 +30% 변화 시 최소 어획량은 605톤이며, -30% 변화 시 1,124톤으로 분석되었다(Table 8).

**Table 8. Results of sensitivity analysis by market price**

(unit: thousand won)	
market price	Catch (ton)
+30%	605
+20%	656
+10%	715
2018	787
-10%	874
-20%	983
-30%	1,124

**어업비용변화에 따른 민감도 분석**

현재 국제 사회에서는 WTO 수산보조금 현상이 진행 중이고, 인건비, 유류비 등 각종 비용요소들의 가격 변화 현상이 향후 보다 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 어업비용에 대한 민감도 분석을 통해 어업비용 변화에 따른 최소 어획량 수준을 추정해 보았다. 어업비용의 변화율은 -30%에서 +30% 범위에서 변화 수준을 설정하였다. 분석결과 Table 9에서 정리된 바와 같다.

분석결과, 2018년 현재 어업비용 기준으로 어업이익이 영(0)이 되는 최소 어획량 수준은 787톤으로 분석되었다. 여기서 어업비용이 현 수준에서 30% 증가할 경우 최소 어획량 수준은 1,023톤이며, 30% 감소할 경우 최소 어획량 수준은 551톤으로 분석되었다(Table 9).

**Table 9. Results of sensitivity analysis by fishing cost**  
(unit: thousand won)

Fishing cost	Catch (ton)
+30%	1,023
+20%	944
+10%	865
SQ	787
-10%	708
-20%	629
-30%	551

### 결론

기름가자미는 2008년에 수산자원회복 대상종으로 선정되어 자원회복 및 관리를 위해 매년 자원회복 권고안이 발표되고 있다. 이러한 자원회복 권고안 설정에는 신뢰할 수 있는 자원평가 모델 등을 사용하여 대상종에 대한 정확한 자원평가가 선행되어야 한다. 그 이후 자원평가 결과를 활용하여 어업관리방안들에 대한 효과 분석을 통해 실효성 있는 권고안, 즉 어업관리방안들이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 기름가자미의 효과적인 어업관리방안을 제시하기 위해 자료의 불확실성을 고려할 수 있고, 과정오차와 관측오차를 동시에 고려할 수 있는 Bayesian State-space 모델 사용하여 기름가자미의 자원상태를 평가하였다. 그리고 생물경제모델을 활용하여 어업관리방안들에 대한 효과 분석하였다.

연구 결과를 요약 해보면, 첫 번째로 Bayesian State-space 모델 사용한 기름가자미 자원평가 분석결과, 기름가자미의 MSY는 1,985톤, K는 23,930톤, q는 0.000007765, 그리고 r은 0.31로 분석되었다.

두 번째로 향후 기름가자미에 대한 TAC 제도의 도입이 될 경우 생물학적 효과를 분석한 결과, 현재 어획량 수준과 같이 1,761톤으로 설정되어 지속된다면 기름가자미 자원량이 20년 후에는 14,637톤으로 유지하는 추세로 평가되었다. 그리고 어획노력량 저감 방안의 분석결과, 현재 어획노력량(현재 hp) 수준으로 설정되어 지속될 경우 기름가자미 자원량이 13,776톤으로 유지하는 추세로 평가되었다. 하지만 어획노력량을 20% 감소시킬 경우 향후 17,091톤으로 증가하는 것으로 분석되었다.

마지막으로 TAC의 경제학적 효과를 분석결과, TAC 설정을 현재 어획량 기준으로 30% 증가시킬 경우 20년

후인 2038년의 NPV는 1,486,410천원으로 가장 낮은 수준으로 분석되었다. 반대로 10% 증가시킬 경우 NPV는 2,206,522천원으로 가장 높은 것으로 추정되었다. 하지만 자원에는 악영향을 미치는 것으로 분석되었다. 어획노력량 저감 방안의 분석결과, 현재 어획노력량 수준으로 유지되면 20년 후인 2038년 NPV는 2,235,592천원으로 수준으로 분석되었다. 그리고 어획노력량을 10% 증가시킬 경우 NPV는 2,257,575천원으로 가장 높은 수준이었지만, 생물학적 측면에서는 자원량이 감소하는 것으로 분석되었다.

본 연구의 분석결과를 활용하여 향후 동해구외끌이중형저인망의 기름가자미에 대한 TAC 설정 시 현재 어획량 수준 이상으로 할당량을 설정할 경우 기름가자미 자원에 부정적인 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 그러므로 향후 TAC 설정 시 현재 어획량 수준 이하로 설정되어야 할 것이다. 그리고 동해구외끌이중형저인망어업의 어획노력량을 20% 감소할 경우 자원량이 증가하는 것으로 추정되었다. 따라서 동해구외끌이중형저인망의 현재 평균 조업일수 182일은 146일 정도로 감소될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기름가자미 전체 어획량에서 가장 많은 어획비중 차지하고 있는 동해구외끌이중형저인망어업만을 대상으로 하였다. 이에 따라 동해안 전체 기름가자미에 대한 자원평가에는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 향후에는 어획비중이 높은 연안자망에서 어획되는 기름가자미에 대한 어획량과 어획노력량 자료가 보다 정확하게 조사·수집되어야 할 것이다.

그리고 2015년 이전의 기름가자미에 대한 정확한 어획량을 파악할 수 없어 본 연구에서는 최근 4년 동안의 비율을 이용하여 어획량을 추정하였다. 하지만 향후 기름가자미에 대한 정확한 어획량 자료가 지속적으로 수집되어야 할 것이고, 이를 통해 보다 신뢰성 있는 기름가자미에 대한 자원평가가 가능해질 수 있을 것이다.

### 사사

이 논문은 2020년도 국립수산물과학원 수산과학연구소(원양어업 자원평가 및 관리 연구, R2020023)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Bolker BM. 2008. Ecological models and data in R. Princeton University Press, 233-242.
- Chaloupka M, Balazs G .2007. Using Bayesian state-space modelling to assess the recovery and harvest potential of the Hawaiian green sea turtle stock. *Ecol Mmodel* 205, 93-109.
- Choi JH, Choi WH and Kim DH. 2016. A bioeconomic analysis of blackfin flounder *Glyptocephalus stelleri* fisheries management. *Korean J Fish Technol* 52, 394-402. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2016.52.4.394>.
- Choi MJ, Kim DH and Choi JH. 2019. Comparing surplus production models for analyzing potential yield of fishery resources in West sea, Republic of Korea. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology* 55, 206-216. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.3.206>.
- Davis JC. 2010. Rebuilding fisheries : Challenges for fisheries managers, *The Economics of Rebuilding Fisheries Workshop Proceedings*, OECD. 31-43.
- FAO. 2018. The state of world fisheries and aquaculture. <http://www.fao.org/3/i9540en/i9540en.pdf>. Accessed 27 Feb 2019.
- Fisheries Information Service. 2018. Fishery Production Statistics. Fishing statistics. Retrieved from <http://fips.go.kr/>. Accessed 17 Oct 2019.
- Fox and WW JR. 1970. An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. *Transactions of the American Fisheries Society* 99, 80-88.
- Gilks WR and Wild P. 1992. Adaptive rejection sampling for Gibbs sampling. *Applied Statistics*, 337-348.
- Haddon M. 2010. Modelling and quantitative methods in fisheries. CRC press, 1-435
- Holland D. 2010. Economic considerations and methods for evaluating fishery rebuilding strategies, *The Economics of Rebuilding Fisheries Workshop Proceedings*, OECD. 95-111
- ICCAT. 2008. Report of the standing committee on research and statistics (SCRS). Retrieved from [https://www.iccat.int/com2018/ENG/PLE\\_104\\_ENG.pdf](https://www.iccat.int/com2018/ENG/PLE_104_ENG.pdf). Accessed 27 Feb 2019.
- Kim D.H. 2015. Evaluating the TAC policy in the sandfish stock rebuilding plan. *J Fish Bus Adm* 46, 29-39.
- Korea Fisheries Resources Agency. 2018. Coastal Fisheries Survey Report, FIRA-ER-18-045, Busan, Korea, 99-100.
- KOSIS. 2018. Fishery production survey. Retrieved from <http://kosis.kr>. Accessed 22 Feb 2019.
- Lunn DJ, Thomas A, Best N, and Spiegelhalter D. 2000. WinBUGS-a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility. *Statistics and computing* 10, 325-337.
- McAllister MK, Pikitch EK, and Babcock EA. 2001. Using demographic methods to construct Bayesian priors for the intrinsic rate of increase in the Schaefer model and implications for stock rebuilding. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58, 1871-1890.
- McAllister M. 2014. A generalized Bayesian surplus production stock assessment software (BSP2). *Collect Vol Sci Pap ICCAT* 70, 1725-1757.
- Millar RB and Meyer R. 2000a. Bayesian state-space modeling of age-structured data: fitting a model is just the beginning. *Can J Fish Aquat Sci* 57, 43-50.
- Millar RB and Meyer R. 2000b. Non-linear state space modelling of fisheries biomass dynamics by using Metropolis-Hastings within-Gibbs sampling. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 49, 327-342.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2014. Fisheries Production Statistics, Ministry of Oceans and Fisheries. Accessed 17 Oct 2019.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2019. Fisheries Production Statistics, Ministry of Oceans and Fisheries. Accessed 17 Oct 2019.
- Neal RM. 1997. Markov chain Monte Carlo methods based on 'slicing' the density function. Department of Statistics, University of Toronto, Canada, 1-27.
- NIFS. 2019. Resource status of 2019 and restoration recommendation of fisheries resources in 2020. National Institute of Fisheries Science, Gijang, 175.
- Pella JJ and Tomlinson PK. 1969. A generalized stock production model. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 13, 416-497.
- Schaefer and MB. 1954. Some aspects of the dynamics of populations. important to the management of the commercial marine fisheries. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 1, 23-56.
- Sohn MH, Yang JH, Park JH, Lee HW, Choi YM and Lee



JB. 2013. Stock Assessment and Optimal Catch of Blackfin Flounder *Glyptocephalus stelleri* in the East Sea, Korea. The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science 46, 598-606. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2013.0598>.

Spiegelhalter D, Thomas A, Best and Lunn D. 2003. WinBUGS user manual, version 1.4. Medical Research Council

Biostatistics Unit, Cambridge, 60.

Winker H, Carvalho F, Kapur M. 2018. JABBA: just another bayesian biomass assessment. Fisher Res 204, 275-288.

---

2020. 08. 06 Received

2020. 09. 14 Revised

2020. 10. 15 Accepted