



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

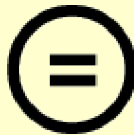
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학박사 학위논문

한국 동해 생태계의 잠재생산량 추정방법 비교 연구



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수산물리학과

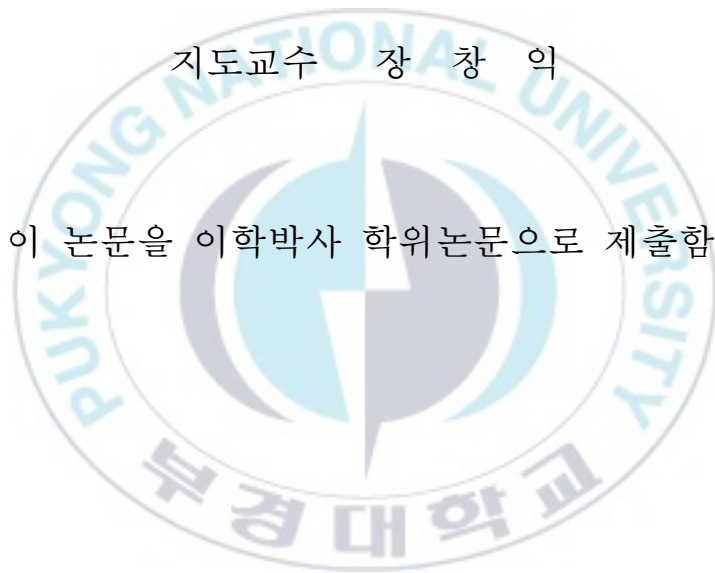
임 정 현

이학박사 학위논문

한국 동해 생태계의 잠재생산량 추정방법 비교 연구

지도교수 장 창 익

이 논문을 이학박사 학위논문으로 제출함.



2018년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수산물리학과

임 정 현

임정현의 이학박사 학위논문을 인준함.

2018년 2월 23일



위 원 장 경제학 박사 표 희 동



위 원 이 학 박사 현 상 윤



위 원 이 학 박사 서 영 일



위 원 이 학 박사 윤 상 철



위 원 이 학 박사 장 창 익



목 차

목차	i
List of Figures	iv
List of Tables	vii
Abstract	x
I. 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 동해 생태계 현황	4
2.1. 어장 환경	4
2.2. 어획량 변동	6
II. 재료 및 방법	11
1. 잠재생산량 추정방법	11
1.1. 생태계 역학 분석법	11
1.2. 생산량 기반 분석법	20
1.2.1. 통합생산량 분석법	20
1.2.2. 개체군생산량 분석법	36
1.2.3. 어업생산량 분석법	40
2. 어획강도에 따른 자원량 예측 모델	43

3. 자료	47
3.1. 생태계 역학 분석을 위한 자료	47
3.2. 생산량 기반 분석을 위한 자료	53
III. 결과	61
1. 잠재생산량 추정방법별 결과	61
1.1. 생태계 역학 분석법	61
1.2. 생산량 기반 분석법	65
1.2.1. 통합생산량 분석법	65
1.2.2. 개체군생산량 분석법	70
1.2.3. 어업생산량 분석법	74
2. 어획강도에 따른 한국 동해 생태계의 자원량 예측 결과	76
3. 잠재생산량 추정방법론간 비교 분석	77
3.1. 생태계 역학 분석법	77
3.2. 생산량 기반 분석법간 비교 분석	79
3.3. 생태계 역학 분석법과 생산량 기반 분석법간 비교 분석	82
IV. 고찰	86
1. 한국 동해 생태계에 적합한 잠재생산량 추정방법	86
2. 한국 동해 생태계 자원관리를 위한 제언	90
V. 요약	93

VI. 참고문헌	95
Appendix	106
Appendix 1	106
Appendix 2	110

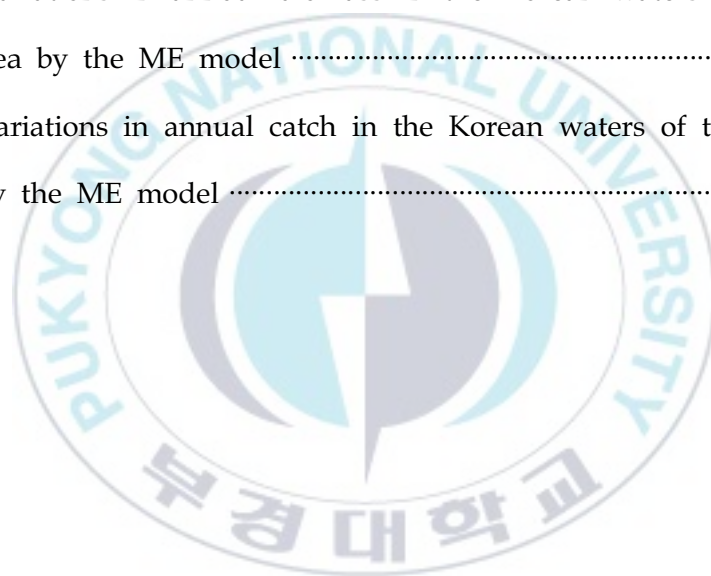


List of Figures

Fig. 1. Classification of boundary in the Korean waters of the East Sea considering ecological characteristics and management subjects of fisheries resources	5
Fig. 2. Annual catch in the Korean waters of the East Sea and the entire Korean waters	6
Fig. 3. Changes in annual catch ratio of major species in the Korean waters of the East Sea (source from KOSIS)	9
Fig. 4. Input screen for initial information in the Ecopath model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea	14
Fig. 5. Input screen for catch in the Ecopath model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea	17
Fig. 6. Input screen of the ASPIC model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea	24
Fig. 7. Result screen for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program	25
Fig. 8. Result screen for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the GAMS program using ME model ..	28
Fig. 9. Setup screen for the Bootstrap method for estimation of potential	

yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program	33
Fig. 10. Result screen for the Bootstrap method for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program	34
Fig. 11. Results of Ecosim simulation by species group in the Korean waters of the East Sea	61
Fig. 12. Ecosystem structure in the Korean waters of the East Sea prior to the start of fishing	63
Fig. 13. Results of standardized gross tonnage (GT) of coastal and offshore fishery in the Korean waters of the East Sea considering improvement of fishing performance	65
Fig. 14. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the Fox Model	66
Fig. 15. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the ASPIC Model	67
Fig. 16. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the ME Model	67
Fig. 17. Sensitivity analysis of the PY estimates in the Korean waters of the East Sea by the ME model according to the change in input data	70
Fig. 18. Forecast results of future biomass in Korean waters of the East	

Sea due to the change in fishing intensity	77
Fig. 19. Comparison of the potential yield (PY) by group in the Korean waters of the East Sea estimated by the ecosystem dynamics analysis and production-based analysis.	84
Fig. 20. Comparison of the potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by estimation method	85
Fig. 21. Variations in annual biomass in the Korean waters of the East Sea by the ME model	89
Fig. 22. Variations in annual catch in the Korean waters of the East Sea by the ME model	90



List of Tables

Table 1. Average catch, area and catch per unit area in recent 5 years (2012~2016) by sea area in the Korean waters	7
Table 2. Average catch and catch ratio in recent 5 years (2012~2016) of major species in the Korean waters of the East Sea	8
Table 3. Average catch and catch ratio in recent 5 years (2012~2016) of major fisheries in the Korean waters of the East Sea	10
Table 4. Criteria for classification of species group in the Korean waters of the East Sea in accordance with the ecological features	13
Table 5. Estimates of potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC), standard error (S.E.), and coefficient of variation (CV) by the Jackknife resampling method in the Korean waters of the East Sea ..	46
Table 6. Species by group in the Korean waters of the East Sea	48
Table 7. Initial input parameters and adjusted input parameters of the Ecopath model in the Korea waters of the East Sea	50
Table 8. Input data for diet composition (DC) in the Korean waters of East Sea	51
Table 9. Annual catch and fishing effort data in the Korean waters of the East Sea	53
Table 10. Technology coefficient by vessel type of fishery in the Korean	

waters based on the 1980 (NIFS (2016); Seo et al. (2017))	57
Table 11. Average catch ratio and available data of the exploitable 12 major species in recent 5 years (2012~2016) in the Korean waters of the East Sea	58
Table 12. Average catch ratio and available data of the 6 major fisheries in recent 5 years (2012~2016) in the Korean waters of the East Sea	59
Table 13. The estimated exploitable carrying capacity (ECC) by species group in the Korean waters of the East Sea	62
Table 14. The estimated potential yield (PY) by species group in the Korean waters of the East Sea	64
Table 15. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by surplus production model	68
Table 16. Potential yield (PY), exploitable carrying capacity (ECC) and distribution rate of major species in the Korean waters of the East Sea	71
Table 17. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) by species in the Korean waters of the East Sea estimated using allowable biological catch (ABC) and stock trends	72
Table 18. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) of target species by group except the 12 major species in the Korean waters of the East Sea	73
Table 19. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity	

(ECC) of the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea estimated by the ME model	75
Table 20. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) of fisheries by group except the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea	76
Table 21. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) in the Korean waters of the East Sea by the ecosystem modeling method (EMM)	78
Table 22. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) in the Korean waters of the East Sea by the production-based analysis	80
Table 23. The potential yield (PY) by group in the Korean waters of the East Sea estimated by the ecosystem dynamics analysis and production-based analysis	83
Table 24. The potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by estimation method	84
Table 25. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) in the Korean waters of the East Sea by the ME model	89

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

Jung Hyun Lim

*Department of Fisheries Physics, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

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 in the future. So far, however, there have been few studies on the estimation methods for PY in Korea. PY, which is defined as the maximum sustainable yield, is an essential data for establishing reference points for ecosystem-based

resource assessment in the Korean waters. In addition, there have been no studies on the comparative analysis for 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.

The ecosystem dynamics analysis has the advantage of predicting the change of total ecosystem, but it is estimated to have the disadvantage of the great uncertainty of the PY estimates because of its needs for a lot of input parameters for estimating the PY and its limit to realizing all input data. On the other hand, the holistic production method (HPM) of the production-based analysis utilizes relatively a few assumptions and parameters, and estimates the PY by using the whole data over 51 years including the initial stage of resource exploitation. In particular, the ME model of the HPM estimates the PY on the basis of the probability-based parameters by setting a theoretically possible ranges for each parameter. Therefore, the ME model of the 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 for providing indicators and reference points for sustainable and reasonable management of fisheries resources.



I. 서론

1. 연구배경 및 목적

세계의 어업자원은 과도한 이용으로 인해 최근 40년 사이에 상위 어획대상종 (전체 어획량의 약 30%)들은 대부분은 완전히 개발되고 이용되어 점차 악화되고 있다 (Zhang, 2014). 우리나라의 동해 생태계도 어로기술의 발달, 선박의 대형화 등에 따른 수산자원의 과도한 남획과 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 (Table 1).

해양에서 잠재생산량 (potential yield, PY)은 특정 해역에서 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. 잠재생산량은 우리나라 연근해의 생태계 기반 자원평가를 위한 기준점 설정시에도 반드시 필요한 자료이다. 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. Ryther (1969)의 연구에 의하면 이 방법은 잠재생산량의 절대 추정이 가능하고 환경이나 생태계 변화 등에 적용이 가능하다. 하지만 먹이사슬을 이용하는 방식은 에너지 전달 효율과 먹이사슬 길이의 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, 전달 효율 추정치는 공간적, 생태학적 변동이 있을 수 있고 (Libralato et al., 2008), 개발에 따라 그 값이 변할 수 있다는 문제점이 있다 (Coll et al., 2009a, b).

둘째, 질량균형 모델 (mass-balanced model)에 기반해서 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 자료 (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 생활사 특성치를 이용하여 잠재생산량을 추정하는 방법들은 여러가지 문제점이 있어서 최근에는 생태계 내 어종군간의 먹이관계를 고려한 생태계 모델링 (Ecopath with Ecosim model, EwE)을 사용하거나 개체군 생산량 모델들 (ASPIC 모델, ME 모델 등)을 사용하여 잠재생산량을 추정하는 방법들이 주로 이용되고 있다. 하지만 지금까지는 여러가지 추정방법론간의 장단점을 비교 분석하거나 광역생태계를 대상으로 하는 실질적인 잠재생산량 추정방법에 관한 연구는 없었다. 따라서, 수

산자원의 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 이를 보완하고자 한다. 이에 따라 보다 과학적이고 체계적인 자원관리를 위해 우리나라의 동해 생태계에 가장 적합한 잠재생산량 추정방법을 제시하고자 한다.

2. 동해 생태계 현황

2.1. 어장 환경

우리나라 연근해 생태계에 대해 동·서·남해의 경계를 명확하게 정의내린 바는 아직까지 없다. 일반적으로 동해는 우리나라와 러시아 연안, 일본으로 둘러싸여 있는 반폐쇄적인 해양 특성을 가지고 있는 해역이다. 대륙붕이 발달하지 못하여 평균 수심이 약 1,500m이며, 대한해협 (Korea Strait), 쓰가루 해협 (Tsugaru Strait), 소야 해협 (Soya Strait)을 통해 동중국해, 북태평양, 오호츠크해로 연결되어 있다. 동해는 수심 300m 이하에서 수온 0~1℃, 염분 33.96~34.14‰ 범위의 동해 고유수가 동해 전체 부피의 약 80%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다 (Yasui et al., 1967). 동해의 전선역은 대한해협을 통하여 유입되는 대마난류와 북한난류 동해고유수가 만나는 해역으로서, 난류수의 좋은 투명도와 한류수의 저층에서 공급되는 풍부한 영양염 때문에 생산력이 높은 곳으로 알려져 있다 (Raymont, 1980). 따라서 냉수성 어류와 온수성 어류가 모두 출현하므로 매우 다양한 생물상이 나타나고 있다. 주로 동해의 북부는 냉수성 저어류가 많고, 남부

에는 온수성 부어류가 많으며, 대부분 연안과 대륙사면 사이를 이동하면서 살아가거나 계절적으로 남북 회유를 하는 것이 많다.

해양 생태계는 배타적 경제수역과 같은 인위적인 요인, 해양학적 요인, 생태학적 요인, 수산자원의 이용과 관리의 주체 등 여러 가지 요인들을 고려하여 구분되어야 하지만, 현실적으로 경계기준점을 명확히 설정하기가 쉽지 않다 (Seo, 2011). 따라서 본 연구에서는 동해의 생태학적 특성과 수산자원의 이용 및 관리의 주체를 고려하여 행정구역상 강원도와 경상북도를 기준으로 한·일 중간수역까지 포함하여 동해 생태계를 정의하였다 (Fig. 1).

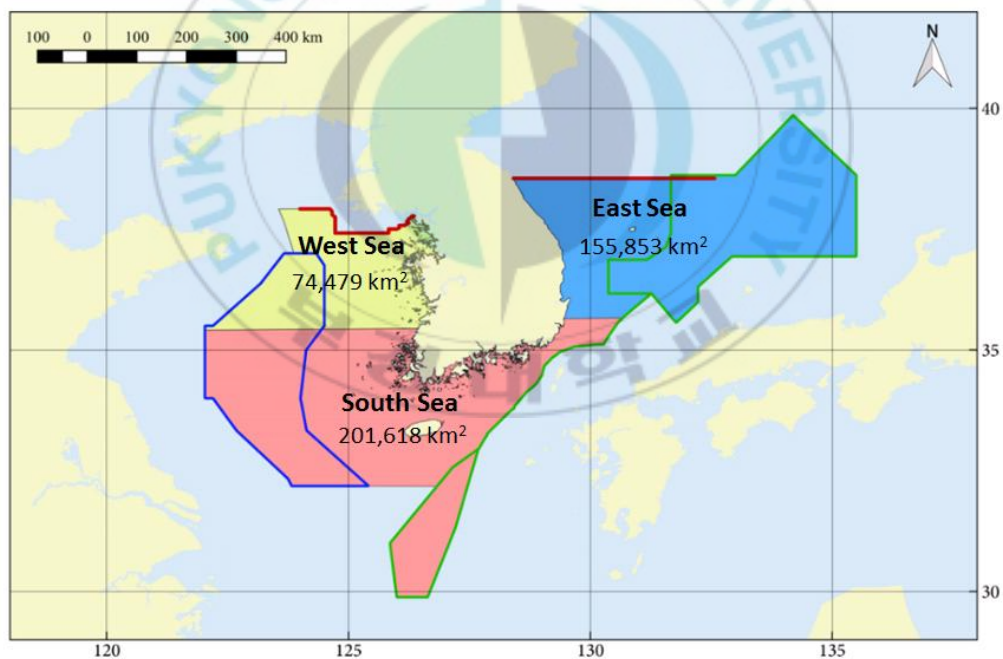


Fig. 1. Classification of boundary in the Korean waters of the East Sea considering ecological characteristics and management subjects of fisheries resources.

2.2. 어획량 변동

우리나라 총 어획량은 1970년대부터 급격히 증가하다 1986년 약 173만톤의 최고 수준에서 점차 감소하기 시작하여 최근 2016년에는 약 93만톤 수준이다 (Fig. 2). 해역별 어획량을 보면, 최근 5개년 (2012-2016년)의 평균 어획량을 기준으로 남해가 전체 연근해 생산량의 71%로 가장 큰 비율을 차지하였고, 동해가 17%, 서해가 12% 순이었다 (Table 1).

최근 FAO의 어업통계에 따르면, 전세계 평균 단위면적당 어획량은 $0.23\text{mt}/\text{km}^2$ 이며, 우리나라가 속하는 북서태평양의 단위면적당 어획량은 전 세계 해역에서 가장 많은 $1.04\text{mt}/\text{km}^2$ 를 차지하고 있다 (FAO Statistics). 그러나 동해의 경우, 단위면적당 어획량이 우리나라 해역에서 가장 적은 $1.13\text{mt}/\text{km}^2$ 로 나타났다.

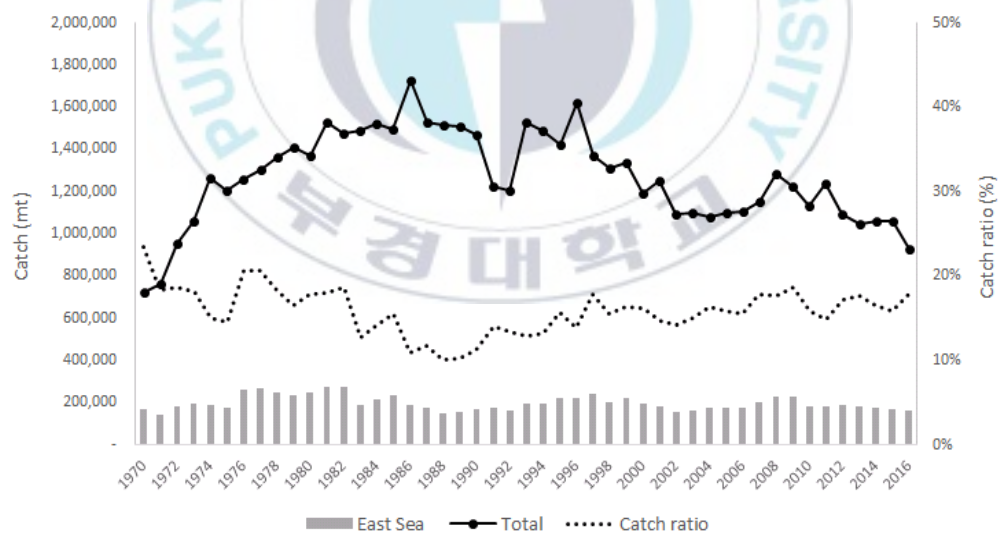


Fig. 2. Annual catch in the Korean waters of the East Sea and the entire Korean waters.

Table 1. Average catch, area and catch per unit area in recent 5 years (2012~2016) by sea area in the Korean waters

	Average catch (mt) and catch ratio (%) in recent 5 years (2012-2016)	Area (km ²)	Catch per unit area (mt/km ²)
East Sea	175,996 (17%)	155,853 (36%)	1.13
West Sea	124,812 (12%)	74,479 (17%)	1.68
South Sea	735,799 (71%)	201,618 (47%)	3.65
Entire Korean waters	1,036,607 (100%)	431,950 (100%)	2.40

동해의 주요 어종 변화를 살펴보면, 최근 5개년 (2012-2016년) 어종별 평균 어획량 비율의 순위는 살오징어, 붉은대게, 청어 순이었다 (Table 2). 어획량 비율이 높은 상위 15종의 평균 어획량은 동해 전체 어획량의 약 89%를 차지하였다. 특히, 살오징어의 평균 어획량 비율이 약 39%로 상당히 높은 값을 나타냈다. 상위 15종을 주요 어종으로 간주한 동해의 연도별 어종 변화는 Fig. 3과 같이 나타났다. 1970년대 초기에는 살오징어와 도루묵의 어획비율이 높았으나, 최근에는 도루묵의 어획비율이 크게 줄어들고 대부분이 살오징어와 붉은대게, 청어 등을 어획하는 추세이다.

Table 2. Average catch and catch ratio in recent 5 years (2012~2016) of major species in the East Sea

Rank	Major species	Average catch (mt)	Catch ratio (%)
1	Common squid	69,026	39.2
2	Red snow crab	38,136	21.7
3	Pacific herring	17,887	10.2
4	Sandfish	5,579	3.2
5	Flounder	5,132	2.9
6	Octopus	3,940	2.2
7	Amberjack	2,823	1.6
8	Chinese puffer	2,082	1.2
9	Spanish mackerel	2,045	1.2
10	Jack mackerel	2,039	1.2
11	Sea snail	1,926	1.1
12	Snow crab	1,872	1.1
13	Chub mackerel	1,782	1.0
14	Atka mackerel	1,542	0.9
15	Pacific sandlance	1,490	0.8
Total		157,301	89.4

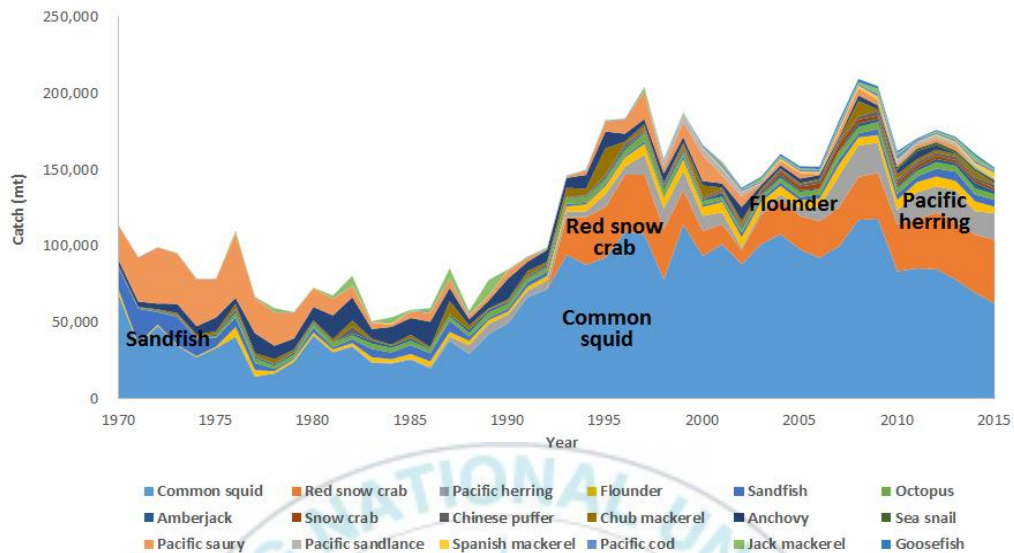


Fig. 3. Changes in annual catch ratio of major species in the East Sea (source from KOSIS).

동해의 주요 어업을 살펴보면, 최근 5개년 (2012-2016년) 어업별 평균 어획량 비율의 순위는 근해통발, 동해구중형트롤, 근해채낚기, 연안자망, 정치망 순이었다 (Table 3). 상위 5개 어업의 평균 어획량은 동해 전체 어획량의 약 77%를 차지하였다. 특히, 근해통발의 평균 어획량 비율이 약 22%로 가장 높은 값을 나타냈다.

Table 3. Average catch and catch ratio in recent 5 years (2012~2016) of major fisheries in the East Sea

Rank	Major fisheries	Average catch (mt)	Catch ratio (%)
1	Offshore pot	38,440	21.8
2	Eastern sea trawl	32,871	18.7
3	Offshore angling	28,532	16.2
4	Coastal gillnet	19,738	11.2
5	Set nets	15,708	8.9
6	Eastern sea danish seine	9,554	5.4
7	Small powered purse seine	8,658	4.9
8	Coastal complex	5,145	2.9
9	Coastal pot	4,491	2.6
10	Offshore gillnet	2,078	1.2
Total		165,214	93.9

II. 재료 및 방법

1. 잠재생산량 추정방법

1.1. 생태계 역학 분석법

생태계 모델링 방법 (ecosystem modeling method, EMM)에 의해 동해의 잠재생산량을 추정하기 위해서는 첫째, 대상 생태계인 동해의 범위를 설정하고 면적을 산출한다. 둘째, 잠재생산량 추정의 대상이 되는 어획대상 어종들을 중요하거나 유사한 생태학적 특성을 가지는 생물군별로 그룹화하여 분류한다. 셋째, Ecopath with Ecosim에 필요한 입력자료들을 추정한다. 넷째, Ecopath를 이용한 생태계 구조를 분석한다. 다섯째, Ecosim을 이용한 분류군별 어획대상 환경수용량을 추정한다. 마지막으로 추정된 분류군별 환경수용량과 자원역학적 관계를 이용하여 잠재생산량을 추정한다. 본 연구에서 사용된 약어 및 표기법은 Appendix 1을 참조하기 바람.

1.1.1. 대상 생태계 정의

본 연구에서 동해 생태계의 범위는 앞서 언급한 바와 같이 동해의 생태학적 특성과 수산자원의 이용 및 관리의 주체를 모두 고려하여 행정구역상 강원도와 경상북도를 기준으로 설정하였으며, 그 면적은 155,853km²이다.

1.1.2. 생물군 분류

생태계 모델에서는 서식지, 먹이습성 등 유사한 생태학적 특성에 따라 여러 종을 하나의 생물군으로 묶어서 모델에 적용하여야 한다. 본 연구에서는 생물군 그룹핑을 위해 인공신경망 (artificial neural networks, ANNs)

방법을 사용하였다. 인공신경망은 인간의 뇌 기능에 기초한 비선형 mapping 구조이다. 인공신경망 (ANNs)은 예측 모델링에서 큰 수용력을 가지는 'black box'와 같다고 볼 수 있는데, 즉, 미지의 상황을 설명하는 모든 특성들은 반드시 인공신경망에 제시되고 있으며, 최근 생태계 모델링에서는 ANNs 방법이 적용되고 있다 (Lek and Guegan, 1999). 따라서 대상 생태계에 서식하는 생물들을 생태학적 유사성에 따라 그룹핑하기 위해 인공신경망을 인지하는 테크닉의 하나인 자가구성법 (self-organizing mapping, SOM)을 적용하였다.

생태계 기반 추정방법을 사용하여 정확한 잠재생산량을 추정하기 위해서는 먼저 동해의 생태계 구조를 정확히 파악해야 하는데, 어획대상 어종과 피·포식 관계에 있는 모든 어획대상 생물뿐만 아니라 바다새, 바다포유류, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤 등 비어획대상 생물들을 모두 고려하여 분류군을 정의하고 생태계 구조를 파악해야 한다.

본 연구에서는 사용가능한 자료를 고려하여 비어획대상 생물인 바다새, 바다포유류, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤에 대한 분류군을 따로 분류하고 어획대상 생물들은 생태학적 특성을 검토하여 Table 4와 같이 8가지 생태학적 특성에 기초하여 분류하였다. 숫자는 각각의 특성들을 구분하기 위하여 임의로 부여하였다.

Table 4. Criteria for classification of species group in the Korean waters of the East Sea in accordance with the ecological features

Feature	0	1	2	3	4	5
Swimming ability	None	Weak	Strong			
Bone	Osteichthyes	Chondrichthyes	Mollusks	Crustacean	Others	
Body size	Small	Medium	Large			
Shape	Spindle	Compressed	Long-compressed	Flat	Cylindrical	Others
Habitat depth	Onshore	Offshore	Brackish			
Habitat	Pelagic	Middle	Demersal	Sand/Mud	Rock	Others
Diet	Predatory	Carnivorous	Herbivorous	Omnivorous		
Spawning	Oviparous	Ovoviviparous	Viviparous			

1.1.3. 입력자료 추정

생태계 모델의 구조를 파악하고 역학적 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 생물군별로 많은 정보가 필요하다. 즉, 생태계 내에는 많은 생물종들이 서식하며 이들은 서로 먹고 먹히는 관계에 있기 때문에, 한 생물군의 생체량 증감은 이들의 포식자 또는 피식자의 생체량 증감에도 영향을 미친다. 이러한 영향은 그들이 생산할 수 있는 생산량과 인간이 이용할 수 있는 어획량 변동에도 큰 영향을 초래한다. 따라서 생물군별 생체량 (B), 생물학적 생산량 (P), 섭식량 (Q), 피식-포식 관계 (DC), 어획량 (C), 영양효율 (EE)에 대한 정확한 정보 수집은 필수적이다. 만약 이 중 5개의 파라미터만 알 수 있다면 나머지 한 파라미터는 생태계 질량균형 모델 (mass-balanced model)에 의해 자동적으로 추정된다. 일반적으로 영양효율 (ecotrophic efficiency, EE)은 다른 파라미터에 비해 직접 추정하는 것이 어려우므로,

질량균형 모델에 의해 간접적으로 추정된다. Ecopath 모델의 초기화면에는 분석 시작연도와 대상생태계 면적 등의 기본정보를 입력한다 (Fig. 4).

Fig. 4. Input screen for initial information in the Ecopath model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea.

1.1.3.1. 생체량 (biomass, B)

동해는 해역특성상 트롤시행 조사 자료가 부족한 현실이다. 따라서 동해의 어획대상 어종의 생체량을 구하기 위해 1960년대 자원량이 처녀자원량의 95% 수준에 있다는 가정과 Gulland(1971)의 $MSY=0.5MB_0$ 라는 가정을 사용하여 아래와 같이 1960년대의 자원량을 추정하였다.

$$B_{60s} = 0.95 \frac{MSY}{0.5M} \quad (1)$$

$$M \approx F_{MSY}, \quad MSY \approx 0.9C_{max}$$

여기서 C_{max} 는 평형최고어획량으로써 각 분류군별 연도별 어획량 추세를 고려하여 평형최고어획량 5개년 평균값을 사용하였다.

바다포유류의 경우 동해의 우점종인 밍크고래의 목시조사 (sighting survey) 결과를 사용하여 동해의 밍크고래 자원의 조사면적당 개체수인 밀도 (individuals/km²) 자료에 밍크고래의 평균 개체중량을 곱하여 단위면적당 생체량을 추정하여 사용하였다 (Park et al., 2009).

바다새의 경우에는 사용가능한 자료가 부족하여 고래류 자원 연구의 일환으로 수행된 목시조사에 의한 바다새 분포 양상 조사자료를 사용하였다. 전체 조사면적당 조류의 발견율 (birds/km²) 자료에 종다양도지수 (dominance index)가 90% 이상인 우점종의 평균 개체중량을 곱하여 단위면적당 생체량을 추정하여 사용하였다 (Kim et al., 2011).

1.1.3.2. 생산량/생체량 (production to biomass, P/B) 비

생산량/생체량 (P/B) 비는 생산량을 생체량으로 나누어 계산하거나, 만약 P와 B 중에 하나의 추정이 불가능한 경우에는 생산량과 생체량 간의 관계를 이용하여 아래의 식들에 의해 추정할 수 있다.

- 회전율 (T: turnover ratio) 이용 : $P/\bar{B} = T$ (Waters, 1969)
- 무척추동물의 경우 : $P/B = 0.65 \times M - 0.37$ (M: body mass, kcal)
(Banse and Mosher, 1980)
- 생산량이 체장과 관계없는 생물의 경우 : $P/B = T/10$
(T : annual mean temperature, °C)

(Johnson and Brinkhurst, 1971)

또한, 평형상태 ($dB/dt = 0$)에서는 아래와 같이 순간전사망계수 (Z)가 P/B값으로 사용될 수 있다 (Allen, 1971).

$$P/B = Z \quad (2)$$

위 식은 평형상태를 가정한 것으로, 일반적으로 생태계는 평형상태가 아니므로 성장률을 이용하여 다음 식으로 추정할 수 있다.

$$P/B = G \quad (3)$$

다만, 국내에는 이와 관련된 논문이 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).

1.1.3.3. 섭식량/생체량 (consumption to biomass, Q/B) 비

섭식량/생체량 (Q/B) 비는 생물의 단위 생체량당 먹이 섭식량으로 위내 용물 분석에 의해 구한 연간 섭식량 (Q)을 생체량 (B)으로 나눈 비로, 생물 군 구성종들의 생체량으로 가중평균해서 추정한다. 하지만 국내에는 이와 관련된 논문이 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).

1.1.3.4. 먹이조성 (diet composition, DC)

먹이조성은 생물군간의 피식-포식 관계를 나타내는 것으로, DC_{ji} 는 포식자 j 가 섭식한 먹이 중에서 피식자 i 가 차지하는 부분이다. 즉,

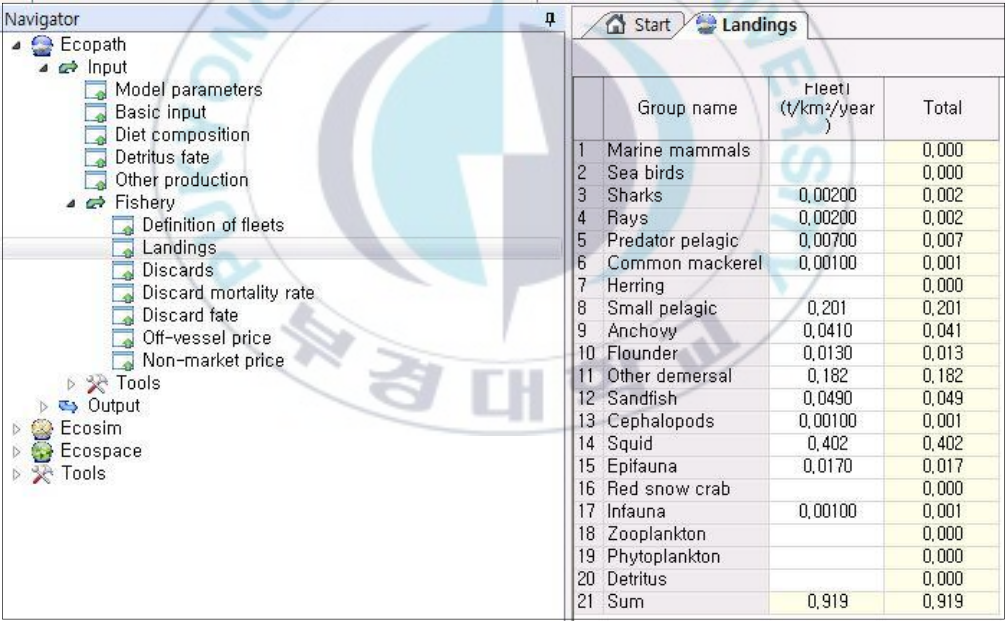
$$DC_{ji} = \frac{Q_{ji}}{Q_j}, \quad \sum_{i=1}^k DC_{ji} = 1 \quad (4)$$

여기서, Q_j 는 생물 j 의 시간당 총섭식량이고, Q_{ji} 는 포식자 j 에 의해 섭식

된 피식자 i 의 양이다. 먹이조성에 관한 자료는 각종 문헌 및 보고서를 참조하여 먹이 중요도에 따라 가중치 (1~5)를 주었다 (Alias, 2003; Mackinson and Daskalov, 2007; Lee et al., 2002; Mustafa, 2003; Tamura and Fujise, 2002). 그리고 분류군별 구성종들의 생체량으로 가중평균한 분류군별 대표어종의 먹이조성 자료를 분석에 사용하였다 (Table 8).

1.1.3.5. 어획량(catch, C)

어획량은 통계청의 1966~1968년 3개년 강원도와 경상북도의 시도별 어획량 평균값을 사용하였다 (Fig. 5).



	Group name	Fleet1 (t/km ² /year)	Total
1	Marine mammals		0.000
2	Sea birds		0.000
3	Sharks	0.00200	0.002
4	Rays	0.00200	0.002
5	Predator pelagic	0.00700	0.007
6	Common mackerel	0.00100	0.001
7	Herring		0.000
8	Small pelagic	0.201	0.201
9	Anchovy	0.0410	0.041
10	Flounder	0.0130	0.013
11	Other demersal	0.182	0.182
12	Sandfish	0.0490	0.049
13	Cephalopods	0.00100	0.001
14	Squid	0.402	0.402
15	Epifauna	0.0170	0.017
16	Red snow crab		0.000
17	Infauna	0.00100	0.001
18	Zooplankton		0.000
19	Phytoplankton		0.000
20	Detritus		0.000
21	Sum	0.919	0.919

Fig. 5. Input screen for catch in the Ecopath model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea.

1.1.4. 생태계 구조 분석

생태계 구조를 분석하기 위해 Ecopath 모델에 의한 생태계 특성치를 기

초로 구성생물들의 시간에 따른 변동을 분석할 수 있는 생태계 역학 모델 (Ecosim module of Ecopath)을 사용하였다 (Pauly et al., 2000). 이 방법은 질량균형 모델 (mass-balanced model)을 사용하여 역학 시뮬레이션과 평형 상태의 변화를 분석한다.

만약 대상생태계 내 구성생물들의 이입량과 이출량이 같고 평형상태라 가정하면, Ecopath에서의 질량균형 모델은 (i)의 생산량 = (i)의 어획량 + 포식자에 의한 (i)의 소비량 + (i)의 기타 사망량으로 정의된다. 여기서 i 는 특정 환경, 특정 시간의 시작과 끝까지 동일한 상태를 가지는 생태계 내의 특정그룹 (단일 종 또는 두 종 이상으로 구성)이다. 이 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_i \cdot (P/B)_i = Y_i + \sum_{j=1}^n B_j \cdot (Q/B)_j DC_{ji} + M_0 B_i \quad (5)$$

여기서, B_i 는 특정 기간 동안 i 의 생체량이다. $(P/B)_i$ 는 평형상태 하에서 순간전사망계수 (Z_i)와 같은 i 의 생산량/생체량 비이다 (Allen, 1971). Y_i 는 i 의 어획량이고, B_j 는 소비자 혹은 포식자의 생체량이다. $(Q/B)_j$ 는 소비자 j 의 단위 생체량당 먹이 소비량이고, DC_{ji} 는 j 의 먹이에서 i 가 차지하는 부분 (j 가 i 를 먹지 않을 때, $DC_{ji} = 0$)이다. 그러므로 특정기간 동안 포식자 j 가 피식자 i 를 섭취한 총 섭취량 (Q_{ji})은 $Q_{ji} = B_j (Q/B)_j DC_{ji}$ 으로 나타낼 수 있다. M_0 는 어획과 섭식에 의한 사망을 제외한 기타사망계수이다.

식 (5)를 다시 표현하면,

$$0 = B_i \cdot (P/B)_i - Y_i - \sum_{j=1}^n Q_{ji} - M_0 B_i \quad (6)$$

와 같다. Ecopath에서는 기초 생산자를 제외하고 $B_i \cdot (P/B)_i$ 를 그룹 j 에 의해 섭식된 먹이량 ($\sum Q_{ji}$)과 성장효율 (g_i)과의 곱으로 계산한다. 즉, 소비자 j 로의 영향흐름 Q_{ji} 는 $B_i \cdot (P/B)_i = g_i \sum Q_{ji}$ 이 만족되도록 계산되어진다.

식 (6)을 역학 모델로 바꾸기 위해서는, 식 (6)의 좌변을 생체량 변화율인 dB_i/dt 로 나타내고, 기초생산자 그룹은 생체량 B_i 에 따르는 $(P/B)_i$ 의 변화를 예측할 수 있도록 관계식을 제공해야 한다. Y_i 는 시간에 대한 변화율인 어획율 (H_i)로 나타내면, $H_i = F_i \cdot B_i$ 로 나타낼 수 있고, 여기서 F 는 순간어획사망계수이다. 고정된 섭식량 Q_{ji} 는 생체량 B_i 와 B_j 의 변화에 따라 섭식량이 어떻게 변하는지를 예측해 주는 관계식으로 대치해야 한다. 식 (6)은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dB_i/dt = f(B) - F_i B_i - \sum_{j=0}^n C_{ij} (B_i, B_j) - M_0 B_i \quad (7)$$

여기서, i 가 기초생산자라면 $f(B)$ 는 B_i 의 함수가 되고, 만약 소비자라면 $f(B) = g_i \sum C_{ij} \cdot (B_i, B_j)$ 가 된다. 여기서, $C_{ij} (B_i, B_j)$ 는 B_i 와 B_j 로부터 Q_{ji} 를 예측하는데 사용되는 함수이다. 만약 $f(B)$ 와 $C_{ij} (B_i, B_j)$ 함수를 알 수 있다면 식 (7)은 시간에 따르는 F_i 로 적분될 수 있다.

1.1.5. 어획대상 환경수용량 추정

본 연구에서는 동해에 서식하는 어획대상 수산생물 중 어획개시 전의 전체 자원량을 어획대상 환경수용량 (exploitable carrying capacity, ECC) 또는 처녀자원량으로 정의하였다. 따라서 Ecosim에서 어획사망계수 (F_i)가 0일 때

분류군별 자원량을 시뮬레이션하여 일정한 값으로 수렴할 때의 값을 어획 대상 환경수용량으로 계산하였다. 여기서, 바다새, 바다포유류, 동물플랑크톤, 식물플랑크톤 등 비어획대상 생물 분류군은 제외하였다.

1.1.6. 잠재생산량 추정

생태계 분석법에 의한 잠재생산량 (potential yield, PY)은 아래와 같이 Gulland (1971) 가정을 이용하여 추정하였다.

$$PY = 0.5MB_0 \quad (8)$$

1.2. 생산량 기반 분석법

생산량 분석법에 의한 동해의 잠재생산량 추정방법에는 세 가지가 있다. 첫째, 동해 전체 어획대상 어획량과 어획노력량 자료만을 변수로 하여 잉여생산량모델 (Fox, ASPIC, ME 모델)로 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 통합생산량 분석법 (holistic production method, HPM), 둘째, 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 개체군생산량 분석법 (population production method, PPM), 셋째, 어업별로 사용가능한 자료에 따라 잉여생산량 모델을 적용하여 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 어업생산량 분석법 (fishery production method, FPM)이다.

1.2.1. 통합생산량 분석법 (holistic production method, HPM)

1.2.1.1. 잉여생산량 모델의 적용

통합생산량 분석법에서 사용된 잉여생산량 모델은 어획량과 어획노력량 자료만을 사용하여 자원의 잉여생산량 변화를 추정하여 최대지속적생산량

(maximum sustainable yield, MSY)을 구하는 방법으로써 자원평가에 자주 사용되고 있다 (Zhang, 2010).

본 연구에서는 평형 잉여생산량모델인 Fox모델과 비평형 잉여생산량모델인 ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariate)모델 및 최대엔트로피 (Maximum Entropy, ME) 모델을 사용하여 잠재생산량을 추정하였다. 본 연구에서 환경수용량 (K)은 어획대상 환경수용량 (ECC)으로, 최대지속적생산량 (MSY)은 잠재생산량 (PY)으로, 최대지속적생산량 (MSY)을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{MSY})은 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY})으로, 최대지속적생산량 (MSY)시 어획노력량 (f_{MSY})은 잠재생산량 시 어획노력량 (f_{PY})으로 간주하였다.

Fox 모델

평형 잉여생산량모델인 Fox 모델은 Gompertz 성장식으로 자원의 생체량 변화율을 나타내므로 식 (9)의 미분방정식을 기초로 하고 있다.

$$\frac{dB}{dt} = rB(\ln B_{\infty} - \ln B) - qfB \quad (9)$$

어획에 의한 자원의 감소가 자원의 자연 증가와 같게 되는 경우를 평형상태라 하고, 이 때의 연간어획량은 식 (10)과 같다.

$$Y^* = rB^*[\ln B_{\infty} - \ln B^*] \quad (10)$$

여기서, $Y^* = qfB^*$, $B^* = Y^*/qf = U^*/q$ 이다. 이를 어획노력량 (f)과 단위노력당 어획량 (CPUE)의 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U^* = U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) \quad (11)$$

$$\text{혹은 } Y^* = U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right)f \quad (12)$$

Fox 모델에 의한 PY를 추정하기 위해 위의 관계식을 이용하여 선형회귀 분석을 하였다. 여기서, U^* 는 평형 CPUE이다. 매개변수를 추정하기 위해 식 (11)에 자연대수를 취하여 선형화하면 식 (13)과 같다.

$$U^* = U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) \quad (13)$$

여기서, Y 는 $\ln U^*$, X 는 f , 회귀상수인 Y 절편 a 는 $\ln U_{\infty}$, 기울기 b 는 $-q/r$ 이다. 식 (12)를 f 에 대하여 미분하고 식 (14)와 같이 잠재생산량을 추정하였다.

$$PY = Y^* = \frac{U_{\infty} r}{eq} \quad (14)$$

ASPIC 모델

비평형 잉여생산량모델인 ASPIC 모델은 다음의 로지스틱 성장모델을 기초로 하고 있다.

$$\frac{dB_t}{dt} = (r - F_t)B_t - \frac{r}{K}B_t^2 \quad (15)$$

여기서, B_t 는 시간 t 에서의 자원량, r 은 내적자연증가율, K 는 어획대상 환경수용량 (ECC)이다. 식 (15)는 시간에 대한 자원량식이며, $\alpha_t = r - F_t$, $\beta = r/K$ 라 하고 이를 생산량에 대한 식으로 나타내고 적분하여 식 (16)과 같이 잠재생산량을 추정하였다.

$$PY = \hat{Y}_\tau = \frac{F_\tau}{\beta} \ln \left[1 - \frac{\beta \hat{B}_\tau (1 - e^{\alpha_\tau})}{\alpha_\tau} \right] \quad (16)$$

ASPIC 모델은 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하기 위해 Fig. 6과 같이 ASPIC 프로그램의 입력화면에 초기값으로 최대지속적생산량 ($MSY = PY$), 어획대상 환경수용량 ($K = ECC$), 어획대상 환경수용량에 대한 분석 시작 시점시의 자원량의 비 (B_1/K), 어획능률 (q)이 사용된다. ASPIC 모델은 Schaefer 모델을 기본으로 하고 있기 때문에 B_1/K 는 0.5로 설정하였다. MSY 초기값은 ASPIC 매뉴얼상의 권고기준에 따라 추정에 사용된 자료에서 최고 어획량의 절반수준으로 가정하여 설정하였고, K 초기값은 ASPIC 매뉴얼상의 권고기준인 최고 어획량의 2~20배 수준에 근거하여 본 연구에서는 최고 어획량의 5배 수준으로 설정하였다 (Prager, 2013). MSY 와 K 의 최소값은 설정된 초기값의 절반수준으로 설정하였고, 최대값은 초기값의 2배로 설정하였다. $q = CPUE/B$ 이므로 최고 어획량의 5배를 자원량으로 간주하여, 최고 $CPUE$ 를 최고 어획량의 5배로 나눈 값으로 설정하였다 (Prager, 2013).

General Data		Model Specification		Advanced Options		Series Selection		Series Data	
Parameter Starting Guesses and Estimation									
		Starting Guesses		Constraints		Estimate ?			
				Min	Max				
B1/ K	0.5000					☐ Check any Parameters to be Estimated (or ☒ Uncheck to Leave Constant at Starting ☒ Guess)			
MSY	1.3751E+05	6.8752E+04		2.7501E+05					
K	1.3750E+06	6.8752E+05		2.7501E+06					
		Generate Default Values		Restore User Input Values					
Convergence Criteria									
C.C. for Simplex Optimization		1.0000E-08							
C.C. for Restarts		3.0000E-08							
Number of Restarts		8							
C.C. for Estimating F		1.0000E-04							
Additional Parameters									
Maximum F Allowed During Estimation		1.0000							
Random Number Seed		8254199							
Penalty on B1 > K									
☒ ON ☐ OFF		50.0							
General Data		Model Specification		Advanced Options		Series Selection		Series Data	
Series Parameters									
Series	Series Selected	Series Title	Series Type	Estimate q	Starting Guess for q	Statistical Weight for Series			
1	☒	Series 1	Effort and Catch	☐	4.0750E-06	1.0000E+00			

Fig. 6. Input screen of the ASPIC model for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea.

이렇게 모델 시뮬레이션을 위한 기본 입력자료들을 설정하여 프로그램에 입력하고 모델을 실행 (Menu-Run-Run ASPIC Model)시키면 Fig. 7과 같이 시뮬레이션 결과보고서 파일 (Menu-View-View Aspic Report File)이 생성된다. 추정된 어획대상 환경수용량과 잠재생산량은 결과보고서의 'Model parameter estimates'에서 $K (=ECC)$, $MSY (=PY)$ 값으로 산출되며, 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량은 'Management and derived parameter estimates'에서 $B_{MSY} (=B_{PY})$ 값으로 산출된다.

MODEL PARAMETER ESTIMATES (NON-BOOTSTRAPPED)									
Parameter		Estimate	User/pgm guess	2nd guess	Estimated	User guess			
B1/K	Starting relative biomass (in 1966)	5.000E-01	5.000E-01	8.271E-01	0	1			
MSY	Maximum sustainable yield	2.140E+05	1.375E+05	1.661E+05	1	1			
K	Maximum population size	1.033E+06	1.375E+06	9.964E+05	1	1			
phi	Shape of production curve (Bmsy/K)	0.5000	0.5000	-----	0	1			
----- Catchability Coefficients by Data Series -----									
q(1)	Series 1	4.075E-06	4.075E-06	3.871E-04	0	1			
MANAGEMENT and DERIVED PARAMETER ESTIMATES (NON-BOOTSTRAPPED)									
Parameter		Estimate	Logistic formula		General formula				
MSY	Maximum sustainable yield	2.140E+05	-----		-----				
Bmsy	Stock biomass giving MSY	5.167E+05	K/2		K*n**((1/(1-n)))				
Fmsy	Fishing mortality rate at MSY	4.141E-01	MSY/Bmsy		MSY/Bmsy				
n	Exponent in production function	2.0000	-----		-----				
g	Fletcher's gamma	4.000E+00	-----		[n**((n/(n-1)))]/[n-1]				
B./Bmsy	Ratio: B(2017)/Bmsy	8.780E-01	-----		-----				
F./Fmsy	Ratio: F(2016)/Fmsy	9.229E-01	-----		-----				
Fmsy/F.	Ratio: Fmsy/F(2016)	1.084E+00	-----		-----				
Y.(Fmsy)	Approx. yield available at Fmsy in 2017	1.922E+05	MSY*B./Bmsy		MSY*B./Bmsy				
Ye.	...as proportion of MSY	8.980E-01	-----		-----				
Ye.	Equilibrium yield available in 2017	2.108E+05	4*MSY*(B/(K-(B/K)**2))		g*MSY*(B/(K-(B/K)**n))				
Ye.	...as proportion of MSY	9.851E-01	-----		-----				
----- Fishing effort rate at MSY in units of each CE or CC series -----									
fmsy(1)	Series 1	1.016E+05	Fmsy/q(1)		Fmsy/q(1)				
qKapenta	Series 1	1.016E+05	-----		-----				
ESTIMATED POPULATION TRAJECTORY (NON-BOOTSTRAPPED)									
Obs	Year or ID	Estimated total F mort	Estimated starting biomass	Estimated average biomass	Observed total yield	Model total yield	Estimated surplus production	Ratio of F mort to Fmsy	Ratio of biomass to Bmsy
1	1966	0.328	5.167E+05	5.367E+05	1.758E+05	1.758E+05	2.136E+05	7.910E-01	1.000E+00
2	1967	0.224	5.545E+05	5.946E+05	1.330E+05	1.330E+05	2.087E+05	5.400E-01	1.073E+00
3	1968	0.330	6.303E+05	6.286E+05	2.072E+05	2.072E+05	2.040E+05	7.959E-01	1.220E+00
4	1969	0.224	6.271E+05	6.548E+05	1.469E+05	1.469E+05	1.955E+05	5.417E-01	1.214E+00
5	1970	0.246	6.787E+05	6.898E+05	1.696E+05	1.696E+05	1.900E+05	5.938E-01	1.313E+00
6	1971	0.195	6.991E+05	7.208E+05	1.406E+05	1.406E+05	1.805E+05	4.709E-01	1.353E+00
7	1972	0.243	7.390E+05	7.389E+05	1.789E+05	1.789E+05	1.751E+05	5.863E-01	1.430E+00
8	1973	0.266	7.352E+05	7.271E+05	1.933E+05	1.933E+05	1.785E+05	6.418E-01	1.423E+00
9	1974	0.266	7.205E+05	7.160E+05	1.904E+05	1.904E+05	1.822E+05	6.420E-01	1.394E+00
10	1975	0.245	7.123E+05	7.160E+05	1.753E+05	1.753E+05	1.822E+05	5.912E-01	1.378E+00
11	1976	0.380	7.191E+05	6.819E+05	2.591E+05	2.591E+05	1.918E+05	9.175E-01	1.392E+00
12	1977	0.436	6.519E+05	6.171E+05	2.689E+05	2.689E+05	2.056E+05	1.052E+00	1.262E+00
13	1978	0.437	5.886E+05	5.687E+05	2.486E+05	2.486E+05	2.117E+05	1.056E+00	1.139E+00
14	1979	0.429	5.516E+05	5.416E+05	2.325E+05	2.325E+05	2.135E+05	1.037E+00	1.066E+00
15	1980	0.478	5.328E+05	5.198E+05	2.453E+05	2.453E+05	2.139E+05	1.146E+00	1.031E+00
16	1981	0.586	5.014E+05	4.677E+05	2.739E+05	2.739E+05	2.118E+05	1.414E+00	9.703E-01
17	1982	0.687	4.393E+05	4.002E+05	2.750E+05	2.750E+05	2.027E+05	1.660E+00	8.501E-01
18	1983	0.512	3.670E+05	3.707E+05	1.898E+05	1.898E+05	1.969E+05	1.237E+00	7.103E-01
19	1984	0.600	3.741E+05	3.622E+05	2.173E+05	2.173E+05	1.948E+05	1.449E+00	7.239E-01
20	1985	0.715	3.515E+05	3.258E+05	2.330E+05	2.330E+05	1.846E+05	1.727E+00	6.805E-01
21	1986	0.637	3.033E+05	2.962E+05	1.885E+05	1.885E+05	1.750E+05	1.537E+00	5.869E-01
22	1987	0.624	2.897E+05	2.860E+05	1.784E+05	1.784E+05	1.713E+05	1.506E+00	5.607E-01
23	1988	0.518	2.827E+05	2.940E+05	1.522E+05	1.522E+05	1.742E+05	1.250E+00	5.470E-01
24	1989	0.489	3.047E+05	3.184E+05	1.557E+05	1.557E+05	1.824E+05	1.181E+00	5.896E-01
25	1990	0.483	3.313E+05	3.438E+05	1.661E+05	1.661E+05	1.899E+05	1.167E+00	6.412E-01
26	1991	0.470	3.552E+05	3.673E+05	1.726E+05	1.726E+05	1.961E+05	1.135E+00	6.873E-01
27	1992	0.406	3.786E+05	3.996E+05	1.623E+05	1.623E+05	2.029E+05	9.806E-01	7.326E-01
28	1993	0.465	4.192E+05	4.242E+05	1.975E+05	1.975E+05	2.071E+05	1.124E+00	8.112E-01
29	1994	0.453	4.288E+05	4.349E+05	1.971E+05	1.971E+05	2.086E+05	1.095E+00	8.239E-01
30	1995	0.520	4.403E+05	4.316E+05	2.245E+05	2.245E+05	2.082E+05	1.256E+00	8.521E-01

Fig. 7. Result screen for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program.

최대엔트로피 (ME) 모델

비평형 잉여생산량모델인 최대엔트로피 (ME) 모델은 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하기 위해 단순형 생산함수형태의 식 (17)과 Verhulst (1838)의 로지스틱 함수 식 (18)을 사용하였다.

$$c_t = qE_t B_t \exp(\epsilon_t) \quad (17)$$

$$B_{t+1} = [B_t + rB_t(1 - \frac{B_t}{K}) - C_t] \exp(\mu_t) \quad (18)$$

여기서, C_t 는 t 년의 총 어획량, q 는 어획능률, E_t 는 t 년의 어획노력량, B_t 는 t 년의 자원량, r 은 내적자연증가율, K 는 어획대상 환경수용량 (ECC), $rB_t(1 - B_t/K)$ 는 자연증가량, ϵ_t 는 t 년의 어획량에 대한 오차, μ_t 는 t 년의 자원량에 대한 오차이다. ME 모델을 이용하여 파라미터인 q , r , ϵ_t , μ_t , $K(=ECC)$ 를 추정하는 식은 다음과 같다.

$$q = p_1^q \cdot 0 + p_2^q \cdot h/2 + p_3^q \cdot h \quad (19)$$

$$r = p_1^r \cdot 0 + p_2^r \cdot 0.375 + p_3^r \cdot 0.75 \quad (20)$$

$$\epsilon_t = p_1^\epsilon \cdot (-0.2) + p_2^\epsilon \cdot 0 + p_3^\epsilon \cdot (0.2) \quad (21)$$

$$\mu_t = p_1^\mu \cdot (-0.2) + p_2^\mu \cdot 0 + p_3^\mu \cdot (0.2) \quad (22)$$

또한, 어획대상 환경수용량 ($K=ECC$)은 아래의 식 (23)을 사용하여 추정할 수 있다.

$$ECC = p_1^{ECC} \cdot 0 + p_2^{ECC} \cdot h/2 + p_3^{ECC} \cdot h \quad (23)$$

여기서, h 는 추정하고자 하는 각 파라미터의 확률 p 의 최대범위값을 나타낸다. $q = C/(B \cdot f)$ 의 관계식에 의해 q 의 최대범위 (h)는 $q_{\max} = C_{\max}/(2 \cdot C_{\min} \cdot f_{\min})$ 으로 가정하여 동해의 경우 $q_{\max}$ 는 2.95E-05로 계산되어 설정하였다. r 은 일반적으로 $r/2 \approx F_{PY} (0.25 \leq F_{PY} \leq 0.5)$ 의 관계에 의해 최대범위를 1까지 간주할 수 있으나, 어류의 내적자연증가율 (r)은 0.43 수준이라는 Cortes (2016)의 연구결과에 근거하여 본 연구에서는 r 의 최대범위를 그 2배 수준에 가까운 0.75로 설정하였다. ECC의 최대범위 (h)는 ASPIC 모델에서와 같이 Gulland (1971) 가정에 근거하여 PY 초기값으로 가정한 최고 어획량을 자연사망계수의 절반 수준으로 나눈 PY의 6.45배에 1.5배를 곱해준 9.68배로 설정하였고, 자원량 범위는 ECC 범위와 동일한 값으로 가정하였고, 오차항 범위는 $\pm 20\%$ 내외로 설정하기 위해 $e = 0.2$ 로 설정하였다.

이렇게 모델 시뮬레이션을 위한 기본 입력자료들을 설정하여 GAMS (General Algebraic Modeling System)를 이용하여 확률의 조건을 만족하는 식 (24)에 의해 파라미터를 추정하였다. 추정에 사용된 GAMS 프로그램의 코딩자료는 Appendix 2를 참조하기 바람.

$$\text{Max} \left[- \sum_{j=1}^3 p_j^g \ln p_j^g - \sum_t \sum_{j=1}^3 p_{tj}^l \ln p_{tj}^l \right], \quad g = q, r, ECC \quad l = B, \varepsilon, \mu \quad (24)$$

GAMS 프로그램에 코딩자료를 입력하고 모델을 실행 (Menu-File-Run)시키면 Fig. 8과 같이 시뮬레이션 결과가 생성된다. 어획대상 환경수용량과 잠재생산량은 결과화면 좌측 메뉴의 'Display-P'와 'Display-S'를 클릭하면 생성되는 확률치 결과를 이용하여 추정된다.

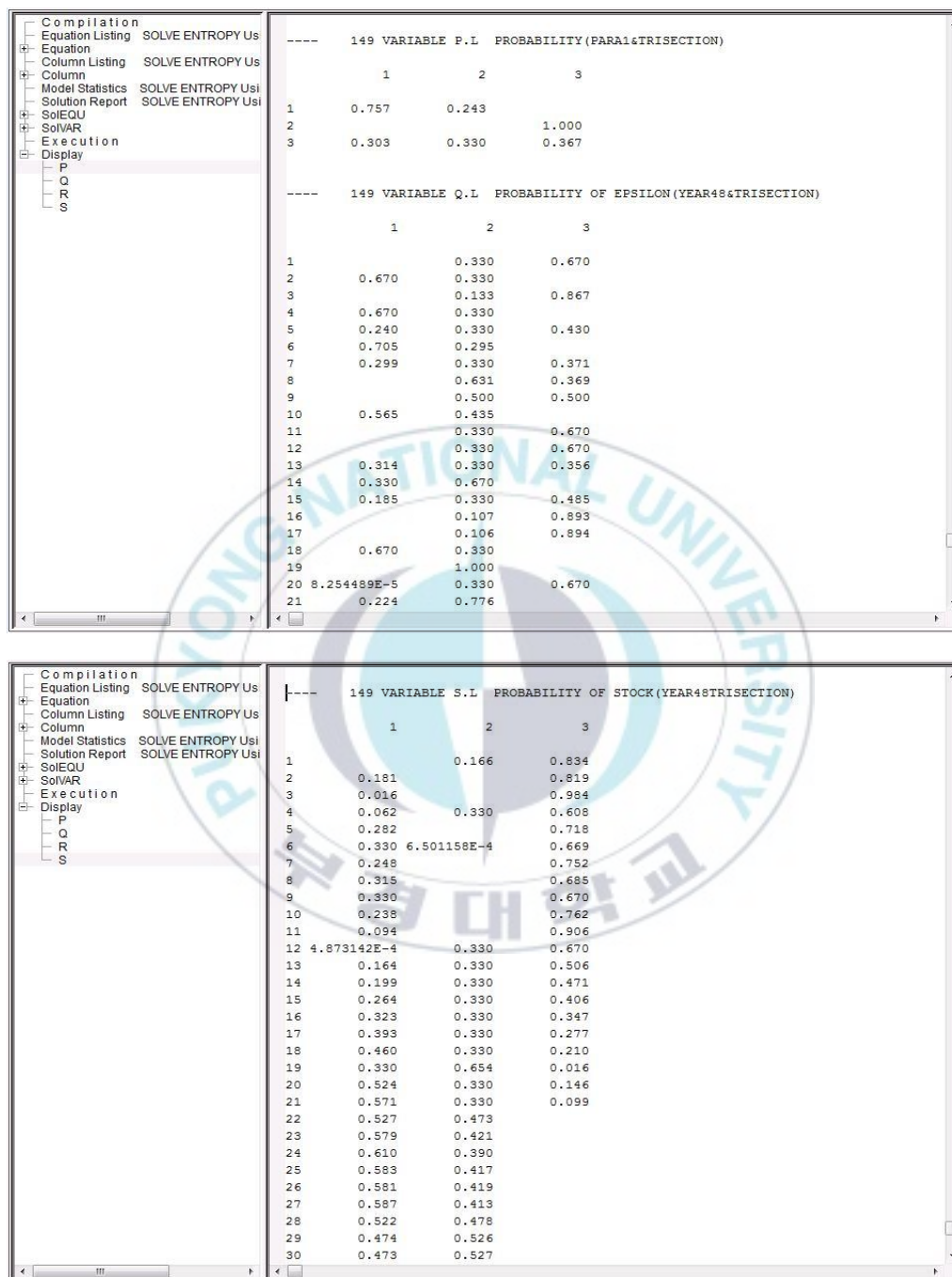


Fig. 8. Result screen for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the GAMS program using ME model.

Fig. 8의 상단 그림 첫 줄의 '149 VARIABLE P. L PROBABILITY'로 산출된 결과의 1~3행은 파라미터 q , r , K ($=ECC$)의 확률치를 나타내며, 1~3열은 각 확률치의 범위 ($p_1 \sim p_3$)를 나타낸다.

	1	2	3
1 (q)	p_1^q	p_2^q	p_3^q
2 (r)	p_1^r	p_2^r	p_3^r
3 (ECC)	p_1^{ECC}	p_2^{ECC}	p_3^{ECC}

예를 들면, 동해의 경우 q 확률치가 $p_1^q=0.757$, $p_2^q=0.243$, $p_3^q=0$ 으로 추정되어 모델 초기값으로 설정한 q 확률치의 범위 0, $h/2=1.48E-05$, h (q_{max})= $2.95E-05$ 와 각각 곱해서 세 개의 항을 더하면 q 는 $3.59E-06$ 으로 계산되었다. r 확률치는 $p_1^r=0$, $p_2^r=0$, $p_3^r=1.000$ 으로 추정되어 모델 초기값으로 설정한 r 확률치의 범위 0, 0.375, 0.75와 각각 곱해서 세 개의 항을 더하면 r 은 0.750으로 계산되었다. ECC 확률치가 $p_1^{ECC}=0.303$, $p_2^{ECC}=0.330$, $p_3^{ECC}=0.367$ 로 추정되어 모델 초기값으로 설정한 ECC 확률치의 범위 0, $h/2=665,334mt$, $h=1,330,689mt$ (최고 어획량의 9.68배)와 각각 곱해서 세 개의 항을 더하면 동해의 ECC는 1,415,853mt으로 추정되었다.

Fig. 8의 하단 그림 첫 줄의 '149 VARIABLE S. L PROBABILITY OF STOCK'로 산출된 결과는 입력자료 51개년에 대한 연도별 자원량 확률치이며, 어획대상 환경수용량이 자원량 수준이라 가정하고 식 (23)을 이용하여 연도별 자원량을 추정하였다. 예를 들면, 1966년의 자원량 확률치는 0, 0.166, 0.834로 추정되어 초기값으로 설정한 자원량 범위 0, $h/2=665,334mt$, $h=1,330,689mt$ 와 각각 곱해서 세 개의 항을 더하면 동해의 1966년 자원량

은 1,220,242mt으로 추정되었다.

모델 시뮬레이션을 통해 추정된 파라미터 r , 어획대상 환경수용량 ($K=ECC$)을 나타내는 식 (20), 식 (23)을 이용하여 다음과 같이 잠재생산량을 추정하였다.

$$PY = \frac{r \cdot ECC}{4} \quad (25)$$

잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY})은 엑셀의 해찾기 기능으로 연도별 자원량을 나타내는 식 (18)에서 잉여생산량과 관련된 $rB_t(1-B_t/K)$ 값이 최대가 될 때의 B_t 값으로 추정하였다.

1.2.1.2. 모델 검정

자료의 적합도를 평가하기 위해 각 모델에 대한 결정계수 (R^2)를 계산하였으며, 아래의 식과 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (z_i - \hat{z}_i)^2}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2}; \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_i z_i \quad (26)$$

여기서, z_i 는 실제 CPUE, $\hat{z}_i$ 는 모델에 의해 예측된 CPUE, i 는 연도, n 은 자료의 수이다.

각 모델들에 의한 추정치와 실제 자료의 정확도를 평가하기 위해 오차의 제곱 평균 제곱근 (root mean square error, RMSE)과 Theil의 U 통계량 (U) (1966)을 아래의 식과 같이 계산하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2} \quad (27)$$

여기서, $z(x_i)$ 는 x_i 에서의 실제 CPUE, $\hat{z}(x_i)$ 는 x_i 에서의 모델에 의해 예측된 CPUE를 나타낸다.

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\hat{z}_{i+1} - z_{i+1}}{z_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{z_{i+1} - z_i}{z_i} \right)^2}} \quad (28)$$

여기서, $\hat{z}$ 는 모델에 의해 예측된 CPUE, z 는 실제 CPUE를 나타낸다.

자료의 정확도를 나타내는 RMSE와 U 통계량은 1 이하일 때 모델에 의한 추정치가 실제 자료를 잘 나타낸다고 볼 수 있으며, 값이 작을수록 추정치가 실제 자료와 더 잘 맞음을 의미한다.

1.2.1.3. 잠재생산량의 신뢰구간 추정

본 연구에서는 통합생산량 분석법에 의한 동해의 잠재생산량 (PY) 추정치와 실제 자료의 정밀도를 평가하고 신뢰도를 검정하기 위해 추정치의 95% 신뢰구간 (confidence interval)을 추정하였다. 추정치의 95% 신뢰한계 하한점과 상한점의 사이를 신뢰구간으로 계산하였고, 잠재생산량 추정에 사용된 잉여생산량모델별로 신뢰한계 하한점과 상한점은 다음과 같이 추정하였다.

Fox 모델

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

$$PY = \frac{U_{\infty} r}{eq} = -\frac{e^{\alpha-1}}{\beta} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}(PY) &= \left(\frac{\partial PY}{\partial \alpha}\right)^2 \cdot \text{Var}(\alpha) + \left(\frac{\partial PY}{\partial \beta}\right)^2 \cdot \text{Var}(\beta) + 2 \left(\frac{\partial PY}{\partial \alpha}\right) \left(\frac{\partial PY}{\partial \beta}\right) \cdot \text{Cov}(\alpha, \beta) \\ &= \left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)^2 \cdot \text{Var}(\alpha) + \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right)^2 \cdot \text{Var}(\beta) + 2 \left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right) \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right) \cdot \text{Cov}(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (30)$$

$$SE(PY) = \sqrt{\left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right)^2 \cdot \text{Var}(\alpha) + \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right)^2 \cdot \text{Var}(\beta) + 2 \left(-\frac{e^{\alpha-1}}{\beta}\right) \left(\frac{e^{\alpha-1}}{\beta^2}\right) \cdot \text{Cov}(\alpha, \beta)} \quad (31)$$

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

$$95\% \text{ confidence interval of PY} = PY \pm 1.96 \cdot SE(PY) \quad (32)$$

ASPIC 모델

ASPIC 모델은 ECC와 PY 추정치의 95% 신뢰구간을 추정하기 위해 상용 프로그램 ASPIC의 프로그램 모드를 사용하였다 (Fig. 9). ASPIC의 BOT

모드는 부트스트랩 (Bootstrap) 방법을 적용하여 추정치의 95% 신뢰구간 추정이 가능하다.

Fig. 9. Setup screen for the Bootstrap method for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program.

무작위 함수를 바탕으로 하는 부트스트랩 방법은 표본자료를 무작위로 다시 추출하여 새로운 표본을 만드는 과정을 반복하여 모델 모수에 대한 신뢰구간을 추정하는 방법이다 (Hoyle and Cameron, 2003). 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 실행 (Menu-Run-Run ASPIC Model)시키면 Fig. 10과 같이 시뮬레이션 결과보고서 파일 (Menu-View-View Aspic Report File)이 생성

된다. 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.

Page 4

ESTIMATES FROM BOOTSTRAPPED ANALYSIS										
Param name	Point estimate	Estimated bias in pt estimate	Estimated relative bias	Bias-corrected approximate confidence limits				Inter-quartile range	Relative IQ range	
				80% lower	80% upper	95% lower	95% upper			
B1/K	5.000E-01	0.000E+00	0.00%	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	5.000E-01	0.000E+00	0.000	
K	1.033E+06	-5.121E+03	-0.50%	7.250E+05	1.131E+06	7.017E+05	1.177E+06	9.201E+04	0.089	
q(1)	4.075E-06	7.623E-21	0.00%	4.075E-06	4.075E-06	4.075E-06	4.075E-06	0.000E+00	0.000	
MSY	2.140E+05	6.578E+02	0.31%	2.110E+05	2.262E+05	2.100E+05	2.288E+05	2.643E+03	0.012	
Ve(2017)	2.108E+05	-1.082E+04	-5.13%	1.991E+05	2.151E+05	1.726E+05	2.172E+05	5.193E+03	0.025	
V.(Fmsy)	1.799E+05	-4.064E+03	-2.26%	1.799E+05	1.838E+05	1.788E+05	1.838E+05	2.558E+03	0.014	
Bmsy	5.167E+05	-2.561E+03	-0.50%	3.625E+05	5.654E+05	3.508E+05	5.887E+05	4.601E+04	0.089	
Fmsy	4.141E-01	1.172E-02	2.83%	3.722E-01	6.238E-01	3.563E-01	6.514E-01	4.194E-02	0.101	
fmsy(1)	1.016E+05	2.875E+03	2.83%	9.134E+04	1.531E+05	8.744E+04	1.599E+05	1.029E+04	0.101	
B./Bmsy	8.780E-01	8.506E-02	9.69%	5.705E-01	1.118E+00	4.819E-01	1.488E+00	2.774E-01	0.316	
F./Fmsy	9.229E-01	-3.168E-02	-3.43%	7.176E-01	1.371E+00	4.957E-01	1.598E+00	3.286E-01	0.356	
Ve./MSY	9.651E-01	-5.231E-02	-5.31%	8.958E-01	9.999E-01	7.610E-01	1.000E+00	3.308E-02	0.034	
INFORMATION FOR REPAST (Prager, Porch, Shertzer, & Caddy, 2003. NAJFM 23: 349-361)										
Unitless limit reference point in F (Fmsy/F.):				1.084						
CV of above (from bootstrap distribution):				0.3344						
NOTES ON BOOTSTRAPPED ESTIMATES:										
- Bootstrap results were computed from 1000 trials. - Results are conditional on bounds set on MSY and K in the input file. - All bootstrapped intervals are approximate. The statistical literature recommends using at least 1000 trials for accurate 95% intervals. The default 80% intervals used by ASPIC should require fewer trials for equivalent accuracy. Using at least 500 trials is recommended. - Bias estimates are typically of high variance and therefore may be misleading.										
Trials replaced for lack of convergence:				0				Trials replaced for MSY out of bounds:		0
Trials replaced for q out-of-bounds:				0						
Trials replaced for K out-of-bounds:				94				Residual-adjustment factor:		1.0202
Elapsed time: 0 hours, 2 minutes, 11 seconds.										

Fig. 10. Result screen for the Bootstrap method for estimation of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea in the ASPIC program.

최대엔트로피 모델

ME 모델은 모델 시뮬레이션을 위해 사용된 GAMS 프로그램에서 추정치의 95% 신뢰구간을 직접 추정할 수 없어서, 자료에서 얻어진 통계량의 표본오차를 비모수적으로 평가하는 Jackknife resampling 방법 (Tukey, 1958)으로 아래의 식과 같이 표준오차 (SE)를 계산하여 PY와 ECC 추정치

의 95% 신뢰한계의 하한점과 상한점을 추정하였다.

$$\hat{\theta}_j = n\theta - (n-1)\theta_j \quad (33)$$

$$m_{jack} = \frac{\sum \hat{\theta}_j}{n} \quad (34)$$

$$Var_{jack} = \frac{\sum (\hat{\theta}_j - m_{jack})^2}{(n-1)} \quad (35)$$

$$SE_{jack} = \sqrt{\frac{\sum (\hat{\theta}_j - m_{jack})^2}{(n-1)n}} \quad (36)$$

$$95\% \text{ confidence interval of PY} = \text{PY} \pm 1.96 \cdot SE \quad (37)$$

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.

1.2.1.4. 민감도 분석

통합생산량 분석법에서는 모델에 사용되는 입력자료의 변화에 따라 잠재 생산량 추정치가 얼마나 민감하게 변화하는지를 파악하기 위해 민감도 분석 (sensitivity analysis)을 실시하였다. 일반적으로 민감도 분석의 목적은 주요 변수에 대한 가정이 일정하게 변화할 때, 구하고자 하는 결과값이 얼마나 민감하게 반응하는가를 파악하는 것이다. 본 연구에서는 민감도 분석

을 통해 잉여생산량 모델에 사용되는 입력자료인 어획량과 어획노력량이 불확실한 경우, 어획량과 어획노력량이 변하면 잠재생산량 추정치가 얼마나 민감하게 변하는지를 파악하였다. 어획량과 어획노력량의 변화 정도를 설정하고, 아래의 식으로 민감도 지수 (sensitivity index, SI)를 계산하여 입력자료의 민감도를 판별하였다.

$$SI (\% \text{ change in PY}) = \frac{\text{Tested PY} - \text{Predicted PY}}{\text{Predicted PY}} \cdot 100 \quad (38)$$

여기서, 분모는 잠재생산량 추정치이고, 분자는 입력자료의 변화에 따른 잠재생산량 추정치의 변화량이다. 입력자료의 변화 정도는 5% 단위로 -20%~+20% 범위로 설정하였다.

1.2.2. 개체군생산량 분석법 (population production method, PPM)

본 연구에서는 어종별 잠재생산량 추정을 위해 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정하는 개체군생산량 분석법 (Kim, 2016)을 사용하였다.

동해 주요 어종은 최근 5개년 (2012~2016년)의 어종별 어획 비율 (KOSIS 국가통계포털)이 높은 순에서 어종별 잠재생산량 추정을 위해 이용가능한 자료 (어종별 어획량 및 어획노력량, 자원평가 문헌 추정치 등)의 수집 유무에 따라 동해 분포 주요 12어종을 선별하였다 (Table 11). 선별된 12어종은 살오징어, 붉은대게, 청어, 도루묵, 가자미, 문어, 방어, 복어, 삼치, 전갱이, 대게, 고등어이다.

1.2.2.1. 주요 어획대상 12어종에 대한 잠재생산량 추정

본 연구에서는 살오징어, 붉은대게, 청어, 도루묵, 가자미, 방어, 복어, 삼치, 전갱이, 대게, 고등어로 총 11어종에 대해서는 어종별 어획량과 CPUE 자료를 사용하여 '1.2.1.1. 잉여생산량 모델의 적용'과 같이 ME 모델로 한국 전체해역에 대한 어종별 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 직접 추정하였다. 그리고 한국 전체해역의 어종별 어획량에 대한 동해 어종별 어획량 비율을 이용하여 동해 연근해의 어종별 잠재생산량 ($PY_{E,s}$)과 어획대상 환경수용량 ($ECC_{E,s}$)을 아래의 식으로 추정하였다.

$$PY_{E,s} = PY_s \cdot \left(\frac{C_{E,s}}{C_{K,s}} \right) \quad (39)$$

$$ECC_{E,s} = ECC_s \cdot \left(\frac{C_{E,s}}{C_{K,s}} \right) \quad (40)$$

여기서, PY_s 는 한국 전체해역에 대한 s 어종의 잠재생산량, $C_{E,s}$ 는 동해에 대한 s 어종의 어획량, $C_{K,s}$ 는 한국 전체해역에 대한 s 어종의 어획량, ECC_s 는 한국 전체해역에 대한 s 어종의 어획대상 환경수용량이다.

ME 모델에 의한 추정을 위해 이용가능한 자료가 부족한 어종 (문어)에 대해서는 최근 5개년 (2012~2016년)에 대한 자원동향이 평형 및 증가를 나타내는 어종에 대해서는 생물학적 허용어획량 (allowable biological catch, ABC)을 잠재생산량으로 가정하였다. 여기서 ABC는 Zhang and Lee (2001)의 5단계 ABC 추정 시스템에 따라 추정하였다. 문어의 경우 이용가능한 정보수준이 연도별 어획량 자료이므로 5단계 정보수준에 따라 어획량에 큰 변화가 없었던 기간인 최근 5개년의 어획량 산술평균치의 75% 수준

으로 ABC를 추정하였다. 그리고 한국 전체해역의 어종별 어획량에 대한 동해 어종별 어획량 비율을 이용하여 동해 연근해의 어종별 잠재생산량 ($PY_{E,s}$)을 식 (39)와 같이 추정하였다. 어획대상 환경수용량은 처녀자원량 모델을 이용하여 역추정하였으며, 사용된 Gulland (1971)의 관계식은 다음과 같다.

$$MSY = 0.5MB_{\infty} \quad (41)$$

여기서, $MSY = PY$, $B_{\infty} \approx K \approx ECC$ 로 가정하여 아래의 식으로 어획대상 환경수용량을 역추정하였다.

$$B_{\infty,s} = 2 \cdot \frac{PY_s}{M_s} \quad (42)$$

여기서, PY_s 는 어종별 잠재생산량, M_s 는 어종별 순간자연사망계수이다. 어종별 순간자연사망계수 (M_s)는 Table 11의 생태학적 특성치 참고문헌에서 인용하였다.

1.2.2.2. 전체 어획대상에 대한 잠재생산량 추정

본 연구에서는 주요어종 이외의 어종 중에 연도별 어획량 자료만 있는 일부 어종의 경우 어종별 연도별 어획량 자료만을 입력자료로 사용하여 $r-K$ 관계에 의해 MSY를 추정할 수 있는 온라인 툴인 Catch-MSY 방법 (Martell and Froese, 2013)으로 어종별 MSY를 직접 추정하였다 (www.fishbase.org). 먼저, 온라인상의 툴박스에 어종별 연도별 어획량 자료를 입력한다. 다음 단계에서는 어종별 생물학적 정보로 내적증가율 (r),

자연사망계수 (M), 성장계수 (K)만 추가로 입력하고 Fishbase 홈페이지의 DB 자료를 기반으로 어종별 회복력 (resilience) 수준을 설정하면 어종별 잠재생산량이 자동적으로 추정된다.

동해 분포 주요 12어종 이외의 어종 중 잠재생산량과 어획대상 환경수용량 추정을 위해 이용가능한 자료가 부족한 어종에 대해서는 외삽의 방법을 사용하였다. 주요어종을 제외한 어종에 대하여 설정된 어종분류군은 가오리류 (Skates), 포식성 표층어류 (Predator pelagic), 소형 표층어류 (Small pelagic), 가자미류 (Flounder), 기타 저서어류 (Other demersal), 두족류 (Cephalopods), 표생동물 (Epifauna), 내생동물 (Infauna)로 총 8개의 그룹으로 설정하였다. 어종분류군의 기준어종은 추정된 주요 12어종 중 자원평가 자료의 신뢰도를 고려하여 선별하였다.

어종분류군별 주요어종 이외의 어종에 대한 잠재생산량은 아래의 식으로 추정하였다.

$$PY_{G,s} = C_{G,s} \cdot \left(\frac{PY_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (43)$$

여기서, $PY_{G,s}$ 는 그룹 G 의 s 어종에 대한 동해 잠재생산량, $PY_{G,std}$ 는 그룹 G 의 기준 어종 (standard species, std)의 동해 잠재생산량, $C_{G,s}$ 는 그룹 G 의 s 어종에 대한 동해 어획량 (2012~2016년 평균), $C_{G,std}$ 는 그룹 G 의 기준 어종 (std)의 동해 어획량 (2012~2016년 평균), G 는 어종군 그룹이다.

따라서, 동해 연근해 전체 어획대상 잠재생산량 (PY)은 아래의 식과 같다.

$$PY = \sum PY_{E,s} + \sum PY_{G,s} \quad (44)$$

어종분류군별 주요어종 이외의 어종에 대한 어획대상 환경수용량은 아래의 식으로 추정하였다.

$$ECC_{G,s} = C_{G,s} \cdot \left(\frac{ECC_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (45)$$

여기서, $ECC_{G,s}$ 는 그룹 G의 s어종에 대한 동해 어획대상 환경수용량, $ECC_{G,std}$ 는 그룹 G의 기준 어종 (standard species, std)의 동해 어획대상 환경수용량이다.

따라서, 동해 연근해 전체 어획대상 환경수용량 (ECC)은 아래의 식과 같다.

$$ECC = \sum ECC_{E,s} + \sum ECC_{G,s} \quad (46)$$

1.2.3. 어업생산량 분석법 (fishery production method, FPM)

본 연구에서는 어업별 잠재생산량 추정을 위해 어업별로 사용가능한 자료에 따라 잉여생산량 모델을 적용하여 잠재생산량을 추정하는 어업생산량 분석법 (Kim, 2016)을 사용하였다.

동해 주요 어업의 선별기준은 최근 5개년 (2012~2016년)의 어업별 어획비율 (KOSIS 국가통계포털)이 높은 순에서 어업별 어획량 및 어획노력량 자료가 이용가능한 어업을 선별하였다. 선별된 주요 6개 어업은 동해구중형트롤, 근해채낚기, 연안자망, 소형선망, 연안통발, 근해자망이다 (Table 12).

1.2.3.1. 주요 6개 어업에 대한 잠재생산량 추정

동해구중형트롤, 근해채낚기, 연안자망, 소형선망, 연안통발, 근해자망에

대한 동해 어업별 연도별 어획량자료는 국가통계포털 (KOSIS)에서 1998~2009년에 대한 어획량자료를 수집하여 사용하였다. 동해 어업별 연도별 어획노력량의 총톤수는 아래의 식을 사용하여 추정하였다.

$$f_{t,v} = v_{t,v} \cdot GTPV_{t,v} \cdot \gamma_{t,v} \quad (47)$$

여기서, $f_{t,v}$ 는 동해 v 어업에 대한 표준화된 총톤수, $v_{t,v}$ 는 동해 v 어업에 대한 척수, $GTPV_{t,v}$ 는 v 어업에 대한 척당 톤수 ($GT_{t,v}/V_{t,v}$), $\gamma_{t,v}$ 는 v 어업에 대한 어획효율, v 는 동대구중형트롤, 근해채낚기, 연안자망, 소형선망, 연안통발, 근해자망, t 는 1998~2009년이다.

수집된 어획량 및 어획노력량 자료를 사용하여 '1.2.1.1. 잉여생산량 모델의 적용'과 같이 ME 모델에 의해 동해의 어업별 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 추정하였다. 동해 주요 6개 어업의 잠재생산량 (PY_P)과 어획대상 환경수용량 (ECC_C) 추정식은 아래와 같다.

$$PY_P = \sum PY_{P,v} \quad (48)$$

$$ECC_C = \sum ECC_{C,v} \quad (49)$$

여기서, $PY_{P,v}$ 는 잉여생산량모델에 의해 추정된 어업별 잠재생산량, $ECC_{C,v}$ 는 잉여생산량모델에 의해 추정된 어업별 어획대상 환경수용량이다.

1.2.3.2. 전체 어획대상에 대한 잠재생산량 추정

동해 주요어업 이외의 어업에 대한 잠재생산량과 어획대상 환경수용량은

외삽의 방법으로 추정하였다. 주요어업을 제외한 어종에 대하여 설정된 어업분류군은 끌어구류, 선망류, 연승류, 통발류, 기타로 총 5개의 그룹으로 설정하였다. 또한 어구의 특성에 따라 추정된 주요 어업 중 어업분류군별 기준어업을 설정하였다.

어업분류군별 이외의 어업에 대한 잠재생산량은 아래의 식으로 추정하였다.

$$PY_{G,F} = C_{G,F} \cdot \left(\frac{PY_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (50)$$

여기서, $PY_{G,F}$ 는 그룹 G 의 F 어업에 대한 동해 잠재생산량, $PY_{G,std}$ 는 그룹 G 의 기준 어업 (standard fishery, std)의 동해 잠재생산량, $C_{G,F}$ 는 그룹 G 의 F 어업에 대한 동해 어획량 (1998~2009년 평균), $C_{G,std}$ 는 그룹 G 의 기준 어업 (std)의 동해 어획량 (1998~2009년 평균), G 는 분류군 그룹 (Group no. 1-5)이다.

따라서, 동해 연근해 전체 어획대상 잠재생산량 (PY)은 아래의 식과 같다.

$$PY = PY_P + \sum PY_{G,F} \quad (51)$$

어업분류군별 주요어업 이외의 어업에 대한 어획대상 환경수용량은 아래의 식으로 추정하였다.

$$ECC_{G,F} = C_{G,F} \cdot \left(\frac{ECC_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (52)$$

여기서, $ECC_{G,F}$ 는 그룹 G 의 F 어업에 대한 동해 어획대상 환경수용량, $ECC_{G,std}$ 는 그룹 G 의 기준 어업 (standard fishery, std)의 동해 어획대상 환경수용량이다.

따라서, 동해 연근해 전체 어획대상 환경수용량 (ECC)은 아래의 식과 같다.

$$ECC = ECC_G + \sum ECC_{G,F} \quad (53)$$

2. 어획강도에 따른 자원량 예측 모델

본 연구에서는 동해 연근해어업의 자원이 얼마나 빨리 회복되는지를 파악하기 위해 2017년부터 2036년까지 향후 20년간의 우리나라 동해의 자원량을 예측하고, 추정된 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 비교하였다. 자원량 예측을 위해, II장 1.2.1절의 통합생산량 분석법 중 ME모델에서 추정되는 어획대상 환경수용량과 잠재생산량, 기타 파라미터들을 아래의 자원량에 관한 식 (54)에 적용하였다.

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{ECC \cdot RV} \right) - C_t \quad (54)$$

여기서, B_{t+1} 은 $t+1$ 년의 자원량, B_t 는 t 년의 자원량, ECC와 r 은 통합생산량 분석법의 ME모델에 의해 추정되는 어획대상 환경수용량과 내적자연증가율이다. RV는 랜덤변동계수로서 EXCEL에서

$RV = (1 - CV_{ECC}) + ((2 \times CV_{ECC}) \cdot RAND())$ 와 같은 수식을 입력하여 계산

하였으며, $RAND()$ 는 0~1 사이의 난수를 발생시키는 함수이다. 실제로 환경수용량은 일정한 것이 아니라 매년 기후요인 등 환경요인에 의해 변동하기 때문에, 매년 ECC가 ECC에 대한 변동계수 CV_{ECC} 의 범위 안에서 랜덤하게 변한다는 가정을 설정하고 자원량을 예측하였다.

$$C_t = qB_tf_t \quad (55)$$

여기서, C_t 는 t 년의 어획량, q 는 어획효율계수, f_t 는 t 년의 어획노력량이다. 본 연구에서는 2016년 현재 어획노력량 $f_{current}$, 잠재생산량 시 어획노력량 f_{PY} , 2016년 현재 어획노력량 (f)에 대하여 $\times 0.5$, $\times 1.5$ 배의 총 4가지 시나리오를 설정하여 어획강도에 따른 자원량을 예측하였다.

어획대상 환경수용량에 대한 변동계수 (CV_{ECC})를 추정하기 위해 Jackknife resampling 방법을 사용하였다 (Tukey, 1958). 이 방법은 자료에서 얻어진 통계량의 표본오차를 비모수적으로 평가하는 방법이다. 가장 단순한 Jackknife법은 주어진 자료에서 자료점을 하나씩 제거하여 통계량을 계산하는 작업을 반복하여, 얻어진 잭나이프통계량의 분산과 표준오차를 계산하는 방법이며, 그 과정은 II장 1.2.1.3절의 식 (33)~식 (36)과 같다.

따라서 본 연구에서는 ECC의 변동계수 (CV_{ECC})를 추정하기 위해 아래의 식을 적용하였다.

$$CV_{ECC} = \frac{SE_{jack}}{ECC} \quad (56)$$

즉, 1966년부터 2016년까지 51개년에 대한 어획량과 어획노력량 자료 중

에서 1개년의 자료를 1966년부터 2016년까지 순서대로 하나씩 제외시켜 50개년의 자료를 가지는 표본을 51개 만든다. 다음으로 각 표본을 ME모델에 적용시켜 51개의 추정치를 구한 다음 식 (33)~식 (36), 식 (56)을 적용시켜 ECC에 대한 변동계수를 구하였다 (Table 5). 따라서 동해의 ECC 변동계수는 0.161로 추정되었으며, 이 값을 자원량 예측 시 ECC의 변동 범위로 사용하였다.



Table 5. Estimates of potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC), standard error (S.E.), and coefficient of variation (CV) by the Jackknife resampling method in the Korean waters of the East Sea

Sample	PY estimate (θ_j)	Pseudo value of PY ($\hat{\theta}_j$)	ECC estimate (θ_j)	Pseudo value of ECC ($\hat{\theta}_j$)
1	263,001	389,016	1,479,613	-1,772,133
2	269,955	41,302	1,439,762	220,387
3	270,324	22,871	1,546,919	-5,137,434
4	255,467	765,723	1,362,491	4,083,962
5	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
6	251,277	975,197	1,340,147	5,201,161
7	271,004	-11,120	1,445,354	-59,201
8	252,929	892,634	1,348,953	4,760,821
9	258,413	618,421	1,378,203	3,298,355
10	259,359	571,138	1,383,246	3,046,177
11	255,772	750,453	1,547,790	-5,181,031
12	244,929	1,292,608	1,306,289	6,894,017
13	277,174	-319,632	1,478,262	-1,704,596
14	253,989	839,627	1,354,608	4,478,117
15	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
16	252,535	912,342	1,346,851	4,865,931
17	261,141	482,034	1,392,751	2,570,957
18	272,501	-85,982	1,453,339	-458,463
19	265,456	266,285	1,415,764	1,420,293
20	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
21	258,294	624,363	1,377,569	3,330,044
22	264,958	291,188	1,413,108	1,553,110
23	272,501	-85,982	1,453,339	-458,463
24	259,746	551,776	1,385,312	2,942,912
25	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
26	261,974	440,386	1,397,193	2,348,833
27	262,168	430,647	1,398,232	2,296,893
28	265,456	266,285	1,415,764	1,420,293
29	265,456	266,285	1,415,764	1,420,293
30	256,077	735,227	1,365,743	3,921,321
31	260,783	499,918	1,390,843	2,666,338
32	239,534	1,562,356	1,310,721	6,672,429
33	258,254	626,392	1,452,904	-436,686

34	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
35	251,496	964,264	1,341,313	5,142,851
36	239,893	1,544,434	1,279,428	8,237,090
37	247,946	1,141,748	1,322,381	6,089,429
38	275,656	-243,741	1,470,167	-1,299,845
39	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
40	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
41	260,764	500,895	1,390,739	2,671,549
42	240,030	1,537,560	1,477,109	-1,646,965
43	255,469	765,639	1,362,500	4,083,515
44	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
45	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
46	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
47	239,893	1,544,434	1,279,428	8,237,090
48	240,872	1,495,490	1,438,040	306,509
49	256,026	737,782	1,365,471	3,934,944
50	264,545	311,800	1,410,909	1,663,044
51	252,765	900,817	1,348,081	4,804,467
Standard error (S.E.)		65,339		407,472
Coefficient of variation (CV)		0.105		0.161

3. 자료

3.1. 생태계 역학 분석을 위한 자료

8가지 생태학적 특성을 고려하여 유사한 생태학적 특성을 가지는 종들을 동일군으로 분류하여 사용하였다 (Table 6). 우리나라 연근해 전체 어획량의 상위 3종인 멸치, 고등어, 살오징어와 동해에서 어획량이 높은 붉은대게, 청어, 도루묵은 독립 분류군으로 따로 지정하였다.

Table 6. Species by group in the Korean waters of the East Sea

	Group name	Species
1	Marine mammals	Minke whale, Common dolphin
2	Sea birds	Streaked shearwater, Ancient murrelet, Common tern, Pacific loon, Black-tailed gull
3	Sharks	Mko shark, Siny dogfish, Bllhead shark
4	Rays	Skate
5	Predator pelagic	Jack mackerel, Amberjacks, Spanish mackerel
6 ^{*1}	Chub mackerel	Chub mackerel
7	Small pelagic	Sardine, Dotted gizzard shad
8 ^{*1}	Anchovy	Anchovy
9 ^{*2}	Pacific herring	Pacific herring
10	Flounder	Korean flounder, Sole, Halibut
11 ^{*2}	Sandfish	Sandfish
12	Other demersal	Temperate perch, Rosy seabass, Black seabream, Red seabream, Barred knifejaw, Pomfret, Pufferfish, Rockfish, Greenling, Gurnard, Sea raven, Mullet, Atka mackerel, Whitespotted conger, Snailfish, Croaker
13	Cephalopods	Cuttlefish, Whiparm octopus, Octopus
14 ^{*1}	Common squid	Common squid
15 ^{*2}	Red snow crab	Red snow crab
16	Epifauna	Horned turban, Sea snail, Abalone, Mussel, Sea urchin, Sea squirt, Sea cucumber, Blue crab, Japanese swimming crab
17	Infauna	Scallop, Sunray surf clam, Oyster

^{*1} The top dominant species of total catch in the whole Korean waters, and

^{*2} the species with higher catch ratio in the Korean waters of the East Sea are assigned independent group separately.

Ecopath에 입력된 파라미터와 모델에 의해 보정된 값은 Table 7과 같다. Ecopath에서 생태계 영양효율 (EE) 값이 자동으로 추정되는데 EE 값이 1 이상으로 추정될 경우 매뉴얼에서는 EE 값을 0.950로 고정하여 모델을 재 실행하도록 권고되어 있다. 여기서, B_{ini} 는 생체량의 초기 입력 파라미터, B_{adj} 는 모델에 의해 보정된 생체량, EE_{ini} 는 모델에 의해 추정된 초기 영양 효율 파라미터, EE_{adj} 는 모델에 의해 보정된 영양효율 파라미터이다. 입력 파라미터 보정 시에는 생태학적 특성을 고려하여 동일 생태계 그룹에 대해서는 EE 값이 유사하도록 P/B비나 Q/B비를 조정하여 값을 보정하였다. 이에 따라 해당하는 분류군의 생체량이 자동으로 보정된다.



Table 7. 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

먹이조성 자료는 각종 문헌 및 보고서를 참조하여 먹이 중요도와 생체량을 고려한 각 분류군별 대표어종의 위내용물 분석 자료를 사용하였다 (Table 8).

Table 8. Input data for diet composition (DC) in the Korean waters of East Sea

(a) Importance of prey by species group

Prey(j)/Predator(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1 Marine mammals	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 Sea birds	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 Sharks	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4 Rays	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 Predator pelagic	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
6 Chub mackerel	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
7 Herring	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
8 Small pelagic	5	0	2	2	2	3	3	0	0	1	1	0	3	5	0	0	0
9 Anchovy	5	0	1	2	2	3	3	0	0	1	1	0	3	5	0	0	0
10 Flounder	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
11 Other demersal	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
12 Sandfish	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	2	1	0
13 Cephalopods	0	0	2	3	5	3	0	0	0	3	5	3	1	1	2	3	0
14 Squid	1	0	5	5	5	5	0	0	0	5	5	5	5	0	5	5	0
15 Epifauna	0	3	1	5	0	1	0	0	0	1	2	3	1	1	3	3	1
16 Red snow crab	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	1	1	0	0
17 Infauna	0	1	0	1	0	0	0	1	0	3	2	3	2	3	5	5	3

Table 8. continued

(b) Input data for diet composition (DC)

Prey(j)/Predator(i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 Marine mammals	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2 Sea birds	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3 Sharks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 Rays	-	-	0.005	-	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5 Predator pelagic	-	-	0.009	-	0.007	-	-	-	-	-	-	-	0.003	0.004	-	-	-	-
6 Chub mackerel	-	-	0.003	-	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.001	-	-	-	-
7 Herring	-	-	0.015	0.013	0.025	-	-	-	-	-	-	-	0.006	0.007	-	-	-	-
8 Small pelagic	0.060	-	0.059	0.050	0.049	0.075	0.667	-	-	0.009	0.007	-	0.033	0.065	-	-	-	-
9 Anchovy	0.016	-	0.008	0.014	0.013	0.021	0.183	-	-	0.003	0.002	-	0.009	0.018	-	-	-	-
10 Flounder	-	-	0.009	0.007	-	-	-	-	-	-	0.002	-	0.003	0.004	-	-	-	-
11 Other demersal	0.069	-	0.171	0.144	0.141	0.144	-	-	-	0.055	0.042	0.091	0.064	0.075	0.009	0.108	-	-
12 Sandfish	-	-	0.005	0.004	0.004	0.004	-	-	-	-	0.001	-	0.002	0.002	0.001	0.003	-	-
13 Cephalopods	-	-	0.014	0.018	0.029	0.018	-	-	-	0.007	0.008	0.011	0.003	0.003	0.001	0.013	-	-
14 Squid	0.055	-	0.685	0.578	0.567	0.576	-	-	-	0.219	0.166	0.367	0.258	-	0.035	0.435	-	-
15 Epifauna	-	0.472	0.016	0.069	-	0.014	-	-	-	0.005	0.008	0.026	0.006	0.007	0.003	0.031	0.033	-
16 Red snow crab	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.012	-	0.009	0.010	0.001	-	-	-
17 Infauna	-	0.028	-	0.002	-	-	-	-	-	0.003	0.001	0.005	0.002	0.004	0.001	0.009	0.017	-
18 Zooplankton	0.800	-	-	-	0.150	0.150	0.150	0.600	0.650	0.500	0.500	0.400	0.400	0.700	0.500	0.400	0.100	0.200
19 Phytoplankton	-	-	-	-	-	-	-	0.300	0.200	0.100	0.150	0.100	-	-	0.250	-	0.450	0.700
20 Detritus	-	-	-	0.100	-	-	-	0.100	0.150	0.100	0.100	-	0.200	0.100	0.200	-	0.400	0.100
21 Import	-	0.500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sum	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

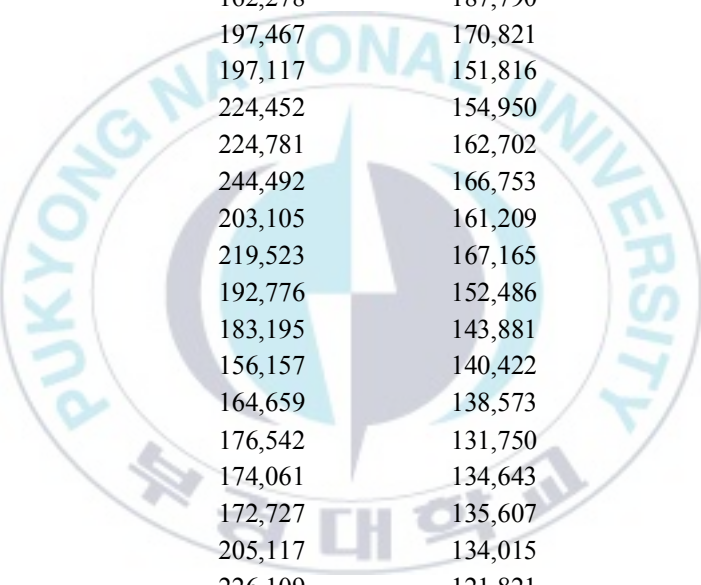
3.2. 생산량 기반 분석을 위한 자료

3.2.1. 통합생산량 분석법 (HPM)

동해 연근해어업을 통합생산량 분석법 (HPM)의 잉여생산량모델 (Fox, ASPIC, ME 모델)에 적용하기 위해 1966~2016년 동해 연근해어업의 시도별 어획량 (metric ton, MT) 및 어획노력량 자료를 사용하였다. 어획노력량으로는 동력선과 무동력선의 총톤수 (gross tonnage, GT)자료를 사용하였다. 국가통계포털 (KOSIS)에서 1970~2016년의 시도별 연도별 어획량 자료 및 1992~2016년의 시도별 연도별 어획노력량 자료를 수집하였으며, 수산통계연보에서 1966~1969년의 시도별 연도별 어획량 자료 및 1966~1991년의 시도별 연도별 어획노력량 자료를 수집하였다. 어획량 및 어획노력량은 시도별로 정리되어 있으므로 강원도와 경상북도에 대한 연도별 어획량 및 어획노력량 자료를 수집하여 표준화하였다 (Table 9).

Table 9. Annual catch and fishing effort data in the Korean waters of the East Sea

Year	Catch (mt)	Gross tonnage (GT)	
		Power vessel	Non-power vessel
1966	175,805	22,851	12,176
1967	132,951	26,872	11,893
1968	207,156	27,935	9,038
1969	146,896	33,667	11,719
1970	169,620	37,013	10,487
1971	140,554	39,230	11,244
1972	178,919	37,861	11,133
1973	193,253	43,026	11,746
1974	190,357	43,074	10,617
1975	175,303	44,929	8,859
1976	259,094	44,308	7,921
1977	268,860	52,510	6,339
1978	248,555	71,457	5,255
1979	232,519	78,118	3,435
1980	245,317	81,333	3,123



1981	273,905	90,648	2,806
1982	275,009	106,060	2,628
1983	189,835	118,531	2,275
1984	217,281	129,993	2,391
1985	232,960	134,312	2,399
1986	188,533	153,882	2,351
1987	178,372	158,345	2,249
1988	152,188	170,863	1,838
1989	155,731	169,179	2,124
1990	166,112	167,023	1,987
1991	172,637	175,621	1,909
1992	162,278	187,790	1,923
1993	197,467	170,821	1,281
1994	197,117	151,816	842
1995	224,452	154,950	595
1996	224,781	162,702	464
1997	244,492	166,753	486
1998	203,105	161,209	453
1999	219,523	167,165	482
2000	192,776	152,486	424
2001	183,195	143,881	350
2002	156,157	140,422	336
2003	164,659	138,573	310
2004	176,542	131,750	340
2005	174,061	134,643	303
2006	172,727	135,607	312
2007	205,117	134,015	271
2008	226,109	121,821	243
2009	228,186	111,312	233
2010	179,476	111,104	237
2011	183,672	110,280	245
2012	187,383	113,903	221
2013	184,064	116,239	215
2014	174,335	116,312	199
2015	168,612	124,407	207
2016	165,585	120,678	208

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 전체에 대한 어획노력량 자료를 수집하기 위하여 시도별 (강원도, 경상북도)로 수집된 자료를 취합하였다. 동해 연도별 어업별 시도별 어획노력량 자료를 수집할 수 없었기 때문에 단위노력당어획량 (catch per unit effort, CPUE)이 일정하다고 가정하여, 동해 연도별 내수면어업의 어획노력량은 우리나라 연근해 전체의 내수면 톤수에 해역별 내수면 어획량 비율을 곱하여 추정하였다.

총톤수 자료는 어군탐지기의 보급 또는 엔진출력 증가 등에 따른 연도별 어획효율을 반영하지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 어로기술개발에 따라 국립수산물과학원 (2016)과 서 등 (2017)의 연구에서 추정된 우리나라 어업별 어획성능지수가 우리나라 어업의 연도별 어획효율 향상을 반영한다고 가정하여 동해의 총톤수 자료를 표준화시켰다. 무동력선의 연도별 어획효율은 일정하므로 동력선에 대한 어획효율만 고려하였다. 국립수산물과학원 (2016)의 연구결과에 따르면 Fitzpatrick (1996)의 어업기술계수 추정과 같이 1980년을 기준으로 1960~2015년까지 5년 단위로 우리나라 주요 5개 근해어업인 대형선망, 대형트롤, 근해연승, 근해자망, 근해통발 어업에 대한 시대별 어선 및 어구 발달 등을 고려한 어획성능지수를 추정하였다 (Table 10). 본 연구에서는 저인망류 (Trawls), 선망 (Purse seiner), 연승 (Long liner), 자망 (Gillnetter), 통발 (Pot)을 선별하여 각 기술계수의 연 증가율을 구하였다. 이외의 어업에 대한 기술계수는 저인망류, 선망, 연승, 자망 및 통발의 기술계수를 어업별 어획량으로 가중평균한 값으로 가정하였다.

각 어획효율의 증가율은 아래 식에 대한 선형회귀 분석을 실시하여 어업

별 기술계수 증가율 (γ_v)에 해당하는 기율기를 추정하였다.

$$TC_{v,t} = \alpha_v + \gamma_v t \quad (57)$$

여기서, $TC_{v,t}$ 는 어업에 대한 t 년의 기술계수, α_v 는 어업에 대한 기술계수 연 증가율, γ_v 는 어업에 대한 계수, v 는 저인망, 선망, 연승, 자망, 통발, 기타어업, t 는 1965, 1980, 1995, 2010년이다.

각 어업의 연도별 어획효율 (catching efficiency, CE)은 아래의 식으로부터 추정하였다.

$$CE_{v,t} = CE_{tr} + \gamma_v (t - t_r) \quad (58)$$

여기서, $CE_{v,t}$ 는 어업에 대한 t 년의 어획효율, t 는 1966~2016, t_r 은 기준연도인 1966년, CE_{tr} 는 기준연도에 대한 초기값 1이다.

각 어업에 대하여 표준화된 동력선 t 년의 총톤수 ($P_{v,t}$)는 다음과 같이 추정하였다.

$$P_{v,t} = GT_{v,t} \cdot CE_{v,t} \quad (59)$$

여기서, $GT_{v,t}$ 는 표준화되지 않은 v 어업에 대한 동력선의 t 년 총톤수이다. 연도별 동력선 총톤수는 각 어업의 표준화된 연도별 동력선 총톤수의 합으로 나타냈다 ($P_{GT,t} = \sum P_{v,t}$).

따라서, 표준화된 t 년의 총톤수 ($f_{GT,t}$)는 아래의 식과 같다.

$$f_{GT,t} = P_{GT,t} + NP_{GT,t} \quad (60)$$

여기서, $P_{GT,t}$ 는 표준화된 동력선의 t 년 총톤수, $NP_{GT,t}$ 는 무동력선의 t 년 총톤수이다.

Table 10. Technology coefficient by vessel type of fishery in the Korean waters based on the 1980 (NIFS (2016); Seo et al. (2017))

Vessel type	Technology coefficient											
	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Trawl	0.87	0.87	0.89	0.99	1.00	1.09	1.44	1.45	1.60	1.60	1.60	1.60
Purse seine	-	0.39	0.43	0.60	1.00	1.15	1.33	1.39	1.53	1.53	1.64	-
Longline	0.53	0.53	0.53	0.60	1.00	1.17	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34
Gillnet	0.51	0.51	0.74	0.74	1.00	1.08	1.20	1.49	1.56	1.68	1.88	2.05
Pot	-	-	-	-	1.00	1.37	1.71	1.99	2.01	2.48	2.50	2.50

3.2.2. 개체군생산량 분석법 (PPM)

개체군생산량 분석법을 위해 선별된 동해 주요 12어종의 최근 5개년 (2012~2016년) 평균 어획비율은 86.6%이며, 어종별 잠재생산량 추정을 위해 수집된 이용가능한 자료는 Table 11과 같다.

Table 11. Average catch ratio and available data of the exploitable 12 major species in recent 5 years (2012-2016) in the Korean waters of the East Sea

Rank	Species	Average catch ratio in recent 5 years (%)	Catch and CPUE by species	References for stock assessment	
				Allowable biological catch (ABC)	Ecological characteristics
1	Common squid	39.2	NFRDI (2016)	-	-
2	Red snow crab	21.7	NFRDI (2016)	-	-
3	Pacific herring	10.2	NFRDI (2016)	-	-
4	Sandfish	3.2	NFRDI (2016)	-	-
5	Flounder	2.9	NFRDI (2016)	-	-
6	Octopus	2.2	-	NFRDI (2016)	Mohn (1982)
7	Amberjack	1.6	NFRDI (2016)	-	-
8	Chinese puffer	1.2	NFRDI (2016)	-	-
9	Spanish mackerel	1.2	NFRDI (2016)	-	-
10	Jack mackerel	1.2	NFRDI (2016)	-	-
11	Snow crab	1.1	NFRDI (2016)	-	-
12	Chub mackerel	1.0	NFRDI (2016)	-	-
Total		86.6			

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

어종별 어획량 및 CPUE 자료가 이용가능한 어종은 '1.2.1.1. 잉어생산량 모델의 적용'에서 최대엔트로피 (ME) 모델을 사용하여 어종별 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 직접 추정하였다. ME 모델에 의한 추정을 위해 이용가능한 자료가 부족한 어종에 대해서는 어종별 잠재생산량을 추정하기 위해 현재까지 출간된 최대지속적생산량 ($MSY=PY$) 또는 생물학적 허용어획량 (ABC) 추정 논문 및 보고서 등의 참고문헌 자료를 사용하였다. MSY

와 ABC 자료가 없는 주요어종 이외의 어종의 경우 Martell and Froese (2013)의 연구결과에 따라 어종별 연도별 어획량 자료만을 입력자료로 사용하여 $r-K$ 관계에 의해 MSY를 추정할 수 있는 'Catch-MSY 방법'으로 어종별 MSY를 직접 추정하여 사용하였다. 어종별 어획대상 환경수용량 추정의 경우, ME 모델에 의한 추정이 어려운 어종에 대해서는 치녀자원량 모델을 이용하여 추정하기 위해 Zhang and Megrey (2006) 모델에 의한 생태학적 특성치를 직접 추정하거나 현재까지 출간된 생태학적 특성치 논문 및 보고서 등의 참고문헌 자료를 사용하였다.

3.2.3. 어업생산량 분석법 (FPM)

어업생산량 분석법을 위해 선별된 동해 주요 6개 어업의 최근 5개년 (2012~2016년) 평균 어획비율은 54.8%이며, 어업별 잠재생산량 추정을 위해 수집된 이용가능한 자료는 Table 12와 같다.

Table 12. Average catch ratio and available data of the 6 major fisheries in recent 5 years (2012~2016) in the Korean waters of the East Sea

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	

*Data for catch and number of vessel: KOSIS (1998~2009), Korean Coastal and Offshore Fishery Census (2004; 2010)

어업별 어획량 및 CPUE 자료가 이용가능한 어업은 '1.2.1.1. 잉여생산량 모델의 적용'에서 최대엔트로피 (ME) 모델을 사용하여 어업별 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 직접 추정하였다.



Ⅲ. 결과

1. 잠재생산량 추정방법별 결과

1.1. 생태계 역학 분석법

동해의 잠재생산량을 추정하기 위해 먼저 Ecosim을 이용하여 분류군별 어획대상 환경수용량을 추정하였다. Ecopath에서 분석한 생태계 구조를 기반으로 Ecosim을 이용하여 어획사망계수 F 가 0일 경우 분류군별 생체량을 시뮬레이션한 결과 Fig. 11과 같이 분류군별로 일정한 값으로 수렴하였으며 그 값은 Table 13과 같다.

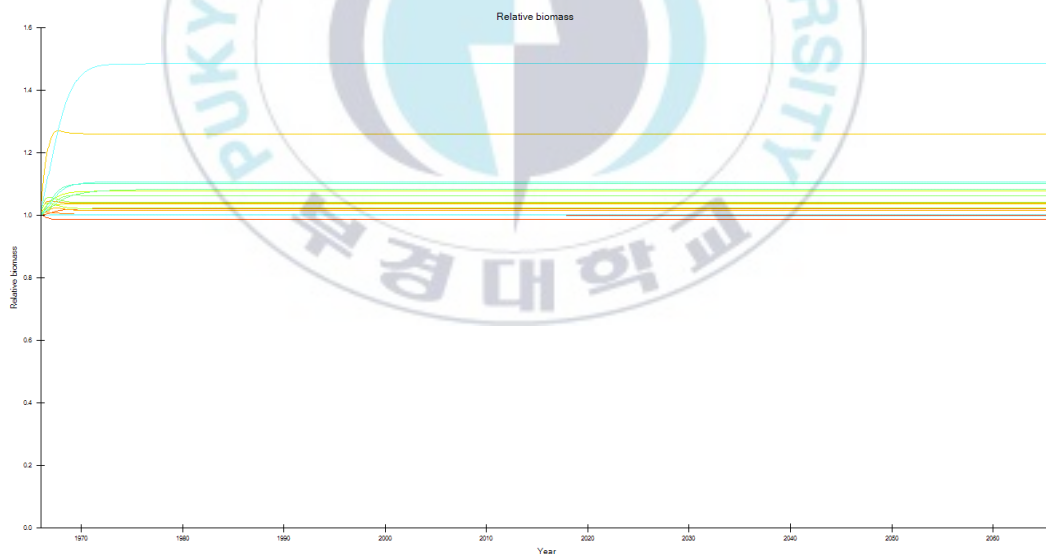


Fig. 11. Results of Ecosim simulation by species group in the Korean waters of the East Sea.

Table 13. The estimated exploitable carrying capacity (ECC) by species group in the Korean waters of the East Sea

Rank	Group name	ECC (mt)
1	Marine mammals	-
2	Sea birds	-
3	Sharks	3,021
4	Rays	19,305
5	Predator pelagic	37,192
6	Chub mackerel	11,971
7	Small pelagic	175,888
8	Anchovy	44,762
9	Pacific herring	61,479
10	Flounder	36,231
11	Sandfish	24,927
12	Other demersal	668,513
13	Cephalopods	26,714
14	Common squid	537,017
15	Red snow crab	91,620
16	Epifauna	62,000
17	Infauna	10,765
Total		1,811,405

Ecosim을 이용하여 어획개시 이전의 동해 생태계 구조를 분석한 결과 Fig. 12와 같이 분석되었으며, 이때의 전체 평균영양단계는 3.25로 추정되었다.

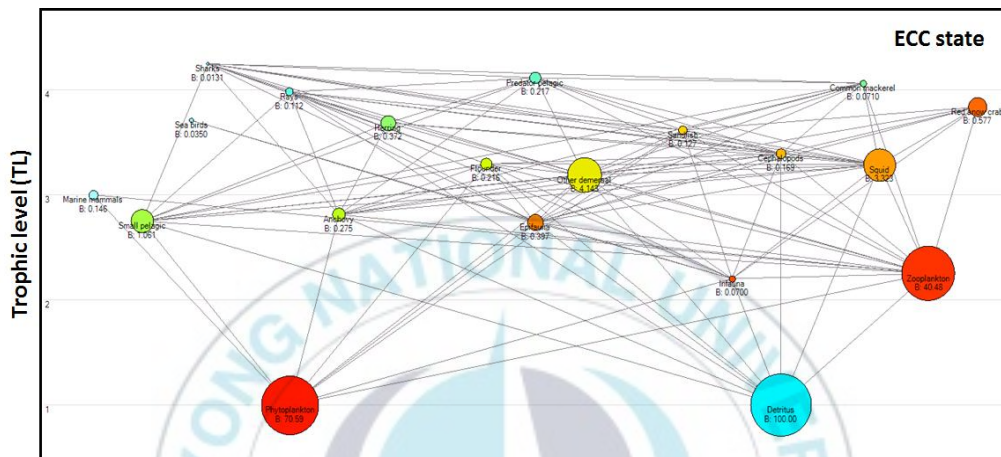


Fig. 12. Ecosystem structure in the Korean waters of the East Sea prior to the start of fishing.

따라서, 분류군별 어획대상 환경수용량과 자원역학적 관계를 이용하여 생태계 역학 분석법으로 추정된 동해 생태계의 잠재생산량은 Table 14와 같다.

Table 14. The estimated potential yield (PY) by species group in the Korean waters of the East Sea

Rank	Group name	PY (mt)
1	Marine mammals	-
2	Sea birds	-
3	Sharks	468
4	Rays	2,992
5	Predator pelagic	6,137
6	Chub mackerel	2,933
7	Small pelagic	35,680
8	Anchovy	9,080
9	Pacific herring	14,399
10	Flounder	5,100
11	Sandfish	6,564
12	Other demersal	126,827
13	Cephalopods	4,141
14	Common squid	83,238
15	Red snow crab	32,983
16	Epifauna	10,013
17	Infauna	2,153
Total		342,707

1.2. 생산량 기반 분석법

1.2.1. 통합생산량 분석법 (HPM)

각 어업별 동력선에 대하여 연도별 어획효율을 반영한 어획노력량을 추정하여 연도별 동력선 총 어획노력량을 구하였으며, 연도별 무동력선 총 어획노력량까지 고려하여 표준화된 연도별 총톤수를 추정하였다 (Fig. 13).

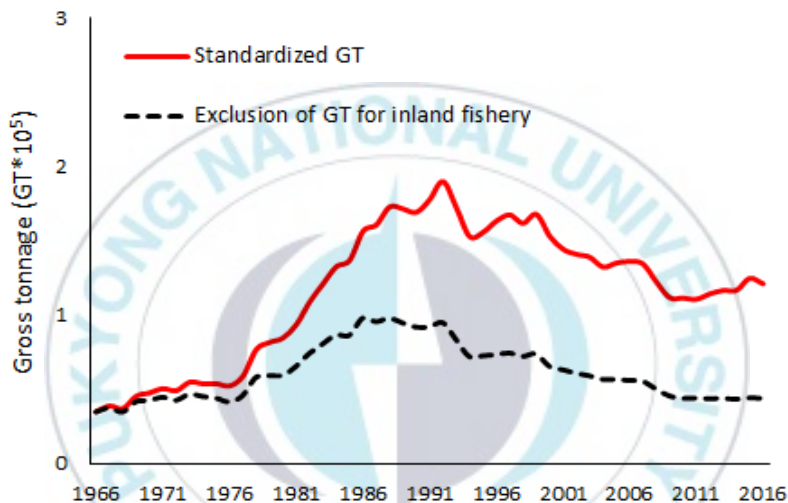


Fig. 13. Results of standardized gross tonnage (GT) of coastal and offshore fishery in the Korean waters of the East Sea considering improvement of fishing performance.

세 모델에 대하여 어획노력량으로 총톤수 자료를 사용하여 나타낸 결과는 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16, Table 15와 같다. 여기서 환경수용량 (K)은 어획대상 환경수용량 (ECC)으로, 최대지속적생산량 (MSY)은 잠재생산량 (PY)으로, 최대지속적생산량 (MSY)을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{MSY})은 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY})으로, 최대지속적생산량 (MSY)시 어획노력량 (f_{MSY})은 잠재생산량 시 어획노력량 (f_{PY})으로 간주

하였다. 잠재생산량 (PY)의 범위는 ASPIC 모델의 214,000mt에서 ME 모델의 265,472mt으로 추정되었고, 어획대상 환경수용량 (ECC)의 범위는 ASPIC 모델의 1,033,000mt에서 ME 모델의 1,415,853mt으로 나타났다.

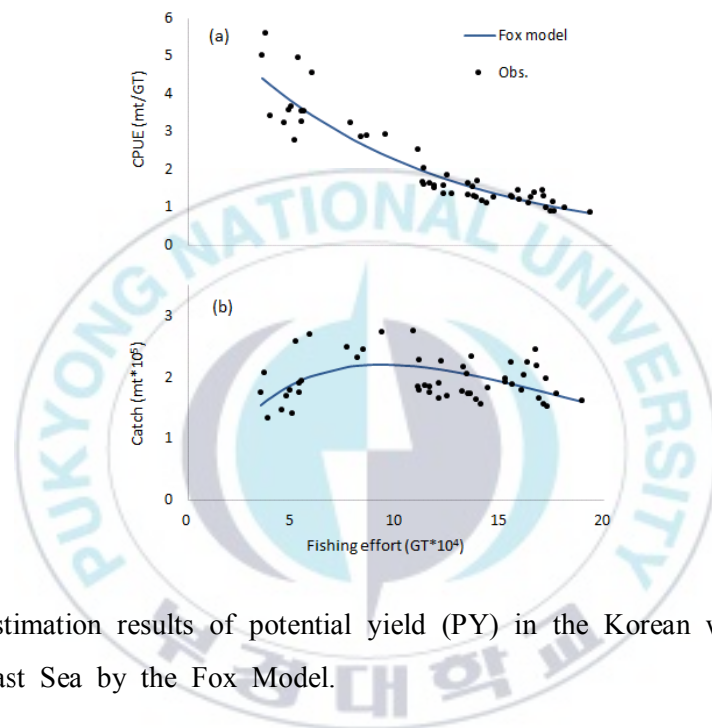


Fig. 14. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the Fox Model.

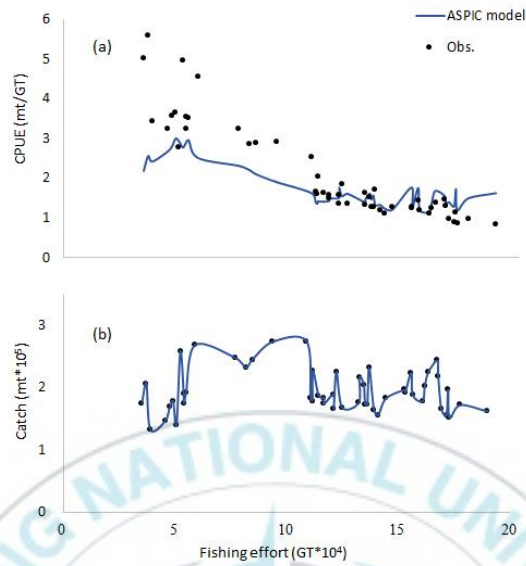


Fig. 15. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the ASPIC Model.

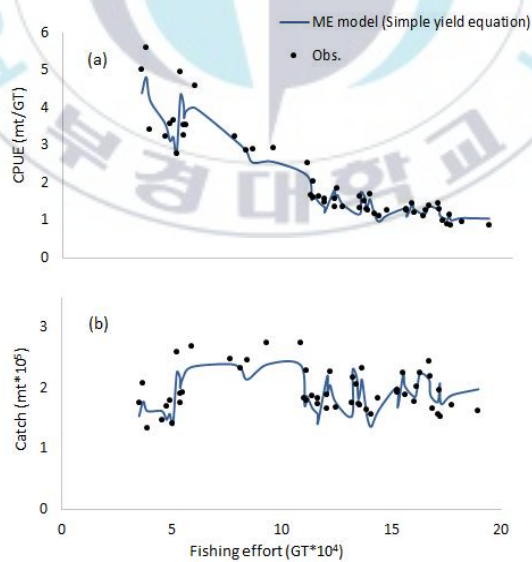
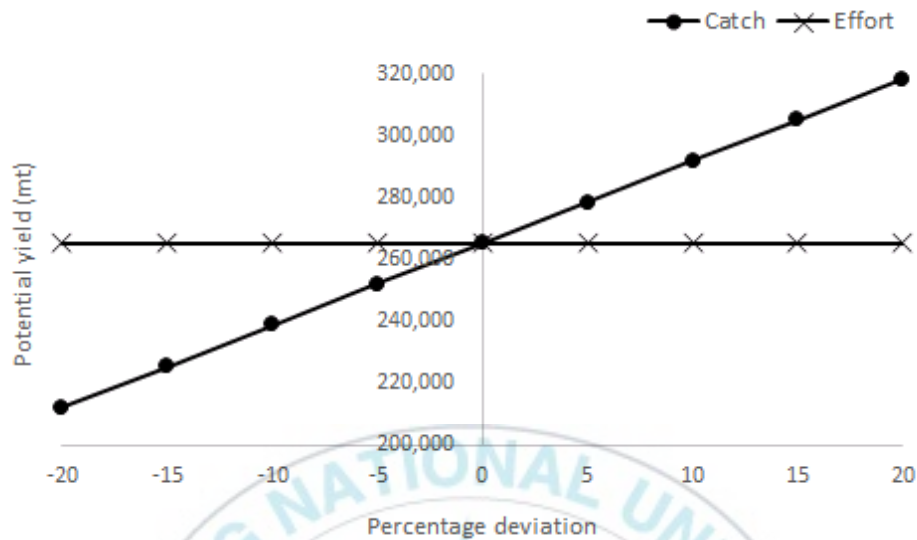


Fig. 16. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the ME Model.

Table 15. Estimation results of potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by surplus production model

Model Parameters	Fox	ASPIC	ME
PY (mt) (95% confidence interval)	220,908 (210,001-231,815)	214,000 (210,000-228,800)	265,472 (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) (95% confidence interval)	-	1,033,000 (701,700-1,177,000)	1,415,853 (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(α, β)	-2.968E-08	-	-
Var(PY)	30,968,078	-	-
SE(PY)	5,565	-	-

Fox 모델은 모델 적합도 (R^2 , RMSE, U)가 낮으며, 기타 중요한 생태학적 파라미터인 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY})과 어획대상 환경수용량 (ECC)의 추정이 불가능하다. ASPIC 모델은 초기값 설정 시 사용되는 어업자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 어획대상 환경수용량과 내적자연증가율을 추정하기 때문에 어업자료에 대해 민감한 추정결과를 나타낸다. ME 모델은 모델 적합도 (R^2 , RMSE, U)가 양호하고, 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하여 잠재생산량 (PY)가 계산되기 때문에 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높다. 따라서 ME 모델이 가장 적절한 추정결과를 나타내므로, 통합생산량 분석법 (HPM)의 ME 모델에 의한 동해 연근해 잠재생산량 (PY)은 265,472mt, 어획대상 환경수용량 (ECC)은 1,415,853mt으로 추정되었으며, PY 추정치의 95% 신뢰구간은 211,077-319,867mt (오차: $\pm 20.5\%$), ECC 추정치의 95% 신뢰구간은 967,189-1,864,516mt (오차: $\pm 31.7\%$)으로 추정되었다. ME 모델의 경우 입력자료의 변화에 따른 PY 추정치의 민감도 분석을 실시한 결과, ME 모델에 의한 잠재생산량 추정치는 어획노력량의 변화에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났지만, 어획량의 변화에는 민감도 지수 (SI)가 입력자료의 변화율에 비례하여 일률적으로 증감하는 경향을 보였다 (Fig. 17).



Input data	% change in PY according to the change in input data							
	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20
Catch	-20.00	-15.01	-10.01	-5.01	4.99	9.99	14.99	19.99
Effort	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01

Fig. 17. Sensitivity analysis of the PY estimates in the Korean waters of the East Sea by the ME model according to the change in input data.

1.2.2. 개체군생산량 분석법 (PPM)

1.2.2.1. 주요 어획대상 12어종에 대한 잠재생산량 추정

주요 어획대상 11어종은 전체해역에 대한 어종별 어획량 및 CPUE 자료를 사용하여 잉여생산량 모델로 한국 전체해역에 대한 어종별 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 직접 추정하고, 한국 전체해역에 대한 동해의 어획비율을 이용하여 동해에 대한 잠재생산량과 어획대상 환경수용량을 추정하였다 (Table 16). 잠재생산량은 살오징어가 80,208mt으로 가장 높게 추정되었고, 다음으로 청어 41,726mt, 붉은대게 30,120mt 순으로 높게 추정되었다.

Table 16. Potential yield (PY), exploitable carrying capacity (ECC), distribution rate of major species in the Korean waters of the East Sea

Major species	PY in the Korean waters (mt)	ECC in the Korean waters (mt)	Distribution rate of the East Sea to the Korean waters (%)	PY in the East Sea (mt)	ECC in the East Sea (mt)
Common squid	180,657	1,153,895	0.44	80,208	512,306
Red snow crab	30,171	192,709	1.00	30,120	192,382
Pacific herring	68,896	367,443	0.61	41,726	222,539
Sandfish	6,730	50,948	0.97	6,511	49,293
Flounder	19,066	121,779	0.30	5,777	36,902
Amberjack	11,810	65,375	0.25	2,909	16,103
Chinese puffer	8,986	54,370	0.52	4,712	28,511
Spanish mackerel	56,816	303,016	0.06	3,499	18,659
Jack mackerel	53,019	338,643	0.07	3,918	25,025
Snow crab	2,344	23,541	0.93	2,175	21,846
Chub mackerel	175,889	1,123,440	0.01	2,529	16,156
Total	614,383	3,795,159	-	184,085	1,139,722

생물학적 허용어획량 (ABC) 자료를 사용하여 추정한 어종은 자원동향이 평형을 나타내는 문어이다 (Table 17). 한국 전체해역에 대한 문어의 잠재생산량은 8,714mt로 추정되었으며, 최종적으로 한국 전체해역에 대한 동해의 어획 비율을 고려한 결과, 문어의 동해의 잠재생산량은 3,613mt으로 추정되었다. 어획대상 환경수용량은 처녀자원량 모델에 의해 23,312mt으로 추정되었다.

Table 17. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) by species in the Korean waters of the East Sea estimated using allowable biological catch (ABC) and stock trends

Species	ABC (mt)	Stock trend	PY in the Korean waters (mt)	Distribution rate of the East Sea to the Korean waters (%)	PY in the East Sea (mt)	Natural mortality rate (M) (yr ⁻¹)	ECC in the East Sea (mt)
Octopus	8,714	Equilibrium	8,714	0.41	3,613	0.31	23,312

1.2.2.2. 전체 어획대상에 대한 잠재생산량 추정

분류군에 의한 주요 12어종을 제외한 어종들의 잠재생산량은 36,759mt으로 추정되었고, 어획대상 환경수용량은 218,998mt으로 추정되었다. 따라서, 동해 연근해 전체 어획대상의 잠재생산량은 224,458mt으로 추정되었고, 어획대상 환경수용량은 1,382,032mt으로 추정되었다 (Table 18).

Table 18. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) of target species by group except the 12 major species in the Korean waters of the East Sea

Group	Target species excluding major species in the Korean waters of the East Sea	Standard species (std)	$PY_{G,std} / C_{G,std}$	PY excluding standard species (mt)	$ECC_{G,std} / C_{G,std}$	ECC excluding standard species (mt)
Rays	Skate, Shark	-	*1.23	272	*7.63	1,688
Predator pelagic	Chum salmon, Rainbow trout, Bluefin tuna, Other tunas	Chub mackerel	1.42	1,055	9.06	6,708
Small pelagic	Pacific saury, Halfbeak, Anchovy, Dotted gizzard shad, Sardine, Pacific sandlance	Pacific herring	2.33	12,005	12.44	63,397
Flounder	Korean flounder, Halibut, Sole	Flounder	1.13	1,888	7.19	11,986
Other demersal	Temperate perch, Rosy seabass, Black seabream, Red seabream, Barred knifejaw, Seabreams, Pomfret, Rockfish, Greenling, Gurnard, Sea raven, Mullet, Korean sandlance, Atka mackerel, Whitespotted conger, Filefish, Snailfish, Hairtail, Pacific cod, Walleye pollock, Goosefish, Croaker, Mi-iuy croaker	Sandfish	1.17	16,619	8.84	103,888
Cephalopods	Cuttlefish, Whiparm octopus, Marine molluscs nei	Common squid	1.16	486	7.42	3,102
Epifauna	Horned turban, Sea snail, Abalone, Mussel, Sea urchin,	Red snow crab	0.79	3,953	5.04	25,247

	Sea squirt, Sea cucumber, Blue crab, Japanese swimming crab, Marine crabs nei, Kuruma prawn, Shrimps					
Infauna	Scallop, Sunray surf clam, Oyster	-	*1.23	481	*7.63	2,980
Total		-		36,759	-	218,998

*Using the rate of PY and ECC to total catch of the 12 major species in the Korean waters of the East Sea

1.2.3. 어업생산량 분석법 (FPM)

1.2.3.1. 주요 6개 어업에 대한 잠재생산량 추정

잉여생산량모델에 의해 추정된 동해구중형트롤, 근해채낚기, 연안자망, 소형선망, 연안통발, 근해자망의 잠재생산량과 어획대상 환경수용량, 모델 적합도는 Table 19와 같다. 동해구중형트롤의 잠재생산량과 어획대상 환경수용량이 각각 56,146mt, 345,511mt으로 가장 높게 추정되었으며, 다음으로 근해채낚기가 각각 32,800mt, 261,873mt으로 높게 추정되었다.

Table 19. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) of the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea estimated by the ME model

Major fisheries	PY (mt)	ECC (mt)	R ²
Eastern sea trawl	56,146	345,511	0.925
Offshore angling	32,800	261,873	0.667
Coastal gillnet	42,746	88,456	0.842
Small powered purse seine	21,552	153,765	0.840
Coastal pot	5,718	43,054	0.883
Offshore gillnet	8,382	34,354	0.942
Total	167,334	927,012	

1.2.3.2. 전체 어획대상에 대한 잠재생산량 추정

주요어업을 제외한 어업들의 잠재생산량은 97,410mt으로 추정되었고, 어획대상 환경수용량은 642,833mt으로 추정되었다. 따라서, 동해 연근해 전체 어획대상의 잠재생산량은 264,754mt으로 추정되었고, 어획대상 환경수용량은 1,569,845mt으로 추정되었다 (Table 20).

Table 20. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) of fisheries by group except the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea

Group	Standard fishery (std)	$PY_{G,std} / C_{G,std}$	PY excluding standard fishery (mt)	$ECC_{G,std} / C_{G,std}$	ECC excluding standard fishery (mt)
1 Trawler	Eastern sea trawl	2.0	10,980	12.1	67,571
2 Puse seiner	Small powered purse seine	3.0	5,959	21.5	42,514
3 Longliner	Offshore angling	0.7	6,391	5.3	51,023
4 Pots	Coastal pot	1.5	35,855	11.6	269,972
5 Others	-	*1.4	38,226	*7.5	211,754
Total	-	-	97,410	-	642,833

*Using the rate of PY and ECC to total catch of the 6 major fisheries in the Korean waters of the East Sea by weighted average with catch of each fishery

2. 어획강도에 따른 한국 동해 생태계의 자원량 예측 결과

4가지 시나리오의 어획강도에 따른 2017년~2036년 향후 20개년에 대한 우리나라 동해의 자원량 예측 결과는 Fig. 18과 같다. 2036년의 자원량은 $0.5 \times f_{current}$, f_{PY} , $f_{current}$, $1.50 \times f_{current}$ 순으로 자원량이 높았다. $0.5 \times f_{current}$ 에서는 B_{PY} (707,926톤) 수준을 크게 뛰어넘었고, f_{PY} 에서는 B_{PY} 수준보다 약간 높았다. $f_{current}$ 에서는 자원량이 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY}) 수준에 훨씬 못 미치는 낮은 수준에서 변동하는 것으로 나타났다. $1.50 \times f_{current}$ 에서는 자원량이 크게 감소하는 추세를 보였다.

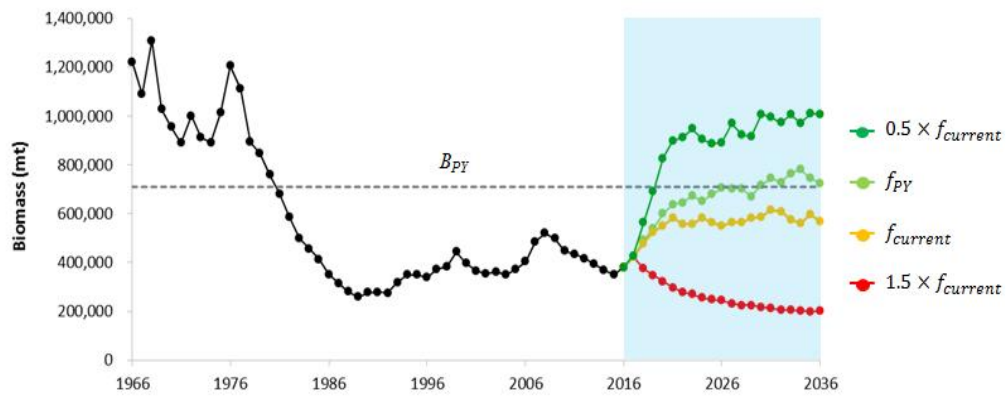


Fig. 18. Forecast results of future biomass in Korean waters of the East Sea due to the change in fishing intensity.

3. 잠재생산량 추정방법론간 비교 분석

3.1. 생태계 역학 분석법

본 연구에서 생태계 역학 분석법에 의해 추정된 동해의 잠재생산량은 342,707mt, 어획대상 환경수용량은 1,811,405mt이다 (Table 21).

Table 21. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) in the Korean waters of the East Sea by the ecosystem modeling method (EMM)

	Group name	PY (mt)	ECC (mt)
1	Sharks	468	3,021
2	Rays	2,992	19,305
3	Predator pelagic	6,137	37,192
4	Chub mackerel	2,933	11,971
5	Small pelagic	35,680	175,888
6	Anchovy	9,080	44,762
7	Pacific herring	14,399	61,479
8	Flounder	5,100	36,231
9	Sandfish	6,564	24,927
10	Other demersal	126,827	668,513
11	Cephalopods	4,141	26,714
12	Common squid	83,238	537,017
13	Red snow crab	32,983	91,620
14	Epifauna	10,013	62,000
15	Infauna	2,153	10,765
	Total	342,707	1,811,405

지금까지 많은 생태계 분석 모델들이 제시되었지만 해양생태계의 영양관계 분석에 사용되는 실용적인 방법은 Polovina (1984)에 의해서 개발된 Ecopath 모델이다. 이 모델을 사용해서 생태계의 구조와 기능을 설명해 주는 다양한 생태계 특성치를 계산하고 이 값들을 다른 생태계의 값들과도 비교할 수 있다. 그러나 Ecopath는 생태계 영양 구조의 정적인 단면만을 보여 준다는 한계점이 있어서 Ecopath 모델에 의한 생태계 특성치를 기초로 구성생물들의 시간에 따른 변동을 분석할 수 있는 생태계 역학 모델이

개발되었다 (Ecosim module of Ecopath). 이 모델은 미분방정식들로 이루어진 시스템으로 역학 시뮬레이션과 평형상태의 변화를 분석할 수 있고 어업에 의한 생태계 반응을 이해하는데 사용될 수 있다 (Pauly et al., 2000). 또한 분석시에 생태계 영양 상호관계를 나타내는 생물군간의 피식-포식 관계까지 고려된다.

3.2. 생산량 기반 분석법간 비교 분석

본 연구에서 생산량 기반 분석법에 의한 동해의 잠재생산량과 어획대상 환경수용량 추정결과는 Table 22와 같다. 잠재생산량 (PY)의 범위는 통합생산량 분석법 (ASPIC 모델)의 214,000mt에서 통합생산량 분석법 (ME 모델)의 265,472mt으로 나타났다. 어획대상 환경수용량 (ECC)의 범위는 통합생산량 분석법 (ASPIC 모델)의 1,033,000mt에서 어업생산량 분석법의 1,569,845mt으로 나타났다.

Table 22. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC) in the Korean waters of the East Sea by the production-based analysis

Estimation method	PY (mt)	ECC (mt)
HPM (Fox model)	220,908 (210,001-231,815) Error: $\pm 4.9\%$	-
HPM (ASPIC model)	214,000 (210,000-228,800) Error: -1.9,+6.9%	1,033,000 (701,700-1,177,000) Error: -32.1,+13.9%
HPM (ME model)	265,472 (211,077-319,867) Error: $\pm 20.5\%$	1,415,853 (967,189-1,864,516) Error: $\pm 31.7\%$
PPM	224,458	1,382,032
FPM	264,754	1,569,845

어획량과 어획노력량 자료만을 변수로 하여 잉여생산량모델을 사용하여 어획대상 환경수용량을 추정하는 통합생산량 분석법은 추정에 필요한 자료의 수가 적고 모델의 개념이 간단하여 쉽게 사용할 수 있다. 또한 추정에 사용된 잉여생산량모델의 적합도가 양호하고, 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높은 장점이 있다. 통합생산량 분석법의 Fox 모델은 전통적인 잉여생산량모델로 어획이 없을 때의 평형상태에서 얻어지는 잉여량을 잉여생산량으로 계산하기 때문에 대상자원이 평형상태임을 가정한다. 통합생산량 분석법의 ASPIC 모델은 Fox 모델과 달리 대상자원이 평형상태라 가정하지 않고, 관측오차를 사용하여 자원의 어업자료를 잉여생산량모델에 적합시켜 합리적인 파라미터의 추정이 가능하다 (Prager, 2005). 잠재생산량 뿐만 아니라 생태학적으로 중요한 어획대상 환경수용량 ($K=ECC$), PY시의 자원량 (B_{PY}) 등의 파라미터 추정도 가능하며, 편차 추정을 위해 부트스트랩

과 비모수 신뢰구간을 사용한다. 통합생산량 분석법의 ME 모델은 비평형 잉여생산량모델로서 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하므로 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높다. 다음으로 개체군생산량 분석법은 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정한다. 마지막으로 어업생산량 분석법은 어업별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정한다.

생산량 기반 추정방법간 비교 분석 결과, 추정치의 신뢰도를 고려해 볼 때 다섯 가지 추정방법 중에서 통합생산량 분석법이 1) 상대적으로 적은 가정과 파라미터를 사용하고, 2) 자원 개발 초기단계 자료부터 사용하여 잠재생산량 뿐만 아니라, 3) 연도별 자원량까지 추정이 가능하다. 4) 통합생산량 분석법 중에서도 ME 모델이 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하여 잠재생산량을 추정하기 때문에 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높다. 5) 통합생산량 분석법에서는 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 Theil의 U 통계량 (U)을 계산하여 평가한 결과, 통합생산량 분석법에서 사용된 세 가지 잉여생산량모델 중 ME 모델에 의한 추정치의 U값이 1이하로 가장 낮았다. 최종적으로 선정된 ME 모델에 의한 PY 추정치의 입력자료 변화에 따른 민감도 분석을 실시한 결과, 어획량 변화율에 비례하여 PY 추정치가 일률적으로 증감하는 경향을 보였다. 생산량 기반 분석법의 통합생산량 분석법 (ME 모델)에 의해 추정된 동해의 잠재생산량은 265,472mt이며, 추정치의 95% 신뢰구간은 211,077-319,867mt (오차: $\pm 20.5\%$)이다.

3.3. 생태계 역학 분석법과 생산량 기반 분석법간 비교 분석

분류군별로 비교가 가능한 생산량 기반 분석법의 개체군생산량 분석법과 생태계 역학 분석법의 잠재생산량 추정결과는 Table 23 및 Fig. 19와 같다. 가오리류, 기타 저서어류, 소형 표층어류 등의 일부 분류군에서는 추정된 잠재생산량이 개체군생산량 분석법에 대하여 생태계 분석법의 추정결과가 약 3~13배 이상의 차이를 보였다. 그 이유로는 다음과 같은 요인들의 영향을 고려해 볼 수 있다. 생태계 역학 분석법에 의한 잠재생산량 추정은 기초생산자 (식물플랑크톤, 동물플랑크톤)에 대한 불확실한 생체량 자료 사용, 그 외 기초 입력자료인 P/B비, Q/B비 등에 대해 주로 외국 문헌자료를 사용하였다. 개체군생산량 분석법에서는 생산량 기반 분석법간 추정결과 비교에서와 마찬가지로 해역별 어장면적이 고려되었지만, 트롤대상어종에 대하여 생태계 분석법에서는 1960년대 말의 생체량 추정 자료를 사용하였으나, 개체군생산량 분석법에서는 자원이 개발되어 감소된 이후의 평가자료를 이용하여 생태계 역학 분석법보다 잠재생산량이 과소 추정되었을 가능성이 있다. 예를 들면, 소형 표층어류의 잠재생산량이 개체군생산량 분석법에서 약 3배 적게 추정이 되었다.

Table 23. The potential yield (PY) by group in the Korean waters of the East Sea estimated by the ecosystem dynamics analysis and production-based analysis

	Group name	PY by the PPM (mt)	PY by the EMM (mt)	Difference (%)	Average catch in recent 5 years (2012-2016) (mt)
1	Rays	272	3,460	1,171	221
2	Predator pelagic	11,381	6,137	-46	7,669
3	Chub mackerel	2,529	2,933	16	1,782
4	Small pelagic	10,819	35,680	230	3,886
5	Anchovy	1,187	9,080	665	953
6	Pacific herring	41,726	14,399	-65	17,887
7	Flounder	7,665	5,100	-33	6,781
8	Sandfish	6,511	6,564	1	5,579
9	Other demersal	21,331	126,827	495	10,574
10	Cephalopods	4,099	4,141	1	4,358
11	Common squid	80,208	83,238	4	69,026
12	Red snow crab	30,120	32,983	10	38,136
13	Epifauna	6,128	10,013	63	6,876
14	Infauna	481	2,153	348	390
	Total	224,458	342,707	-	174,118

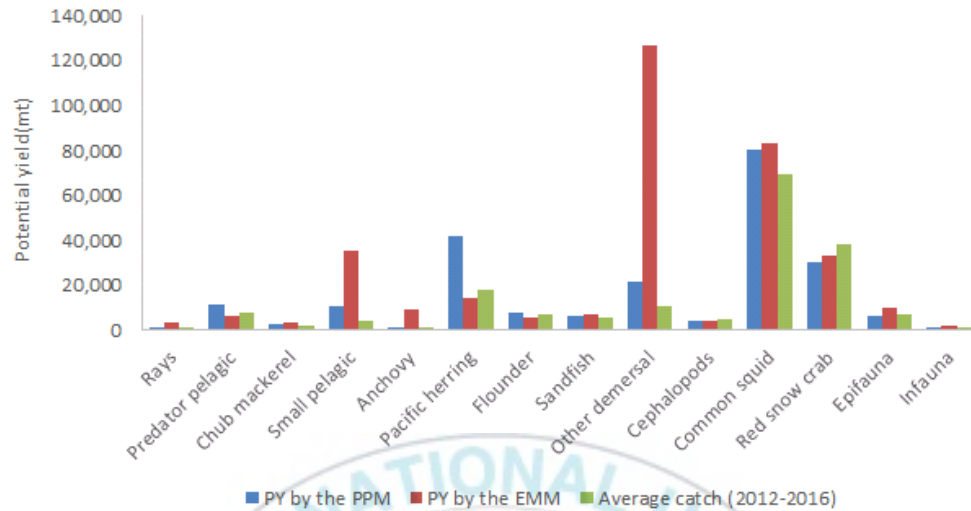


Fig. 19. Comparison of the potential yield (PY) by group in the Korean waters of the East Sea estimated by the ecosystem dynamics analysis and production-based analysis.

따라서, 생태계 역학 분석법과 생산량 기반 분석법에 의해 추정된 동해의 잠재생산량은 통합생산량 분석법 (ASPIC 모델)의 214,000mt에서 생태계 역학 분석법의 342,707mt으로 나타났다 (Table 24와 Fig. 20).

Table 24. The potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by estimation method

Potential yield (PY) (mt)					
EMM	HPM (Fox model)	HPM (ASPIC model)	HPM (ME model)	PPM	FPM
342,707	220,908 (210,001-231,815) Error: ±4.9%	214,000 (210,000-228,800) Error:-1.9,+6.9%	265,472 (211,077-319,867) Error: ±20.5%	224,458	264,754

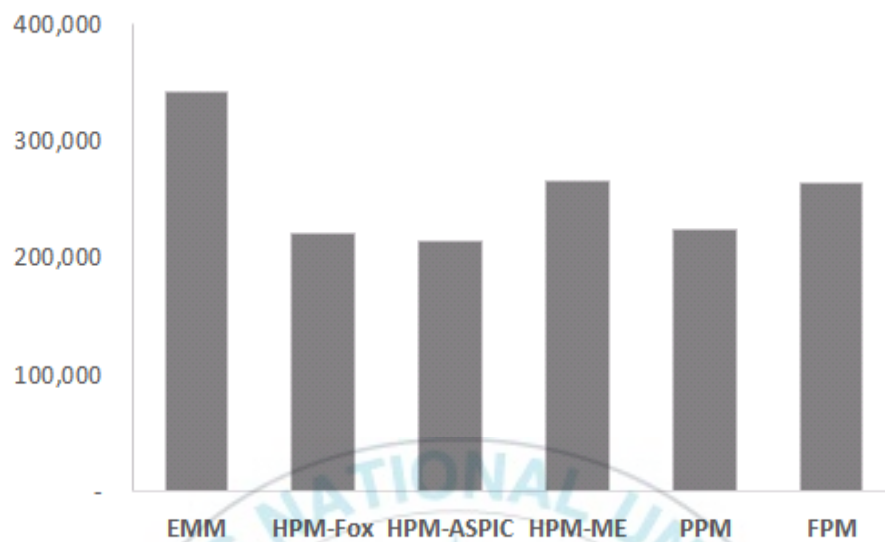


Fig. 20. Comparison of the potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by estimation method.

IV. 고찰

1. 한국 동해 생태계에 적합한 잠재생산량 추정방법

본 연구에서 6가지 잠재생산량 추정방법을 통해 추정된 동해의 잠재생산량은 통합생산량 분석법 (ASPIC 모델)의 214,000mt에서 생태계 역학 분석법의 342,707mt으로 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 생체량 (B), 생산량/생체량 (P/B)비, 섭식량/생체량 (Q/B)비, 어획량 (C), 먹이조성(DC) 자료 등 잠재생산량 추정에 필요한 자료들이 많아서 현실적으로 이런 자료들을 모두 구축하기는 쉽지 않다. 따라서 분석시에 P/B비는 순간전사망계수 (Z) 추정치로부터 간접적으로 추정하여 가정하고, Q/B비와 먹이조성 자료 등은 주로 외국문헌을 참고하여 사용함으로써 기초 입력자료의 불확실성이 크다는 한계가 있다.

생산량 기반 분석법에서 통합생산량 분석법의 Fox 모델의 경우, 전통적인 잉여생산량모델로서 어획이 없을 때의 평형상태에서 얻어지는 잉여량을 생산량으로 계산하기 때문에 대상자원이 평형상태임을 가정한다. 따라서 현재 어획되고 있는 자원을 대상으로 잠재생산량 추정을 위해 잉여생산량 모델을 적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. 그리고 PY 와 f_{PY} 의 추정은 가능하지만 기타 중요한 생태학적 파라미터인 어획 대상 환경수용량 ($K=ECC$), PY 시의 자원량 (B_{PY}), 내적자연증가율 (r) 등을 추정할 수 없다는 한계가 있다. 통합생산량 분석법의 ASPIC 모델은 잠재

생산량 추정을 위해 최대지속적생산량 ($MSY=PY$), 어획대상 환경수용량 ($K=ECC$), 어획대상 환경수용량에 대한 분석 시작 시점시의 자원량의 비 (B_1/K), 어획능률 (q)에 대한 초기값을 설정한다. 이 경우 사용되는 어업자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 환경수용량과 내적자연증가율 (r)을 추정하기 때문에 사용되는 어업자료에 민감할 수 있다. 반면에 통합생산량 분석법의 ME 모델은 Fox 모델과 같이 평형상태를 가정하지도 않고, 확률치로 파라미터를 추정하기 때문에 상대적으로 신뢰성이 높은 추정방법이라 판단할 수 있다.

생산량 기반 분석법에서 개체군생산량 분석법은 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정한다. 이 과정에서 대상 생태계인 동해에 대한 어종별 잠재생산량을 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, 잠재생산량 추정시에 해역별 어장면적이 고려되었다. 하지만 주요어종 (86.6%) 이외 어종은 대부분 사용가능한 자료가 부족하여 잉여생산량 모델에 의한 잠재생산량의 직접 추정이 어려워 외삽의 방법을 사용하므로 추정치의 불확실성이 크다는 한계점이 있다.

생산량 기반 분석법에서 어업생산량 분석법은 어업별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 잠재생산량을 추정한다. 이 과정에서 어업별 어획량 및 어획노력량 (CPUE 등) 자료가 부족한 어업의 경우, 개체군생산량 분석법과 마찬가지로 주요어업 (54.8%) 이외 어업의 잠재생산량 추정치에 대하여 외삽의 방법을 사용함으로써 불확실성이 증가하였다. 또한 어업 성능 향상에 따라 확대된 어장면적이 고려되지 않아 추정치가 과소추정되었을 가능성이 있다는 한계점이 있다.

분류군별로 비교가 가능한 생태계 역학 분석법과 생산량 기반 분석법의 개체군생산량 분석법의 추정결과 비교시에는 생태계 내 어종군간의 먹이관계를 고려한 생태계 모델의 추정방법과 각 어종군만의 자원역학만을 고려한 잉여생산량 모델의 추정방법 자체의 차이점에 의해서 두 추정방법간의 결과 차이가 발생했을 것으로 판단된다. 따라서 현재 기초자료 수준에서 생태계 역학 분석법에 의한 결과를 수산자원관리에 반영하기에는 불확실성이 크기는 하지만, 자원이 개발되어 감소된 이후의 평가자료를 이용하는 개체군생산량 분석법보다는 생태계 역학 분석법에 의한 결과를 반영하는 것이 보다 합리적으로 판단된다. 하지만, 6가지 추정방법을 모두 고려하면 현실적으로 잠재생산량 추정에 필요한 많은 입력 파라미터 자료들을 모두 구축하기 쉽지 않은 생태계 역학 분석법을 사용하기에는 추정치의 불확실성이 클 것으로 판단된다. 상대적으로 적은 가정과 파라미터를 이용하고 51개년의 자원 개발 초기단계 자료부터 사용한 생산량 기반 분석법의 통합생산량 분석법 (ME 모델)에 의해 추정된 잠재생산량의 오차가 상대적으로 적을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 통합생산량 분석법 (ME 모델)이 가장 합리적이고, 우리나라 동해 생태계에 적합한 잠재생산량 추정방법으로 판단되었다.

최종적으로 선정된 통합생산량 분석법 (ME 모델)에 의한 동해의 잠재생산량과 어획대상 환경수용량과 추정결과는 Table 25, Fig. 21, Fig. 22와 같다. 동해의 잠재생산량은 265,472mt, 어획대상 환경수용량은 1,415,853mt로 추정되었다. 여기서, ME모델에 의한 자원량 추정치는 단위노력당어획량 (CPUE)의 변동을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 자원량의 3개년 이동평균 추세로 자원량을 살펴본 결과, 동해 전체 자원량이 지속적으로 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 21).

Table 25. The potential yield (PY) and exploitable carrying capacity (ECC)
in the Korean waters of the East Sea by the ME model

PY (mt)	Error of 95% confidence interval of PY (%)	ECC (mt)	B ₂₀₁₆ (mt)	B _{PY} (mt)	C ₂₀₁₆ (mt)
265,472 (211,077-319,867)	±20.5	1,415,853	379,912	707,926	165,585

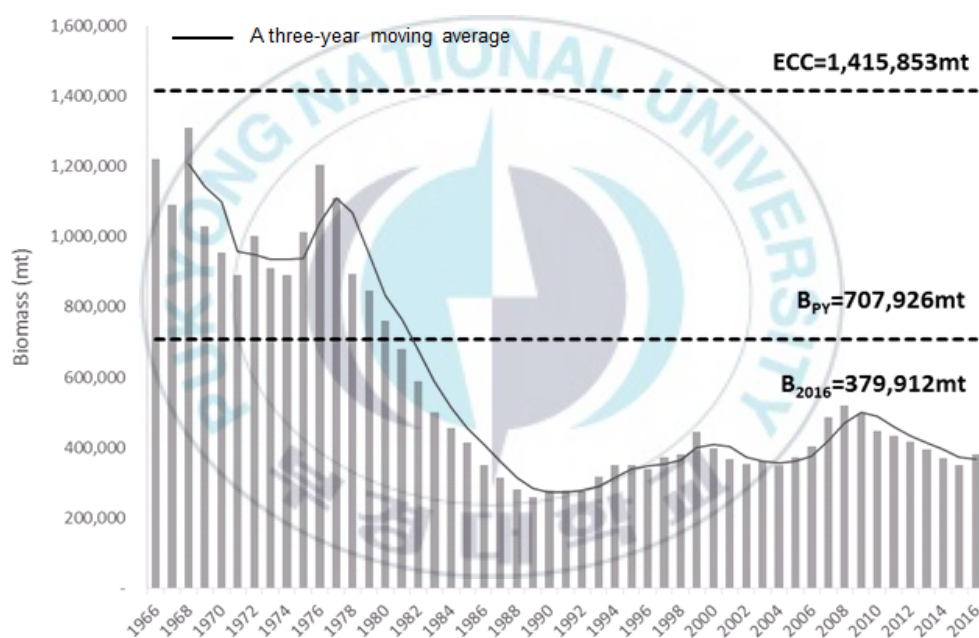


Fig. 21. Variations in annual biomass in the Korean waters of the East Sea by the ME model.

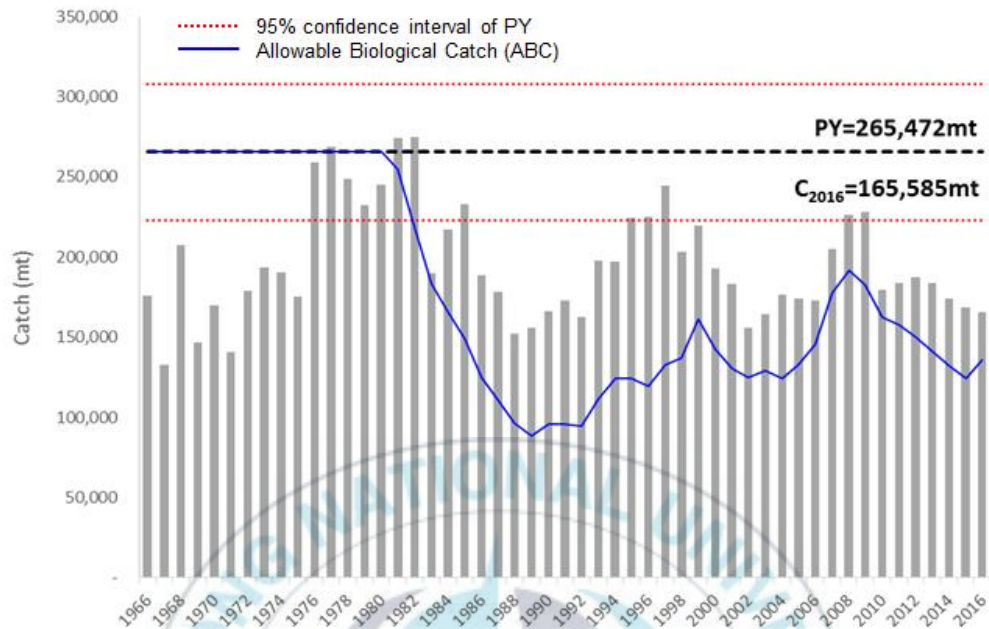


Fig. 22. Variations in annual catch in the Korean waters of the East Sea by the ME model.

최종적으로 선정된 통합생산량 분석법 (ME 모델)에 의해 추정된 동해의 자원량은 1968년도에 1,309,398mt으로 가장 높았고, 그 이후 꾸준히 감소하여 1980년대 초반부터는 B_{PY} 수준인 707,926mt보다 자원량이 감소하기 시작하여 현재 2016년은 자원량이 379,912mt 수준이다 (Fig. 21).

2. 한국 동해 생태계 자원관리를 위한 제언

본 연구에서는 앞서 Table 25와 같이 최종적으로 통합생산량 분석법 (ME 모델)을 잠재생산량의 추정을 위한 가장 합리적인 추정방법으로 선정하였고, 이에 따라 동해의 잠재생산량은 265,472mt (211,077-319,867mt, 오차: $\pm 20.5\%$)으로 추정되었다. 통합생산량 분석법 (ME 모델)에 의해 추정된

동해의 자원량 변동을 살펴보면 어획초기인 1970년대 초반부터 꾸준히 감소하여 1980년대 초반부터는 B_{PY} 수준인 707,926mt보다 자원량이 감소하기 시작하여 현재 2016년은 자원량이 165,585mt 수준이다 (Fig. 21). 1970년대에 동해의 어획량이 생물학적허용어획량 (ABC) 수준보다 낮음에도 불구하고 자원량이 감소하는 이유는 중국, 일본 등 주변국과의 경쟁조업으로 인한 남획과 저층끌어구류의 성행으로 인한 주요 서식처 훼손 등으로 자원이 감소한 것으로 보인다 (Fig. 22). 1980년대 이후부터 2000년대 초반까지는 ABC를 훨씬 초과하여 과도한 어획이 이루어졌기 때문에 자원량이 감소한 것으로 보인다. 2002년부터 2008년까지는 총허용어획량 (total allowable catch, TAC) 제도의 본격적인 시행으로 어획량과 ABC 간의 격차가 비교적 감소하여 자원이 회복되는 경향을 보였지만 최근에는 다시 감소하는 경향을 보였다.

본 연구에서 동해 생태계의 잠재생산량을 추정하기 위해 사용된 어획량 자료는 통계청의 공식 통계자료 (KOSIS)를 기반으로 분석에 사용하였다. 하지만 어획량 허위보고, 불법 공조조업 등을 지도·단속하는 해양수산분야의 유관기관에 청취조사를 한 결과, 우리나라 연근해 어획량 보고 및 집계 실태에 여러가지 문제점들이 있었다. 실제로는 동해에서 조업하여 어획을 하였어도 부산공동어시장에서 어획물을 위판한다면 부산의 어획량으로 집계되고 있는 실정이다. 이러한 경우에 부산은 행정구역 기준상으로 남해에 해당되기 때문에 실제 동해에서 조업된 어획량의 집계가 누락될 가능성이 있다. 또한 어획보고 시스템이 구축되어 있기는 하지만 정확한 조업위치를 보고하지 않고 어획량도 허위로 보고하는 경우가 많아서 실제 어획량과 통계청에 집계된 어획량이 상이할 가능성이 있다. 예를 들어, 동해의 주요 어종인 살오징어의 경우에도 최근들어 대형트롤에 의한 어획비율이 높아지고 있는데 부산에서 위판될 경우 남해의 어획량으로 집계가 되고

있는 실정이다. 따라서 원양어선의 전자조업보고시스템 (electronic reporting system, ERS)과 같이 향후 연근해 어선에도 정확한 조업위치와 어획량을 보고할 수 있는 어획보고 시스템을 개선 및 구축하고 승선옵서버 제도를 도입한다면 정확한 통계자료를 기반으로 보다 신뢰성 있는 동해 생태계의 잠재생산량을 추정할 수 있을 것이다.

지속가능하고 합리적인 수산자원의 관리를 위해서는 자원량의 변동을 파악하고 현재 자원이 어느 수준에 있는지를 판단하여 자원관리를 수행할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서 잠재생산량의 추정을 위한 가장 합리적인 추정방법으로 선정된 통합생산량 분석법 (ME 모델)은 동해 생태계에 적합한 잠재생산량 추정치를 제시하고, 이는 효율적인 자원관리의 지표로 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서는 어획강도 변화에 따른 향후 20년 (2017-2036년)에 대한 동해의 자원량을 예측하였다. 현 2016년 어획노력량 수준 ($f_{current}$)을 유지할 경우 자원량이 잠재생산량을 달성하기 위한 수준의 자원량 (B_{PY}) 수준에 훨씬 못 미치는 낮은 수준에서 변동하는 것으로 보아 현 수준이 남획수준임을 알 수 있다. 따라서 잠재생산량 (265,472mt) 수준의 어획량을 얻기 위해서는 f_{PY} 시나리오에 따라 어획노력량을 f_{PY} 수준으로 감소시켜 자원량을 B_{PY} (707,926mt) 수준으로 증가시키고 이에 따른 어획량은 잠재생산량 수준으로 증가시켜야 한다. 현재 2016년의 379,912mt 수준인 자원량의 약 1.9배인 B_{PY} (707,926mt)를 목표자원량으로 설정하여 자원을 회복시키기 위한 적절한 관리방안을 수립하고 적극적으로 실시한다면, 현재 2016년의 165,585mt 수준인 어획량을 약 1.6배 증가시킨 잠재생산량 수준인 265,472mt까지 어획이 가능할 것으로 기대된다.

V. 요약

우리나라 연근해는 과거 수산자원의 과도한 남획, 환경오염과 간척사업 등으로 인한 연안어장의 생산성 감소와 어장생태계의 질적 저하로 인해, 수산자원이 양적·질적으로 위험한 수준에 있다. 지속가능하고 효과적인 수산자원 관리를 위해서는 우리나라 연근해 수산자원의 향후 이용가능한 잠재생산량 (potential yield, PY)을 정확히 알아야 하는데 현재까지는 잠재생산량 추정방법에 관한 국내 연구가 거의 없는 실정이다. 하나의 자원으로부터 지속적으로 취할 수 있는 최대 어획량인 잠재생산량은 우리나라 연근해의 생태계 기반 자원평가를 위한 기준점 설정시에도 반드시 필요한 자료이다. 하지만 지금까지는 추정방법론간의 장·단점을 비교 분석하거나 광역생태계를 대상으로 하는 실질적인 잠재생산량 추정방법에 관한 연구가 없었다. 따라서, 수산자원의 합리적 관리를 위해서는 개체군 역학과 생태계 분석을 결합한 광범위하고 종합적인 차원에서의 잠재생산량 추정방법에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 잠재생산량 추정방법들간의 비교 분석을 통해 각 방법의 장·단점을 파악하고, 개체군 역학과 생태계 역학을 고려한 광범위하고 종합적인 차원에서의 잠재생산량 추정방법으로 보완하였다.

생태계 역학 분석법은 전체 생태계 변화를 예측할 수 있다는 장점이 있으나, 잠재생산량 추정에 필요한 입력 파라미터들이 많아서 현실적으로 모든 자료를 구축하기에는 한계가 있어 추정치의 불확실성이 클 것으로 판단되었다. 생산량 기반 분석법의 통합생산량 분석법은 상대적으로 적은 가정과 파라미터를 사용하고, 51개년의 자원 개발 초기단계 자료부터 사용하여 잠재생산량을 추정하였다. 특히 통합생산량 분석법 중 ME 모델이 각 파라

미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하여 잠재생산량을 추정하기 때문에 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높아서 가장 합리적인 추정방법으로 판단되어 가장 적합한 잠재생산량 추정방법으로 통합생산량 분석법 (ME 모델)을 선정하였다. 이 연구결과는 수산자원의 효율적인 관리를 위한 지표와 기준점을 제시하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.



VI. 참고문헌

- Alias, M. 2003. Trophic Model of the Coastal Fisheries Ecosystem of the West Coast of Peninsular Malaysia. WorldFish Center Conference Proceedings 67, 313-332.
- Allen, K. R. 1971. Relation between production and biomass. J. Fish. Res. Bd. Can. 28, 1573-1581.
- Alverson, D. L., A. R. Longhurst and J. A. Gulland. 1970. How much food from the sea? Science 168, 503-505.
- Banase, K. and S. Mosher. 1980. Adult body mass and annual production/biomass relationships of field populations. Ecol. Monogr. 50, 355-379.
- Beddington, J. R. and G. P. Kirkwood. 2005. The estimation of potential yield and stock status using life-history parameters. Phil Trans R Soc B 360, 163-170.
- Cho, H. J., C. H. Moon, H. S. Yang, W. B. Kang and K. W. Lee. 1997. Regeneration processes of nutrients in the polar front area of the East Sea. J. Korean. Fish. Soc. 30(3), 393-407 (in Korean with English abstract).
- Christensen, V. and C. J. Waters. 2004. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations. Ecol. Model. 172, 109-139.
- Christensen, V. and D. Pauly. 1992. ECOPATH II a software for balancing steady ecosystem models and calculating network characteristics. Ecol. Modelling. 61, 169-185.

- Christensen, V. and D. Pauly. 1995. Fish production, catches and the carrying capacity of the world oceans. *NAGA, the ICLARM Q.* 18(3), 34-40.
- Coll, M., I. Palomera and S. Tudela. 2009a. Decadal changes in a NW Mediterranean Sea food web in relation to fishing exploitation. *Ecological Modeling* 220, 2088-2102.
- Coll, M., A. Santojanni, I. Palomera and E. Arneri. 2009b. Food-web changes in the Adriatic Sea over the last three decades. *Marine Ecology Progress Series* 381, 17-37.
- Cortes, E. 2016. Perspectives on the intrinsic rate of population growth. *Methods in Ecology and Evolution* 7, 1136-1145.
- FAO. 1995. Code of Conduct for Responsible Fisheries. FAO, Rome. 41 pp.
- FAO Statistics. FAO Fisheries & Aquaculture - Statistics (<http://www.fao.org/fishery/statistics/collections/en>).
- Fox, WW Jr. 1974. An overview of production modelling. 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, on September 2–7, 1974. WTPD–Nantes/74/13, 143-156.
- Golan, A., G. Judge and L. Karp. 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.
- Gong, Y. and M. Y. Oh. 1977. Oceanographic Environments and

- Fisheries Resources off the East Coast of Korea. National Federation of fisheries cooperative. 633 pp.
- Gulland, J. A. 1971. The Fish Resources of the Ocean. Fishing News (Books), West Byfleet, 255 pp.
- ICES. 1994. Report of the Study Group on Seabird/Fish Interactions. ICES CM 1994/L;3.
- ICES. 1995. Report of the Study Group on Ecosystem Effects of Fishing Activities. ICES Cooperative Research Report, No. 200.
- Ito, S. I., M. J. Kishi, Y. Kurita, Y. Oozeki, Y. Yamanaka, B. A. Megrey and F. E. Werner. 2004. Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model. Fish. Oceanogr. 13 (Suppl. 1), 111-124.
- Jamieson, G. and C. I. Zhang (Eds.). 2005. Report of the Study Group on Ecosystem-Based Management Science and its Application to the North Pacific. PICES Science Report No. 29, 77 pp.
- Jang, S. H., H. S. Ryu and J. H. Lee. 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 (in Korean with English abstract).
- Johnson, M. G. and R. O. Brinkhurst. 1971. Production of benthic macroinvertebrates of Bay of Quinte and Lake Ontario. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 28, 1699-1714.
- Kim, D. S. and K. D. Cho. 1998. The material distribution by the

- ecosystem modeling in Suyoung Bay. Journal of the Environmental Science 7(6), 817-825 (in Korean with English abstract).
- Kim, S. 2003. Changes in fisheries resources in relation to variability of oceanic environments. J. Kor. Fish. Soc. 6, 11-20 (in Korean with English abstract).
- Kim, S. and S. Kang. 1998. The status and research direction for fishery resources in the East Sea/Sea of Japan. J. Korean. Soc. Fish. Res. 1(1), 44-58 (in Korean with English abstract).
- Kim, S. and S. Kang. 1999. Recent development in the concept and research direction for carrying capacity of marine ecosystem. J. Korean. Soc. Fish. Res. 2, 101-110 (in Korean with English abstract).
- Kim, H. A. 2016. A Study on the Estimation of Potential Yield for Korean West Coast Fisheries. Master's thesis, Pukyong National University, Korea. 134 pp (in Korean).
- Kim, H. W., Z. G. Kim and S. G. Choi. 2011. Seabird distribution patterns by sighting survey in the East Sea in spring. Kor. J. Env. Eco. 25(2), 123-131 (in Korean with English abstract).
- KOSIS (Korean Statistical Information Service). Statistical database - Agriculture, Forestry and Fishery - Fishery. <http://www.kosis.kr>. Accessed in 2017 (in Korean).
- Kwon, Y., C. I. Zhang, H. D. Pyo and Y. I. Seo. 2013. Comparison of models for estimating surplus productions and methods for estimating their parameters. J. Korean. Soc. Fish. Tech. 49(1),

18-28 (in Korean with English abstract).

- Larkin, P. A. and W. Gazey. 1982. Application of ecological simulation models to management of tropical multispecies fisheries. In Theory and Management of Tropical Fisheries, pp. 123-140. ed., by D. Pauly and G.I. Murphy. ICLARM Conference Proceedings, 9.
- Lassalle, G., D. Gascuel, F. L. Loch, J. Lobry, G. J. Pierce, V. Ridoux, M. B. Santos, J. Spitz and N. Niquil. 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.
- Lee, J. B., Y. J. Shin, J. H. Lee, Y. M. Choi, D. W. Lee and H. K. Cha. 2012. Estimation of potential fishery yield for *Corbicula japonica* in the Seomjin River, Korea. Korean. J. Malacol. 28(2), 91-99 (in Korean with English abstract).
- Lee, M. W. 2014. Ecosystem-base Stock Assessment and Fisheries Management in the West Coast of Korea. Doctoral dissertation, Pukyong National University, Korea. 130 pp (in Korean).
- Lee, S. W., H. S. Lee, J. C. Yoo, J. G. Je, C. Levings and W. K. Paek. 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 (in Korean with English abstract).
- Lek, S. and J. F. Guegan. 1999. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. Ecological Modelling 120,

65-73.

- Libralato, S., M. Coll, S. Tudela, I. Palomera and F. Pranovi. 2008. Novel index for quantification of ecosystem effects of fishing as removal of secondary production. *Marine Ecology Progress Series* 355, 107-129.
- Mackinson, S. and G. Daskalov. 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 pp.
- Martell, S. and R. Froese. 2013. A simple method for estimating MSY from catch and resilience. *Fish and fisheries* 14, 504-514.
- Megrey, B. A., K. A. Rose, R. Klumb, D. Hay, F. E. Werner, D. L. Eslinger, and S. L. Smith. 2007. A bioenergetics-based population dynamics model of Pacific herring (*Clupea harengus pallasii*) coupled to a lower trophic level nutrient-phytoplankton-zooplankton model: Description, calibration, and sensitivity analysis. *Ecological Modelling* 202, 144-164.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2000. Studies on the TAC-based Fisheries Management System and Quota Allocations for Jointly Exploited Fisheries Resources under the EEZ Regime. 542 pp (in Korean with English abstract).
- Murawski, S. A. 2000. Definitions of overfishing from an ecosystem perspective. *ICES Journal of Marine Science* 57, 649-658.
- Mustafa, M. G. 2003. Trophic model of the coastal ecosystem in the waters of Bangladesh, Bay of Bengal. WorldFish Center

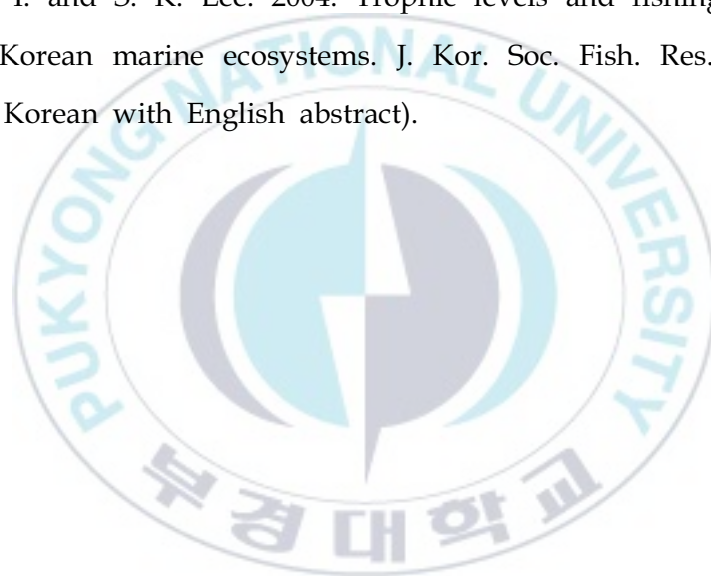
- Conference Proceedings 67, 263-280.
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2002. Fishing Gear of Korea. 579 pp (in Korean).
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2013. Ecology and Fishing Ground of Fisheries Resources in Korean Waters. 401 pp (in Korean).
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2016. Study on the Estimation of Fishing Power according to the Development of Fishing Vessels and Gears. 114 pp (in Korean).
- NIFS (National Institute of Fisheries and Science). 2016. Study on Analysis of Diet Composition of Major Species in the Korean Waters. 92 pp (in Korean).
- NRC (National Research Council). 1999. Sustaining Marine Fisheries. National Research Council, National Academy Press, Washington DC., 184 pp.
- Palomares, M. L. and D. Pauly. 1989. A multiple regression model for predicting the food consumption of marine fish populations. Aust. J. Mar. Freshwat. Res. 40, 259-273.
- Park, K. J., Y. R. An, Z. G. Kim, S. G. Choi, D. Y. Moon and J. E. Park. 2009. Abundance estimate of the Minke Whale, *Balaenoptera acutorostrata*, in the East Sea, Korea. Kor. J. Fish. Aquat. Sci. 42(6), 642-649 (in Korean with English abstract).
- Pauly, D. and V. Christensen, 1995. Primary production required to sustain global fisheries. Nature. 374, 255-257.
- Pauly, D. V. Christensen, J. Dalsgaard, R. Froese and F. Torres Jr. 1998.

- Fishing down marine food webs. *Science* 279, 860-863.
- Pauly, D. V. Christensen and C. Waters, 2000. Ecopath, Ecosim and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 57, 697-706.
- Polovina, J. J. 1984. Model of a coral reef ecosystem. I. The ECOPATH model and its application to French Shoals. *Coral Reefs* 3(1), 1-11.
- Prager, M. H. 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, 27 pp.
- Prager, M. H. 2013. User's Guide for ASPIC: A Stock-Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Programs. Prager Consulting, Portland, Oregon, USA, 26 pp.
- Raymont, J. E. G. 1980. Plankton and productivity in the oceans. *Phytoplankton*. Pergamon Press 1, 8-9.
- Rosenthal, R. E. 2016. GAMS - A User's Guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA, 571 pp.
- Rudstam, L. G. 1988. Exploring the dynamics of herring consumption in the Baltic: applications of an energetic model of fish growth. *Kieler Meeresforsch., Sonderh* 6, 312-322.
- Russell, E. S. 1931. Some theoretical considerations of the overfishing problem. *J. Cons. int. Explor. Mer.* 6, 1-20.
- Ryther, J. H. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science*, 166, 72-76.

- Seo, Y. I. 2011. Ecosystem-based Stock Assessment and Fisheries Management in the Southern Sea of Korea. Doctoral dissertation, Pukyong National University, Korea. 168 pp (in Korean with English abstract).
- Seo, Y. I., K. S. Hwang, H. K. Cha, T. Y. Oh, H. S. Jo, B. Y. Kim, K. J. Ryu and Y. W. Lee. 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 (in Korean with English abstract).
- Shannon, C. E., and W. Wiener, 1963. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, Univ. of Illinois Press, 125 pp.
- Shin, Y. J. 2009. A method for Estimating Potential Fishery Yield in Coastal Waters. Master's thesis, Pukyong National University, Korea. 53 pp (in Korean with English abstract).
- Tamura, T. and Y. Fujise. 2002. Geographical and seasonal changes of the prey species of minke whale in the Northwestern Pacific. ICES Journal of Marine Science, 59: 516-528.
- The World Bank and FAO. 2009. The Sunken Billions - The Economic Justification for Fisheries Reform. The World Bank, 100 pp.
- Theil, H. 1966. Applied Economic Forecasting. Chicago, Rand McNally.
- Trites, A. W., P. A. Livingston, S. Mackinson, M. C. Vasconcellos, A. M. Springer and D. Pauly. 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, Vol. 7. 100 pp.

- Tukey, J. W. 1958. Bias and confidence in not quite large samples. *The Annals of Mathematical Statistics* 29, 614-623.
- Waters, T. F. 1969. The turnover ratio in production ecology of freshwater invertebrates. *The American Naturalist*, Vol. 103, No. 930. 173-185.
- Wooster, W. S. and C. I. Zhang. 2004. Regime shifts in the North Pacific: early indications of the 1976-1977 event. *Progress in Oceanography*, 60: 183-200.
- Yasui, M., Y. Yasuoka, K. Tamioka and O. Shiota. 1967. Oceanographic studies of the Japan Sea (1)-Water characteristics. *Oceanographical Magazine*, 19: 177-192.
- Zar, J. H. 1999. *Biostatistical Analysis*. 4th ed. Prentice Hall International, Inc, 663 pp.
- Zhang, C. I. 2014. *Assessment and Management of Fisheries Resources*. Fisheries economic institute books. 399 pp (in Korean).
- Zhang, C. I., J. B. Lee, S. Kim and J. H. Oh. 2000. Climate regime shifts and their impacts on marine ecosystem and fisheries resources in Korean waters. *Progress in Oceanography* 47, 171-190.
- Zhang, C. I. and J. B. Lee. 2001. Stock assessment and management implications of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) in Korean waters, based on the relationships between recruitment and the ocean environment. *Progress in Oceanography* 49, 513-537.
- Zhang, C. I. 2002. Prospect of ecosystem-based fisheries resource management. *J. Kor. Soc. Fish. Res.* 5, 73-90 (in Korean with English abstract).

- Zhang, C. I., S. I. Lee and J. M. Kim. 2003. Ecosystem-based management of fisheries resources in marine ranching areas. J. Kor. Soc. Fish. Res. 6, 71-83 (in Korean with English abstract).
- Zhang, C. I. and S. C. Yoon. 2003. Effects of Climatic Regime Shift on the Structure of Marine Ecosystem in the Southwestern East Sea during the 1970s. Kor. Soc. Fish. Res. 36(4), 389-401 (in Korean with English abstract).
- Zhang, C. I. and S. K. Lee. 2004. Trophic levels and fishing intensities in Korean marine ecosystems. J. Kor. Soc. Fish. Res. 6, 140-152 (in Korean with English abstract).



Appendix

Appendix 1. Notations used in comparing the estimation methods for the potential yield in the Korean waters of the East Sea

Notation	Description
ABC	Allowable biological catch
B_0	Initial biomass
B_1/K	Ratio of biomass to carrying capacity (K) at the beginning of the analysis
B_{60s}	Biomass in 1960
B_i	Biomass of species i during specific period
B_{MSY}	Biomass at the level to achieve the maximum sustainable yield
B_{PY}	Biomass at the level to achieve the potential yield
B_t	Biomass in year t
C	Catch
$C_{E,s}$	Catch of species s in the Korean waters of the East Sea
$C_{G,s}$	Catch of species s of group G in the Korean waters of the East Sea
$C_{G,std}$	Catch of standard species (or fisheries) of group G in the Korean waters of the East Sea
$C_{K,s}$	Catch of species s in the whole Korean waters
C_{max}	Maximum equilibrium catch in recent 5 years (2012~2016)
C_t	Catch in year t
$CE_{t,r}$	Initial value of catching efficiency about standard year
$CE_{v,t}$	Catching efficiency about fishery in year t
CPUE	Catch per unit effort
CV	Coefficient of variation

CV_{ECC}	Coefficient of variation for the target ECC
DC_{ji}	Portion of the prey i consumed by the predator j
E_t	Fishing effort in year t
ECC	Exploitable carrying capacity at the fishery level
$ECC_{E,s}$	ECC by species s in the Korean waters of the East Sea
$ECC_{G,F}$	ECC of fisheries F of group G in the Korean waters of the East Sea
$ECC_{G,s}$	ECC of species s of group G in the Korean waters of the East Sea
$ECC_{G,std}$	ECC of standard species (or fisheries) of group G in the Korean waters of the East Sea
ECC_s	ECC of species s in the whole Korean waters
EE	Ecotrophic efficiency
EMM	Ecosystem modeling method
f	Fishing effort
F	Fishing mortality rate
FPM	Fishery production method
f_{MSY}	Fishing effort at the level to achieve the maximum sustainable yield
F_{MSY}	Fishing mortality at the level to achieve the maximum sustainable yield
f_{PY}	Fishing effort at the level to achieve the potential yield
F_{PY}	Fishing mortality at the level to achieve the potential yield
$f_{t,v}$	Standardized gross tonnage for the fishery v in the Korean waters of the East Sea
G	Growth rate
GT	Gross tonnage
$GTPV_{t,v}$	Gross tonnage per vessel for the fishery v ($GT_{t,v}/V_{t,v}$)
h	Maximum range of probability p of each parameter
H_i	Harvesting rate of species i over time
HPM	Holistic production method

i	Specific group i within ecosystem which have same state from start to the end of specific circumstance and time
K	Carrying capacity at the species level
M	Natural mortality rate
M_0	Other mortality rate excluding mortality about fishing and feed
m_{jack}	Mean estimated by Jackknife method
MSY	Maximum sustainable yield at the species level
n	Number of rawdata
PPM	Population production method
PY	Potential yield at the fishery level
$PY_{E,s}$	PY by species in the Korean waters of the East Sea
$PY_{G,F}$	PY of fisheries F of group G in the Korean waters of the East Sea
$PY_{G,s}$	PY of species s of group G in the Korean waters of the East Sea
$PY_{G,std}$	PY of standard species (or fisheries) of group G in the Korean waters of the East Sea
PY_s	PY of species s in the whole Korean waters
q	Catchability
Q_i	Total consumption per hour of species i
Q_{ji}	Amount of prey i consumed by predator j
r	Intrinsic rate of natural increase
$RMSE$	Root mean square error
RV	Random coefficient of variation
s	Species
SI	Sensitivity index
SE_{jack}	Standard error estimated by Jackknife method
t	Year
T	Turnover ratio
$TC_{v,t}$	Technology coefficient about fishery in year t

U	Theil's U-statistic
U^*	CPUE in equilibrium
$v_{t,v}$	Number of vessel for the fishery v in the Korean waters of the East Sea
Var_{jack}	Variance estimated by Jackknife method
Y_i	Catch of species i
z	Observed CPUE
$\hat{z}$	Predicted CPUE
$z(x_i)$	Observed CPUE at x_i
$\hat{z}(x_i)$	Predicted CPUE at x_i
α_v	Annual rate of increase of technology coefficient about fishery
$\gamma_{t,v}$	Catchability for the fishery v
γ_v	Coefficient about fishery
ε_t	Observation error about catch in year t
θ_j	The estimate for the sample j
$\hat{\theta}_j$	Pseudo value estimated by the jackknife method
μ_t	Process error about biomass in year t

Appendix 2. The coding data for the GAMS program used in the estimation for the potential yield (PY) in the Korean waters of the East Sea by the ME model

SETS K YEAR37 /1*51/		
T TRISECTION /1*3/		
J ESTIMATED PARA1 /1*3/		
klast(k) last period;		
klast(k) = yes\$(ord(k)eq card(k));		
TABLE DATA(K,*) "CATCH AND EFFORT DATA"		
	YIELD	EFFORT
1	175805	35027
2	132951	38765
3	207156	36973
4	146896	45386
5	169620	47499
6	140554	50475
7	178919	48994
8	193253	54772
9	190357	53691
10	175303	53788
11	259094	52229
12	268860	58849
13	248555	76711
14	232519	81553
15	245317	84456
16	273905	93455
17	275009	108688
18	189835	120805

19	217281	132384
20	232960	136712
21	188533	156233
22	178372	160594
23	152188	172701
24	155731	171303
25	166112	169009
26	172637	177530
27	162278	189713
28	197467	172103
29	197117	152658
30	224452	155545
31	224781	163166
32	244492	167239
33	203105	161662
34	219523	167647
35	192776	152909
36	183195	144231
37	156157	140758
38	164659	138883
39	176542	132089
40	174061	134946
41	172727	135919
42	205117	134286
43	226109	122064
44	228186	111545
45	179476	111341
46	183672	110525
47	187383	114124
48	184064	116454
49	174335	116511
50	168612	124614
51	165585	120886

VARIABLES

ENT

P(J,T) PROBABILITY(PARA1&TRISECTION)

Q(K,T) PROBABILITY OF EPSILON(YEAR51&TRISECTION)

R(K,T) PROBABILITY OF MU(TEAR50&TRISECTION)

S(K,T) PROBABILITY OF STOCK(YEAR51&TRISECTION);

POSITIVE VARIABLES P(J,T);

POSITIVE VARIABLES Q(K,T);

POSITIVE VARIABLES R(K,T);

POSITIVE VARIABLES S(K,T);

PARAMETER Y(K) YIELD;

Y(K)=DATA(K,'YIELD');

PARAMETER E(K) EFFORT;

E(K)=DATA(K,'EFFORT');

FILE REPORT /D:CatchModel1.OUT/;

PUT REPORT;

PUT "MAXIMUM ENTROPY MODEL 1"/;

SCALAR X0 % /0.000/

X1 % /0.5/

X2 % /1.0/

Q0 scale /0.000/

Q1 scale /665344/

Q2 scale /1330689/

EQUATIONS

OBJ

REY(K)

```

REX(K)
SUMST1(J)
SUMST2(K)
SUMST3(K)
SUMST4(K);

OBJ .. ENT=E= -(SUM(J,SUM(T,P(J,T)*LOG(P(J,T))))
      + SUM(K,SUM(T,Q(K,T)*LOG(Q(K,T))))
      + SUM(K,SUM(T,R(K,T)*LOG(R(K,T))))
      + SUM(K,SUM(T,S(K,T)*LOG(S(K,T)))));

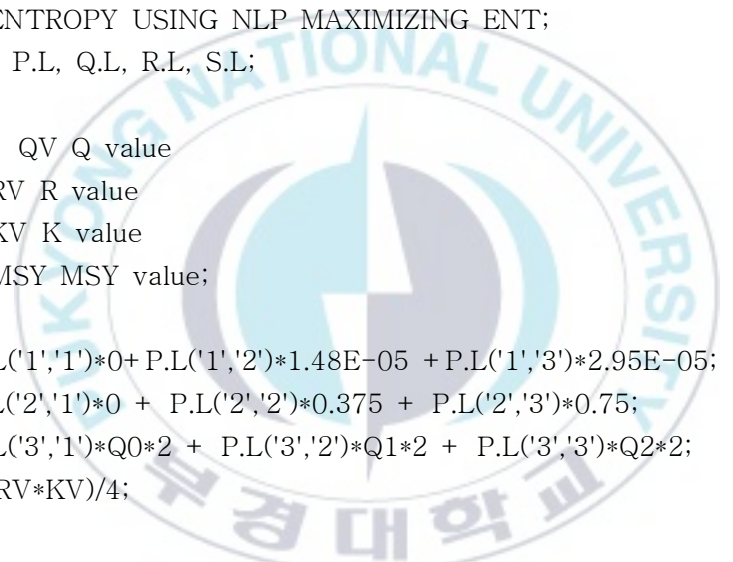
REY(K) .. LOG(Y(K))=E= LOG(P('1','1')*0+ P('1','2')*1.48E-05
+ P('1','3')*2.95E-05)
      + LOG(E(K))
      + LOG(S(K,'1')*Q0+ S(K,'2')*Q1+ S(K,'3')*Q2)
      + (Q(K,'1')*(-0.2)+ Q(K,'2')*0+ Q(K,'3')*0.2);

REX(K)$ (not klast(k)) .. LOG(S(K+1,'1')*Q0+ S(K+1,'2')*Q1+ S(K+1,'3')*Q2) =E=
      LOG(S(K,'1')*Q0+ S(K,'2')*Q1+ S(K,'3')*Q2)+
      LOG(1+ (P('2','1')*0+ P('2','2')*0.375+ P('2','3')*0.75)*
      (1-(S(K,'1')*Q0+ S(K,'2')*Q1+ S(K,'3')*Q2)
      /(P('3','1')*Q0*2+ P('3','2')*Q1*2+ P('3','3')*Q2*2))
      -Y(K)/(S(K,'1')*Q0+ S(K,'2')*Q1+ S(K,'3')*Q2))
      + (R(K,'1')*(-0.2)+ R(K,'2')*0+ R(K,'3')*0.2);

SUMST1(J) .. SUM(T,P(J,T)) =E= 1;
SUMST2(K) .. SUM(T,Q(K,T)) =E= 1;
SUMST3(K) .. SUM(T,S(K,T)) =E= 1;
SUMST4(K)$ (not klast(k)) .. SUM(T,R(K,T)) =E= 1;

P.L(J,'1') = 0.33;
P.L(J,'2') = 0.33;
P.L(J,'3') = 0.34;
Q.L(K,'1') = 0.33;

```

```

Q.L(K,'2') = 0.33;
Q.L(K,'3') = 0.34;
R.L(K,'1') = 0.33;
R.L(K,'2') = 0.33;
R.L(K,'3') = 0.34;
S.L(K,'1') = 0.33;
S.L(K,'2') = 0.33;
S.L(K,'3') = 0.34;

MODEL ENTROPY /ALL/;
SOLVE ENTROPY USING NLP MAXIMIZING ENT;
DISPLAY P.L, Q.L, R.L, S.L;

SCALAR QV Q value
      RV R value
      KV K value
      MSY MSY value;

QV = P.L('1','1')*0+P.L('1','2')*1.48E-05 + P.L('1','3')*2.95E-05;
RV = P.L('2','1')*0 + P.L('2','2')*0.375 + P.L('2','3')*0.75;
KV = P.L('3','1')*Q0*2 + P.L('3','2')*Q1*2 + P.L('3','3')*Q2*2;
MSY = (RV*KV)/4;

DISPLAY QV, RV, KV, MSY;

```