

통합생산량분석법에 의한 한국 서해 어획대상 잠재생산량 추정 연구

김현아 · 서영일* · 차형기 · 강희중 · 장창익¹

국립수산물과학원 연근해자원과, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부

A study on the estimation of potential yield for Korean west coast fisheries using the holistic production method (HPM)

Hyun-A KIM, Yong-Il SEO*, Hyung Kee CHA, Hee-Joong KANG, Chang-Ik ZHANG¹

Fisheries Resources Management Division, National Institute of Fishers Science, Busan 46083, Korea

¹*Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Korea*

The purpose of this study is to estimate potential yield (PY) for Korean west coast fisheries using the holistic production method (HPM). HPM involves the use of surplus production models to apply input data of catch and standardized fishing efforts. HPM compared the estimated parameters of the surplus production from four different models: the Fox model, CYP model, ASPIC model, and maximum entropy model. The PY estimates ranged from 174,232 metric tons (mt) using the CYP model to 238,088 mt using the maximum entropy model. The highest coefficient of determination (R^2), the lowest root mean square error (RMSE), and the lowest Theil's U statistic (U) for Korean west coast fisheries were obtained from the maximum entropy model. The maximum entropy model showed relatively better fits of data, indicating that the maximum entropy model is statistically more stable and accurate than other models. The estimate from the maximum entropy model is regarded as a more reasonable estimate of PY. The quality of input data should be improved for the future study of PY to obtain more reliable estimates.

Keywords : Potential yield, Carrying capacity, Korean west coast fisheries, Stock assessment, Holistic production method

서론

우리나라 서해는 남북한과 중국에 의해 둘러싸인 반 폐쇄해로서 약 6억에 이르는 연안 인구가 의존하고 있는 이용도가 매우 높은 해역이다. 황해에 서식하고 있는 대부분의 주요 자원생물은 남·북한뿐만 아니라 중국 사

이를 왕래하는 경계왕래자원으로 구성되어 있어 수산자원의 이용은 주인이 없는 자원이라는 인식 하에서 경쟁적으로 이루어져 왔고, 그 결과로 황해의 수산자원 중 대부분의 주요 어종들은 고갈상태에 있는 것으로 알려져 있다(Zhang et al., 1993).

*Corresponding author: seoyi@korea.kr, Tel: +82-51-720-2296, Fax: +82-51-720-2277

이는 첫째, 인구 및 소득 증가에 따른 식량 수요의 증가로 수산물의 수요가 증가했고, 둘째, 과학기술의 진보에 따른 각종 어획기술의 획기적 발달이 어획량의 남획을 뒷받침했으며, 셋째, 수산자원은 소유권적 특성상 개방자원이나 공유자원의 성질을 지니기 때문에 개인에 의한 자유로운 자원채취는 자원의 남용을 필수적으로 가져오기 때문인 것으로 판단된다(Kim and Kwon, 2000).

수산자원의 고갈 위기에 직면한 세계 각국에서는 수산자원의 중요성이 더욱 부각될 것으로 전망하여 수산자원의 보호 및 관리정책을 수립하고 있으며, 관련 국제협약 체결도 증가하고 있는 상태이다.

우리나라도 2013년에 해양수산부가 부활된 사실에 비추어 알 수 있듯이 수산자원에 대한 중요성을 인지하고 있는 것이 사실이며, 우리나라 수산자원의 관리, 보전 그리고 남획방지, 적정 생산 등 많은 부분에서 수산자원에 대한 정확한 자원동태적 분석이 요구되고 있다.

수산자원을 관리하기 위한 필수적인 요소는 대상자원의 자원량 변동을 파악하고, 대상 자원으로부터 지속적으로 취할 수 있는 최대 어획량인 최대지속적생산량(Maximum Sustainable Yield, MSY)을 알아내는 것이다. 또한 자원의 어획이전 상태인 환경수용량과 MSY는 연관되어 있기 때문에(Gulland, 1971), 대상자원의 자원량 변동과 MSY를 정확히 판단하기 위해서는 어획대상 환경수용량을 파악해야 한다.

MSY는 수십년 동안 수산관리의 중심 주제가 되어 오고 있다. 이 용어는 Ricker(1946)가 처음으로 ‘MSY’라는 용어로 수산과학에 소개하였으며, ICNAF(International Commission for the Northwest Atlantic Fisheries)의 협정과 미국과 캐나다 간에 체결된 넙치에 관한 1953년 조약에서도 사용되었다. 그 후, Chapman et al.(1962)은 태평양 넙치에 대한 Schaefer 모델에서의 최대치를 설명할 때, ‘MSY’라는 용어를 사용하였다(Cushing, 1981). 그리고 미국 북태평양어업관리평의회(North Pacific Fishery Management Council, NPFMC)는 어업관리계획(Fishery Management Plan, FMP)에서 ‘MSY는 주어진 환경 조건 하에서 하나의 자원으로부터 취할 수 있는 가장 큰 어획량의 적절한 기간의 평균치이다’라고 정의하였다(Zhang, 1989). MSY라는 용어는 잠재생산량, 잠재생산력, 최대지속적생산량 등 여러 용어와 동일한 의

미로 사용되고 있는데, 본 논문에서는 잠재생산량(Potential Yield, PY)이라 칭하였으며, 어업의 대상이 되는 어획대상어종의 생물량 상한치를 어획대상 환경수용량(Exploitable Carrying Capacity, ECC)으로 정의하였다.

또한 표준화된 어획노력량과 어획량 자료를 변수로 하여 현재까지 개발된 잉여생산량모델을 사용하여 어획대상 환경수용량(ECC)과 잠재생산량(PY)을 추정하는 방법을 통합생산량 분석법(Holistic Production Method, HPM)으로 정의하였다.

잉여생산량모델은 자원생물의 연령조성이나 체장조성 자료를 이용할 수 없거나 생태학적 파라미터를 추정할 수 없을 때 어획자료를 기반으로 잠재생산량을 추정하여 자원관리에 사용할 수 있는 유용한 모델이다(Zhang, 1991).

잉여생산량모델들의 파라미터를 추정하는 방법에는 선형회귀, 중회귀 등의 방법이 있는데, 선형회귀방법에 의해 파라미터를 추정하는 방법은 전통적 잉여생산량모델(Schaefer, 1954, 1957; Pella and Tomlinson, 1969; Fox, 1974)로써 평형상태를 가정하여 연도별 어획량과 어획노력량에 대한 일차식으로 잠재생산량을 계산하는 방법이다(Zhang, 2010).

그러나 자원평가를 위한 대상자원은 현재 어획되고 있는 자원이기 때문에 이를 잉여생산량모델에 적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. 중회귀방법은 이러한 가정 없이 세가지 이상의 파라미터를 중회귀분석에 의해 추정하는 방법이다. Clark et al.(1992)은 지수성장함수의 Fox 모델을 중회귀방법으로 통합 개발하였다.

또한 ASPIC 모델(Prager, 1992a, 1992b)은 평형상태에 대한 가정 없이 관측오차를 사용하여 자원의 어업자료를 잉여생산량모델에 적합시켜 합리적인 파라미터의 추정이 가능하도록 하는 모델이다(Prager, 2005, 2011). ASPIC 모델은 대서양다랑어보존위원회(International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, ICCAT)에서 눈다랑어와 황새치의 자원평가에 이용되고 있으며(ICCAT, 2008, 2009), 인도양다랑어위원회(Indian Ocean Tuna Commission, IOTC)에서도 눈다랑어의 자원평가에 이용하고 있는 등(IOTC, 2009), 지역 수산관리기구에서 자원관리를 위해 사용하고 있는 대표적인 잉여생산량 모델이다.

앞서 소개한 잉여생산량모델들은 추정하는데 필요한 자료의 수보다 추정하는 파라미터의 수가 더 많다는 문제로 인하여, 파라미터를 추정할 때 사용되는 자료에 의해 파라미터들의 추정치가 민감하게 영향을 받는다. 이러한 문제를 해결하고자 제시된 방법이 최대엔트로피 모델(Golan et al., 1996a, 1996b)이다. 최대엔트로피 모델은 추정하고자 하는 파라미터를 주어진 제약조건 내에서 파라미터가 가질 수 있는 확률분포를 추정하여 파라미터가 자료를 가장 잘 설명할 수 있는 이상적인 값을 추정하는 모델이다. 이 모델은 최대파라미터를 추정함에 있어서 초기조건을 두어 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않는다(Kwon et al., 2013).

따라서 본 연구에서는 우리나라 어획대상 어종에 대한 자원평가의 필요성을 인식하고 우선적으로 서해 연근해 어업의 자원관리를 위한 자원상태를 파악하기 위하여, 첫째, 현재까지 개발된 잉여생산량 모델들을 사용하여 우리나라 서해의 어획대상 어종에 대한 어획대상 잠재생산량을 추정하였다. 둘째, 각 방법 별 추정치를 비교·분석하여 가장 합리적인 잠재생산량 추정치를 선정하고, 셋째, 추정방법과 자료의 신뢰도를 향상시키기 위한 방안을 제시하였다.

자료 및 방법

어획량 및 어획노력량 자료 수집

본 연구에서는 서해 연근해 어선어업의 어획대상 수산자원에 대한 어획대상 잠재생산량과 환경수용량을 추정하였다. 국립수산과학원의 수산자원관리용 생태계 구분 기준(NFRDI, 2015)을 사용하여 서해 행정구역인 인천광역시, 경기도, 충청북도, 충청남도, 전라북도의 1967~2013년간 연도별 시도별 어획량 및 어획노력량 자료를 수집하였다(KOSIS, 2015). 본 연구의 선행연구인 잉여생산량 모델을 이용한 세계어업의 잠재생산량 추정 연구(FAO, 2001)에서 어획량은 어선크기와 가장 밀접한 관련이 있다고 판단하여 어획노력량으로 표준화된 총톤수를 사용한 바 있으며, 또한 총톤수 자료는 40개년 이상의 자료를 이용할 수 있었기 때문에, 본 연구에서도 어획노력량으로 동력선과 무동력선의 총톤수 자료를 사용하였다(Table A1).

어획노력량의 표준화

수집된 자료의 무차원화를 위하여 세 단계로 어획노력량 자료를 표준화하였다. 1) 수집 가능한 연도별 시도별 총톤수 자료에는 본 연구 대상범위인 서해 해수면어업 외에도 양식어업과 내수면어업이 포함되어 있기 때문에, 양식어업과 내수면어업의 총톤수를 추정하여 이를 제외하였다. 2) 국제협약을 적용한 선박법 시행규정 시행(83.12.29)에 따라 구톤수를 신통수로 환산하였다. 3) 총톤수 자료는 어군탐지기의 보급 또는 엔진출력 증가 등에 따른 연도별 어획효율을 반영하지 못하기 때문에 Fitzpatrick(1996)으로부터 추정된 어업별 기술 계수를 사용하여 연도별 어획노력량을 표준화하였다.

시도별 연도별 총톤수 자료에서 양식어업과 내수면어업의 총톤수를 제외하기 위하여, 먼저 시도별 연도별로 수집된 총톤수 자료를 취합하였다. 어획노력량 자료 수집 기준이 과거 어선소유자 기준에서 1979년부터 실질적인 어획량을 반영하는 등록항 기준으로 변경되었다. 따라서 1979년 이전까지 어선소유자 기준으로 서울로 집계되었던 동력선의 어획노력량이 1979년부터 경기도와 부산에 일정 비율로 포함되었기 때문에, 1979년도 이전의 시도별 연도별 어획노력량 자료를 등록항 기준으로 환산하기 위해, 1967년부터 연도에 따른 어획노력량의 변화를 식 (1)과 같이 지수화하여 회귀 분석을 통해 회귀계수를 추정하고, 회귀식으로부터 1979년 이전의 총톤수를 추정하였다. 또한 어선소유자 기준의 1979년 경기도와 부산의 총톤수 ($f_{R,1979}$)를 식 (2)로 나타냈다.

$$f_{R,t} = a_R e^{\gamma_R t} \quad (1)$$

여기서, $f_{R,t}$ 는 지역 R의 t년 총톤수, a_R 은 지역 R의 계수, γ_R 은 지역 R의 총톤수 연 증가율, R은 경기도, 부산, t는 1967~1978년이다.

$$f_{R,1979} = a_R e^{\gamma_R 1979} \quad (2)$$

서울 총톤수 자료에서 등록항 경기도 톤수 자료의 포함율 (r_f)을 식 (3)으로 추정하였다.

$$r_f = \frac{f_{R,p} - f_{R,1979}}{(f_{R,p} - f_{G,1979}) + (f_{B,p} - f_{B,1979})} \quad (3)$$

여기서, $f_{G,p}$ 는 1979년 등록항 기준의 경기도 총톤수, $f_{G,1979}$ 는 추정된 어선소유자 기준의 경기도 총톤수, $f_{B,p}$ 는 1979년 등록항 기준의 부산 총톤수, $f_{B,1979}$ 는 추정된 어선소유자 기준의 부산 총톤수이다.

등록항 기준의 1967~1978년 경기도 어획노력량을 식 (4)로 추정하였다.

$$G_t = f_{G,t} + (f_{S,t} \cdot r_f) \quad (4)$$

여기서, G_t 는 등록항 기준의 경기도 t년 총톤수, $f_{G,t}$ 는 어선소유자 기준의 경기도 t년 총톤수, $f_{S,t}$ 는 어선소유자 기준의 서울 t년 총톤수, t는 1967~1978이다.

따라서 등록항 기준의 1967~2013년 서해 연도별 총톤수 (W_t)는 식 (5)와 같다.

$$W_t = O_t + P_t \quad t < 1979 \quad O_t : G_t \quad (5)$$

$$t \geq 1979 \quad O_t : H_t$$

여기서, P_t 는 인천광역시, 충청북도, 충청남도, 전라북도의 t년 총톤수 합, H_t 는 등록항 기준의 경기도 t년 총톤수이다.

서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 총톤수 ($AIGT_{t,v}$)는 식 (6)으로 추정하였다. 각 어업의 연도별 총톤수는 국가통계포털에서 수집하였다(KOSIS, 2015).

$$AIGT_{t,v} = f_{t,v} \left(\frac{WC_{t,v}}{C_{t,v}} \right) \quad (6)$$

여기서, $f_{t,v}$ 는 한국 전체 해역에 대한 양식어업과 내수면어업의 t년 총톤수, $WC_{t,v}$ 는 서해 양식어업과 내수면어업의 t년 어획량, $C_{t,v}$ 는 한국 전체 해역에 대한 양식어업과 내수면어업의 t년 어획량, t는 1967~2013이다.

따라서 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 총톤수를 제외한 서해 연도별 총톤수(GT_t)는 식 (7)과 같다.

$$GT_t = W_t - AIGT_{t,v} \quad (7)$$

또한 1967~1983년의 톤수(GT_t)를 국제협약을 적용한 선박법에 따른 신통수(NGT_t)로 환산하여 자료를 사용하였다(MOF, 2017).

$$NGT_t = 0.72 \cdot GT_t \quad (8)$$

여기서, t는 1967~1983년이다.

Fitzpatrick(1996)은 대형트롤 등 13개 어업에 대해 시간의 흐름에 따른 어구 발달, 어선 구조 및 항법 장비 발달 등을 고려하여 1980년을 기준으로 1965년, 1995년의 기술계수를 추정하였다. 본 연구에서는 저인망류(Trawls), 선망(Purse seiner), 연승(Long liner), 자망(Gillnetter) 어업에 대한 Fitzpatrick의 기술계수를 사용하여 서해 어업의 연도별 총톤수 자료를 표준화 하였다(Table 1).

서해의 안강망어업은 높은 어획 비율을 차지하고 있지만 추정된 기술계수가 없으므로 안강망어업과 어획량 추세가 가장 비슷한 저인망류의 기술계수를 적용하였다. 저인망류는 5종류 트롤의 기술계수 평균값을 사용하였다. 이외의 서해 기타 어업(통발, 채낚기, 정지망, 기선권현망 등)은 저인망류, 선망, 연승 및 자망의 기술계수 평균값을 사용하였다. 무동력선의 연도별 어획효율은 일정하므로 동력선에 대한 어획효율만 고려하였다.

어업별 동력선의 표준화를 위해 먼저, 식 (9)에 대한 선형 회귀 분석을 하여 Fitzpatrick의 어업별 기술계수 연 증가율(γ_v)을 추정하였다.

$$TC_{v,t} = a_v + \gamma_v t \quad (9)$$

여기서, $TC_{v,t}$ 는 v어업의 t년 기술계수, a_v 는 v어업의 계수, γ_v 는 v어업의 기술계수 연 증가율, v는 저인망류, 선망, 연승, 자망, 기타어업, t는 1965, 1980, 1995년이다.

어업별 연도별 어획효율(Catching efficiency, CE)은 다음 식 (10)으로부터 추정하였다.

$$CE_{v,t} = CE_{tr} + \gamma_v (t - t_r) \quad (10)$$

여기서, $CE_{v,t}$ 는 v어업의 t년 어획효율, CE_{tr} 은 초기 값 1, t는 1967~2013, t_r 은 1967이다.

어업별 표준화된 t년의 동력선 총톤수($P_{v,t}$)는 식 (11)로부터 추정하였다.

$$P_{v,t} = GT_{v,t} \cdot CE_{v,t} \quad (11)$$

Table 1. Technology coefficient (TC) by Fitzpatrick (1996) and estimated annual increasing rate (%) of the TC by fishery for Korean west coast fisheries

Fisheries	Technology coefficient			Annual increasing rate (%)
	1965	1980	1995	
Trawls	0.6	1	2.1	0.05
Purse seiner	0.6	1	2.0	0.05
Long liner	0.4	1	2.8	0.08
Gillnetter	0.4	1	1.5	0.04
Others	0.5	1	2.1	0.05

여기서, $GT_{v,t}$ 는 v어업 동력선의 t년 총톤수이다. 연도별 어업별 표준화된 동력선 총톤수의 합으로 연도별 서해 어업의 동력선 총톤수를 구하였다 ($P_{GT,t} = \sum P_{v,t}$). 따라서 표준화된 연 총톤수($f_{GT,t}$)는 식 (12)와 같다.

$$f_{GT,t} = P_{GT,t} + NP_{GT,t} \quad (12)$$

여기서, $NP_{GT,t}$ 는 무동력선의 t년 총톤수이다.

잉여생산량모델의 적용

본 연구에서는 서해 어획대상 잠재생산량과 환경수용량을 추정하기 위해 잉여생산량 모델을 기반으로 하는 Fox 모델(Fox, 1974), CYP 모델(Clark et al., 1992), ASPIC 모델 (Prager, 1992a, 1992b) 및 최대엔트로피 모델(Golan et al, 1996a, 1996b)을 적용하였다(부록 참조). 이 중 Fox 모델은 환경수용량 추정이 불가하여 잠재생산량 추정에만 적용하였다. 네 모델에서 추정되는 최대 지속적생산량(MSY) 값을 잠재생산량 PY)으로 정의하고, 초기자원량(B_{∞}) 값을 어획대상 환경수용량(ECC)로 정의하였다.

모델검정

각 모델에 대한 결정계수(R^2), 오차의 제곱 평균 제곱근 (Root Mean Square Error, RMSE), 및 Theil's의 U 통계량 (U)을 계산하여 자료의 적합도를 평가하였다. 결정계수(R^2)를 구하는 식은 식 (13)과 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_1)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_1)^2}; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i \quad (13)$$

여기서, y_i 는 실제 단위노력당어획량(Catch per unit effort, CPUE), \hat{y}_1 은 모델에 의해 계산된 CPUE, i 는 연도, n 은 자료의 수이다. 오차의 제곱 평균 제곱근 (RMSE)은 식 (14)로 추정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(x_i) - \hat{y}(x_i)]^2} \quad (14)$$

여기서, $y(x_i)$ 는 x_i 에서의 실제 CPUE, $\hat{y}(x_i)$ 는 x_i 에서의 예측 CPUE이다. Theil's의 U 통계량 (U)은 식 (15)와 같다.

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{F_{i+1} - Y_{i+1}}{Y_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{Y_i} \right)^2}} \quad (15)$$

여기서, F는 모델에 의해 계산된 어획량, Y는 실제 어획량이다.

결 과

어획노력량의 표준화

서해 전체 어업에 대한 총톤수는 1967년 약 4만톤에서 2013년 약 6만톤으로 약 1.4배 증가한 경향을 보였으

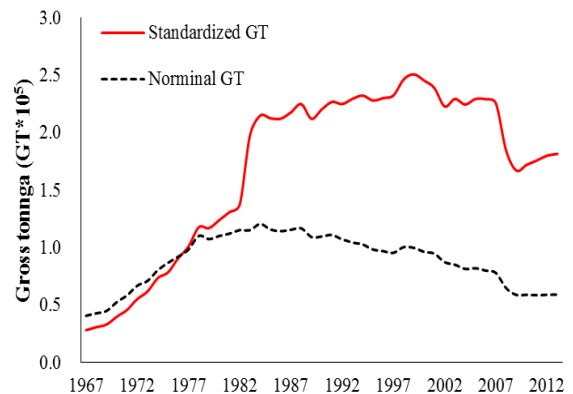


Fig. 1. Annual variations in nominal gross tonnage (GT), and standardized GT for Korean west coast fisheries from 1967 to 2013.

며, 1986년에 약 26만톤으로 가장 높은 값을 나타냈다. 추정된 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 총톤수를 제외하고, 1967~1983년도의 총톤수를 신통수로 환산한 결과는 Table A1과 같다.

어업별 연도별 어획효율(CE)은 Table A2와 같다. 각 어업별 어획효율은 초기연도에 대하여 2013년에 2.7~4.7배의 증가량을 보였다. 어업별 연도별 어획효율(CE)을 고려하여 표준화된 총톤수는 Fig. 1와 Table A1에 나타냈다.

서해 어업에 대한 표준화된 총톤수는 어군탐지기의 보급 또는 엔진출력 증가 등에 따른 연도별 어획효율이 고려되어 1967년 약 4만톤에서 2013년 약 18만톤으로 4.6배 가량 증가한 경향을 보였으며, 1999년에 약 25만톤으로 가장 높은 값을 나타냈다.

잉여생산량모델의 적용

네 모델에 의해 추정된 어획량과 CPUE는 관측된 값

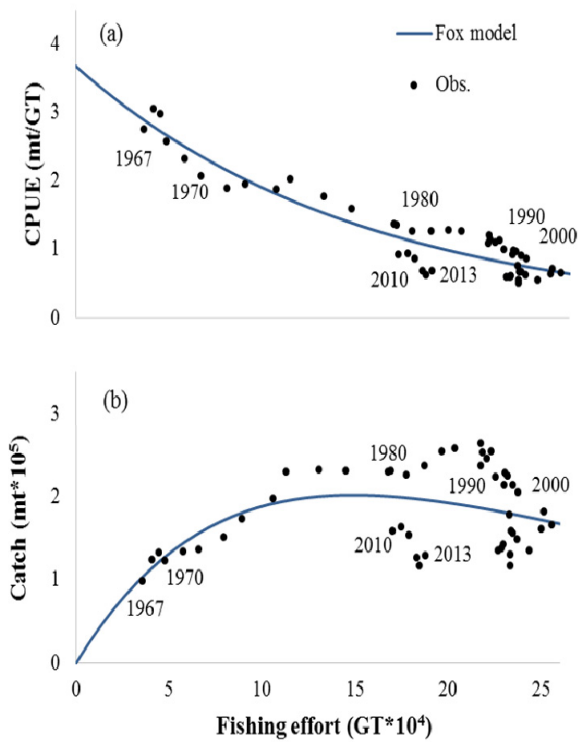


Fig. 2. The estimated (a) CPUE and (b) catch (b) for Korean west coast fisheries by Fox model.

을 적절하게 설정하고 있다(Fig. 2~Fig. 5). 모델 적합도 (R2, RMSE, U)에서 R2값은 Fox 모델이 0.896으로 가장 낮은 값을 보였고, 최대엔트로피 모델이 0.953으로 가장 높은 값을 나타냈다. 0에 가까울수록 모델에 대한 자료의 높은 적합도를 나타내는 RMSE 및 U 값은 최대엔트로피 모델에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 네 모델 중에서 최대엔트로피 모델의 추정치가 관측된 값의 변화에 가장 근접하였다. 기타 추정치는 Table 2와 같다.

어획대상 잠재생산량과 환경수용량

잉여생산량 모델에 의해 추정된 우리나라 서해 어획대상 잠재생산량은 Fox 모델에서 219,146 mt, CYP 모델에서 174,232 mt, ASPIC 모델에서 232,700 mt, 최대엔트로피 모델에서 238,088 mt으로 추정되었으며, 우리나라 서해 어획대상 환경수용량은 CYP 모델에서 2,164,598 mt, ASPIC 모델에서 1,617,000 mt, 최대엔트로피 모델에서 1,140,541 mt으로 추정되었다(Table 2).

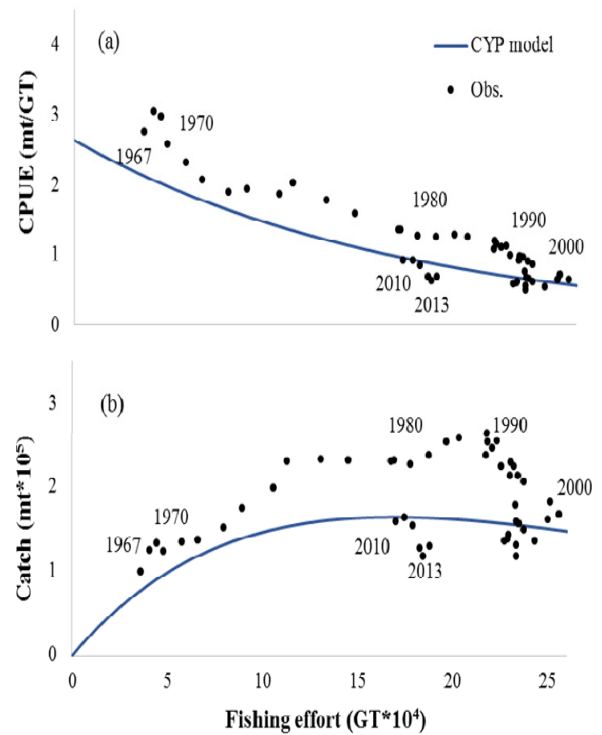


Fig. 3. The estimated (a) CPUE and (b) catch (b) for Korean west coast fisheries by CYP model.

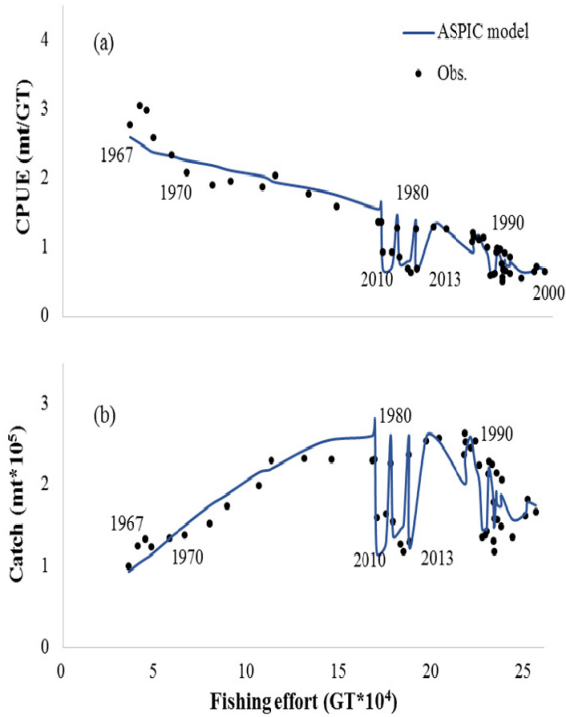


Fig. 4. The estimated (a) CPUE and (b) catch (b) for Korean west coast fisheries by ASPIC

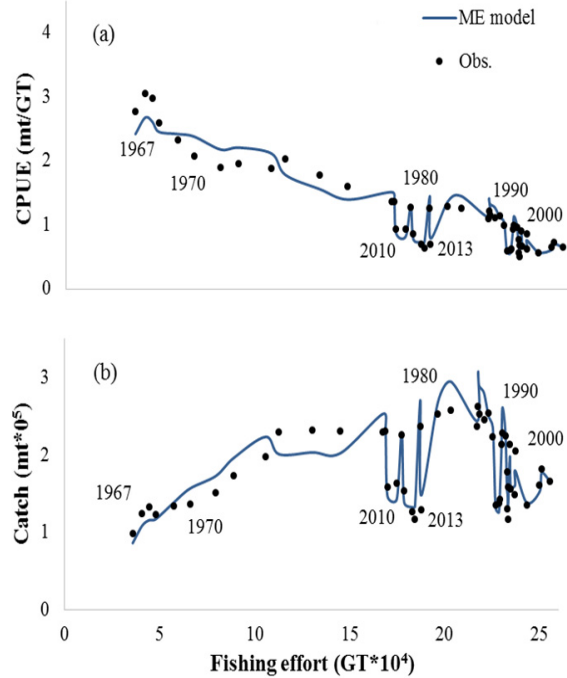


Fig. 5. The estimated (a) CPUE and (b) catch (b) for Korean west coast fisheries by maximum entropy model.

Table 2. Summary of the estimated results for Korean west coast fisheries by each model using gross tonnage for effort

Parameter	Fox model	CYP model	ASPIC model	Maximum entropy model
$MSY = PY(mt)$	219,146	174,232	232,700	238,088
$B_{MSY}(mt)$	-	796,311	808,500	459,762
$f_{MSY}(GT)$	123,110	142,232	138,800	161,438
$K = ECC(mt)$	-	2,164,598	1,617,000	1,140,541
$q(/GT)$	-	1.54E-06	2.07E-06	3.21E-06
$r(/year)$	-	0.219	0.476	0.835
R^2	0.896	0.899	0.933	0.953
RMSE	0.451	0.728	0.290	0.252
U	2.671	2.482	1.478	1.173

고 찰

본 연구에서는 어업관리에 앞서 선행되어야 하는 어획대상 자원평가를 위해 통합생산량 분석법(HPM)을 사용하여 서해 전체 어획대상 잠재생산량(PY)과 환경수용량(ECC)을 추정하였다. 통합생산량 분석법(HPM)은 서해 전체 어획대상 어종의 어획량과 표준화된 어획노력량 자료를 사용하여 네 가지의 잉여생산량모델에 의해 잠재생산량과 환경수용량을 추정하였으며, 추정된 어획

대상 잠재생산량과 환경수용량은 각 모델 별로 상이한 결과를 나타내었다.

네 가지의 잉여생산량모델에 의해 추정된 어획대상 잠재생산량은 CYP 모델에 의한 17만톤에서 최대엔트로피 모델에 의한 24만톤의 범위였다. 환경수용량은 대엔트로피 모델에 의한 114만톤에서 CYP 모델에 의한 216만톤의 범위로 추정되었다(Table 2).

자원평가를 위한 대상자원은 현재 어획되고 있는 자

원이기 때문에 이를 잉여생산량모델에 적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. Fox 모델은 평형상태를 가정하며, 선형회귀방법이므로 기타 중요한 생태학적 파라미터와 환경수용량의 추정이 불가능하였다. CYP 모델은 모든 파라미터를 추정할 수는 있으나, 중회귀방법을 사용하여 입력 자료에 대해 추정치가 상당히 민감하기 때문에 이상적인 값을 추정하기에는 어려움이 따른다. ASPIC 모델은 파라미터 추정 시 초기 값을 설정한다. 이 경우 사용되는 입력자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 파라미터를 추정하기 때문에 마찬가지로 사용하는 어업자료에 민감하다(Kwon et al., 2013). 예로, 내적증가율 (r)은 0.5와 1.0 사이의 값이 이상적인 값으로 알려져 있으나, 두 모델에서 각각 0.5 미만으로 추정되었다.

반면에 최대엔트로피 모델은 비평형 상태를 고려하며, 관측된 자료에 오차가 있는 상태에서 최소한의 사전 정보를 이용하여 자원평가에 필요한 파라미터들을 추정할 수 있는 방법이다(Pyo, 2006). 최대엔트로피 모델은 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률론적으로 계산되기 때문에 추정되는 파라미터들이 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않아 신뢰성이 높다. 또한 입력자료에 대한 모델의 신뢰도 수준을 나타내는 모델 적합도(R^2 , RMSE, U)를 비교해 봤을 때, 가장 높은 모델 적합도를 보여준 최대엔트로피 모델이 서해 전체 어획대상 잠재생산량과 환경수용량을 추정하는 가장 이상적인 모델이라 판단된다.

최대엔트로피 모델에 의해 추정된 서해 전체 어획대상 잠재생산량은 24만톤, 환경수용량은 114만톤이다. 이 모델에 의한 연도별 자원량은 1967년부터 급격히 감소하였다(Fig. 6). 1984년부터 자원량이 적정 자원량 수준인 B_{PY} 이하로 감소한 뒤 그 수준을 회복하지 못하고 2013년에는 B_{PY} 의 절반 수준인 23만톤 수준까지 감소하였다. B_{PY} 를 목표 자원량으로 설정하여 관리방안을 수립하고 실시한다면, 현재 수준의 어획량을 목표 자원량에 따른 어획량 수준인 PY 만큼 어획 가능할 것이다. 2013년 자원량 23톤을 적절한 관리방안을 통하여 목표 자원량 46만톤만큼 자원을 회복시킨다면, 2013년 어획량 12만톤에서 약 2배 증가한 24만톤의 어획량을 기대할 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 통합생산량 분석법(HPM)의 적용함에 있어서의 문제점이 몇 가지 존재

하였는데, 첫째, 잉여생산량모델의 입력자료로 사용된 통계청 어획량 자료에는 IUU어업, 폐기량, 생계어업, 낚시, 갯벌체험 등에 의한 어획량 자료가 미포함 되어, 잠재생산량과 환경수용량이 과소추정되었다는 것이다. 둘째, 지역별 어획노력량 수집 기준이 1979년부터 어선소유자 기준에서 등록항 기준으로 변경되었기 때문에 자료 수집 기준을 연도별로 통일시키기 위하여 1979년 이전의 서울 총톤수가 1979년부터 경기도와 부산에 일정 비율로 포함되었다고 가정을 하여 1979년 이전 연도들에 대한 총톤수 재계산을 해 주었고, 서울, 부산, 경기도를 제외한 타지역의 경우에는 어업의 발달에 따른 각 지역별 총톤수 증가량만 있었다고 가정을 한 것에 대하여 오차가 발생하였다. 셋째, 총톤수의 어획노력량 표준화 시, 우리나라 어업에 대한 어획효율 추정 연구 사례가 없으므로 연도별 어업성능 향상에 대한 해외 연구의 추정치를 우리나라 어선 총톤수에 외삽함에 따라 어획노력량에 대한 신뢰성이 감소하였다는 것이다. 또한 연도별 어업성능 향상에 대한 해외 연구의 추정치인 저인망류, 선망, 연승 및 자망 기술계수의 평균값을 통발, 채낚기, 정치망, 기선권현망 등 서로 관련이 없는 어업들에 대해서 일괄 적용 하였으므로 이에 대한 오차가 발생하였다. 뿐만 아니라 1980년도 기술계수를 기준으로 1965년과 1995년도 기술계수를 선형 회귀분석을 하여 추정된 연도별 어업별 증가율을 2013년도까지 적용하였다. 어업별 연도별 증가율은 매년 동일한 증가율을 나타내지 않고 차이가 날 것이라는 점과 1995년까지 연구된 기술계수로 추정된 증가율을 1996년부터 2013년까지 18개년의 연도에 외삽한 것에 따른 신뢰성이 감소하였다.

본 연구에서 추정된 잠재생산량과 환경수용량 추정치의 신뢰성 향상을 위해서는 우리나라 어획량 수집방법 재구축 연구가 필요하고, 우리나라 어선 및 어구 발달에 따른 연도별 어업별 어획효율 추정 연구가 필요하다.

차후에 위의 연구들이 수행되어, 각 문제점이 보완된다면, 보다 신뢰도 높은 서해 전체 어획대상 잠재생산량 추정치를 도출할 수 있을 것이다. 또한, 이번 연구에서는 서해에 한정하였지만, 향후 보완된 기초자료를 바탕으로 동해와 남해의 어획대상 잠재생산량 추정 연구까지 실시한다면 어업관리에 앞서 선행되어야 하는 우리나라 연근해 전체 어획대상에 대한 신뢰도 높은 자원평가를 실시할 수 있을 것이다.

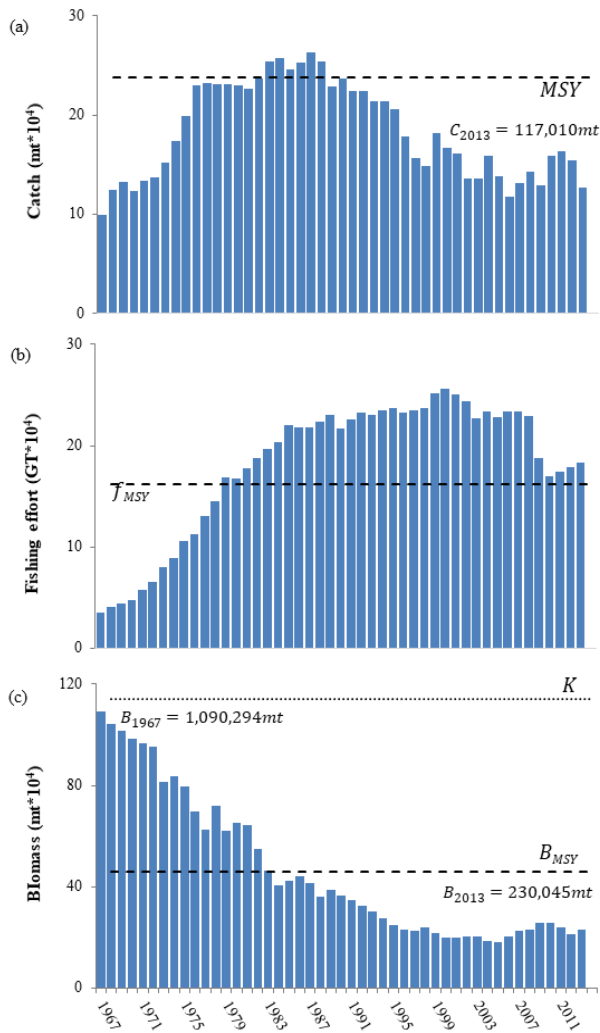


Fig. 6. Estimated annual catch (a), fishing effort (b) and biomass (c) for Korean west coast fisheries by maximum entropy model from 1967 to 2013.

사 사

이 논문은 2018년도 국립수산물과학원 수산과학연구소 사업 연구해어업 자원평가 및 관리연구(R2018024)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Chapman DG, Myhre RJ and Southward GM. 1962. Utilization of Pacific halibut stocks: estimation of maximum sustainable yield 1960. Rep Int Pacific Halibut Comm No. 31, 1-35.

Clark RP, Yoshimoto SS and Pooley SG. 1992. A bioeconomic analysis of the northwestern Hawaiian Islands lobster fishery. *Marine Resource Economics* 7, 115-140.

Cushing DH. 1981. *Fisheries biology: a study in population dynamics*. 2nded Univ Wisconsin Press Madison Wisconsin, 1-200.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2001. *World Capture Fisheries*. Rome, FAO, 1-26.

Fox WW Jr. 1974. An overview of production modeling. Working document submitted to the workshop on population dynamics of Tuna, sponsored by the International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, and held at Nantes, France, WTPD-Nantes/74/13, 143-156.

Fitzpatrick J. 1996. Technology and Fisheries Legislation. *FAO Fisheries Technical Paper*. No. 350 Part 2, 191-200.

Golan A, Judge G and Karp L. 1996a. A maximum entropy approach to estimation and inference in dynamic models or counting fish in the sea using maximum entropy. *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, 559-582.

Golan A, Judge G and Miller D. 1996b. A maximum entropy econometrics. John Wiley & Sons Ltd, 24-25.

Gulland JA. 1971. *The Fish Resources of the Ocean*. Fishing News (Books). West Byfleet, 1-255.

ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2008. Report of the 2007 ICCAT Bigeye tuna stock assessment session. Vol Sci Pap ICCAT 62, 1-143.

ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2009. Report of the 2009 Atlantic swordfish stock assessment session. SCRS/2009/016-SWO ATL Stock Assessment, 1-78.

IOTC (Indian Ocean Tuna Commission). 2009. Report of the Twelfth Session of the Scientific Committee.

Kim GC and Kwon OS. 2000. Estimating the biological growth function of Korean anchovy: A maximum entropy approach. *Environmental and Resource Economics Review* Vol. 9, 285-309.

KOSIS (Korean Statistical Information Service). 2015. Survey on fishery production of fisheries processing industry, Fishery production survey. <http://kosis.kr> (accessed September 25, 2015).

Kwon YJ, Zhang CI, Pyo HD and Seo YI. 2013. Comparison of models for estimation surplus productions and

- methods for estimating their parameters. *J Korean Soc Fish Technol* 49(1), 18-28.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 2015. A study on the estimation of carrying capacity and potential yield for Korean fisheries. NFRDI, 1-96.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2017. Guideline for decrease project of offshore fishing boats of the 2017. Ministry of Oceans and Fisheries, 1-87.
- Pella JJ and Tomlinson PK. 1969. A generalized stock production model. *Inter Am Trop Tuna Comm Bull* 13, 419-496.
- Prager MH. 1992a. ASPIC: A surplus-production model incorporating covariates. *ICCAT Collected Volume of Scientific Papers* 28, 218-229.
- Prager MH. 1992b. Recent Developments in Extending the ASPIC Production Model. *ICCAT Working Document SCRS/92/127*, 1-10.
- Prager MH. 2005. User's Manual for ASPIC: A Stock-Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program. National Marine Fisheries Service Beaufort Laboratory Document BL-2004-01, 1-27.
- Prager MH. 2011. User's Manual for ASPIC: A Stock-Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program, 1-26.
- Pyo HD. 2006. A comparative analysis of surplus production models and a maximum entropy model for estimating the anchovy's stock in Korea. *J Fish Mar Sci Edu* 18, 19-30.
- Ricker WE. 1946. Production and utilization of fish population. *Ecol Monogr* 16, 379-391.
- Schaefer MB. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. *Inter Am Trop Tuna Comm Bull* 1, 25-56.
- Schaefer MB. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter Am Trop Tuna Comm Bull* 2, 245-285.
- Zhang CI. 1989. An analysis of MSY as a fisheries management objective. *Ocean Research* 11(2), 59-67.
- Zhang CI. 1991. *Fisheries Resource Ecology*. Usung Publ Co Seoul Korea, 1-399.
- Zhang CI, Yoo SJ and Sohn MH. 1993. Changes in fisheries resources and future research need for the Yellow Sea ecosystem Living marine resources of the Yellow Sea ecosystem. *Bull Mar Res Ins Vol* 17, 69-83.
- Zhang CI. 2010. *Marine Fisheries Resource Ecology*. Sejong Publ Co Busan Korea, 1-561.
-
2017. 01. 25 Received
 2018. 01. 09 Revised
 2018. 01. 10 Accepted

부 록

Table A1. Annual catch, observed fishing effort, estimated gross tonnage of aquaculture and inland fishery (AIGT) and standardized GT using Catching efficiency (CE) for Korean west coast fisheries from 1967 to 2013

Year	Catch (mt)	Observed fishing effort (GT)	Estimated AIGT	Standardized GT using CE
1967	124,571	40,940	1,517	28,384
1968	132,735	43,064	1,428	31,006
1969	123,761	45,125	1,948	33,311
1970	133,947	52,770	2,491	40,078
1971	137,302	58,664	3,136	46,008
1972	151,543	67,053	2,892	55,480
1973	173,940	71,230	2,356	62,043
1974	198,532	80,563	2,506	73,696
1975	229,902	86,950	6,440	78,693
1976	232,565	92,327	3,021	91,046
1977	231,472	98,496	3,109	101,236
1978	230,820	110,345	3,260	117,959
1979	229,570	107,593	4,244	117,149
1980	226,400	110,305	4,155	124,103
1981	236,981	112,347	3,587	131,065
1982	253,628	115,430	4,626	137,645
1983	257,686	115,364	3,659	197,973
1984	245,347	120,811	3,243	215,071
1985	252,582	115,939	2,830	212,689
1986	263,568	114,530	4,422	212,354
1987	254,085	115,713	5,695	217,836
1988	228,596	116,994	6,764	225,063
1989	236,939	109,430	8,220	212,233
1990	224,207	109,834	7,112	220,355
1991	224,623	111,224	7,983	226,960
1992	213,444	107,330	5,682	225,104
1993	213,719	104,621	3,265	229,546
1994	205,543	102,962	2,967	232,431
1995	178,086	98,577	2,400	228,219
1996	156,784	97,115	2,049	230,240
1997	148,601	95,653	1,674	232,553
1998	182,141	100,627	2,597	246,457
1999	166,720	100,009	2,755	250,913
2000	161,439	96,481	3,427	245,488
2001	135,560	94,922	3,926	239,001
2002	135,781	87,540	3,902	222,976
2003	158,484	85,352	4,122	229,492
2004	137,938	81,660	3,581	224,689
2005	117,239	82,259	3,655	229,415
2006	130,871	80,189	3,267	229,347
2007	142,492	78,119	2,981	225,632
2008	129,565	64,960	3,628	184,696
2009	158,601	59,030	3,818	167,285
2010	163,582	59,204	3,366	172,153
2011	154,230	58,773	2,678	176,020
2012	127,231	59,175	2,678	180,145
2013	117,010	59,291	3,226	181,720

Table A2. Catching efficiency (CE) for Korean west coast fisheries from 1967 to 2013

Year	Catching efficiency (CE)				
	Trawls, Stow net	Purse seiner	Gillnetter	Long liner	Others
1967	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1968	1.050	1.047	1.037	1.080	1.053
1969	1.100	1.093	1.073	1.160	1.106
1970	1.150	1.140	1.110	1.240	1.159
1971	1.200	1.187	1.147	1.320	1.212
1972	1.250	1.234	1.184	1.400	1.265
1973	1.300	1.280	1.220	1.480	1.318
1974	1.350	1.327	1.257	1.560	1.371
1975	1.400	1.374	1.294	1.640	1.424
1976	1.450	1.420	1.330	1.720	1.477
1977	1.500	1.467	1.367	1.800	1.530
1978	1.550	1.514	1.404	1.880	1.583
1979	1.600	1.560	1.440	1.960	1.636
1980	1.650	1.607	1.477	2.040	1.689
1981	1.700	1.654	1.514	2.120	1.742
1982	1.750	1.701	1.551	2.200	1.795
1983	1.800	1.747	1.587	2.280	1.848
1984	1.850	1.794	1.624	2.360	1.901
1985	1.900	1.841	1.661	2.440	1.954
1986	1.950	1.887	1.697	2.520	2.007
1987	2.000	1.934	1.734	2.600	2.060
1988	2.050	1.981	1.771	2.680	2.113
1989	2.100	2.027	1.807	2.760	2.166
1990	2.150	2.074	1.844	2.840	2.219
1991	2.200	2.121	1.881	2.920	2.272
1992	2.250	2.168	1.918	3.000	2.325
1993	2.300	2.214	1.954	3.080	2.378
1994	2.350	2.261	1.991	3.160	2.431
1995	2.400	2.308	2.028	3.240	2.484
1996	2.450	2.354	2.064	3.320	2.537
1997	2.500	2.401	2.101	3.400	2.590
1998	2.550	2.448	2.138	3.480	2.643
1999	2.600	2.494	2.174	3.560	2.696
2000	2.650	2.541	2.211	3.640	2.749
2001	2.700	2.588	2.248	3.720	2.802
2002	2.750	2.635	2.285	3.800	2.855
2003	2.800	2.681	2.321	3.880	2.908
2004	2.850	2.728	2.358	3.960	2.961
2005	2.900	2.775	2.395	4.040	3.014
2006	2.950	2.821	2.431	4.120	3.067
2007	3.000	2.868	2.468	4.200	3.120
2008	3.050	2.915	2.505	4.280	3.173
2009	3.100	2.961	2.541	4.360	3.226
2010	3.150	3.008	2.578	4.440	3.279
2011	3.200	3.055	2.615	4.520	3.332
2012	3.250	3.102	2.652	4.600	3.385
2013	3.300	3.148	2.688	4.680	3.438

Fox 모델

Fox 모델은 자원의 생체량의 변화율을 Gompertz 성장식으로 나타냄으로써, 다음의 미분방정식을 기초로 하고 있다.

$$\frac{dB}{dt} = rB(\ln B_\infty - \ln B) - qfB \quad (A1)$$

여기서, B는 자원량, r은 내적증가율, B_∞는 환경수용량(ECC), q는 어획능률, f는 어획노력량이다. 위의 미분방정식(A1)에서 어획에 의한 감소가 자원의 자연 증가와 같게 될 경우(즉, 자원량이 변하지 않는 경우: dB/dt=0), 이를 평형상태라 부르게 되고, 이때의 연간어획량은 연간 평형생산량(Y*)이라 부르고, 다음과 같이 나타낸다.

$$Y^* = rB^*[\ln B_\infty - \ln B^*] \quad (A2)$$

위의 식 (A2)를 B*에 대하여 미분함으로써 생체량이 최대생체량의 1/3 정도의 수준에 있을 때, 잠재생산량(PY)이 초래된다. Y* = qfB*에서 B* = Y*/qf = U*/q (여기서, U*는 평형 CPUE)를 위의 식 (A2)에 대입함으로써 어획노력량과 단위노력당어획량의 관계식을 다음과 같이 만들 수 있다

$$U^* = U_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) \quad (A3)$$

or

$$Y^* = U_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) f \quad (A4)$$

매개변수인 U_∞와 q/r은 위의 식 (A4)에 자연로그를 취하여 선형화시켜서 추정 가능하다. 위의 식 (A4)를 f에 대하여 미분해서 최대치를 구하기 위해 0으로 놓으면,

$$\frac{dY^*}{df} = -\frac{q}{r} U_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) f + U_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) = 0 \quad (A5)$$

그러므로, 잠재생산량 시의 어획노력량인 f_{PY} = r/q이 되고, 잠재생산량을 구하기 위해 f_{PY}를 식 (A1)에 대입하면, Y* = U_∞r/eq이 되는데, 이때의 Y*가 잠재생산량이다.

CYP 모델

근사치 추정을 통해 중회귀분석으로 잉여생산량모델의 파라미터들을 추정하는 CYP 모델은 Fox 모델에서 사용하는 Gompertz 성장 모델을 기초로 하고 있다. U = qB이므로, Fox 모델 유도 과정에서의 식 (A1)을 다시 쓰면 식 (A6)과 같다.

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = r \ln(qB_\infty) - r \ln(U) - qf \quad (A6)$$

위의 식 (A6)을 적분하면,

$$\int_{U(t)}^{U(t+1)} \frac{dU}{U} = r \ln(qkB_\infty) \int_t^{t+1} dt - r \int_t^{t+1} \ln(U) dt - q \int_t^{t+1} f dt$$

이를 정리하면 식 (A7)과 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1}}{U_t}\right) = r \ln(qB_\infty) - r \int_t^{t+1} \ln(U) dt - q \bar{f}_t \quad (A7)$$

여기서, U_t는 t년 초의 순간적인 CPUE이고 f_n은 n년의 총 어획노력량이다. 식 (A7)의 ln(U)을 테일러 다항식의 방법을 사용하여 1차항까지 나타내면,

$$\begin{aligned} \ln(U) &= \sum_{B_\infty=0}^n \frac{f^{(B_\infty)}(\bar{U}_n)}{K!} (U - \bar{U}_n)^{B_\infty} \\ &\approx \ln(\bar{U}_n) + \left(\frac{1}{\bar{U}_n}\right) (U - \bar{U}_n) \\ &= \ln(\bar{U}_n) - 1 + (U/\bar{U}_n) \end{aligned}$$

이를 적분하면 식 (A8)과 같다.

$$\int_f^{f+1} \ln(U) dt = \ln(\bar{U}_t) - 1 + \left(\frac{1}{\bar{U}_t}\right) \int_t^{t+1} U dt \quad (A8)$$

식 (A8)은 $\bar{U}_t = \int_t^{t+1} U dt$ 의 정의에 따라서 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_t^{t+1} \ln(U) dt = \ln(\bar{U}_t) - 1 + 1 = \ln(\bar{U}_t)$$

따라서 식 (A7)에 위의 결과에 따라 변형시키면 아래의 식 (A9)와 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1}}{U_t}\right) = r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U}_t) - q\overline{f}_t \quad (A9)$$

식 (A9)는 중회귀식으로 연도별 \overline{U}_t 와 \overline{f}_t 자료를 사용하여, 세 개의 매개변수인 내적증가율(r), 환경수용량 (B_∞ =ECC), 어획능력(q)을 추정할 수 있다. 그런데 식 (A9)는 \overline{f}_{t+1} 을 모르지만 \overline{U}_{t+1} 을 예측할 수 있다는 가정을 내포하고 있는데 실제로 다음 해의 예상되는 노력량을 모르고서 다음 해의 CPUE를 예측 가능하다는 가정은 모순된다고 볼 수 있다. 좀 더 현실적인 식을 얻기 위해 t 년에 대한 식 (A9)에 $t+1$ 년에 대한 식인 $\ln\left(\frac{U_{t+2}}{U_{t+1}}\right) = r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U}_{t+1}) - q\overline{f}_{t+1}$ 을 더해서 2로 나누면 식 (A10)과 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1} \cdot U_{t+2}}{U_{t+1} \cdot U_t}\right) = 2r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U}_t \cdot \overline{U}_{t+1}) - q(\overline{f}_t + \overline{f}_{t+1}) \quad (A10)$$

여기서, $\overline{U}_t = \sqrt{U_t \cdot U_{t+1}}$, 즉 평균 CPUE는 그 해 초와 말의 순간 CPUE의 기하평균치와 같다고 보고 식 (A6)을 다시 쓰면 \overline{U}_{t+1} 뿐만 아니라 \overline{f}_{t+1} 를 예측할 수 있는 식이 도출된다.

$$2\ln(\overline{U}_{t+1}) - 2\ln(\overline{U}_t) = 2r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U}_t) - r\ln(\overline{U}_{t+1}) - q(\overline{f}_t + \overline{f}_{t+1})$$

위의 식의 좌변을 $\ln(\overline{U}_{t+1})$ 로 정리하면 다음 식 (A11)과 같다.

$$\ln(\overline{U}_{t+1}) = \frac{2r}{(2+r)}\ln(qB_\infty) + \frac{(2-r)}{2+r}\ln(\overline{U}_t) - \frac{q}{(2+r)}(\overline{f}_t + \overline{f}_{t+1}) \quad (A11)$$

식 (A11)은 세 개의 매개변수인 내적증가율(r), 환경수용량(B_∞ =ECC), 어획능력(q)을 추정하는 중회귀식이다. 평형생산량은 Gompertz 성장 방정식 (A1)에서 $\frac{dB}{dt} = 0$ 인 경우가 되므로, $\frac{dB}{dt} = 0 = rB(\ln B_\infty - \ln B) - qfB$ 에서

$$B^* = B_\infty \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (A12)$$

여기서 $U^* = qB^*$ 이므로 식 (A12)는 식 (A13)과 같다.

$$U^* = qB_\infty \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (A13)$$

또한 $C^* = qfB^*$ 에 따라서

$$C^* = qfB_\infty \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (A14)$$

식 (A14)를 f 에 대하여 미분한 후, 0으로 놓으면, $\frac{dC^*}{df} = -\frac{q^2}{r}fB_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) + qB_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) = 0$, 그러므로, 잠재생산량 시의 어획노력량은 $f_{PY} = r/q$ 이고, 잠재생산량을 구하기 위해 f_{PY} 를 식 (A14)에 대입하면, $PY = B_\infty r/e$ 가 된다. 또한 잠재생산량 시의 자원량 (B_{PY})은 f_{PY} 를 식 (A12)에 대입하면, $B_{PY} = B_\infty/e$ 가 된다.

ASPIC 모델

로지스틱 성장 모델을 기초로 하는 식은 식 (A15)와 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = (r - F_t)B_t - \frac{r}{K}B_t^2 \quad (A15)$$

여기서, B_t 는 시간 t 에서의 자원량, r 은 내적증가율, K 는 환경수용량 (ECC)이다. 식 (A15)에서 $\alpha_t = r - F_t$, $\beta = r/K$ 로 두면 식 (A16)과 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = \alpha_t B_t - \beta B_t^2 \quad (A16)$$

식 (A16)은 시간에 대한 자원량의 식이며, 여기서 f_t 가 일정하다고 가정하고, 초기시간을 $t = \tau$, 마지막 시간을 $t = \tau + 1$ 로 두면 아래 식 (A17)과 같다.

$$\hat{B}_{t+1} = \frac{\alpha_t \beta_t e^{\alpha_t}}{\alpha_t + \beta_t (e^{\alpha_t} - 1)} \quad (A17)$$

같은 시간의 생산량에 대한 식은 식 (A18)와 같다.

$$\hat{Y}_\tau = \int_{t=1}^{\tau+1} F_\tau \hat{B}_t dt \quad (A18)$$

식 (A18)을 적분하면 식(A19)으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{Y}_\tau = \frac{F_\tau}{\beta} \ln \left[1 - \frac{\beta \hat{B}_\tau (1 - e^{\alpha_\tau})}{\alpha_\tau} \right] \quad (A19)$$

잠재생산량을 추정하기 위해서 사용된 초기값으로는 환경수용량에 대한 분석 시작 시점시의 자원량의 비 (B_1/ECC), 잠재생산량(PY), 환경수용량(ECC), 어획능률(q)이다. 자원량의 비(B_1/ECC)는 0.5로 설정하였다(Prager, 2013). 잠재생산량의 초기값은 1967~2013년 사이에서 가장 큰 서해 전체 어획량인 263,568 mt로 가정하였다. 환경수용량의 초기값은 Gulland(1971) 가정을 이용하였다. Gulland는 초기자원량($B_\infty = ECC$)과 순간자연사망계수(M)를 사용하여 PY를 추정하는 방법을 아래와 같이 제시하였다.

$$MSY = 0.5MB_\infty \quad (A20)$$

여기서, 순간자연사망계수(M)는 우리나라 어획대상의 평균 자연사망계수를 15세로 가정하여 0.31/year이다 (Alagaraja, 1984). 따라서 환경수용량의 초기값은 잠재생산량의 6.45배인 1,647,300 mt으로 설정하였다. 잠재생산량과 환경수용량의 최대범위는 설정된 초기값의 1.5배로 설정하였다. 환경수용량의 최소범위는 ASPIC 매뉴얼(Prager, 2013)에 의해 가장 큰 어획량의 2배로 설정하였으며, 잠재생산량의 최소범위는 Gulland(1971) 가정에 따라 환경수용량 최소범위의 0.16배로 설정하였다. q는 최고 CPUE의 5배와 최고 어획량의 5배 값을

나눈 값으로 설정하였다(Prager, 2013).

최대엔트로피 모델

최대엔트로피 모델의 생산량과 자원량 식은 식 (A21)과 식 (A22)와 같다.

$$C_t = qE_t B_t \exp(\varepsilon_t) \quad (A21)$$

$$B_{t+1} = \left[B_t + \gamma B_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right) - C_t \right] \exp(\mu_t) \quad (A22)$$

여기서, C_t 는 t년의 총 어획량, q는 어획능률, E_t 는 t년의 어획노력량, B_t 는 t년의 자원량, r은 내적증가율, K는 환경수용량(ECC), ε_t 는 관측오차(observation error), μ_t 는 과정오차 (process error)이다.

파라미터의 확률변수화를 위해서 식 (A21)과 식 (A22)의 모수 q, r, K, B_t , ε_t , μ_t 의 추정 식은 식 (A23)~식 (A28)과 같다.

$$q = p_1^q \cdot 0 + p_2^q \cdot s/2 + p_3^q \cdot s \quad (A23)$$

$$r = p_1^r \cdot 0 + p_2^r \cdot m/2 + p_3^r \cdot m \quad (A24)$$

$$K = p_1^K \cdot 0 + p_2^K \cdot m/2 + p_3^K \cdot h \quad (A25)$$

$$B_t = p_1^B \cdot 0 + p_2^B \cdot h/4 + p_3^B \cdot h/2 \quad (A26)$$

$$\varepsilon_t = p_1^\varepsilon \cdot (-e) + P_2^\varepsilon \cdot 0 + P_3^\varepsilon \cdot (+e) \quad (A27)$$

$$\mu_t = p_1^\mu \cdot (-e) + P_2^\mu \cdot 0 + P_3^\mu \cdot (+e) \quad (A28)$$

여기서, q, r, K의 범위는 각각 (0, s), (0, m), (0, h)이며, n, m, h에 대하여 각각 1, 1, 1,647,300을 입력하였다. 오차항 범위인 e에 대해서는 0.2를 사용하였다.

확률의 조건을 만족하는 다음 식 (A29)를 각각 GAMS(General Algebraic Modeling System)를 이용하여 파라미터를 추정하였다.

$$Max \left(- \sum_{j=1}^3 p_j^q \ln p_j^q - \sum_t \sum_{j=1}^3 p_{tj}^l \ln p_{tj}^l \right) \quad (A29)$$

여기서, $\mathbf{g}=(\mathbf{q}, \mathbf{r}, \mathbf{k})$, $\mathbf{l}=(B_t, \varepsilon_t, \eta_t)$, $\mathbf{t}=(1, 2, 3, \dots, n-1)$ 이며, 제약조건은 $\sum_{j=1}^3 p_j^q = 1$, $\sum_{j=1}^3 p_{tj}^l = 1$ 이다.

네 가지 잉여생산량모델의 추정식을 Table A3에 요약

하여 나타냈다.

Table A3. Each estimation equation for Fox model, CYP model, ASPIC model and Maximum entropy model

Model	Estimation equation
Fox model	$U^* = U_\infty \exp\left(-\frac{qf}{r}\right)$
CYP model	$\ln(\overline{U}_{t+1}) = \frac{2r}{(2+r)} \ln(qB_\infty) + \frac{(2-r)}{2+r} \ln(\overline{U}_t) - \frac{q}{(2+r)} (\overline{f}_t + \overline{f}_{t+1})$
ASPIC model	$\hat{Y}_\tau = \frac{F_\tau}{\beta} \ln \left[1 - \frac{\beta \hat{B}_\tau (1 - e^{-\alpha_\tau})}{\alpha_\tau} \right]$
Maximum entropy model	$C_t = qE_t B_t \exp(\varepsilon_t);$ $B_{t+1} = \left[B_t + \gamma B_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right) - C_t \right] \exp(\mu_t)$