

한국 동해 생태계의 잠재생산량 추정방법에 관한 비교 연구

임정현 · 서영일^{1*} · 장창익

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹국립수산과학원 연근해자원과

A comparative study on the estimation methods for the potential yield in the Korean waters of the East Sea

Jung-Hyun LIM, Young-Il SEO^{1*} and Chang-Ik ZHANG

Department of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

¹Fisheries Resources Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

Due to the decrease in coastal productivity and deterioration in the quality of ecosystem which result from the excessive overfishing of fisheries resources and the environmental pollution, fisheries resources in the Korean waters hit the dangerous level in respect of quantity and quality. In order to manage sustainable and effective fisheries resources, it is necessary to suggest the potential yield (PY) for clarifying available fisheries resources in the Korean waters. So far, however, there have been few studies on the estimation methods for PY in Korea. In addition, there have been no studies on the comparative analysis of the estimation methods and the substantial estimation methods for PY targeted for large marine ecosystem (LME). For the reasonable management of fisheries resources, it is necessary to conduct a comprehensive study on the estimation methods for the PY which combines population dynamics and ecosystem dynamics. To reflect the research need, this study conducts a comparative analysis of estimation methods for the PY in the Korean waters of the East Sea to understand the advantages and disadvantages of each method, and suggests the estimation method which considered both population dynamics and ecosystem dynamics to supplement shortcomings of each method. In this study, the maximum entropy (ME) model of the holistic production method (HPM) is considered to be the most reasonable estimation method due to the high reliability of the estimated parameters. The results of this study are expected to be used as significant basic data to provide indicators and reference points for sustainable and reasonable management of fisheries resources.

Keywords : Potential yield, Ecosystem modeling method, Holistic production method, Population production method, Fishery production method

서론

세계의 어업자원은 과도한 이용으로 인해 최근 40년 사이에 상위 어획대상종(전체 어획량의 약 30%)들은 대

부분은 완전히 개발되고 이용되어 점차 악화되고 있다 (Zhang, 2014). 우리나라의 동해 생태계도 어로기술의 발달, 선박의 대형화 등에 따른 수산자원의 과도한 남획

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

과 환경오염 등으로 인한 연안어업의 어획량 감소와 어장생태계의 질적 저하로 인해 생산성이 점차 감소하고 있다. 한국 연근해의 연간 어획량 추세는 1980년대 중반 이후부터 점차 감소하기 시작하여 동해의 경우 최근 5개년 (2012-2016년) 평균 어획량은 약 18만톤 수준에 이른다.

해양에서 잠재생산량(Potential yield, PY)은 대상생태계에서 일차 생산력과 먹이망 구조를 이용하여 상위단계 생물량의 한계치를 계산하여 추정되는 해양의 전체 생산력을 의미한다(Ryther, 1969; Kim and Kang, 1999). 또한 하나의 단위수역에 서식하는 생물들 중 현재 자원으로 이용되고 있거나 앞으로 이용가능한 수산자원의 생물학적 허용 한계치로 정의된다(Shin, 2009). 본 연구에서는 하나의 자원으로부터 지속적으로 취할 수 있는 최대 어획량을 잠재생산량으로 정의하였다. 효과적인 수산자원 관리를 위해서는 우리나라 해역의 어획대상 어종에 대한 환경수용량(Exploitable carrying capacity, ECC), 잠재생산량 등을 알아야 하지만 아직까지 정확히 모르고 있으며 잠재생산량 추정에 관한 국내 연구도 거의 없는 실정이다. 따라서 수산자원의 효과적인 관리계획 수립 및 이용을 위해서 현재 우리나라 해역의 잠재생산량 추정이 매우 중요하다.

지금까지 연구 개발된 잠재생산량 추정방법은 크게 생태계 역학 분석법과 생산량 기반 분석법으로 나눌 수 있다. 생태계 역학 분석법에는 첫째, 기초생산과 먹이사슬의 상호작용을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 Ryther (1969)의 연구에 의하면 잠재생산량의 절대 추정이 가능하고 환경이나 생태계 변화 등에 적용이 가능하다. 하지만 먹이사슬을 이용하는 방식은 에너지 전달 효율과 먹이사슬의 선택에 따라 추정치가 크게 달라질 수 있고, 복잡한 먹이망을 일정한 길이의 사슬로 나타내거나 모든 단계에서 동일한 값으로 사용한다는 등의 가정을 하여 추정치의 불확실성이 존재한다(Alverson et al., 1970). 특히, 에너지 전달 효율 추정치는 공간적, 생태학적 변동이 있을 수 있고(Libralato et al., 2008), 그 값이 변할 수 있다는 문제점이 있다(Coll et al., 2009a, b).

첫째, 질량균형모델(mass-balanced model)을 기반으로 구성생물들의 시간에 따른 변동을 분석하여 잠재생산량을 추정하는 생태계 역학 모델을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 생태계 내 주요 구성요소들과 그들의 생태학적 상호작용을 규명할 수 있으며, 최근 Lee

(2014)가 Ecopath with Ecosim model (Christensen and Waters, 2004)을 이용하여 한국 서해 생태계의 잠재생산량을 추정하였다.

생산량 기반 분석법에는 첫째, 어업생산량을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 어획량 추세로부터 외삽하거나 단위면적당 어획생산량 추정치를 해당 해역에 외삽하여 잠재생산량을 추정하지만, 이용되지 않고 있는 자원이나 알려져 있지 않은 자원들의 잠재생산량은 추정할 수 없다(Gulland, 1971). 따라서 Kim (2016)은 개체군 역학 모델을 이용하여 종 수준, 어업 수준, 전체적인 통합 수준에서의 생산량 분석법을 적용하여 한국 서해의 잠재생산량을 추정하였다.

둘째, 생활사 특성치를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 잠재생산량 추정에 필요한 자료가 적은 생태계나 어업에서도 이용가능하나, 추정과정에서 많은 가정을 사용하여 추정치의 부정확성이 증가한다는 문제점이 있다(Beddington and Kirkwood, 2005).

셋째, 어업생산량과 생활사 특성치를 모두 이용하는 방법이 있다. 연안어장에서 잠재생산량 추정을 위해 이용가능한 자료가 적을 때, 어업생산량 자료와 생활사 특성치 자료를 모두 활용하여 자료가 가장 많은 1단계부터 어종별 어획량 자료만을 사용하는 5단계까지 정보수준을 구분하여 잠재어획가능량을 추정할 수 있다(Shin, 2009). 기존의 국내 연구들은 직접자원조사 자료(2단계 정보수준)를 이용한 섬진강 수계의 담수산 어류 꺾지의 잠재생산량 추정 연구(Jang et al., 2011), 어획량, 생태학적 특성치, 체장조성자료(1단계)와 직접자원조사 자료(2단계)를 이용하여 섬진강에 분포하는 일본재첩의 잠재어획가능량 추정 연구(Lee et al., 2012) 등이 수행된 바 있다. 이러한 추정방법은 잠재생산량 추정을 위해 이용가능한 정보 및 자료가 적은 어장에도 적용이 가능하지만, 정보수준이 낮은 단계의 자료를 사용하여 잠재생산량을 추정할 경우 추정치의 부정확성이 증가할 가능성이 있다.

위에서 설명된 바와 같이 기존의 연구에서 생태계 차원에서 먹이사슬을 이용하거나 개체군 차원에서 어업생산량 및 생활사 특성치 등을 이용하여 잠재생산량을 추정하는 방법들은 여러가지 문제점이 있어서 최근에는 생태계 내 어종군간의 먹이관계를 고려한 생태계 모델링(Ecopath with Ecosim model, EwE model)을 사용하

거나 개체군 생산량 모델들(잉어생산량모델, ASPIC 모델, ME 모델)을 사용하여 잠재생산량을 추정하는 방법들이 주로 이용되고 있다. 하지만 지금까지는 여러가지 추정방법론간의 장단점을 비교 분석하거나 광역생태계를 대상으로 하는 실질적인 잠재생산량 추정방법에 관한 연구는 거의 없었다. 따라서, 수산자원의 합리적 관리를 위해서는 개체군 역학과 생태계 분석을 결합한 광범위하고 종합적인 차원에서의 잠재생산량 추정방법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 잠재생산량을 추정하는 방법들간의 비교 분석을 통해 각 방법의 장·단점을 파악하고, 개체군 역학과 생태계 역학을 고려하여 잠재생산량을 추정하고자 한다. 이에 따라 보다 과학적이고 체계적인 자원관리를 위한 한국 동해 생태계에 가장 적합한 잠재생산량 추정방법을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 한국 동해 생태계의 PY 추정을 위해 통합생산량 분석법, 개체군생산량 분석법, 어업생산량 분석법으로 세 가지 방법의 생산량 기반 분석법(Production-based analysis)과 생태계 모델링 방법을 사용한 생태계 역학 분석법(Ecosystem dynamics analysis)을 사용하였다. 대상생태계는 수산자원의 이용 및 관리의 주체를 고려하여 행정구역상 강원도와 경상북도를 기준으로 한일 중간수역까지 포함하여 동해 생태계로 설정하였고, 내수면어업을 제외한 연근해어업을 대상어업으로 설정하였다.

통합생산량 분석법(Holistic Production Method, HPM)

잉어생산량모델을 적용하여 PY를 추정하기 위해 수산 통계연보와 국가통계포털(KOSIS)에서 수집된 1966~2016년 동해 연근해어업의 시도별 연도별 어획량(Metric ton, MT) 및 어획노력량(Gross tonnage, GT) 자료를 사용하였다. 수집된 시도별 어획노력량 자료에는 양식어업과 내수면어업의 어획노력량이 포함되어 있지만 양식어업의 경우에는 대부분이 전용어선이 아닌 어선어업용 어선을 병행하여 조업에 사용하고 있기 때문에 내수면어업의 어획노력량만 동해 전체의 어획노력량에서 제외시켜 주었다. 동해 내수면어업의 연도별 어획노력량은 내수면어업의 연도별 시도별 어획노력량 자료를 수집할

수 없었기 때문에 우리나라 연근해 전체의 내수면어업 톤수에 우리나라 연근해 전체의 내수면어업 어획량에 대한 동해 내수면어업 어획량 비율을 곱하여 추정하였다. 또한 수집된 동해의 총톤수 자료는 어로장비 및 엔진 성능 발달에 의해 향상된 어획효율이 반영되지 않았으므로, NIFS (2016)와 Seo et al. (2017)의 연구에서 추정된 우리나라 어업별 어획성능지수가 한국 연근해어업의 연도별 어획효율 향상을 반영한다고 가정하여 동해의 총톤수 자료를 표준화시켰다. 본 연구에서는 저인망류(Trawls), 선망(Purse seiner), 연승(Long liner), 자망(Gillnetter), 통발(Pot)을 선별하여 각 어획성능지수의 연 증가율을 구하였다. 이외의 어업에 대한 어획성능지수는 저인망류, 선망, 연승, 자망 및 통발의 어획성능지수를 어업별 어획량으로 가중평균한 값으로 가정하였다.

HPM에서는 PY를 추정하기 위해 전통적인 평형 잉어생산량모델인 Fox 모델, Schaefer 모델을 기본으로 하는 비평형 잉어생산량모델인 ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariate)모델과 최대엔트로피(Maximum entropy, ME)모델을 사용하였으며(Table 1), 각 모델별 추정방법과 모델 초기값 설정은 Lim (2018)을 참조하였다.

각 모델들에 의한 추정치와 실제 자료의 정확도와 적합도를 평가하기 위해 결정계수(R^2), 오차의 제곱 평균 제곱근(Root mean square error, RMSE), Theil의 U 통계량(U)(1966)을 계산하였다. 또한 HPM에 의한 동해의 PY 추정치와 실제 자료의 정밀도를 평가하고 신뢰도를 검증하기 위해 모델별로 추정치의 95% 신뢰구간(confidence interval)을 추정하였다(Appendix 1).

Table 1. Applied surplus production models in the Korean waters of the East Sea

Model	Estimation formula
Fox model (Fox, 1974)	$U^* = U_{\infty} \exp(-\frac{qf}{r})$
ASPIC model (Prager, 1992a, 1992b)	$\hat{Y}_t = \frac{F_t}{\beta} \ln[1 - \frac{\beta \hat{B}_t (1 - e^{\alpha_t})}{\alpha_t}]$
Maximum entropy model (Golan et al., 1996)	$c_t = qE_t B_t \exp(\epsilon_t)$ $B_{t+1} = [B_t + rB_t(1 - \frac{B_t}{K}) - C_t] \exp(\mu_t)$

개체군생산량 분석법(Population Production Method, PPM)

어종별 PY 추정을 위해 개체군생산량 분석법(Kim, 2016)을 사용하였다. 어종별 PY 추정을 위해 이용가능한 자료(어종별 어획량 및 어획노력량, 자원평가 문헌 추정치 등)의 유무에 근거하여 동해의 최근 5개년(2012~2016년) 어종별 어획 비율(KOSIS)이 높은 주요 12어종을 선정하였다(Table 2a).

PPM에 의한 최근연도의 어종별 PY 추정을 위해 동해 주요어종 중 어종별 어획량과 CPUE 자료가 사용가능한 총 11어종(문어 제외)에 대해서는 ME 모델로 한국 전체 해역에 대한 어종별 PY를 직접 추정하였다. 그리고 모든 어장에 어종의 밀도는 균일하게 분포한다는 가정하에 어획량 비율이 어장면적 비율과 같다고 가정하였다. 따라서 동해 연근해의 어종별 PY ($PY_{E,s}$)는 한국 전체 해역의 어종별 어획량에 대한 동해 어종별 어획량 비율을 이용하여 식 (1)과 같이 추정하였다.

$$PY_{E,s} = PY_{K,s} \cdot \left(\frac{C_{E,s}}{C_{K,s}} \right) \quad (1)$$

여기서, $PY_{K,s}$ 는 한국 전체 해역에 대한 어종별 PY, $C_{E,s}$ 는 동해에 대한 어종별 어획량, $C_{K,s}$ 는 한국 전체 해역에 대한 어종별 어획량이다. 이용가능한 자료가 부족한 문어의 경우 최근 5개년(2012~2016년)에 대한 자원동향이 평형 및 증가를 나타내는 종이므로 한국 전체 해역에 대한 문어의 생물학적 허용어획량(ABC)을 PY ($PY_{K,s}$)로 가정하여 식 (1)과 같이 PY를 추정하였다. 따라서 동해 연근해 전체 PY는 아래의 식과 같이 추정하였다.

$$PY = \sum PY_{E,s} + \sum PY_{G,s} \quad (2)$$

여기서, 주요 12어종(86.6%) 이외의 어종(13.4%)에 대한 PY는 외삽의 방법을 통해 $PY_{G,s} = PY_{G,std} \cdot C_{G,s} / C_{G,std}$ 으로 $PY_{G,s}$ 는 그룹 G의 어종별 동해 PY, $PY_{G,std}$ 는 그룹 G의 기준 어종의 동해 PY이다. 여기서, 그룹 G는 가오리류(Skates), 포식성 표층어류(Predator pelagic), 소형 표층어류(Small pelagic), 넙치류(Flounder), 기타 저서어류(Other demersal), 두족류(Cephalopods), 표생

Table 2. Average catch ratio and available data in recent 5 years (2012-2016) in the Korean waters of the East Sea

(a) Major species

Rank	Major species	Average catch ratio in recent 5 years (%)	Catch and CPUE by species	References for stock assessment
				Allowable biological catch (ABC)
1	Common squid	39.2	NIFS (2016)	-
2	Red snow crab	21.7	NIFS (2016)	-
3	Pacific herring	10.2	NIFS (2016)	-
4	Sandfish	3.2	NIFS (2016)	-
5	Flounder	2.9	NIFS (2016)	-
6	Octopus	2.2	-	NIFS (2016)
7	Amberjack	1.6	NIFS (2016)	-
8	Chinese puffer	1.2	NIFS (2016)	-
9	Spanish mackerel	1.2	NIFS (2016)	-
10	Jack mackerel	1.2	NIFS (2016)	-
11	Snow crab	1.1	NIFS (2016)	-
12	Chub mackerel	1.0	NIFS (2016)	-
Total		86.6	-	-

*Data for catch ratio: KOSIS (2012~2016).

(b) Major fisheries

Rank	Major fisheries	Average catch ratio in recent 5 years (%)	Available year of catch and number of vessel
1	Eastern sea trawl	18.7	1998~2009
2	Offshore angling	16.2	1998~2009
3	Coastal gillnet	11.2	1998~2009
4	Small powered purse seine	4.9	2000~2009
5	Coastal pot	2.6	1998~2009
6	Offshore gillnet	1.2	1998~2009
Total		54.8	-

동물(Epifauna), 내생동물(Infauna)로 총 8개의 그룹으로 설정하였고, 그룹 G의 기준 어종은 동해 주요어종 중 자원평가 자료의 신뢰도를 고려하여 선별하였다.

어업생산량 분석법(Fishery Production Method, FPM)
어업별 PY 추정을 위해 어업생산량 분석법(Kim, 2016)을 사용하였다. 어획량 및 어획노력량 자료가 이용 가능한 어업을 기준으로 동해의 최근 5개년(2012~2016년) 어업별 어획 비율(KOSIS)이 높은 주요 6개 어업을 선정하였다(Table 2b).

동해 어업별 연도별 어획노력량의 총톤수는 아래의 식과 같이 추정하였다.

$$f_{t,v} = v_{t,v} \cdot GTPV_{t,v} \cdot \gamma_{t,v} \quad (3)$$

여기서, $f_{t,v}$ 는 동해 v어업에 대한 표준화된 총톤수, $v_{t,v}$ 는 동해 v어업에 대한 척수, $GTPV_{t,v}$ 는 v어업에 대한 척당 톤수($GT_{t,v}/V_{t,v}$), $\gamma_{t,v}$ 는 v어업에 대한 어획 효율, v는 주요 6개 어업, t는 1998~2009년이다. 수집된 어획량 및 어획노력량 자료를 사용하여 ME 모델로 동해의 어업별 PY를 추정하였다. 동해 주요 6개 어업의 잠재생산량(PY_P) 추정식은 아래와 같다.

$$PY_P = \sum PY_{P,v} \quad (4)$$

여기서, $PY_{P,v}$ 는 ME 모델로 추정된 주요 6개어업의 어업별 PY이다. 따라서, 동해 연근해 전체 PY는 아래의 식과 같이 추정하였다.

$$PY = PY_P + \sum PY_{G,F} \quad (5)$$

여기서, 주요어업(54.8%) 이외의 어업(45.2%)에 대한 PY는 외삽의 방법을 통해 $PY_{G,F} = PY_{G,std} \cdot C_{G,F}/C_{G,std}$ 으로 $PY_{G,F}$ 는 그룹 G의 어업별 동해 PY, $PY_{G,std}$ 는 그룹 G의 기준 어업의 동해 PY이다 여기서, 그룹 G는 끌어구류, 선망류, 연승류, 통발류, 기타로 총 5개의 그룹으로 설정하였고, 그룹 G의 기준 어업은 동해 주요어업 중 어구 특성을 고려하여 선별하였다.

생태계 모델링 방법(Ecosystem Modeling Method, EMM)

생태계 역학 분석법의 EMM에서는 동해 생태계에 서식하는 생물들을 8가지 생태학적 특성(유영능력, 골격, 체장, 체형, 서식수심, 서식처, 식성, 산란)에 따라 분류하기 위해 자가구성법(Self-organizing mapping, SOM)을 적용하였다. 동해 생태계 구조를 분석하기 위하여 생태계 역학 모델인 Ecopath 모델을 사용하였다(Christensen and Pauly, 1992). 생태계 모델링을 위해 필요한 입력자료인 생물군별 생체량(B), 생산량(P), 섭식량(Q), 피식-포식 관계(DC), 어획량(C)은 Lim (2018)의 방법을 참조하여 수집하였다. 대상생태계 내 구성생물들의 이입 및 이출량이 같고 평형상태라 가정하면, Ecopath에서의 질량균형 모델은 (i)의 생산량=(i)의 어획량+포식자에 의한 (i)의 소비량+(i)의 생체량+(i)의 기타 사망량으로 정의된다. 여기서, i는 특정 환경, 특정 시간의 시작과 끝까지 동일한 상태를 가지는 생태계 내의 특정그룹(단일 종 또는 두 종 이상으로 구성)이다. 이를 역학 모델의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$dB_i/dt = f(B) - F_i B_i - \sum_{j=0}^n C_{ij} (B_i, B_j) - M_0 B_i \quad (6)$$

분류군별 PY를 추정하기 위해 먼저 Ecosim 모델을 사용하여 ECC를 추정하였다(Christensen and Waters, 2004). 순간어획사망계수(F)가 0일 때, 분류군별 자원량을 시뮬레이션하여 일정한 값으로 수렴하는 값을 ECC로 계산하였다. 이에 따라 한국 동해 생태계의 PY는 아래의 Gulland (1971)의 가정을 사용하여 추정된 분류군별 ECC와 자원역학적 관계를 이용하여 추정하였다.

$$PY_i = 0.5 \cdot M_i \cdot ECC_i \quad (7)$$

여기서, 순간자연사망계수(M_i)는 분류군별 어획량이 높은 어종들의 M값을 가중평균하여 사용하였으며, i 는 생물군을 나타낸다.

결 과

통합생산량 분석법(Holistic Production Method, HPM)

어업별 어획성능지수에 따라 동력선의 연도별 어획

효율을 반영한 어획노력량을 추정하여 연도별 동력선 총 어획노력량을 구하였으며, 연도별 무동력선 총 어획노력량까지 고려하여 표준화된 연도별 총톤수를 추정하였다. 표준화된 동해의 연도별 총톤수는 표준화 전보다 최대 2.8배까지 높게 추정되었다(Fig. 1).

동해의 PY 추정을 위해 Fox 모델, ASPIC 모델, ME 모델을 적용한 결과는 Table 3과 같다. PY의 범위는 ASPIC 모델의 214,000 mt에서 ME 모델의 265,472 mt으로 추정되었고, 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량(B_{PY})과 잠재생산량 시 어획노력량(f_{PY})은 ME 모델에서 가장 높게 추정되었다. ASPIC 모델과 ME 모델에서는 Fox 모델에서는 추정되지 않는 생태학적으로 중요한 파라미터인 ECC도 추정되었으며, 그 값은 ASPIC 모델에서 1,033,000 mt, ME 모델에서 1,415,853 mt으로 추정되었다. 추정치와 실제 자료의 정밀도를 평가하기 위해 PY 추정치의 95% 신뢰구간을 추정한 결과, Fox 모델은 95% 신뢰구간 오차가 $\pm 4.9\%$, ASPIC 모델은 -1.9% , $+6.9\%$ 이었고, ME 모델은 $\pm 20.5\%$ 로 비교적 크게 나타났다. 추정치와 실제 자료의 정확도는 U를 계산한 결과, HPM에서 사용된 세 가지 모델 중 ME 모델에 의한 추정치의 U값이 1이하로 가장 낮았다. 세 가지 모델 중 ME 모델에 의한 추정치가 실측치의 변화를 가장 잘 나타내고 있다(Fig. 2).

개체군생산량 분석법(Population Production Method, PPM)

주요 어획대상 11어종은 전체 해역에 대한 어종별 어

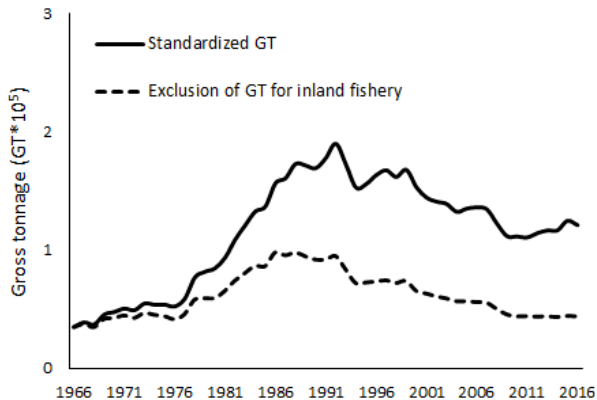


Fig. 1. Standardized gross tonnage (GT) of coastal and offshore fishery in the Korean waters of the East Sea considering improvement of fishing performance.

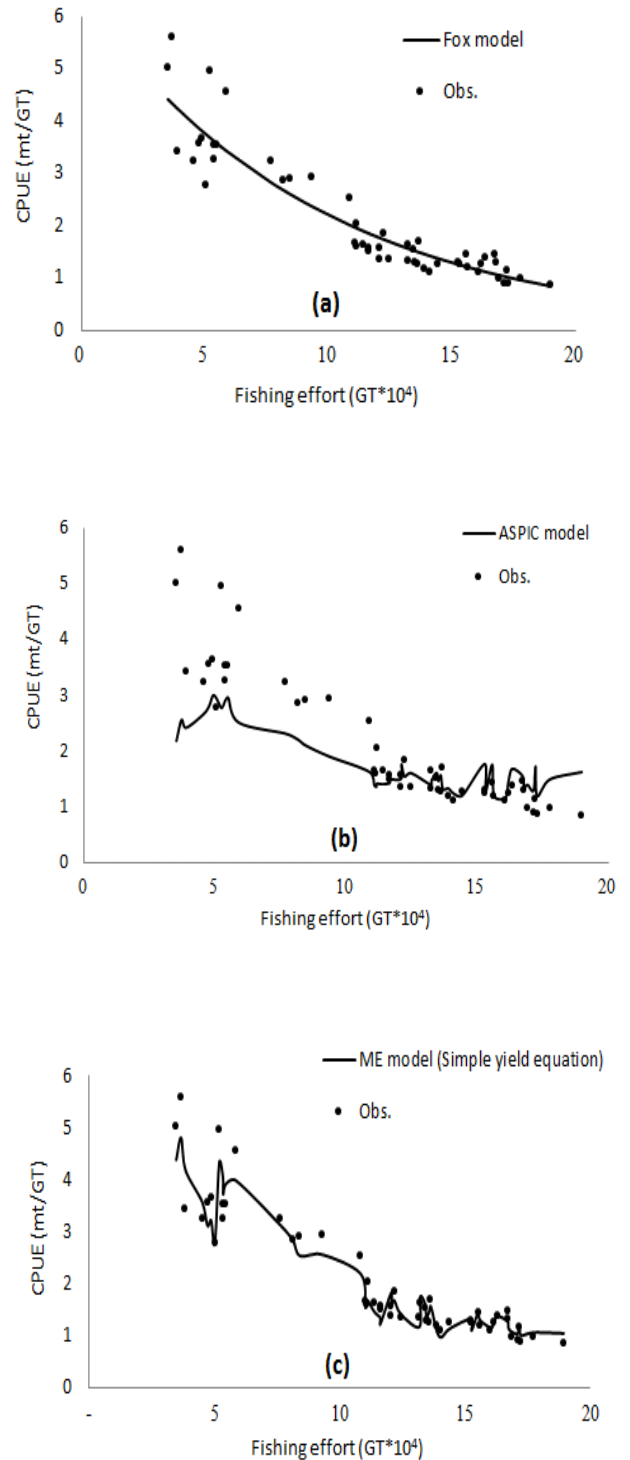


Fig. 2. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by surplus production models. (a) Fox model, (b) ASPIC model and (c) ME model.

Table 3. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by surplus production models

Model	Fox	ASPIC	ME
Parameters			
PY (mt)	220,908	214,000	265,472
(95% confidence interval)	(210,001-231,815)	(210,000-228,800)	(211,077-319,867)
Error of 95% confidence interval of PY (%)	±4.9	-1.9, +6.9	±20.5
B_{PY} (mt)	-	516,700	707,926
f_{PY} (GT)	93,499	101,600	104,529
ECC (mt)	-	1,033,000	1,415,853
(95% confidence interval)	-	(701,700-1,177,000)	(967,189-1,864,516)
Error of 95% confidence interval of ECC (%)	-	-32.1, +13.9	±31.7
q	-	4.075E-06	3.588E-06
r	-	0.828	0.750
R^2	0.869	0.694	0.953
RMSE	0.438	0.847	0.281
U	0.850	1.566	0.535
Regression constant α	0.004	-	-
Regression constant β	2.526E-13	-	-
$Cov(\alpha, \beta)$	-2.968E-08	-	-
Var(PY)	30,968,078	-	-
SE(PY)	5,565	-	-

획량과 CPUE 자료를 사용하여 ME 모델로 한국 전체해역에 대한 동해의 어획비율을 이용하여 동해에 대한 주요어종별 PY를 추정하였다(Table 4). 살오징어의 PY가 80,208 mt으로 가장 많았고, 다음으로 청어 41,726 mt, 붉은대게 30,120 mt 순으로 추정되었다.

문어의 PY는 한국 전체해역에 대한 ABC 자료(8,714 mt)를 사용하여 한국 전체 해역에 대한 동해의 문어 어

획 비율(0.41%)을 고려하여 3,613 mt으로 추정되었다. 그룹별로 주요 12어종을 제외한 어종들의 PY는 36,759 mt으로 추정되었고, 그룹별 PY 추정치는 Lim (2018)을 참조한다. 따라서 동해 연근해 전체 어획대상의 PY는 224,458 mt으로 추정되었다.

Table 4. Potential yield (PY) and distribution rate of major species in the Korean waters of the East Sea estimated by the ME model

Species	PY in the Korean waters (mt)	Distribution rate of the East Sea to the Korean waters (%)	PY in the East Sea (mt)
Common squid	180,657	0.44	80,208
Red snow crab	30,171	1.00	30,120
Pacific herring	68,896	0.61	41,726
Sandfish	6,730	0.97	6,511
Flounder	19,066	0.30	5,777
Amberjack	11,810	0.25	2,909
Chinese puffer	8,986	0.52	4,712
Spanish mackerel	56,816	0.06	3,499
Jack mackerel	53,019	0.07	3,918
Snow crab	2,344	0.93	2,175
Chub mackerel	175,889	0.01	2,529
Total	614,383	-	184,085

어업생산량 분석법(Fishery Production Method, FPM)

ME 모델을 사용하여 어업생산량 분석법에 의해 추정된 동해 주요 6개 어업의 PY는 Table 5와 같다. 동해구 중형트롤의 PY가 56,146 mt으로 가장 많게 추정되었으며, 다음으로 연안자망 42,746 mt, 근해채낚기 32,800 mt 순으로 추정되었다. 주요어업을 제외한 어업들의 PY는 97,410 mt으로 추정되었고, 그룹별 PY 추정치는 Lim

Table 5. Potential yield (PY) of the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea estimated by the ME model

Major fisheries	PY (mt)	R^2
Eastern sea trawl	56,146	0.925
Offshore angling	32,800	0.667
Coastal gillnet	42,746	0.842
Small powered purse seine	21,552	0.840
Coastal pot	5,718	0.883
Offshore gillnet	8,382	0.942
Total	167,334	-

(2018)을 참조한다. 따라서 동해 연근해 전체 어획대상의 PY는 264,754 mt으로 추정되었다.

생태계 모델링 방법(Ecosystem Modeling Method, EMM)

EMM에서 대상생태계는 HPM에서와 마찬가지로 행정구역상 강원도와 경상북도를 기준으로 한일 중간수역까지 포함하여 설정하였고, 그 면적은 155,853 km²로 계산되었다. 8가지 생태학적 특성을 고려하여 유사한 생태학적 특성을 가지는 종들을 동일군으로 분류하였고, 우리나라 연근해 전체 어획량의 상위 3종인 멸치, 고등어, 살오징어와 동해에서 어획량이 높은 붉은 대게, 청어, 도루묵은 독립 분류군으로 따로 지정하였다. 상세 분류군은 Lim (2018)을 참조한다.

생태계 모델링을 위한 입력자료로서 동해의 자원량(B)은 Lim (2018)을 참조하여 추정하였다. 생산량/생체량(P/B) 비와 섭식량/생체량(Q/B) 비는 국내에는 이와 관련된 연구가 거의 없어 관련 외국문헌 등을 참고하여 유사 분류군에 대한 자료를 입력하였다(Alias, 2003; Lassalle et al., 2012; Mackinson and Daskalov, 2007; Trites et al., 1999). 먹이조성(DC) 자료는 각종 문헌 및 보고서를 참조(Alias, 2003; Mackinson and Daskalov,

2007; Lee et al., 2002; Mustafa, 2003; Tamura and Fujise, 2002)하여 먹이 중요도와 생체량을 고려하여 각 분류군별 대표어종의 위내용물 분석 자료를 적용한 Lim (2018)의 연구결과를 사용하였다. 이에 따라 동해 생태계에 대한 EMM의 입력 파라미터는 Appendix 2와 같다. Ecopath에서 생태계 영양효율(EE_{mi})값이 자동으로 추정되는데, EE_{mi}값이 1이상으로 추정될 경우 매뉴얼 권고사항에 따라 값을 0.950로 고정(EE_{adj})하여 모델을 재실행하여 분류군별 생체량이 자동으로 보정(B_{adj})이 된다. 따라서 동해 생태계에 대한 Ecopath 초기 입력 파라미터 및 모델에 의해 보정된 자원량 값은 Table 9와 같다. 여기서, B_{mi}는 B의 초기 입력값, B_{adj}는 모델에 의한 B의 보정값, EE_{mi}는 EE의 초기 입력값, EE_{adj}는 모델에 의한 EE의 보정값을 나타낸다.

생태계 모델링에 의한 ECC를 추정하기 위해 Ecopath에서 분석한 생태계 구조를 기반으로 Ecosim을 이용하여 F=0일 경우 분류군별 생체량을 시뮬레이션하였다. 그 결과, 분류군별로 일정한 값으로 수렴하였다(Table 6). 따라서 추정된 분류군별 ECC와 자원역학적 관계를 이용하여 한국 동해 생태계의 PY는 Table 10과 같이 추정되었다.

Table 6. Estimated potential yield (PY) by species group in the Korean waters of the East Sea by the ecosystem modeling method (EMM)

Rank	Group name	ECC (mt)	M (yr ⁻¹)	PY (mt)
1	Marine mammals	-	-	-
2	Sea birds	-	-	-
3	Sharks	3,021	0.310	468
4	Rays	19,305	0.310	2,992
5	Predator pelagic	37,192	0.330	6,137
6	Chub mackerel	11,971	0.490	2,933
7	Small pelagic	175,888	0.406	35,680
8	Anchovy	44,762	0.406	9,080
9	Pacific herring	61,479	0.468	14,399
10	Flounder	36,231	0.282	5,100
11	Sandfish	24,927	0.527	6,564
12	Other demersal	668,513	0.379	126,827
13	Cephalopods	26,714	0.310	4,141
14	Common squid	537,017	0.310	83,238
15	Red snow crab	91,620	0.720	32,983
16	Epifauna	62,000	0.323	10,013
17	Infafauna	10,765	0.400	2,153
Total		1,811,405		342,707

잠재생산량 추정방법론간 비교

본 연구에서는 개체군 역학과 생태계 역학을 고려하여 종합적인 차원에서 PY 추정방법들을 비교 분석하기 위해 생산량 기반 분석법인 HPM, PPM, FPM과 생태계 역학 분석법인 EMM을 사용하여 한국 동해 생태계의 PY를 추정하였다(Fig. 3). 추정된 동해의 PY는 약 21~34만톤 수준으로 EMM에 의해 342,707 mt으로 가장 많이 추정되었으며, HPM (ASPIC 모델)에 의해 214,000 mt으로 가장 적게 추정되었다.

첫째, 생산량 기반 추정방법간 비교하면, HPM의 Fox 모델은 전통적인 잉여생산량모델로 어획이 없을 때의 평형상태에서 얻어지는 잉여량을 잉여생산량으로 계산하기 때문에 대상자원이 평형상태임을 가정한다. HPM의 ASPIC 모델은 Fox 모델과 달리 대상자원이 평형상태라 가정하지 않고, 관측오차를 사용하여 자원의 어업 자료를 잉여생산량모델에 적합시켜 합리적인 파라미터의 추정이 가능하다(Prager, 2005). PY 뿐만 아니라 생태학적으로 중요한 ECC (=K), B_{PY} 등의 파라미터 추정도

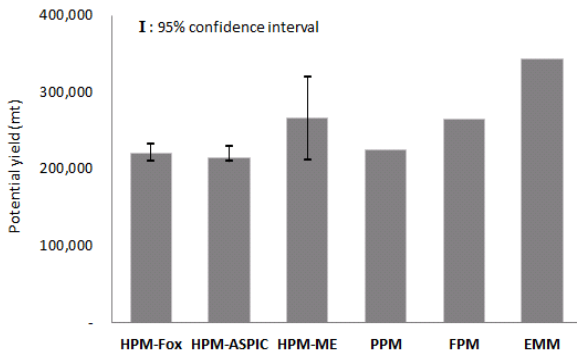


Fig. 3. Comparison of the potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by estimation methods.

가능하며, 편차 추정을 위해 부트스트랩과 비모수 신뢰 구간을 사용한다. HPM의 ME 모델은 비평형 잉여생산량 모델로서 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하므로 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높다. 다음으로 PPM은 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재 생산량을 추정한다. 마지막으로 FPM은 어업별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정한다.

따라서 추정치의 신뢰도를 고려해 볼 때 다섯 가지 추정방법 중에서 HPM이 1) 상대적으로 적은 가정과 파라미터를 사용하고, 2) 자원 개발 초기단계 자료부터 사용하여 PY 뿐만 아니라, 3) 연도별 자원량까지 추정이 가능하다. 4) HPM 중에서도 ME 모델이 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하여 PY를 추정하기 때문에 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높다. 5) HPM에서는 추정치와 실제 자료의 정밀도를 평가하기 위해 PY 추정치의 95% 신뢰 구간을 추정한 결과, Fox 모델은 95% 신뢰구간 오차가 ±4.9%, ASPIC 모델은 -1.9%, +6.9%이었고, ME 모델은 ±20.5%로 비교적 크게 나타났다. 추정치와 실제 자료의 정확도는 Theil의 U 통계량(U)을 계산하여 평가한 결과, HPM의 ME 모델에 의한 추정치의 U값이 1 이하로 가장 낮았다. 그러므로 다섯 가지 생산량 기반 추정방법 중에서는 HPM (ME 모델)이 대상생태계의 PY 추정에 가장 적합한 추정방법으로 판단된다.

둘째, 분류군별로 비교가 가능한 생산량 기반 분석법의 PPM과 생태계 역학 분석법의 EMM을 비교하면, 가

오리류, 기타 저서어류, 소형 표층어류 등 일부 분류군에서 추정된 PY가 PPM에 대하여 EMM의 추정결과가 약 3~13배 이상의 차이를 보였다. PPM은 각 어종군만의 자원역학만을 고려하여 PY를 추정하고, EMM은 생태계 내 어종군간의 먹이관계까지 고려하여 PY를 추정하므로 두 분석법간 추정방법이 상이하서 결과의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 EMM에 의한 PY 추정은 기초생산자(식물플랑크톤, 동물플랑크톤)에 대한 불확실한 생체량 자료 사용, 기초 입력자료인 P/B비, Q/B비 등에 대해 주로 외국 문헌자료 사용 등의 영향을 고려해 볼 수 있다. PPM에서 해역별 어장면적은 고려되었지만, 트롤대상어종에 대해 EMM에서는 1960년대 말의 생체량 추정 자료를 사용하였으나 PPM에서는 자원이 개발되어 감소된 이후의 평가자료를 사용하여 EMM보다 PY가 과소추정되었을 가능성이 있다.

종합적으로 6가지 추정방법을 모두 비교하면, 현재 기초자료 수준에서 추정된 생태계 역학 분석법에 의한 결과를 수산자원관리에 반영하기에는 불확실성이 크기 때문에 생산량 기반 분석법에 의한 결과를 반영하는 것이 보다 합리적이라 판단된다. 그 중에서도 추정방법의 고유한 특성에 따라 상대적으로 적은 가정과 확률치로 계산된 파라미터를 이용하여 PY를 추정하는 HPM (ME 모델)이 한국 동해 생태계의 PY 추정에 가장 적합한 추정방법이라 판단된다.

고 찰

본 연구에서 6가지 PY 추정방법을 통해 추정된 동해의 PY는 HPM (ASPIC 모델)의 21만톤에서 EMM의 34만톤으로 나타났다.

생태계 역학 분석법은 생태계 구성요소간의 상호작용과 특정 시점에서 생태계 먹이사슬의 구조와 생체량을 추정할 수 있고, 전체 생태계 변화를 예측할 수 있으므로 생태계 기반 수산자원관리에 활용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 분류군별 B, P/B비, Q/B비, C, DC 자료 등 PY 추정에 필요한 자료들이 많아서 현실적으로 이런 자료들을 모두 구축하기는 쉽지 않다. 따라서 분석시에 P/B비는 순간전사망계수(Z) 추정치를 가정하여 사용하고, Q/B비와 먹이조성 자료 등은 주로 외국문헌을 참고하여 사용함으로써 기초 입력자료의 불확실성이 크다는 한계가 있었다. 먹이조성 자료는 EMM에서 중요한 입력

자료이므로 향후 대상생태계의 분류군별 대표어종의 위 내용물 조사를 근거로 입력자료를 보완할 필요가 있다.

생산량 기반 분석법에서 HPM의 Fox 모델의 경우 대상자원이 평형상태임을 가정한다. 따라서 현재 어획되고 있는 자원을 대상으로 PY 추정을 위해 Fox 모델을 적용할 경우 이러한 가정은 현실적으로 맞지 않다. 그리고 PY와 f_{PY} 의 추정은 가능하지만 ECC (=K), B_{PY} 등을 추정할 수 없다는 한계가 있다. HPM의 ASPIC 모델은 PY 추정을 위해 $MSY (=PY)$, $K (=ECC)$, K에 대한 분석 시작 시점시의 자원량의 비(B_i/K), 어획능력(q)에 대한 초기값을 설정한다. 이 경우 사용되는 어업자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 환경수용량과 r 을 추정하기 때문에 사용되는 어업자료에 민감할 수 있다. 반면에 HPM의 ME 모델은 Fox 모델과 같이 평형상태를 가정하지도 않고, 확률치로 파라미터를 추정하기 때문에 상대적으로 신뢰성이 높은 추정방법이라 판단할 수 있다.

생산량 기반 분석법에서 PPM은 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 PY를 추정한다. 이 과정에서 대상생태계인 동해에 대한 어종별 PY를 추정하기 위해서는 대상해역별 어종별 어장분포 비율이 필요하다. 하지만 현실적으로 해역별 어종별 어장분포도 수집이 어려우므로 모든 어장에서 어종의 밀도는 균일하게 분포한다는 가정하에 해역별 어획량 비율이 어장면적 비율과 같다고 간주하여, PY 추정시에 해역별 어장면적이 고려되었다. 하지만 주요어종(86.6%) 이외 어종은 대부분 사용가능한 자료가 부족하여 어종별 PY의 직접 추정이 어려워져 외삽의 방법을 사용하므로 추정치의 불확실성이 크다는 한계점이 있었다.

생산량 기반 분석법에서 FPM도 PPM과 마찬가지로 어업별 어획량 및 어획노력량(CPUE 등) 자료가 부족한 어업의 경우, 주요어업(54.8%) 이외 어업의 PY 추정치에 대하여 외삽의 방법을 사용함으로써 불확실성이 증가하였다. 또한 어업성능 향상에 따라 확대된 어장면적이 고려되지 않아 추정치가 과소추정되었을 가능성이 있다는 한계점이 있었다.

분류군별로 비교가 가능한 생산량 기반 분석법의 PPM과 생태계 역학 분석법의 EMM의 추정결과 비교시에는 각 어종군만의 자원역학만을 고려한 잉여생산량모델의 추정방법과 생태계 내 어종군간의 먹이관계를 고려한 생태계 모델의 추정방법 자체의 차이점에 의해서

두 추정방법간의 결과 차이가 발생했을 것으로 판단된다. 따라서 현재 기초자료 수준에서 EMM에 의한 결과를 수산자원관리에 반영하기에는 불확실성이 크기는 하지만, 자원이 개발되어 감소된 이후의 평가자료를 이용하는 PPM보다는 EMM에 의한 결과를 반영하는 것이 보다 합리적으로 판단된다. 하지만, 6가지 추정방법을 모두 고려하면 현실적으로 PY 추정에 필요한 많은 입력 파라미터 자료들을 모두 구축하기 쉽지 않은 EMM을 사용하기에는 추정치의 불확실성이 클 것으로 판단된다. 추정방법의 고유한 특성에 기인하여 상대적으로 적은 가정과 이론적 가능범위를 설정하여 확률치로 계산된 파라미터를 사용한 생산량 기반 분석법의 HPM (ME 모델)에 의해 추정된 PY의 오차가 상대적으로 적을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 HPM (ME 모델)이 가장 합리적이고 한국 동해 생태계에 적합한 PY 추정방법으로 판단되었다. 최종적으로 선정된 HPM (ME 모델)에 의한 동해의 PY는 265,472 mt이며, 추정치의 95% 신뢰구간은 211,077-319,867 mt(오차: $\pm 20.5\%$)이다.

사 사

이 논문은 국립수산과학원 수산시험연구사업 인근해 어업 자원평가 및 관리연구(R2018024)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- Alias M. 2003. Trophic Model of the Coastal Fisheries Ecosystem of the West Coast of Peninsular Malaysia. WorldFish Center Conference Proceedings 67, 313-332.
- Alverson DL, Longhurst AR and Gulland JA. 1970. How much food from the sea? Science 168, 503-505. (DOI: 10.1126/science.168.3930.503)
- Beddington JR and Kirkwood GP. 2005. The estimation of potential yield and stock status using life-history parameters. Phil Trans R Soc B 360, 163-170. (DOI: 10.1098/rstb.2004.1582)
- Christensen V and Pauly D. 1992. ECOPATH II a software for balancing steady ecosystem models and calculating network characteristics. Ecological Modeling 61, 169-185. (DOI: 10.1016/0304-3800(92)90016-8)
- Christensen V and Waters CJ. 2004. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. Ecological Modeling

- 172, 109-139. (DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2003.09.003)
- Coll M, Palomera I and Tudela S. 2009a. Decadal changes in a NW Mediterranean Sea food web in relation to fishing exploitation. *Ecological Modeling* 220, 2088-2102. (DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.04.049)
- Coll M, Santojanni A, Palomera I and Arneri E. 2009b. Food-web changes in the Adriatic Sea over the last three decades. *Marine Ecology Progress Series* 381, 17-37. (DOI: 10.3354/meps07944)
- 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.
- Golan A, Judge G and Karp L. 1996. A maximum entropy approach to estimation and inference in dynamic models or counting fish in the sea with maximum entropy. *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, 559-582. (DOI: 10.1016/0165-1889(95)00864-0)
- Gulland JA. 1971. The fish resources of the ocean. *Fishing News Book, West By fleet*, 1-255.
- Jang SH, Ryu HS and Lee JH. 2011. Stock assessment and management implications of the Korean aucha perch (*Coreoperca herzi*) in freshwater: (2) Estimation of potential yield assessment and stock of *Coreoperca herzi* in the mid-upper system of the Seomjin River. *Korean J. Limnol.* 44(2), 172-177.
- Kim HA. 2016. A study on the estimation of potential yield for Korean west coast fisheries. Master's thesis, Pukyong National University, Korea, 1-134.
- Kim S and Kang S. 1999. Recent development in the concept and research direction for carrying capacity of marine ecosystem. *J. Korean Soc Fish Res* 2, 101-110.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). Statistical database -Agriculture, Forestry and Fishery; Fishery. <http://www.kosis.kr>. Accessed in 2017.
- Lee JB, Shin YJ, Lee JH, Choi YM, Lee DW and Cha HK. 2012. Estimation of potential fishery yield for *Corbicula japonica* in the Seomjin River, Korea. *Korean J Malacol* 28(2), 91-99.
- Lee MW. 2014. Ecosystem-base stock assessment and fisheries management in the west coast of Korea. Doctoral dissertation, Pukyong National University, Korea, 1-130.
- Lee SW, Lee HS, Yoo JC, Je JG, Levings C and Paek WK. 2002. Factors affecting the conservation and distribution of migratory waterbirds in the southern tidal flats of Ganghwa Island, Korea. *Kor. J. Env. Eco.* 16(1), 34-45.
- Lassalle G, Gascuel D, Loch FL, Lobry J, Pierce GJ, Ridoux V, Santos MB, Spitz J and Niquil N. 2012. An ecosystem approach for the assessment of fisheries impacts on marine top predators: the Bay of Biscay case study. *ICES Journal of Marine Science* 69(6), 925-938. (DOI: 10.1093/icesjms/fss049)
- Libralato S, Coll M, Tudela S, Palomera I and Pranovi F. 2008. Novel index for quantification of ecosystem effects of fishing as removal of secondary production. *Marine Ecology Progress Series* 355, 107-129. (DOI: 10.3354/meps07224)
- Lim JH. 2018. A Comparative Study on the Estimation Methods for the Potential Yield in the Korean Waters of the East Sea. Doctoral dissertation, Pukyong National University, Korea, 114.
- Mackinson S and Daskalov G. 2007. An Ecosystem Model of the North Sea to Support an Ecosystem Approach to Fisheries Management: Description and Parameterisation. *Sci. Ser. Tech Rep., Cefas Lowestoft* 142, 196.
- Mustafa MG. 2003. Trophic model of the coastal ecosystem in the waters of Bangladesh, Bay of Bengal. *WorldFish Center Conference Proceedings* 67, 263-280.
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2016. Study on the Estimation of Fishing Power according to the Development of Fishing Vessels and Gears. 1-114.
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2016. Fishing trend and stock assessment of major species in the Korean waters. 1-205.
- 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.
- Ryther JH. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea.

- Science, 166, 72-76. (DOI:10.1126/science.166.3901.72)
- Seo YI, Hwang KS, Cha HK, Oh TY, Jo HS, Kim BY, Ryu KJ and Lee YW. 2017. Change of relative fishing power index from technological development in the offshore large powered purse seine fishery. *J Korean Soc Fish Technol.* 53(1), 12-18. (DOI: 10.3796/KSFT.2017.53.1.012)
- Shin YJ. 2009. A method for estimating potential fishery yield in coastal waters. Master's thesis, Pukyong National University, Korea, 1-53.
- Tamura T and Fujise Y. 2002. Geographical and seasonal changes of the prey species of minke whale in the Northwestern Pacific. *ICES Journal of Marine Science*, 59: 516-528. (DOI: 10.1006/jmsc.2002.1199)
- Theil H. 1966. *Applied Economic Forecasting*. Chicago, Rand McNally.
- Trites AW, Livingston PA, Mackinson S, Vasconcellos MC, Springer AM and Pauly D. 1999. Ecosystem change and the decline of marine mammals in the Eastern Bering Sea: testing the ecosystem shift and commercial whaling hypotheses. *Fisheries Centre Research Reports*, 7, 1-100.
- Tukey JW. 1958. Bias and confidence in not quite large samples. *The Annals of Mathematical Statistics* 29, 614-623.
-
2018. 04. 12 Received
2018. 05. 04 Revised
2018. 05. 09 Accepted

Appendix 1. Estimation of 95% confidence interval of PY in the HPM

Fox 모델은 Delta method (Bolker, 2008)를 적용하여 추정치의 분산(Variance, Var)과 표준오차(Standard error, SE)를 계산하였다.

PY 추정치의 신뢰구간은 Delta method에 의해 계산

$$PY = \frac{U_{\infty}r}{eq} = -\frac{e^{\alpha-1}}{\beta} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} Var(PY) &= \left(\frac{\partial PY}{\partial \alpha}\right)^2 \cdot Var(\alpha) + \left(\frac{\partial PY}{\partial \beta}\right)^2 \cdot Var(\beta) + 2\left(\frac{\partial PY}{\partial \alpha}\right)\left(\frac{\partial PY}{\partial \beta}\right) \cdot Cov(\alpha, \beta) \\ &= \left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)^2 \cdot Var(\alpha) + \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right)^2 \cdot Var(\beta) + 2\left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)\left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right) \cdot Cov(\alpha, \beta) \end{aligned} \tag{2}$$

$$SE(PY) = \sqrt{\left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)^2 \cdot Var(\alpha) + \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right)^2 \cdot Var(\beta) + 2\left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)\left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right) \cdot Cov(\alpha, \beta)} \tag{3}$$

된 추정치의 표준오차와 95% 신뢰수준을 나타내는 표준변수를 곱하여 아래의 식과 같이 추정이 가능하다. 여기서, 표준변수는 표본의 크기가 대표본(n>30)인 경우 1.96, 소표본(n<30)인 경우 $t_{0.05, v}$ 를 사용한다.

95% confidence interval of PY = PY ± 1.96SE(PY) (4)

ASPIC 모델은 ECC와 PY 추정치의 95% 신뢰구간을 추정하기 위해 상용 프로그램 ASPIC의 프로그램 모드를 사용하였다. ASPIC의 BOT 모드는 부트스트랩(Bootstrap) 방법을 적용하여 추정치의 95% 신뢰구간 추정이 가능하다. 본 연구에서 부트스트랩 시행 횟수는 ASPIC 매뉴얼에 따라 신뢰구간 추정을 위한 최소 시행 횟수인 1,000번으로 설정하였고, 1,000개의 부트스트랩 표본을 사용하여 추정치의 95% 신뢰한계의 하한점과 상한점을 추정하였다. ECC와 PY 추정치의 95% 신뢰구간 추정을 위해 프로그램 모드를 ‘Bootstrap’으로 설정하고 모델을 실행시키면 시뮬레이션 결과보고서 파일이 생성된다. ECC와 PY 추정치의 95% 신뢰구간은 부트스트랩 방법을 적용한 결과보고서의 ‘Estimates from

bootstrapped analysis’에서 K (=ECC)와 MSY (=PY)의 95% lower, 95% upper 값으로 산출되며 각각 95% 신뢰한계의 하한점과 상한점을 나타낸다. ME 모델은 자료에서 얻어진 통계량의 표본오차를 비모수적으로 평가하는 Jackknife resampling 방법(Tukey, 1958)으로 아래의

식과 같이 표준오차(SE)를 계산하여 PY와 ECC 추정치의 95% 신뢰한계의 하한점과 상한점을 추정하였다.

$$\hat{\theta}_j = n\theta - (n-1)\theta_j \tag{5}$$

$$m_{jack} = \frac{\sum \hat{\theta}_j}{n} \tag{6}$$

$$Var_{jack} = \frac{\sum (\hat{\theta}_j - m_{jack})^2}{(n-1)} \tag{7}$$

$$SE_{jack} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{\theta}_j - m_{jack})^2}{(n-1)n}} \tag{8}$$

95% confidence interval of PY = PY ± 1.96SE (9)

여기서, $\hat{\theta}_j$ 는 잭나이프 계산에 의해 추정된 Pseudo 값, θ 는 원 자료에 대한 추정치, θ_j 는 j 번째 자료점을 제외한 j 표본에 대한 추정치, n 은 원 자료의 개수이다.

Appendix 2. Initial input parameters and adjusted input parameters of the Ecopath model in the Korea waters of the East Sea

	Group name	B _{ini} (mt/km ²)	B _{adj} (mt/km ²)	P/B (yr ⁻¹)	Q/B (yr ⁻¹)	C (mt)	EE _{ini}	EE _{adj}
1	Marine mammals	0.146	0.146	0.020	9.900	-	0.000	0.000
2	Sea birds	0.035	0.035	0.090	60.190	-	0.000	0.000
3	Sharks	0.003	0.013	0.510	2.960	0.002	1.307	0.950
4	Rays	0.112	0.112	0.666	1.700	0.002	0.140	0.142
5	Predator pelagic	0.217	0.217	1.200	3.510	0.007	0.605	0.606
6	Chub mackerel	0.071	0.071	0.600	1.730	0.001	0.922	0.924
7	Herring	0.372	0.372	0.800	4.340	0.000	0.931	0.932
8	Small pelagic	0.717	1.085	3.750	12.900	0.201	1.405	0.950
9	Anchovy	0.197	0.281	3.940	19.700	0.041	1.326	0.950
10	Flounder	0.216	0.216	1.100	3.200	0.013	0.801	0.802
11	Other demersal	4.143	4.143	1.420	3.700	0.182	0.723	0.741
12	Sandfish	0.127	0.127	2.280	10.100	0.049	0.549	0.549
13	Cephalopods	0.169	0.169	3.200	10.670	0.001	0.604	0.604
14	Squid	3.323	3.323	4.100	10.510	0.402	0.455	0.462
15	Epifauna	0.397	0.397	5.457	20.390	0.017	0.747	0.747
16	Red snow crab	0.577	0.577	1.000	5.000	0.000	0.967	0.967
17	Infauna	0.070	0.070	7.000	27.000	0.001	0.599	0.599
18	Zooplankton	40.480	40.480	44.630	204.700	-	0.944	0.946
19	Phytoplankton	70.590	70.590	128.600	-	-	0.640	0.640
20	Detritus	100.000	100.000	-	-	-	0.166	0.166