



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](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

한국 서해 어업의 잠재생산량 추정 연구



2016년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 물 리 학 과

김 현 아

이 학 석 사 학 위 논 문

한국 서해 어업의 잠재생산량 추정 연구

지도교수 장 창 익

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2016년 2월

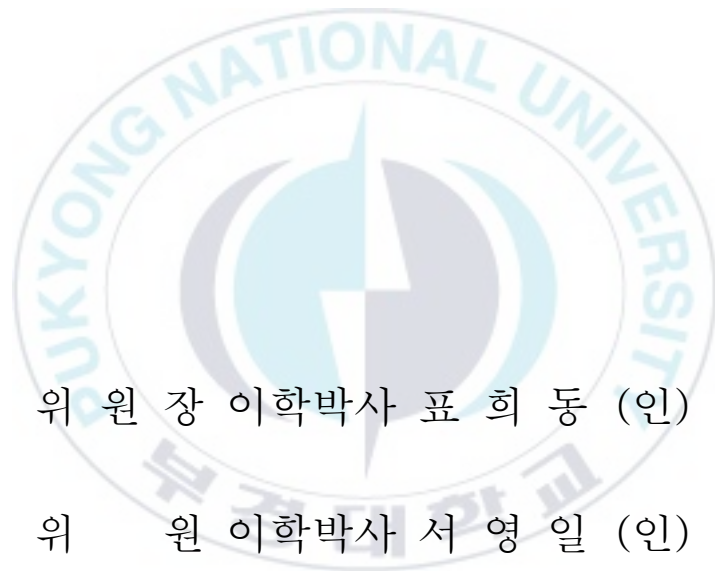
부 경 대 학 교 대 학 원

수 산 물 리 학 과

김 현 아

김현아의 이학석사 학위논문을 인준함.

2016년 2월



위원장 이학박사 표희동 (인)

위원 이학박사 서영일 (인)

위원 이학박사 장창익 (인)

목 차

Abstract.....	- 3 -
서 론.....	- 3 -
1. 연구의 필요성 및 목적.....	- 3 -
2. 연구방법 및 내용	- 5 -
자료 및 방법.....	- 12 -
1. 총생산량 분석법	- 12 -
1.1 어획량 및 어획노력량 자료 수집.....	- 12 -
1.2 어획노력량의 표준화	- 15 -
1.3 잉여생산량모델의 적용.....	- 23 -
1.4 모델검정	- 38 -
2. 개체군생산량 분석법	- 40 -
2.1 자료수집에 의한 주요 어획대상의 선별.....	- 40 -
2.2 주요 어획대상 35어종에 대한 환경수용량 추정	- 45 -
2.3 주요 어획대상 35어종에 대한 잠재생산량 추정	- 50 -
2.4 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정 ..	- 58 -
3. 어업생산량 분석법.....	- 62 -
3.1 자료수집에 의한 주요어업의 선별	- 62 -
3.2 주요 6개 어업에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정 ..	- 64 -

3.3 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정 ..	68 -
------------------------------------	------

결 과.....	71 -
----------	------

1. 통합생산량 분석법.....	71 -
-------------------	------

1.1 어획노력량의 표준화.....	71 -
---------------------	------

1.2 잉여생산량모델의 적용.....	81 -
----------------------	------

2. 개체군생산량 분석법	98 -
---------------------	------

2.1 주요 어획대상 35종 대한 환경수용량 추정.....	98 -
----------------------------------	------

2.2 주요 어획대상 35어종에 대한 잠재생산량 추정	104 -
-------------------------------------	-------

3. 어업생산량 분석법.....	115 -
-------------------	-------

3.1 주요 6개 어업에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정 -	115 -
------------------------------------	-------

3.2 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정 -	119 -
-----------------------------------	-------

고 찰.....	115 -
----------	-------

참고문헌	119 -
------------	-------

**A study on the estimation of potential yield
for Korean west coast fisheries**

Hyun A Kim

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

Abstract

The purpose of this study is to estimate the annual biomass, the carrying capacity, and potential yield for Korean west coast fisheries using three methods. First, The aggregate production analysis (APA) estimates carrying capacity and potential yield using surplus production model to apply standardized input data of catch and fishing efforts from 1966 to 2013yrs. Standardization methods for input data is exclusion of fishing effort for aquaculture and inland fishery, and application for catching efficiency to gross tonnage. It was compared the estimated parameters by the surplus production from four different models, i.e., Fox model, CYP model, ASPIC model, Maximum entropy model. Second, population production analysis (PPA) estimates carrying capacity and potential yield for each species, and then aggregate parameters. We selected major 35 species according to available data, and carrying capacity for major 35 species is estimated by the Maximum entropy model based on surplus production model, and using population ecological characteristics of previous

papers and reports. Potential yield for major 35 species is estimated by using paper and report of stock assessment with each species, data of acceptable biological catch (ABC), and population ecological characteristics of papers and reports. Carrying capacity and potential yield of other species excluded major 35 species are estimated by extrapolation method. Third, fishery production analysis (FPA) estimates carrying capacity and potential yield for each fishery, and then aggregate parameters. We selected major 6 fisheries according to available data and carrying capacity and potential yield for major 6 fisheries are estimated by the Maximum entropy model based on surplus production model, and using data for stock assessment of target species. Carrying capacity and potential yield of other fisheries excluded major 6 fisheries are estimated by extrapolation method.

Carrying capacity and potential yield for Korean west coast fisheries are calculated as 1,045,769 mt and 218,304 mt by APA respectively, which reflects well population dynamic mechanism because used relatively few assumptions and parameters and, data from early stage of resource development to current.

This study will be useful to develop an efficient precautionary approach to fishery resource management under the data-deficient situation.

서론

1. 연구의 필요성 및 목적

우리나라 서해는 남북한과 중국에 의해 둘러싸인 반폐쇄해로서 약 6억에 이르는 연안 인구가 의존하고 있는 이용도가 매우 높은 해역이다. 황해에 서식하고 있는 대부분의 주요 자원생물은 남·북한뿐만아니라 중국 사이를 왕래하는 경계왕래자원으로 구성되어 있어 수산자원의 이용은 주인이 없는 자원이라는 인식 하에서 경쟁적으로 이루어져 왔고, 그 결과로 황해의 수산자원 중 대부분의 주요 어종들은 고갈상태에 있는 것으로 알려져 있다 (Zhang et al, 1993).

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

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

우리나라도 2013년 해양수산부가 다시 설치된 사실에 비추어 알 수 있듯이 수산자원에 대한 중요성을 인지하고 있는 것이 사실이며,

우리나라 수산자원의 관리, 보전 그리고 남획방지, 적정 생산 등 많은 부분에서 수산자원에 대한 정확한 자원동태적 분석이 요구되고 있다.

위와 같은 요구에 부응하여 어업의 대상이 되는 수산자원의 합리적 관리 및 회복을 위해서는 하기 위해서는 대상자원의 현재 자원량 (Biomass, B)이 얼마인지를 알아야 하며, 나아가 대상 종이 최대 서식 가능한 자원량인 환경수용량 (Carrying capacity, K)과 대상 종으로부터 지속적으로 취할 수 있는 최대 어획량인 잠재생산량 (Maximum sustainable yield, MSY)을 알아야 한다. 그러나, 현재 우리나라 해역에 서식하는 어업대상종의 환경수용량과 잠재생산량은 물론, 전체 자원량 수준도 정확하게 모르고 있는 실정이다.

본 연구는 이러한 자원평가의 필요성을 인식하여 현재까지 개발된 여러 자원평가 모델 및 수집자료의 추정치를 사용하여 세가지의 방법으로 서해의 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하고, 세가지 방법의 비교 분석을 통해 가장 적합한 추정치를 제시하는 것이다. 궁극적으로, 사용가능한 정보 및 자료가 제한된 상황에서 보다 효율적으로 우리나라 해역의 자원관리를 위한 과학적이고 체계적인 잠재생산량을 추정할 수 있는 시스템을 구축하는데 목적이 있다.

2. 연구방법 및 내용

우리나라는 연근해 어업자원의 관리시스템 개발에서 첫 단계에 속하는 자료의 수집 시스템이 수산업자들의 인식 부족 등으로 충분하게 수립되어 있지 않다. 이와 같은 문제에 착안하여 사용가능한 정보 및 자료가 제한된 상황에서 서해 전체 어획대상의 환경수용량과 잠재생산량을 추정함으로써 자원상태를 평가하고자 한다.

본 연구의 대상은 우리나라 서해 어업의 전반적 상태를 파악하기 위하여 원양어업, 양식어업, 내수면어업을 제외한 연근해어업으로 정하였다.

본 연구의 내용은 크게 서론, 자료 및 방법, 결론, 고찰, 요약 및 결론의 순으로 이루어져 있다. 서론에서는 자원평가의 필요성에 대하여 언급하였다.

자료 및 방법에서는 연구의 목적인 우리나라 서해 전체 어획대상의 환경수용량과 잠재생산량을 추정하기 위해서 세가지 방법을 제시하였다 (Fig 1).

첫번째, 서해 전체 어획대상 어획량과 어획노력량 자료만을 변수로 하여 현재까지 개발된 잉어생산량모델로 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 총생산량 분석법 (Aggregate Production Analysis, APA)이다.

모델적용을 위하여 1966~2013년 서해 연근해 전체 어획대상의 총어획량 및 어획노력량 자료를 수집하였다. 어획노력량은 마력수와 톤수자료를 수집하였다.

수집한 입력자료의 무차원화를 위해 어획노력량에 대한 표준화를

실시하였다. 표준화는 세가지 방법으로 수행되었으며 다음과 같다: 1) 수집된 시도별 어획노력량에서 양식어업과 내수면어업의 어획노력량을 제외시켜주었다. 2) 어획노력량의 마력수는 동력선에 대한 자료이므로, 마력수가 와트와 같은 일률 단위라는 개념을 이용하여 무동력선에 대한 어획노력량을 반영해주었다. 3) 총톤수자료는 어군탐지기의 보급 또는 엔진출력 증가 등에 따른 연도별 어획효율을 반영하지 못하므로, Fitzpatrick (1996)으로부터 추정된 어업에 대한 기술 계수를 이용하여 톤수자료를 표준화시켰다.

다음으로 표준화된 입력자료를 사용하여 잉여생산량모델로 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 잉여생산량은 어획이 없을 때의 평형상태에서 얻어지는 잉여량을 생산량, 즉 어획량으로 계산하기 때문에 전통적 잉여생산량모델 (Schaefer, 1954, 1957; Pella and Tomlinson, 1967; Fox, 1974)들은 대상자원이 평형상태임을 가정한다 (Zhang, 2010). 연간 어획량과 어획노력량만을 사용하여 잉여생산량을 추정하는 잉여생산량모델들은 현실적으로 모순된 가정들이 많으나, 필요한 자료의 수가 적고 모델의 개념이 간단하여 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다.

잉여생산량모델들의 파라미터를 추정하는 방법에는 선형회귀, 중회귀 등의 방법이 있다. 선형회귀방법에 의해 파라미터를 추정하는 방법은 전통적 잉여생산량모델로써 평형상태를 가정하여 연도별 어획량과 어획노력량에 대한 일차식으로 잠재생산량 (MSY) 과 MSY 시의 어획노력량 (f_{MSY}) 을 계산하는 방법이다. 그러나 자원평가를 위한 대상자원은 현재 어획되고 있는 자원이기 때문에 이를 잉여생산량모델에

적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. 중회귀방법은 이러한 가정없이 세개 이상의 파라미터를 중회귀분석에 의해 추정하는 방법이다. Schnute (1977)는 로지스틱 성장함수의 Schaefer 모델을 중회귀방법으로 통합 개발하였고, CYP (1992)는 지수성장함수의 Fox모델을 중회귀방법으로 통합 개발하였으며, 내적증가율 (r), 최대자원량 (B_{∞}) 및 어획능률 (q)까지 추정할 수 있다.

또한, ASPIC모델 (Prager, 1992a, 1992b)은 평형상태에 대한 가정 없이 관측오차를 사용하여 자원의 어업자료를 잉여생산량모델에 적합시켜 합리적인 파라미터의 추정이 가능하도록 하는 모델이다 (Prager, 2005). ASPIC모델은 적통적 잉여생산량모델에 파라미터들을 추정하는 값에 대한 초기가정을 설정하여 편차수정을 위해 붓스트랩과 비모수 신뢰구간을 사용한다. ASPIC모델에서 사용하는 비선형회귀방법은 상대적으로 시작년도 자료에 민감하지 않으며, 상대적으로 가정을 많이 필요로 하지 않기 때문에 합리적인 파라미터의 추정이 가능하다 (권 등, 2013). ASPIC모델은 현재 대서양다랑어보존위원회 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, ICCAT)에서 다랑어류 및 새치류의 자원량 추정 및 평가에 이용되고 있다 (ICCAT, 2008, 2009).

앞서 소개한 잉여생산량모델들은 추정하는데 필요한 자료의 수보다 추정하는 파라미터의 수가 더 많다는 문제로 인하여, 파라미터를 추정할 때 사용되는 자료에 의해 파라미터들의 추정치가 민감하게 영향을 받는다. 이러한 문제를 해결하고자 제시된 방법이 최대엔트로피모델

(Golan et al, 1996a, 1996b)이다. 최대엔트로피모델은 추정하고자 하는 파라미터를 주어진 제약조건 내에서 파라미터가 가질 수 있는 확률분포를 추정하여 파라미터가 자료를 가장 잘 설명할 수 있는 이상적인 값을 추정하는 모델이다. 이 모델은 최대파라미터를 추정함에 있어서 초기조건을 두어 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않는다 (권 등, 2013).

총생산량 분석법 (APA)에서는 Fox모델, CYP모델, ASPIC모델, 최대엔트로피모델을 사용하여 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다.

두번째, 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 개체군생산량 분석법 (Population Production Analysis, PPA)이다.

환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 방법을 위한 어종별 자원평가 참고문헌의 수집 유무에 따라 서해 분포 주요 35어종을 선별하였다.

선별된 주요 35어종의 환경수용량 추정방법은 어종별 수집된 자료에 따라 2가지로 나누었다: 1) 13어종은 잉어생산량모델로 추정하는 방법이고, 2) 22어종은 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용하여 역추정하는 방법이다.

다음으로 주요 35종에 대한 잠재생산량을 추정하기 위해 어종별 수집된 자료에 따라 3가지 방법을 사용하였다: 1) 22어종은 어종별 잠재생산량 추정에 대한 논문 및 보고서 추정치를 직접적으로 사용하여 추정하였다. 2) 4어종은 자원평가 요약표의 2014년 생물학적 허용어획량 (ABC)와 자원동향을 인용하여 잠재생산량을 역추정하였다. 3) 8어종은

논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용하여 추정하였다.

외삽 (Extrapolation)의 방법을 통해 서해 분포 주요 35어종 이외의 어종에 대한 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 외삽이란 이용가능한 자료의 범위가 한정되어 있어 그 범위 이상의 값을 구할 수 없을 때 관측된 값을 이용하여 한계점 이상의 값을 추정하는 것이다. 주요어종을 제외한 어종에 대하여 어종별 특성을 고려하여 9개의 그룹으로 어종분류군을 설정하였다. 추정된 주요 35어종 중에서 어종분류군별 기준어종을 선별하여, 각 기준어종의 환경수용량과 어획량 비율, 기준어종의 잠재생산량과 어획량 비율을 구하여 각 분류군별 주요어종을 제외한 어종에 적용시켰다.

세번째, 어업별로 사용가능한 자료에 따라 적합한 방법을 통해 환경수용량과 잠재생산량을 추정하는 어업생산량 분석법 (Fishery Production Analysis, FPA)이다.

서해 어업에 대한 어획량 및 어획노력량 자료 수집 유무, 자원평가 참고문헌의 수집 유무에 따라 서해 주요 6개 어업을 선별하였다.

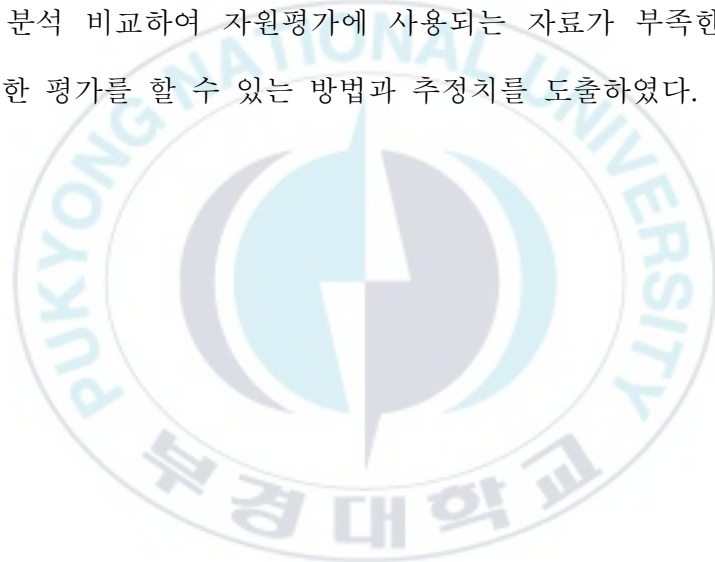
선별된 어업 중 근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발, 근해자망은 최대엔트로피모델을 이용하여 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다.

마을어업은 새만금 마을어업 대상어종별 자원평가 추정치와 새만금 마을어업 어장면적을 인용하여, 새만금 마을어업 어장면적에 대한 환경수용량과 잠재생산량 비율을 경기도, 인천광역시, 충청남도, 전라북도의 마을어업 어장면적에 적용시켜 서해 전체 마을어업의

환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다.

외삽의 방법을 통해 서해 주요 6개 어업 이외의 어업에 대한 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 주요어업을 제외한 어업에 대하여 어업별 특성을 고려하여 6개의 그룹으로 어업분류군을 설정하였다. 추정된 주요 6개 어업 중에서 어업분류군별 기준어업을 선별하여, 각 기준어업의 환경수용량과 어획량 비율, 기준어업의 잠재생산량과 어획량 비율을 구하여 각 분류군별 주요어종을 제외한 어종에 적용시켰다.

고찰에서는 본문의 내용을 정리하고 연구의 결론과 한계를 기술하였다. 방법들을 분석 비교하여 자원평가에 사용되는 자료가 부족한 상황에서 보다 정확한 평가를 할 수 있는 방법과 추정치를 도출하였다.



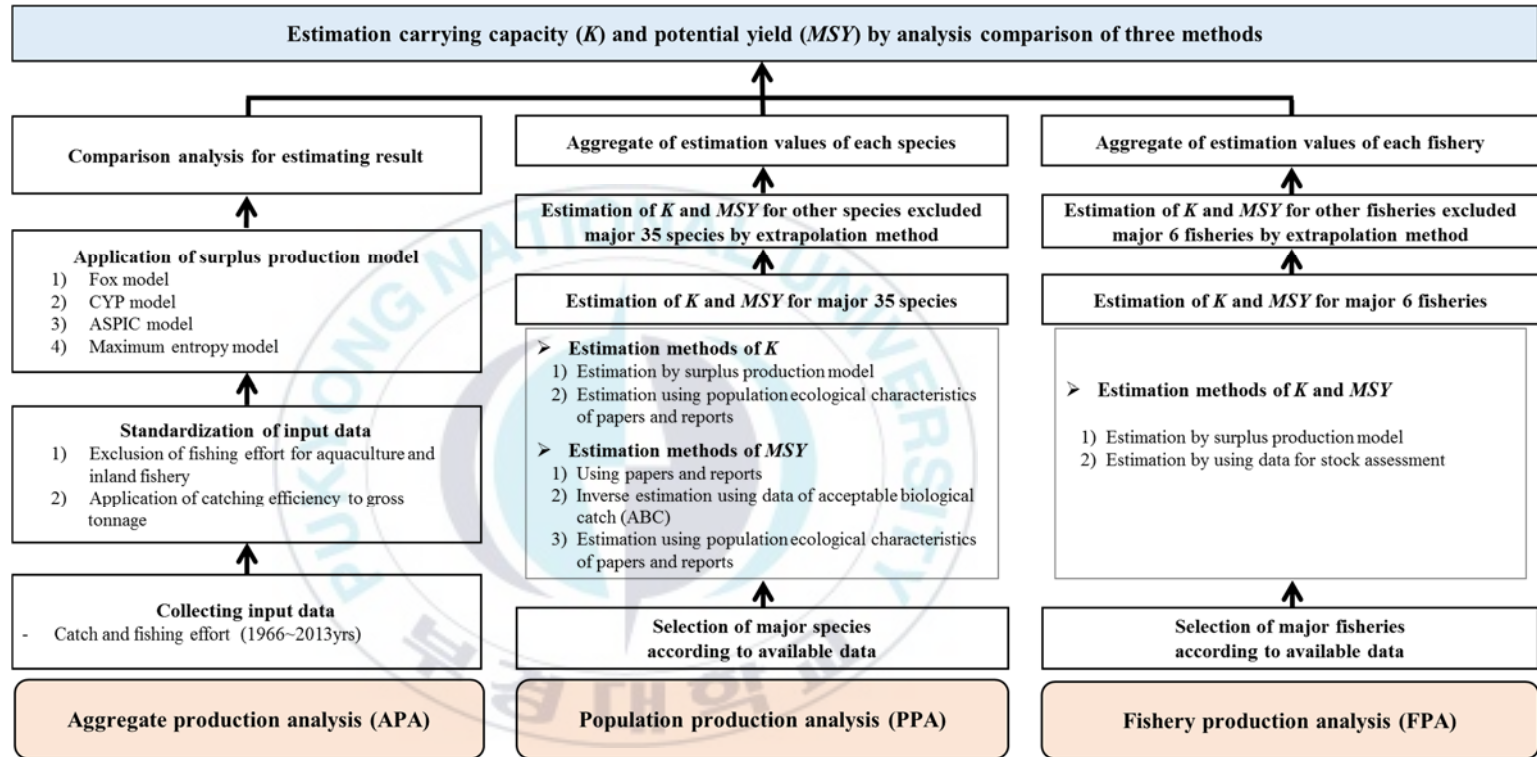


Fig. 1. Flowchart for estimation of carrying capacity and potential yield by three method.

자료 및 방법

1. 총생산량 분석법

1.1 어획량 및 어획노력량 자료 수집

잉어생산량모델에 적용하기 위하여 1966~2013년 서해 연근해 어획량 및 어획노력량 자료를 수집하였다 (Table 1). 어획량 및 어획노력량 자료는 시도별로 정리되어 있어 인천광역시, 경기도, 충청북도, 충청남도, 전라북도에 대한 연도별 어획량 및 어획노력량 자료를 수집하였다. 국가통계포털 (www.kosis.kr)에서 1970~2013년의 시도별 어획량 자료 및 1992~2013년의 시도별 연도별 어획노력량 자료를 수집하였으며, 수산통계연보에서 1966~1969년의 시도별 연도별 어획량 자료 및 1966~1991년의 시도별 연도별 어획노력량 자료를 수집하였다.

Table 1. Annual total catch and total effort of horsepower and gross tonnage of total target species in Korean west coast

Year	Catch (mt)	Gross tonnage (GT)	Horsepower (h.p)
1966	98,973	34,023	31,093
1967	124,571	60,976	97,965
1968	132,735	63,649	103,960
1969	123,761	40,110	50,536
1970	133,947	45,376	63,652
1971	137,302	47,531	68,223
1972	151,543	51,428	81,316
1973	173,940	49,886	81,138
1974	198,532	51,100	91,581
1975	229,902	52,624	96,974
1976	232,565	57,505	121,012
1977	231,472	63,671	154,629
1978	230,820	75,842	211,664
1979	229,570	107,522	315,938
1980	226,400	110,245	338,750
1981	236,981	112,289	364,411
1982	253,628	115,377	413,090
1983	257,686	115,323	460,721
1984	245,347	120,722	536,343
1985	252,582	115,888	566,464
1986	263,568	114,530	613,865
1987	254,085	115,713	755,465
1988	228,596	116,994	891,243
1989	236,939	109,430	943,807
1990	224,207	109,834	1,044,040
1991	224,623	111,224	1,165,774
1992	213,444	107,330	1,334,863
1993	213,719	104,621	1,384,246
1994	205,543	102,962	1,459,213
1995	178,086	98,577	1,503,685
1996	156,784	97,115	1,537,723
1997	148,601	95,653	1,571,760
1998	182,141	100,627	1,706,161
1999	166,720	100,009	1,988,775
2000	161,439	96,481	2,230,595
2001	135,560	94,922	2,910,045
2002	135,781	87,540	3,321,632

Table 1. Continued

Year	Catch (mt)	Gross tonnage (GT)	Horsepower (h.p)
2003	158,484	85,352	3,176,334
2004	137,938	81,660	3,539,285
2005	117,239	82,259	2,630,035
2006	130,871	80,189	3,069,656
2007	142,492	78,119	3,412,676
2008	129,565	64,960	2,698,061
2009	158,601	59,030	3,192,699
2010	163,582	59,204	2,847,409
2011	154,230	58,773	2,708,494
2012	127,231	59,175	2,781,784
2013	117,010	59,291	2,841,329



1.2 어획노력량의 표준화

1.2.1 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 어획노력량 제외

수집된 시도별 어획노력량 자료에는 양식어업과 내수면어업의 어획노력량이 포함되어 있다. 따라서 서해 양식어업과 내수면어업의 어획노력량을 추정하여 서해 전체의 어획노력량에서 제외시켜주었다.

서해 전체에 대한 어획노력량 자료를 수집하기 위하여 시도별로 수집된 자료를 취합하였다. 이 때, 수산통계연보의 어획노력량 자료수집 기준이 1979년부터 어선소유자 기준에서 실질적인 어획량을 반영하는 등록항 기준으로 변경되었다. 따라서 서울로 수집되었던 동력선의 어획노력량이 1979년부터 경기도와 부산에 일정비율로 나뉘어 포함되었다고 가정하여, 1979년도 이전의 어획노력량 자료를 등록항 기준으로 환산하였다. 먼저, 식 (1)에 대해 선형회귀 분석을 실시하여, 1979년도 이전의 자료수집 기준으로 추정된 1979년의 경기도와 부산의 어획노력량 ($f_{R,1979}$)을 식 (2)로 나타냈다.

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

여기서, $f_{R,t}$ 는 지역 R 에 대한 t 년의 어획노력량, a_R 은 지역 R 에 대한 계수, γ_R 은 지역 R 에 대한 어획노력량 연 증가율, f 는 어획노력량 으로 동력선의 톤수, 마력수, R 은 경기도, 부산, t 는 1966~1978년이다.

$$f_{R,1979} = a_R + \gamma_R \cdot 1979 \quad (2)$$

경기도 어획노력량 자료에 대한 서울 어획노력량 자료의 포함율 (r_f)을

식 (3)으로 추정하였다.

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

여기서, $f_{G,p}$ 는 등록항 기준에 대한 경기도의 어획노력량, $f_{G,1979}$ 는 추정된 어선소유자 기준에 대한 경기도의 어획노력량, $f_{B,p}$ 는 등록항 기준에 대한 부산의 어획노력량, $f_{B,1979}$ 는 추정된 어선소유자 기준에 대한 부산의 어획노력량이다.

어선소유자 기준에 대한 1966~1978년의 경기도 어획노력량을 식 (4)로 추정하였다.

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

여기서, G_t 는 어선소유자 기준에 대한 t 년의 경기도 어획노력량, $f_{t,G}$ 는 등록항 기준에 대한 t 년의 경기도 어획노력량, $f_{t,S}$ 는 등록항 기준에 대한 t 년의 서울 어획노력량, t 는 1966~1978년이다.

따라서, 서해 전체에 대해 수집된 연도별 어획노력량 (Wf_t)은 식 (5)로 나타내었다.

$$Wf_t = G_t + P_t \quad (5)$$

여기서, P_t 는 t 년의 인천광역시, 경기도, 충청북도, 충청남도, 전라북도 어획노력량의 합, t 는 1966~2013년이다.

서해의 연도별 양식어업과 내수면어업의 어획노력량 ($Wf_{t,v}$)은 식 (6)과 같이 추정하였다.

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

여기서, $f_{t,v}$ 는 t 년도 양식어업과 내수면어업의 어획노력량, $WC_{t,v}$ 는 서해의 t 년도 양식어업과 내수면어업의 어획량, $C_{t,v}$ 는 한국 전체 해역에 대한 t 년도 양식어업과 내수면어업의 어획량, t 는 1966~2013년이다.

따라서, 양식어업과 내수면어업의 어획노력량을 제외한 서해의 어획노력량 (f_t)은 식 (7)과 같다.

$$f_t = Wf_t - Wf_{t,v} \quad (7)$$



1.2.2 마력수 (Horsepower, $h.p$)의 표준화

마력수는 동력선에 대한 자료이므로 무동력선에 대한 어획노력량을 반영하지 못한다. 따라서 마력수와 와트가 같은 일률 단위라는 개념을 이용하여 무동력선 총톤수에 대한 연도별 마력수를 추정하였다. 즉, 무동력선 한 척에 대한 연도별 마력수 (Horsepower per a ship, $HPPS$)는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$HPPS_t = \frac{\overline{GT}_t \cdot \bar{v} \cdot g \cdot C_f}{1000 \cdot HP} \quad (8)$$

여기서, $HPPS_t$ 는 무동력선 한 척에 대한 t 년의 마력수, $\overline{GT}_t$ 는 무동력선 한 척의 t 년 평균 총톤수 (GT), $\bar{v}$ 는 무동력선 평균 속도로써, Ubunye Challeng website에 의해 보고된 $0.643m/s$ 을 이용하였다. g 는 중력가속도 $9.8m/s^2$, HP 는 마력으로써 $746W$, C_f 는 무동력선 항행시 수면과의 마찰저항으로써 California Natural Resources Agency (1964)에 의해 보고된 0.25를 이용하였다.

무동력선 (Non-powered fishing vessel, NP)의 t 년 총 마력 ($NP_{HP,t}$)은 식 (9)와 같다.

$$NP_{HP,t} = NPFV_t \cdot HPPS_t \quad (9)$$

여기서, $NPFV_t$ 는 동력선 t 년 총 척수, $HPPS_t$ 는 무동력선 한 척에 대한 t 년의 마력수이다.

따라서, t 년의 총 어획노력량 ($f_{HP,t}$)은 식 (10)으로 나타냈다.

$$f_{HP,t} = P_{HP,t} + NP_{HP,t} \quad (10)$$

여기서, $P_{HP,t}$ 는 동력선 (Powered fishing vessel, P)의 t 년 총
마력이다.



1.2.3 총톤수 (Gross tonnage, GT)의 표준화

총톤수자료는 어군탐지기의 보급 또는 엔진출력 증가 등에 따른 연도별 어획효율을 반영하지 못한다. 따라서, Fitzpatrick (1996)으로부터 추정된 어업에 대한 기술 계수를 이용하여 서해의 톤수자료를 표준화시켰다. 무동력선의 연도별 어획효율은 일정하므로 동력선에 대한 어획효율만 고려하였다. Fitzpatrick은 1980년을 기준으로 1965년 1995년의 대형트롤 등 13개 종류의 어선에 대해 어구 발달, 어선 구조 및 항법 장비 발달 등을 고려한 기술계수를 추정하였다 (Table 2). 본 연구에서는 저인망류 (Trawls), 선망 (Purse seiner), 연승 (Long liner), 자망 (Gillnetter)을 선별하여 각 기술계수의 증가율을 구하였다. 여기서, 서해의 경우 안강망어업은 높은 어업비율을 차지함에 따라 안강망어업과 어획량의 추세가 가장 비슷한 저인망류의 기술계수를 이용하였다. 저인망류는 다섯 종류 트롤선의 1965년, 1980년, 1995년 각 연도 평균값을 이용하였다. 이외의 어업에 대한 기술계수는 자료가 부족하여 저인망류, 선망, 연승 및 자망 기술계수의 평균값을 사용하였다. 각 어획효율의 증가율은 아래 식에 대한 선형회귀 분석을 실시하여 어업별 기술계수 증가율 (γ_v)에 해당하는 기울기를 추정하였다.

$$TC_{v,t} = a_v + \gamma_v t \quad (11)$$

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

각 어업의 연도별 어획효율 (Catching efficiency, CE)은 다음 식 (12)로부터 추정하였다.

$$CE_{v,t} = CE_{tr} + \gamma_v(t - t_r) \quad (12)$$

여기서, $CE_{v,t}$ 는 v 어업에 대한 t 년의 어획효율, γ_v 는 v 어업에 대한 기술계수 연 증가율, t 는 1967~2013, t_r 은 기준연도인 1966년, CE_{tr} 는 기준연도에 대한 초기값 1이다.

각 어업에 대하여 표준화된 동력선 t 년의 총톤수 ($P_{v,t}$)는 식 (13)으로부터 추정하였다.

$$P_{v,t} = GT_{v,t} \cdot CE_{v,t} \quad (13)$$

여기서, $GT_{v,t}$ 는 표준화 되지 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 식 (14)와 같다.

$$f_{GT,t} = P_{GT,t} + NP_{GT,t} \quad (14)$$

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

Table 2. Estimated technology coefficients of fishing vessels by vessel type

Type	Technology coefficient		
	1965	1980	1995
Super trawl	0.6	1	2.5
Freeze trawl	0.7	1	2.0
Stern trawl	0.6	1	1.9
Shrimp trawl	0.5	1	2.2
Trawl	0.5	1	1.8
Purse seiner	0.6	1	2.0
Long liner	0.4	1	2.8
Gillnetter	0.4	1	1.5



1.3 잉여생산량모델의 적용

본 연구에서는 평형 잉여생산량모델 Fox모델과 비평형 잉여생산량모델 CYP모델 (Clarke, Yoshimoto, and Pooley, 1992), ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariate)모델 및 Maximum entropy 모델을 사용하여 잠재생산량을 추정하였다.

1.3.1 Fox모델

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

$$\frac{dB}{dt} = rB(\ln B_{\infty} - \ln B) - qfB \quad (15)$$

위의 미분방정식 (15)에서 어획에 의한 감소가 자원의 자연 증가와 같게 될 경우 (즉, 자원량이 변하지 않는 경우: $dB/dt = 0$), 이를 평형상태라 부르게 되고 이 때의 연간어획량은 연간평형생산량 (Y^*)이라 부르고, 다음과 같이 나타낸다.

$$Y^* = rB^*[\ln B_{\infty} - \ln B^*] \quad (16)$$

위의 식 (16)을 B^* 에 대하여 미분함으로써 생체량이 최대생체량의 1/3정도의 수준에 있을 때, 잠재생산량 (MSY)이 초래된다. $Y^* = qfB^*$ 에서 $B^* = Y^*/qf = U^*/q$ (여기서, U^* 는 평형 CPUE)를 위의 식 (16)에 대입함으로써 어획노력량과 단위노력당어획량의 관계식을 다음과 같이 만들 수 있다.

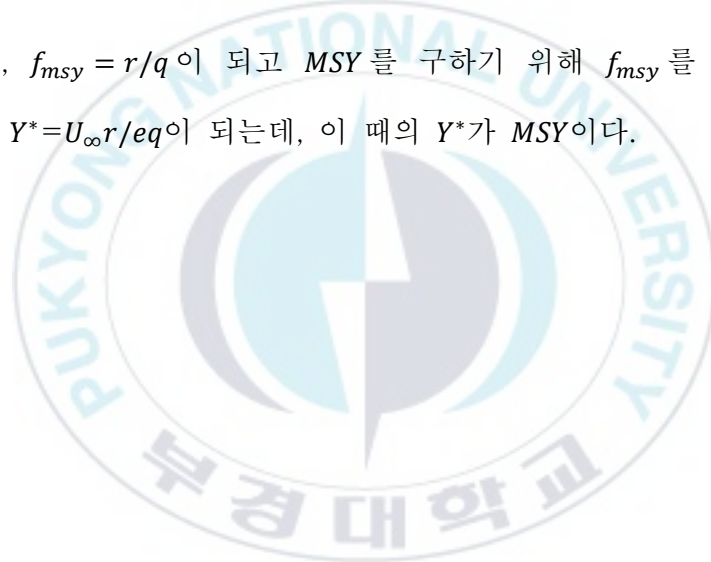
$$U^* = U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) \quad (17)$$

$$\text{혹은} \quad Y^* = U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) f \quad (18)$$

매개변수인 U_{∞} 와 q/r 은 위의 식 (17)에 자연로그를 취하여 선형화시켜서 추정 가능하다. 위의 식 (18)를 f 에 대하여 미분해서 최대치를 구하기 위해 0으로 놓으면,

$$\frac{dY^*}{df} = -\frac{q}{r} U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) f + U_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) = 0 \quad (19)$$

그러므로, $f_{msy} = r/q$ 이 되고 MSY 를 구하기 위해 f_{msy} 를 식 (15)에 대입하면, $Y^* = U_{\infty} r / eq$ 이 되는데, 이 때의 Y^* 가 MSY 이다.



1.3.2 CYP모델

두 번째로 우리나라 전체수역의 잠재어업생산량을 추정하기 위해 적용한 잉여생산량모델은 근사치 추정을 통해 중회귀분석으로 잉여생산량모델의 파라미터들을 추정하는 CYP (Clarke, Yoshimoto and Pooly)모델이다. 이 모델은 Fox모델에서 사용하는 Gompertz 성장 모델을 기초로 하고 있다.

$U = qB$ 이므로, Fox모델 유도 과정에서의 식 (15)를 다시 쓰면 식 (20)과 같다.

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{dt} = r \ln(qB_{\infty}) - r \ln(U) - qf \quad (20)$$

위의 식 (20)을 적분하면,

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

이를 정리하면 식 (21)과 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1}}{U_t}\right) = r \ln(qB_{\infty}) - r \int_t^{t+1} \ln(U) dt - q \bar{f}_t \quad (21)$$

여기서, U_t 는 t년 초의 순간적인 CPUE이고 f_n 은 n년의 총 어획노력량이다. 식 (21)의 $\ln(U)$ 을 테일러 다항식의 방법을 사용하여 1차항까지 나타내면,

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

이를 적분하면 식 (22)와 같다.

$$\int_t^{t+1} \ln(U) dt = \ln(\overline{U}_t) - 1 + \left(\frac{1}{\overline{U}_t}\right) \int_t^{t+1} U dt \quad (22)$$

식 (22)는 $\overline{U}_t = \int_t^{t+1} U dt$ 의 정의에 따라서 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

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

따라서, 식 (21)에 위의 결과에 따라 변형시키면 아래의 식 (23)과 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1}}{U_t}\right) = r \ln(q B_\infty) - r \ln(\overline{U}_t) - q \overline{f}_t \quad (23)$$

식 (23)은 중회귀식으로 연도별 $\overline{U}_t$ 와 $\overline{f}_t$ 자료를 사용하여 세 개의 매개변수인 r, B_∞, q 를 추정할 수 있다. 그런데 식 (23)은 $\overline{f}_{t+1}$ 을 모르지만 $\overline{U}_{t+1}$ 을 예측할 수 있다는 가정을 내포하고 있는데 실제로 다음

해의 예상되는 노력량을 모르므로 다음 해의 CPUE를 예측 가능하다는 가정은 모순된다고 볼 수 있다. 좀 더 현실적인 식을 얻기 위해 t 년에 대한 식 (23)에 $t+1$ 년에 대한 식인 $\ln\left(\frac{U_{t+2}}{U_{t+1}}\right) = r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U_{t+1}}) - q\overline{f_{t+1}}$ 을 더해서 2로 나누면 식 (24)와 같다.

$$\ln\left(\frac{U_{t+1} \cdot U_{t+2}}{U_{t+1} \cdot U_t}\right) = 2r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U_t} \cdot \overline{U_{t+1}}) - q(\overline{f_t} + \overline{f_{t+1}}) \quad (24)$$

여기서, $\overline{U_t} = \sqrt{U_t \cdot U_{t+1}}$, 즉 평균 CPUE는 그 해 초와 말의 순간 CPUE의 기하평균치와 같다고 보고 식 (20)을 다시 쓰면 $\overline{U_{t+1}}$ 뿐만 아니라 $\overline{f_{t+1}}$ 를 예측할 수 있는 식이 도출된다.

$$2\ln(\overline{U_{t+1}}) - 2\ln(\overline{U_t}) = 2r\ln(qB_\infty) - r\ln(\overline{U_t}) - r\ln(\overline{U_{t+1}}) - q(\overline{f_t} + \overline{f_{t+1}})$$

위의 식의 좌변을 $\ln(\overline{U_{t+1}})$ 로 정리하면 다음 식 (25)와 같다.

$$\ln(\overline{U_{t+1}}) = \frac{2r}{(2+r)}\ln(qB_\infty) + \frac{(2-r)}{(2+r)}\ln(\overline{U_t}) - \frac{q}{(2+r)}(\overline{f_t} + \overline{f_{t+1}}) \quad (25)$$

식 (25)는 세 개의 매개변수인 r , B_∞ , q 를 추정하는 중회귀식이다. 평형생산량은 Gompertz 성장 방정식 (15)에서 $\frac{dB}{dt} = 0$ 인 경우가 되므로, $\frac{dB}{dt} = 0 = rB(\ln B_\infty - \ln B) - qfB$ 에서

$$B^* = B_\infty \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (26)$$

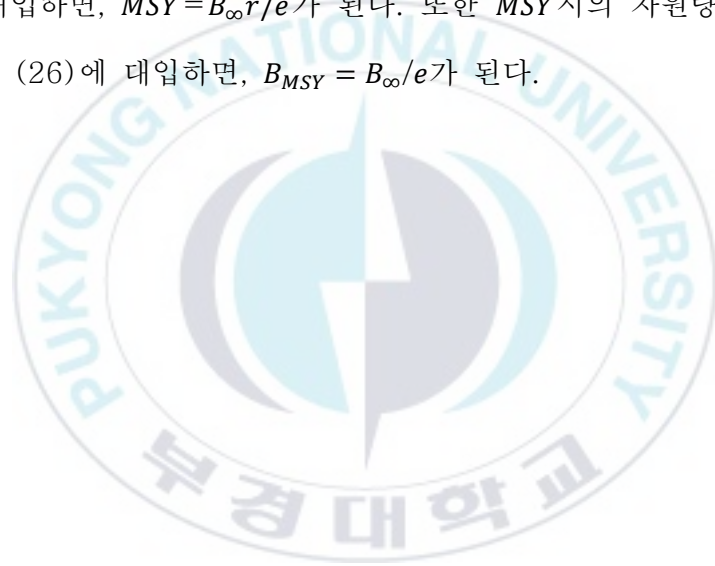
여기서 $U^* = qB^*$ 이므로 식 (26)은 식 (27)과 같다.

$$U^* = qB_{\infty} \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (27)$$

또한, $C^* = qfB^*$ 에 따라서

$$C^* = qfB_{\infty} \exp\left(-\frac{q}{r}f\right) \quad (28)$$

잠재생산량 (MSY)을 구하기 위해서 식 (28)을 f 에 대하여 미분한 후, 0으로 놓으면, $\frac{dC^*}{df} = -\frac{q^2}{r}fB_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) + qB_{\infty} \exp\left(-\frac{qf}{r}\right) = 0$, 그러므로, MSY 시의 어획노력량인 $f_{msy} = r/q$ 이며, MSY 를 구하기 위해 f_{msy} 를 식 (28)에 대입하면, $MSY = B_{\infty}r/e$ 가 된다. 또한 MSY 시의 자원량 (B_{MSY})은 f_{msy} 를 식 (26)에 대입하면, $B_{MSY} = B_{\infty}/e$ 가 된다.



1.3.3 ASPIC모델

ASPIC모델은 어획량 및 상대적 풍도 (또는 노력량) 자료를 이용하여 잉여생산량모델에 의해 MSY , MSY 시의 자원량 (B_{msy}) 및 어획강도 (f_{msy}) 등을 추정하는 모델이다. 로지스틱 성장 모델을 기초로 하는 식은 식 (29)와 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = (r - F_t)B_t - \frac{r}{K}B_t^2 \quad (29)$$

여기서 B_t 는 시간 t 에서의 자원량, r 은 내적자연증가율, K 는 환경수용력이다. 식 (29)에서 $\alpha_t = r - F_t$, $\beta = r/K$ 로 두면 식 (30)과 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = \alpha_t B_t - \beta B_t^2 \quad (30)$$

식 (30)은 시간에 대한 자원량의 식이며, 여기서 F_t 가 일정하다고 가정하고, 초기시간을 $t = \tau$, 마지막 시간을 $t = \tau + 1$ 로 두면 아래 식 (31)과 같다.

$$\hat{B}_{t+1} = \frac{\alpha_t \beta_t e^{\alpha_t}}{\alpha_t + \beta B_t (e^{\alpha_t} - 1)} \quad (31)$$

같은 시간의 생산량에 대한 식은 식 (32)와 같다.

$$\hat{Y}_\tau = \int_{t=1}^{\tau+1} F_t \hat{B}_t dt \quad (32)$$

식 (32)를 적분하면 식(33)으로 나타낼 수 있다.

$$\hat{Y}_\tau = \frac{F_\tau}{\beta} \ln \left[1 - \frac{\beta \hat{B}_\tau (1 - e^{a_\tau})}{a_\tau} \right] \quad (33)$$

이 모델의 파라미터 추정에 필요한 기본 자료는 어획량과 어획노력량 혹은 CPUE자료이다. ASPIC모델에서 *MSY*를 추정하기 위해서 몇 가지의 초기값이 사용된다. 초기값으로는 환경수용력에 대한 분석 시작 시점시의 자원량의 비($\frac{B_1}{K}$), 잠재생산량 (*MSY*), 환경수용량 (*K*), 어획능력 (*q*)이다. 초기값을 설정하는 기준은 ASPIC모델은 Schaefer 모델을 기본으로 하고있기 때문에, $\frac{B_1}{K}$ 는 0.5으로 두었다. 잠재생산량 (*MSY*)의 초기값은 서해 전체 연근해 어획대상의 가장 큰 어획량이었던 263,568mt으로 가정하여 설정하였다. 환경수용량 (*K*)의 초기값은 Gulland (1971)가정을 이용하였다. Gulland는 환경수용량 ($B_\infty = K$)과 순간자연사망계수 (*M*)를 사용하여 잠재생산량 (*MSY*)을 추정하는 방법을 아래와 같이 제시하였다.

$$MSY = 0.5MB_\infty \quad (34)$$

여기서, 순간자연사망계수 (*M*)는 Alagaraja 방법 (1984)에 의거하여, 우리나라 어획대상의 평균 자연사망계수는 15세에서의 0.31/year이다. 따라서 환경수용량 (*K*)의 초기값은 잠재생산량 (*MSY*)의 6.25배인 1,647,300mt으로 설정하였다. 환경수용량과 잠재생산량의 최대범위는 설정된 초기값의 1.5배로 설정하였다. 환경수용량의 최소범위는 ASPIC 매뉴얼 (Prager, 2013)에 의해 가장 큰 어획량의 2배로 설정하였으며,

잠재생산량의 최소범위는 Gulland (1971) 가정에 따라 환경수용량 최소범위의 0.16배로 설정하였다. q 는 최고 CPUE의 5 배와 최고 어획량의 5배 값을 나눈 값으로 설정하였다 (Prager, 2013).



1.3.4 최대엔트로피모델

최대엔트로피모델은 추정하고자 하는 파라미터를 주어진 제약조건 내에서 파라미터가 가질 수 있는 확률분포를 추정하여 파라미터가 자료를 가장 잘 설명할 수 있는 이상적인 값을 추정하는 모델이다.

먼저 최대엔트로피모델의 기본개념에 대해 설명하면 식 (35)의 y 는 한 사건에 대하여 관측된 값으로 임의상수 a_i 와 a_i 가 나타날 확률 p_i 의 곱의 합, 즉 기대값의 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = a_1p_1 + a_2p_2 + \cdots + a_np_n \quad (35)$$

즉, 최대엔트로피 기법이란 관측된 y 값과 사전에 가정한 a_i 를 활용하여 p_i 를 구하는 방법이라 할 수 있다. p_i 를 구하기 위한 목적 함수와 제약 조건은 식 (36)와 같다 (Shannon, 1948).

$$\begin{aligned} \max \quad & H(p) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \\ \text{s.t.} \quad & y_t = \sum_{i=1}^n a_{ti}p_i, t = 1, 2, 3, \dots, T \\ & \sum_{i=1}^n p_i = 1 \end{aligned} \quad (36)$$

우리나라 서해 어획대상 총 어획량 및 어획노력량 자료를 이용하여 다음의 추정식에 적용하였다. 본 연구에서는 최대엔트로피모델의 생산함수를 두가지로 설정하여 두가지의 결과를 도출하였다. 첫번째 식은

Cobb-Douglas 생산함수형태의 식 (37)이고, 두번째 식은 단순형 생산함수형태의 식 (38)이다. 어업 자원의 성장을 나타내는데 사용되는 Vergust (1838)의 로지스틱 함수 식 (39)의 형태를 따른다고 가정하였다.

$$C_t = AE_t^\alpha B_t^\beta \exp(\varepsilon_t) \quad (37)$$

$$C_t = qE_t B_t \exp(\varepsilon_t) \quad (38)$$

$$B_{t+1} = \left[B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right) - C_t \right] \exp(\mu_t) \quad (39)$$

여기서, 식 (37)과 식 (38)의 C_t 는 t 년의 총 어획량, A 와 q 는 어획능력, E_t 는 t 년의 어획노력량, B_t 는 t 년의 자원량, α 와 β 는 각각 노력량과 자원량이 1% 늘어날 때 증가하는 탄성치를 나타내며, 식 (39)의 r 은 내적자연증가율, K 는 환경수용량을 나타내며 $rB_t(1 - B_t/K)$ 는 자연증가량을 의미한다. ε_t, μ_t 는 t 년의 어획량과 자원량에 대한 오차이다.

파라미터를 확률변수화 하기 위해 최대엔트로피모델을 이용하며 이를 구체적으로 나타내면 Cobb-Douglas 생산함수는 식 (40)과 같고, 단순형 생산함수는 식 (41)과 같다.

$$\alpha = p_1^\alpha \cdot 0 + p_2^\alpha \cdot 0.5 + p_3^\alpha \cdot 1$$

$$\beta = p_1^\beta \cdot 0 + p_2^\beta \cdot 0.5 + p_3^\beta \cdot 1$$

$$A = p_1^q \cdot 0 + p_2^q \cdot 0.5 + p_3^q \cdot 1 \quad (40)$$

$$q = p_1^q \cdot 0 + p_2^q \cdot n/2 + p_3^q \cdot h \quad (41)$$

식 (37)의 Cobb-Douglas 생산함수형태에 α, β, A 는 $[0,1]$ 의 범위에 있다고 가정하였다 (하, 2005). 식 (38)의 생산함수를 나타내는 식에서 어획능률 (q)의 최대범위는 $q = C/(B \cdot f)$ 의 관계에 의해, $q_{max} = C_{max}/(2 \cdot C_{min} \cdot f_{min})$ 으로 가정하여, 어획노력량 마력수의 사용에 있어 q 는 $n = 1.93E - 05$, 톤수의 사용에 있어 q 는 $n = 3.72E - 05$ 로 설정하였다.

$$r = p_1^r \cdot 0 + p_2^r \cdot 0.5 + p_3^r \cdot 1$$

$$K = p_1^K \cdot 0 + p_2^K \cdot h/2 + p_3^K \cdot h \quad (42)$$

내적자연증가율 (r)의 범위는 일반적으로 $r/2 \approx F_{MSY}(0.25 \leq F_{MSY} \leq 0.5)$ 의 관계에 의해 최대범위를 1로 설정하였다. 환경수용량 (K)의 h 의 최대 값은 ASPIC모델에서와 같이 Gulland 가정에 따라 최고 어획량의 6.25배인 1,647,300으로 설정하였다.

$$B_t = p_1^B \cdot 0 + p_2^B \cdot h/4 + p_3^B \cdot h/2, \quad t = 1966, 1968, \dots, 2013$$

$$\varepsilon_t = p_1^\varepsilon \cdot (-0.2) + p_2^\varepsilon \cdot 0 + p_3^\varepsilon \cdot (+0.2), \quad t = 1966, 1968, \dots, 2013$$

$$\mu_t = p_1^\mu \cdot (-0.2) + p_2^\mu \cdot 0 + p_3^\mu \cdot (+0.2), \quad t = 1966, 1968, \dots, 2012 \quad (43)$$

자원량의 범위는 환경수용량 범위의 절반값으로 가정하였고, 오차항의 범위는 $\pm 20\%$ 내외로 설정하기 위해 $e = 0.2$ 로 한정하였다.

Cobb-Douglas 생산함수에서는 식 (37), (39), (40), (42), (43)을 제약조건으로 하고, 아래의 식 (44), (46)을 확률의 조건으로 한다.

단순형 생산함수는 식 (38), (39), (41), (42), (43)을 제약조건으로 하고, 아래의 식 (45), (46)을 확률의 조건으로 한다.

$$\sum_{j=1}^3 p_j^g = 1, \quad g = \alpha, \beta, A, r, K \quad (44)$$

$$\sum_{j=1}^3 p_j^g = 1, \quad g = q, r, K \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 p_{tj}^B &= 1, & t &= 1966, 1968, \dots, 2013 \\ \sum_{j=1}^3 p_{tj}^\varepsilon &= 1, & t &= 1966, 1968, \dots, 2013 \\ \sum_{j=1}^3 p_{tj}^\mu &= 1, & t &= 1966, 1968, \dots, 2012 \end{aligned} \quad (46)$$

확률의 조건을 만족하는 다음 식 (47), (48)을 각각 GAMS (General Algebraic Modeling System)를 이용하여 파라미터를 추정하였다.

$$Max \left[- \sum_{j=1}^3 p_j^g \ln p_j^g - \sum_t \sum_{j=1}^3 p_{tj}^l \ln p_{tj}^l \right], \quad g = \alpha, \beta, A, r, K \quad l = B, \varepsilon, \mu \quad (47)$$

$$Max \left[- \sum_{j=1}^3 p_j^g \ln p_j^g - \sum_t \sum_{j=1}^3 p_{tj}^l \ln p_{tj}^l \right], \quad g = q, r, K \quad l = B, \varepsilon, \mu \quad (48)$$

식 (39)에서 자연증가량을 나타내는 식 $rB(1 - B/K)$ 이 최대가 될 때, MSY 시의 자원량 (B_{MSY})과 잠재생산량 (MSY)을 추정할 수 있다 따라서, 추정된 파라미터 내적자연증가율 (r), 환경수용량 (K)과 자연증가량을 나타내는 식을 이용하여 엑셀에서 해찾기 기능을 통해 추정하였다. 또한 추정된 잠재생산량 (MSY)과 MSY 시의 자원량 (B_{MSY})을 식 (37), (38)에 대입함으로써 MSY 시의 어획노력량 (f_{MSY})을 추정하였다.

이상과 같이 우리나라 서해 전체 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 추정하기 위해 사용한 Fox모델, CYP모델, ASPIC모델 및 최대엔트로피모델 추정식을 요약한 표는 아래와 같다 (Table 3).

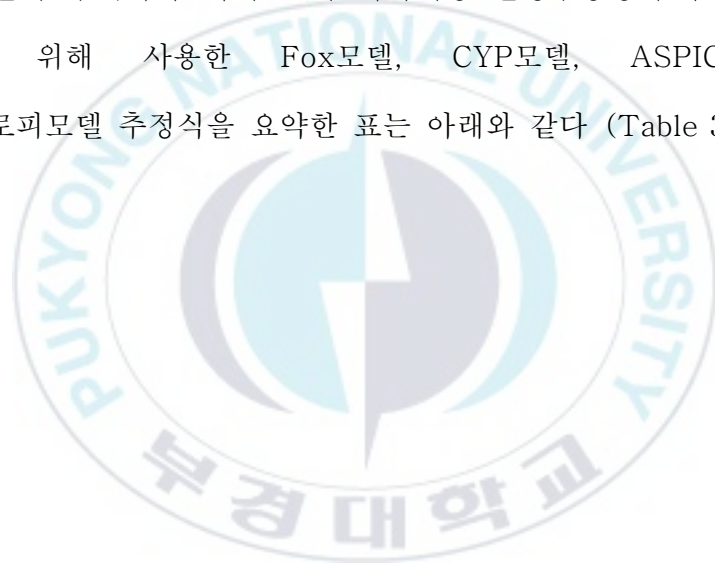


Table 3. Equations for estimation of potential yield for Korean west coast fisheries

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

1.4 모델검정

1.4.1 결정계수 (Coefficient of determination, R^2)

자료의 적합도를 평가하기 위해 각 모델에 대한 결정계수 (R^2)를 계산하였으며, 식 (49)와 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i \quad (49)$$

여기서, y_i 는 실제 CPUE, $\hat{y}_i$ 는 모델에 의해 계산된 CPUE, i 는 연도, n 은 자료의 수를 나타낸다.

1.4.2 오차의 제곱 평균 제곱근 (Root Mean Square Error, $RMSE$)

오차의 제곱 평균 제곱근 ($RMSE$)을 계산하여 각 모델들에 의한 추정치와 실제 자료의 정확도를 평가하였으며, 식 (50)과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(x_i) - \hat{y}(x_i)]^2} \quad (50)$$

여기서, $y(x_i)$ 는 x_i 에서의 실제 CPUE, $\hat{y}(x_i)$ 는 x_i 에서의 예측 CPUE를 나타낸다.

1.4.3 Theil의 U 통계량 (Theil's U-statistic, U)

Theil의 U 통계량 (U)을 계산하여 각 모델들에 대한 추정치와 실제 자료의 정확도를 평가하였으며, 식 (51)과 같다.

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{F_{i+1} - Y_{i+1}}{Y_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{Y_i} \right)^2}} \quad (51)$$

여기서, F 는 모델에 의해 계산된 어획량, Y 는 실제 어획량을 나타낸다.



2. 개체군생산량 분석법

2.1 자료수집에 의한 주요 어획대상의 선별

어종별 잠재생산량 추정을 위한 자원평가 참고문헌의 수집 유무에 따라 서해 분포 주요 35어종을 선별하였다 (Table 4). 어종별 잠재생산량을 추정하기 위해 사용한 참고문헌은 현재까지 출간된 잠재생산량 (MSY) 추정 논문 및 보고서, Tier 5로부터 추정된 생물학적허용어획량 (ABC) 추정치, 생태학적 특성치 논문 및 보고서를 기준으로 하였다. 어종별 환경수용량을 추정하기 위해 사용한 참고문헌은 어종별 어획량및 단위노력당어획량 (CPUE)자료, 생태학적 특성치 논문 및 보고서이다. 잠재생산량 기준으로 선별하였기 때문에 35어종 중 환경수용량 추정을 위한 자원평가 참고문헌이 없는 어종에 대해서는 유사한 생태학적 특성을 가진 어종의 생태학적 특성치 논문 및 보고서를 사용하였다. 선별된 35어종의 5개년 (2010-2014년) 평균 어획비율은 70.67%였다.

Table 4. Reference of stock assessment for commercial 35 species in Korean west coast

Species		Average target ratio from 2010 to 2014 (%)	Reference for potential yield			Reference for carrying capacity		
Scientific name	Korean name		MSY	Estimated ABC by Tier 5	Population ecological characteristics	Catch and CPUE		Population ecological characteristics
<i>Portunus trituberculatus</i>	꽃게	18.36	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Yeon (1998)
<i>Engraulis japonicas</i>	멸치	18.05	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Tapes philippinarum</i>	바지락	5.29	Koh (2001)	-	-	-	-	Choi et al (2011)
<i>Atrina pectinata</i>	키조개	3.82	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Son (2004)
<i>Gadus macrocephalus</i>	대구	3.18	-	NFRDI (2015)	-	-	-	Sinclair (2001)
<i>Acetes japonicus</i>	젓새우	3.14	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Gotshall (1972)
<i>Paralichthys olivaceus</i>	넙치	2.28	-	-	Yoon et al (2014)	-	-	Yoon et al (2014)
<i>Larimichthys polyactis</i>	참조기	2.21	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Lee et al (2013)
<i>Lophiomus setigerus</i>	아귀	2.13	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Charybdis japonica</i>	민꽃게	1.75	-	-	Yeon et al (1997)	-	-	¹ Yeon (1998)

Table 4. Continued

Species		Average target ratio from 2010 to 2014 (%)	Reference for potential yield			Reference for carrying capacity		
Scientific name	Korean name		MSY	Estimated ABC by Tier 5	Population ecological characteristics	Catch and CPUE		Population ecological characteristics
<i>Pleuronectidae</i>	가자미	1.52	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Part et al (1991)
<i>Todarodes pacificus</i>	살오징어	1.35	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Sepia officinalis</i>	갯오징어	1.01	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Mactra veneriformis</i>	동죽	0.96	-	-	Yoo (1994)	-	-	Yoo (1994)
<i>Trichiurus lepturus</i>	갈치	0.93	Park et al (2000)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Agrammus agrammus</i>	노래미	0.71	-	-	Oh et al (1999)	-	-	Oh et al (1999)
<i>Mugil cephalus</i>	송어	0.67	-	-	Sarr et al (2013)	-	-	Sarr et al (2013)
<i>Pampus argenteus</i>	병어	0.45	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Kim (1991)
<i>Sebastes schlegeli</i>	조피볼락	0.43	-	-	Park (2008)	-	-	Park (2008)
<i>Konosirus punctatus</i>	전어	0.38	-	-	Gu et al (2013)	-	-	Gu et al (2013)
<i>Conger myriaster</i>	붕장어	0.38	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-

Table 4. Continued

Species		Average target ratio from 2010 to 2014 (%)	Reference for potential yield			Reference for carrying capacity		
Scientific name	Korean name		MSY	Estimated ABC by Tier 5	Population ecological characteristics	Catch and CPUE		Population ecological characteristics
<i>Cynoglossus joyneri</i>	서대	0.31	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Seo et al (2007)
<i>Scomber japonicus</i>	고등어	0.29	Choi et al (2004)	-	-	-	-	Choi et al (2004)
<i>Raja pulchra</i>	참홍어	0.23	-	NFRDI (2015)	-	-	-	² Fish base Website
<i>collichthys niveatus</i>	강달이	0.23	-	NFRDI (2015)	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Takifugu chinensis</i>	복어	0.16	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Scomberomorus niphonius</i>	삼치	0.16	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Batoidea</i>	가오리	0.07	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Argyrosomus argentatus</i>	보구치	0.07	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Zhang et al (1999)
<i>Saxidomus purpuratus</i>	개조개	0.06	-	-	Kim et al (2007)	KOSIS website	NFRDI (2014)	-

Table 4. Continued

Species		Average target ratio from 2010 to 2014 (%)	Reference for potential yield			Reference for carrying capacity		
Scientific name	Korean name		MSY	Estimated ABC by Tier 5	Population ecological characteristics	Catch and CPUE		Population ecological characteristics
<i>Miichthys miiuy</i>	민어	0.03	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	쥐치	0.02	-	NFRDI (2015)	-	-	-	³ Kim (1991)
<i>Pleurogrammus azonus</i>	임연수어	0.01	NFRDI (2014)	-	-	KOSIS website	NFRDI (2014)	-
<i>Batillus cornutus</i>	소라	0.01	NFRDI (2014)	-	-	-	-	Kwon et al (2010)
<i>Muraenesox cinereus</i>	갯장어	0.00	Zhang et al (1998)	-	-	-	-	Zhang et al (1998)
Total (35 species)						70.67 %		

2.2 주요 어획대상 35어종에 대한 환경수용량 추정

수집된 자료에서 사용의 우선순위를 정하여 두 방법으로 서해 분포 주요 35어종의 환경수용량을 추정하였다. 첫 번째 방법은 어획량 및 CPUE 자료를 사용하여 잉여생산량모델에 의해 12어종에 대한 환경수용량을 추정하였다. 두 번째 방법은 어종별 생태학적 특성 논문 및 보고서의 추정치를 사용하여 23어종에 대한 환경수용량을 추정하였다.



2.2.1 잉여생산량모델에 의한 추정

어종별 어획량자료 (1970~2014년)는 국가통계포털을 통해 수집할 수 있었지만, 어종별 CPUE자료의 경우 국립수산물과학원을 통해 일부 어종에 대해서만 수집할 수 있었다. 따라서 CPUE자료의 유무에 의해 잉여생산량모델로 환경수용량을 추정할 수 있는 어종은 멸치, 아귀, 살오징어, 갑오징어, 갈치, 붕장어, 강달이, 복어, 삼치, 가오리, 개조개, 민어, 임연수어였다. 임연수어는 1990-2001년, 그 이외의 어종은 1990-2013년의 연도별 자료를 이용할 수 있었다. 잉여생산량모델 중 최대엔트로피모델을 사용하여 13어종에 대한 환경수용량을 추정하였다.



2.2.2 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용한 역추정

① 처녀자원량 모델에 의한 역추정

Gulland (1971) 식 (34)를 이용하여 환경수용량을 역추정하였다. 잠재생산량 (MSY)은 ‘2.3 주요 어획대상 35종에 대한 잠재생산량 추정’에서 구한 값을 역이용하였고, 순간자연사망계수 (M)는 Table 4의 생태학적 특성치 참고문헌에서 인용하였다. 따라서 처녀자원량 모델을 이용하여 환경수용량을 추정할 수 있는 어종은 꽃게, 바지락, 키조개, 대구, 갯새우, 참조기, 가자미, 병어, 서대, 고등어, 참홍어, 보구치, 쥐치, 소라, 갯장어로 총 15어종이다.



② 어획량과 자원량 관계식에 의한 역추정

넙치, 민꽃게, 동죽, 노래미, 승어, 조피볼락, 전어로 총 7어종은 어종별 서해의 최고 어획량과 자원량 관계를 이용한 아래의 식으로 역추정하였다.

$$C_{MAX,i} = \frac{F_{i,t} \cdot B_{\infty,i}}{M_i + F_{i,t}} \cdot (1 - \exp(-(M_i + F_{i,t}))) \quad (56)$$

여기서, $C_{MAX,i}$ 는 1966~2013년에서 i 어종의 서해 최고어획량 (mt), $B_{\infty,i}$ 는 i 종의 환경수용량 (mt), $F_{i,t}$ 는 i 종의 t 년도 순간어획사망계수 ($/year$), M_i 은 i 종의 순간자연사망계수 ($/year$)이다. 이 방법은 두 개의 가정을 근거로 한다. 하나는 MSY 시의 순간어획사망계수 (F_{MSY})는 순간자연사망계수 (M)와 같다는 가정이며, 두번째는 최고어획량 (C_{MAX})은 환경수용량 (K)의 자원량 (B)을 MSY 시의 순간어획사망계수 (F_{MSY}) 수준에서 어획되었다는 가정을 근거로 한다.

넙치, 민꽃게, 노래미, 승어, 조피볼락, 전어의 순간자연사망계수 (M)와 순간어획사망계수 (F)는 Table 4의 생태학적 특성치 참고문헌에서 인용하였다. 동죽은 Zhang and Megrey (2006)방법을 사용하여 순간자연사망계수 (M)를 추정하였으며, 식 (55)와 같다.

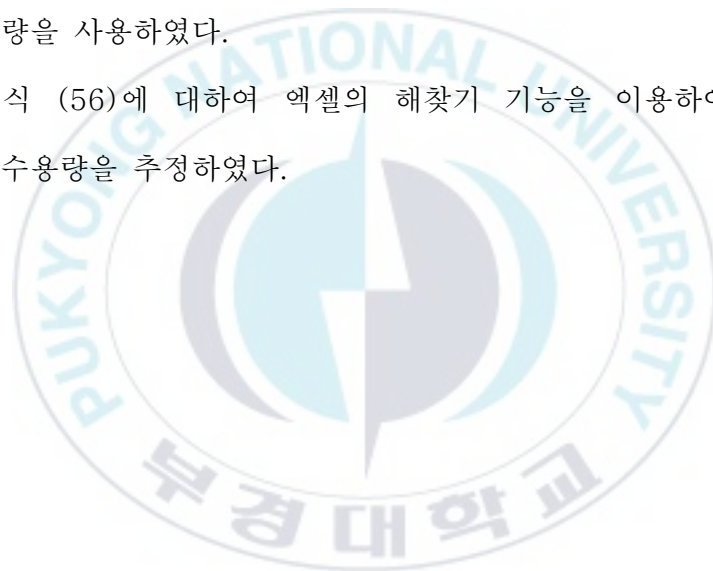
$$M = \frac{\beta \cdot K}{e^{K(0.44 \cdot t_{max} - t_0)} - 1} \quad (55)$$

여기서, K 는 성장계수, t_{max} 는 최대연령, t_0 는 체장이 0일 때의 이론적 연령, β 는 체장-체중 관계식의 상수이며, Table 3의 생태학적 특성치

참고문헌에서 파라미터를 인용하였다. 또한, 동족의 순간전사망계수 (Z)를 추정하여 순간어획사망계수를 구하였다. 순간전사망계수는 Table 3의 유 (1994)에 의해 조사된 바지락 연령별 어획 개체수 자료를 이용하여 어획물곡선법으로 추정된 생존율 ($S = e^{-Z}$)에서 $Z = -\ln(S)$ 로 변환하여 추정하였다. 바지락의 순간어획사망계수 (F)는 순간전사망계수 (Z)에서 순간자연사망계수 (M)을 제함으로써 구하였다. 민꽃게의 순간어획사망계수 (F)는 Table 3의 연 (1997)에 의해 추정된 순간전사망계수 (Z)에서 순간자연사망계수 (M)을 제함으로써 구하였다.

최고어획량은 국가통계포털에서 1966~2013년사이의 어종별 가장 큰 서해 어획량을 사용하였다.

따라서, 식 (56)에 대하여 엑셀의 해찾기 기능을 이용하여 8어종에 대한 환경수용량을 추정하였다.



2.3 주요 어획대상 35어종에 대한 잠재생산량 추정

수집된 자료에서 사용의 우선순위를 정하여 세가지 방법으로 서해 분포 주요 35종의 잠재생산량을 추정하였다. 가장 우선적인 방법은 어종별 잠재생산량 (MSY) 추정에 대한 논문 및 보고서의 추정치를 직접적으로 사용하는 방법이다. 두 번째 방법은 연근해 주요어종에 대한 자원평가 요약표 (NFRDI, 2015) 자료를 사용하여 잠재생산량 (MSY)을 역추정하는 방법이다. 세 번째 방법은 어종별 생태학적 특성치를 사용하여 잠재생산량 (MSY)을 추정하는 방법이다.



2.3.1 논문 및 보고서의 추정치 사용

① 한국 전체 해역에 대한 잠재생산량 추정치 이용 (22어종)

한국 전체 해역에 대한 22어종의 어종별 잠재생산량 (MSY) 추정치를 직접적으로 사용하였다 (Table 4). 따라서, 한국 전체 해역의 어종별 어획량에 대한 서해 어종별 어획량의 비율을 이용하여 서해 연근해의 어종별 잠재생산량 ($MSY_{W,s}$)을 식 (47)로 추정하였다.

$$MSY_{W,s} = MSY_s \cdot \left(\frac{C_{W,s}}{C_{K,s}} \right) \quad (47)$$

여기서, MSY_s 는 한국 전체 해역에 대한 s어종의 잠재생산량 (mt), $C_{W,s}$ 는 서해에 대한 s어종의 어획량 (mt), $C_{K,s}$ 는 한국 전체 해역에 대한 s어종의 어획량 (mt), s는 꽃게, 멸치, 키조개, 젓새우, 참조기, 아귀, 가자미, 살오징어, 갑오징어, 갈치, 병어, 붕장어, 서대, 고등어, 복어, 삼치, 가오리, 보구치, 민어, 임연수어, 소라, 갯장어이다.

② 지역적 범위에 대한 잠재생산량 추정치 사용 (바지락)

바지락은 고 (2001)에서 보고된 새만금 마을어업 바지락의 잠재생산량 추정치 및 새만금 마을어업 바지락의 어장면적을 이용하였다. 2001년도 이전의 서해 바지락 어획량은 마을어업에 의해 99% 어획 (수산통계연보, 1986-2000)되었기 때문에, 서해 바지락은 마을어업에 의해서만 어획된다고 가정하였다. 먼저, 새만금 어장면적에 대한 바지락의 잠재생산량 비율 (γ_T)을 식 (48)으로 추정하였다.

$$\gamma_T = \frac{MSY_T}{A_T} \quad (48)$$

여기서, MSY_T 는 새만금 바지락의 잠재생산량, A_T 는 새만금 바지락의 어장면적이다. 서해 시도별 바지락의 어장면적에 추정된 새만금 바지락 어장면적에 대한 잠재생산량 비율을 적용하여 서해 시도별 바지락의 잠재생산량을 식 (49)으로 추정하였다. 서해 시도별 바지락의 어장면적은 연근해어업총조사 (NRFDI, 2010)에서 인용하였다 (Table 5).

$$MSY_{T,G} = \gamma_T \cdot A_{T,G} \quad (49)$$

여기서, $MSY_{T,G}$ 는 지역 G 에 대한 바지락의 잠재생산량 (mt) $A_{T,G}$ 는 지역 G 에 대한 바지락의 어장면적 (km^2), G 는 경기도, 인천광역시, 충청남도, 전라북도이다. 따라서, 서해 바지락의 잠재생산량 (MSY_{WT})은 식 (50)으로 추정하였다.

$$MSY_{WT} = \sum MSY_{T,G} \quad (50)$$

따라서, 논문 및 보고서의 추정치를 사용하여 23어종에 대해 추정된 잠재생산량 (MSY_R)은 식 (51)과 같다.

$$MSY_R = \sum (MSY_{W,s}) + MSY_{WT} \quad (51)$$



Table 5. Fishery area by province of village fishery in Korean west coast

Province	Fishery area of village fishery (km^2)
Gyeonggi-do	44.51
Incheon Metropolitan city	26.32
Chungcheongnam-do	60.41
Jeollabuk-do	20.71



2.3.2 생물학적 허용어획량 (ABC) 자료를 사용한 역추정

한국 전체 해역에 대한 생물학적 허용어획량 (ABC)과 최근 5개년 (2008~2012년)에 대한 자원동향을 사용하여 잠재생산량 (MSY)을 역추정 할 수 있었던 어종은 대구, 참홍어, 강달이, 쥐치로 총 4어종이다. 자원동향이 평형 및 증가를 나타내는 어종에 대해서는 생물학적 허용어획량 (ABC)을 잠재생산량으로 가정하였다. 그러나 자원동향이 감소를 나타내는 어종에 대해서는 최근 5개년 (2008~2012년) 어종별 어획량 자료를 이용하여 어종별 잠재생산량 (MSY_p)을 아래의 식으로 추정하였다.

$$MSY_p = ABC_p \cdot \left(\frac{5 \cdot C_{2012,p}}{\sum_{t=2008}^{2012} C_{t,p}} \right) \quad (52)$$

여기서, ABC_p 는 p 어종에 대한 생물학적 허용어획량 (mt), $C_{2012,p}$ 는 p 어종에 대한 2012년도 어획량, $C_{t,p}$ 는 p 어종에 대한 t 년도 어획량이다. 한국 전체 해역의 어종별 어획량에 대한 서해 어종별 어획량의 비율을 이용하여 서해 연근해의 어종별 잠재생산량 ($MSY_{p,s}$)을 식 (53)로 추정하였다.

$$MSY_{W,s} = MSY_s \cdot \left(\frac{C_{W,s}}{C_{K,s}} \right) \quad (53)$$

여기서, MSY_s 는 한국 전체 해역에 대한 p 어종의 잠재생산량 (mt), $C_{W,s}$ 는 서해에 대한 p 어종의 어획량 (mt), $C_{K,s}$ 는 한국 전체 해역에 대한 p 어종의 어획량 (mt), p 는 대구, 참홍어, 강달이, 쥐치이다.

따라서, 생물학적 허용어획량 (ABC) 자료를 사용하여 4어종에 대해

역추정된 잠재생산량 (MSY_p)은 식 (54)과 같다.

$$MSY_p = \sum MSY_{W,P} \quad (54)$$



2.3.3 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용한 추정

넙치, 민꽃게, 동죽, 노래미, 숭어, 조피볼락, 전어, 개조개의 8종은 어종별 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용하여 잠재생산량을 추정하였다. 잠재생산량 추정 방법은 Gulland (1971)의 방법으로써 식 (34)와 같다.

어종별 순간자연사망계수 (M)는 Table 4의 생태학적 특성치 참고문헌에서 인용하였다. 어종별 환경수용량 (B_{∞})은 2.2.1, 2.2.2에서 추정된 결과를 사용하였다.



2.4 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

외삽의 방법을 통해 서해 분포 주요 35어종 (70.62%) 이외의 어종 (29.38%)에 대한 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 주요어종을 제외한 어종에 대하여 설정된 어종분류군은 홍어류 (States), 포식성 표영성어류 (Predator pelagic), 소형 표영성어류 (Small pelagic), 조기류 (Croaker), 기타 저서어류 (Other demersal), 두족류 (Cephalopds), 표생동물 (Epifauna), 내생동물 (Infauna), 기타 (Etc.)로 총 9개의 그룹으로 설정하였다 (Table 6). 어종분류군의 기준어종은 추정된 주요 35어종 중 자원평가자료의 신뢰도를 고려하여 선별하였다.

어종분류군별 주요어종 이외의 어종에 대한 환경수용량은 식 (58)로 추정하였다.

$$K_{G,s} = C_{G,s} \cdot \left(\frac{K_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (58)$$

여기서, $K_{G,s}$ 는 G그룹의 s어종에 대한 서해 환경수용량, $C_{G,s}$ 는 G그룹의 s어종에 대한 서해 2000~2014년 평균 어획량, $K_{G,std}$ 는 G그룹의 기준어종 (Standard species, std)에 대한 서해 환경수용량, $C_{G,std}$ 는 G그룹의 기준 어종 (std)에 대한 서해 2000~2014년 평균 어획량, G는 어종분류군 그룹 (Group NO. 1~9), s는 G그룹의 어종이다. Group num. 9의 기타 (Etc.)는 Group num. 1~8 기준어종별 어획량에 대한 환경수용량의 평균값을 이용한다.

따라서, 서해 연근해 전체 어획대상 환경수용량 (K)은 식 (59)과 같다.

$$K = (K_S + K_{G_{1971}}) + \sum K_{G,s} \quad (59)$$

여기서, K_S 는 잉여생산량모델에 의해 추정된 어종별 환경수용량의 합, $K_{G_{1971}}$ 는 처녀자원량 모델에 의해 추정된 어종별 환경수용량의 합이다.

어종분류군별 주요어종 이외의 어종에 대한 잠재생산량은 식 (60)으로 추정하였다.

$$MSY_{G,s} = C_{G,s} \cdot \left(\frac{MSY_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (60)$$

여기서, $MSY_{G,s}$ 는 G그룹의 s어종에 대한 서해 잠재생산량, $MSY_{G,std}$ 는 G그룹의 기준어종 (Standard species, std)에 대한 서해 잠재생산량이다. Group num. 9의 기타 (Etc.)는 Group num. 1~8 기준어종별 어획량에 대한 잠재생산량의 평균값을 이용한다.

따라서, 서해 연근해 전체 어획대상 잠재생산량 (MSY)은 식 (61)과 같다.

$$MSY = (MSY_R + MSY_P + MSY_I) + \sum MSY_{G,s} \quad (61)$$

Table 6. Species excepting major 35 species and standard species for classification by group

Group num.	Classification	Species of excepting major 35 species	Standard species to major 35 species
1	States	<i>Okamejei kenojei</i> (홍어), <i>Mustelus manazo</i> Bleeker (상어)	<i>Raja pulchra</i> (참홍어)
2	Predator pelagic	<i>Scomber australasicus</i> (망치 고등어), <i>Seriola quinqueradiata</i> (방어)	<i>Scomber japonicus</i> (고등어)
3	Small pelagic	<i>Cololabis saira</i> (꼰치), <i>Hyporhamphus sajori</i> (학공치), <i>Setipinna tenuifilis</i> (반지), <i>Sardinella zunasi</i> (밴댕이), <i>Salangichthys microdon</i> (뱅어), <i>Sardinops melanostictus</i> (정어리), <i>Ilisha elongate</i> (준치), <i>Ammodytes personatus</i> Girard (까나리)	<i>Engraulis japonicas</i> (멸치)
4	Croaker	<i>Larimichthys crocea</i> (부세), Other rat-finned fishes (기타 조기류)	<i>Larimichthys polyactis</i> (참조기)
5	Other demersal	<i>Lateolabrax japonicas</i> (농어), <i>Acanthopagrus schlegelii</i> (감성돔), <i>Pagrus major</i> (참돔), <i>Oplegnathus fasciatus</i> (돌돔), <i>Gobiidae</i> (망둑어), <i>Saurida undosquamis</i> (매통이), <i>Sillago sihama</i> (보리멸), <i>Chelidonichthys spinosus</i> (성대), <i>Sebastiscus marmoratus</i> (쏨뱅이), <i>Hemitripteris villosus</i> (삼세기), <i>Platycephalus indicus</i> (양태), <i>Liparis tanakai</i> (꼼치), Others (기타돔류, 기타볼락류)	<i>Pampus argenteus</i> (병어)

Table 6. Continued

Group num.	Classification	Species of excepting major 35 species	Standard species to major 35 species
6	Cephalopds	<i>Lololus beka</i> (꼴뚜기), <i>Octopus variabilis</i> (낙지), <i>Enteroctopus dofleini</i> (문어), <i>Octopus ochellatus</i> (주꾸미), Others (기타연체동물)	<i>Todarodes pacificus</i> (살오징어)
7	Epifauna	<i>Neverita didyma</i> (굴뱅이), <i>Neptunea arthritica Bernardi</i> (소라고둥), <i>Gastropods</i> (고둥), <i>Haliotis giganta Gmeil</i> (전복), <i>Mytilus coruscus</i> (홍합), <i>Cipangopaludina chinensis malleata</i> (우렁이), <i>Echinoidea</i> (성게), <i>Holothuroidea</i> (해삼), <i>Trachysalambria curvirostris</i> (꽃새우), <i>Panulirus japonicas</i> (닭새우), <i>Fenneropenaeus chinensis</i> (대하), <i>Marsupenaeus japonicas</i> (보리새우), <i>Metapenaeus joyneri</i> (중하), Others (기타 게, 기타새우)	<i>Portunus trituberculatus</i> (꽃게)
8	Infauna	<i>Patinopeten yessoensis</i> (가리비), <i>Cyclina sinensis</i> (가무락), <i>Mactra chinensis</i> (개량조개), <i>Tegillarca granosa</i> (꼬막), <i>Solen strictus</i> (맛), <i>Meretrix meretrix</i> (백합), <i>Fulvia mutica</i> (새조개), <i>Scapharca broughtonii</i> (피조개), <i>Crassostrea gigas</i> (굴)	<i>Atrina pectinata</i> (키조개)
9	Etc.	Others (기타어류, 기타갑각류, 기타패류, 기타수산동물)	*

3. 어업생산량 분석법

3.1 자료수집에 의한 주요어업의 선별

서해 어업에 대한 어획량 및 어획노력량의 자료 수집 유무, 자원평가 참고문헌의 수집 유무에 따라 서해 주요 6개 어업을 선별하였다 (Table 7). 근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발, 근해자망은 잉어생산량모델, 마을어업은 대상어종에 대한 자원평가 추정치를 인용하여 잠재생산량 및 환경수용량을 추정하였다. 선별된 6개 어업의 5개년 (2010-2014년) 평균 어획비율은 67.53%였다.



Table 7. Collocation of available data for 6 commercial fisheries in Korean west coast

Fisheries		Average target ratio from 2010 to 2014 (%)	Reference for potential yield and carrying capacity		
English name	Korean name		Catch	Vessel	MSY
Offshore Stow net	근해안강망	21.01	KOSIS website	NFRDI (2004; 2010)	-
Coastal gillnet	연안자망	10.31	KOSIS website	NFRDI (2004; 2010)	-
Coastal improved stow net	연안개량안강망	9.94	KOSIS website	NFRDI (2004; 2010)	-
Coastal fish pot	연안통발	9.44	KOSIS website	NFRDI (2004; 2010)	-
Offshore gill net	근해자망	8.51	KOSIS website	NFRDI (2004; 2010)	-
Community fisheries	마을어업	8.32	-	-	Koh (2001)
Total (6 fisheries)				67.53 %	

3.2 주요 6개 어업에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

3.2.1 잉여생산량모델에 의한 추정

근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발, 근해자망에 대한 서해 어업별 연도별 어획량자료는 국가통계포털 website에서 인용하였다. 서해 어업별 연도별 척수자료는 연근해어업총조사 (NFRDI, 2004; 2010)에서 시도별로 수집하여 합하였다. 근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발, 근해자망에 대한 서해 어업별 연도별 어획노력량의 총톤수는 아래의 식을 이용하여 추정하였다.

$$f_{t,v} = v_{t,v} \cdot GTPV_{t,v} \cdot \gamma_{t,v} \quad (62)$$

여기서, $f_{t,v}$ 는 서해 v 어업에 대한 표준화된 총톤수, $v_{t,v}$ 은 서해 v 어업에 대한 척수, $GTPV_{t,v}$ 는 v 어업에 대한 척당 톤 ($GT_{t,v}/v_{t,v}$), $\gamma_{t,v}$ 는 v 어업에 대한 어획효율, v 는 근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발, 근해자망, t 는 1998~2009년이다. 따라서, 어획량과 총톤수자료로 잉여생산량모델 중 최대엔트로피모델을 이용하여 주요 6개 어업에 대한 환경수용량과 잉여생산량을 추정하였다.

3.2.2 어업 대상어종의 자원평가를 사용한 추정

새만금 마을어업 대상어종에 대한 자원평가 추정치를 인용하여 새만금 마을어업 어장면적에 대한 잠재생산량 및 현존자원량 비율을 경기도, 인천광역시, 충청남도, 전라북도 마을어업 어장면적에 적용시켜 서해 전체 마을어업의 환경수용량 및 잠재생산량을 추정하였다. 새만금 마을어업 대상어종에 대한 자원평가 추정치는 고 (2001)에서 인용하였고, 경기도, 인천광역시, 충청남도, 전라북도 마을어업의 어장면적은 Table 5와 같다.

서해 마을어업 환경수용량을 추정하기 위하여 새만금 마을어업 어장면적에 대한 현존자원량 비율 (γ_B)은 아래의 식과 같이 추정하였다.

$$\gamma_B = \frac{\sum B_{2009,i}}{\sum A_{V,i}} \quad (63)$$

여기서, $\sum B_{2009,i}$ 는 i 어종의 마을어업 현존자원량, $\sum A_{V,i}$ 는 i 종에 대한 새만금 마을어업의 어장면적이다. 서해 시도별 어장면적에 새만금 마을어업 어장면적에 대한 현존자원량 비율을 적용시켜 시도별 마을어업의 현존자원량 ($B_{2009,G}$)을 식 (64)로 추정하였다.

$$B_{2009,G} = \gamma_B \cdot A_{V,G} \quad (64)$$

여기서, $A_{V,G}$ 는 G 지역의 마을어업 어장면적 (km^2), G 는 경기도, 인천광역시, 충청남도, 전라북도이다. 서해 마을어업 현존자원량 (B_{2009})은 아래의 식으로 추정하였다.

$$B_{2009} = \sum B_{2009,G} \quad (65)$$

서해 마을어업 환경수용량 (K_V)은 단원 3.2.1의 추정결과를 이용하여, 마을어업은 대부분 근해에서 실시되기때문에 잉여생산량모델로 추정된 근해자망, 근해안강망의 현존자원량 ($B_{2009,F}$)에 대한 환경수용량 (K_F)의 평균 비율과 같다고 가정하여 아래의 식으로 추정하였다.

$$K_V = B_{2009} \cdot \left(\sum \frac{K_F}{B_{2009,F}} \cdot \frac{1}{2} \right) \quad (66)$$

여기서, K_V 는 서해 마을어업의 환경수용량 (mt), F 는 근해자망, 근해안강망이다.

또한, 서해 마을어업 잠재생산량을 추정하기 위하여 새만금 마을어업 어장면적에 대한 잠재생산량 비율 (γ_{MSY})은 아래의 식과 같이 추정하였다.

$$\gamma_{MSY} = \frac{\sum MSY_{V,i}}{\sum A_{V,i}} \quad (67)$$

여기서, $MSY_{V,i}$ 는 i 어중에 대한 새만금 마을어업의 잠재생산량량, i 는 갯지렁이, 바지락, 동죽, 백합, 가무락이다. 서해 시도별 어장면적에 새만금 마을어업 어장면적에 대한 잠재생산량 비율을 적용시켜 시도별 마을어업의 잠재생산량을 아래의 식으로 추정하였다.

$$MSY_{V,G} = \gamma_{MSY} \cdot A_{V,G} \quad (68)$$

여기서, $MSY_{V,G}$ 는 G 지역 마을어업의 잠재생산량이다. 서해 마을어업 잠재생산량 (MSY_V)은 아래의 식으로 추정하였다.

$$MSY_V = \sum MSY_{V,G} \quad (69)$$

따라서, 서해 주요 6개 어업의 환경수용량 (K_F)은 식 (70)과 같다.

$$K_F = K_S + K_V \quad (70)$$

여기서, MSY_S 은 잉여생산량모델에 의해 추정된 5개 어업의 환경수용량의 합이다. 또한, 서해 주요 6개 어업의 잠재생산량 (MSY_F)은 식 (71)으로 나타내었다.

$$MSY_F = MSY_S + MSY_V \quad (71)$$

여기서, MSY_S 은 잉여생산량모델에 의해 추정된 5개 어업의 잠재생산량의 합이다.

3.3 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

외삽의 방법을 통해 서해 주요어업 (67.53%) 이외의 어업 (32.47%)에 대한 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 주요어업을 제외한 어종에 대하여 설정된 어업분류군은 함정그물류 (Trap nets), 은신함정류 (Hiding places for traps), 자루그물류 (Bag nets), 맨손류 (Fishing without gear), 기타 (Etc.)로 총 5개의 그룹으로 설정하였다 (Table 8). 또한 어구의 특성에 따라 추정된 주요 어업 중 어업분류군별 기준어업을 설정하였다.

어업분류군별 주요어업 이외의 어업에 대한 환경수용량은 식 (72)로 추정하였다.

$$K_{G,F} = C_{G,F} \cdot \left(\frac{K_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (72)$$

여기서, $K_{G,F}$ 는 G그룹의 F어업에 대한 서해 환경수용량, $C_{G,F}$ 는 G그룹의 F어업에 대한 서해 2000~2014년 평균 어획량, $K_{G,std}$ 는 G그룹의 기준어업에 대한 서해 환경수용량, $C_{G,std}$ 는 G그룹의 기준 어업에 대한 서해 2000~2014년 평균 어획량, G 는 어업분류군 그룹 (Group NO. 1~5), F 는 G그룹의 어업이다. Group num. 5의 기타 (Etc.)는 Group num. 1~4 기준어업별 어획량에 대한 환경수용량 평균값을 이용한다.

따라서, 서해 연근해 전체 어획대상 환경수용량 (K)은 식 (73)과 같다.

$$K = K_F + \sum K_{G,F} \quad (73)$$

여기서, K_F 는 서해 주요 6개 어업에 대해 추정된 환경수용량의 합이다.
어업분류군별 주요어업 이외의 어업에 대한 잠재생산량은 식 (74)로 추정하였다.

$$MSY_{G,F} = C_{G,F} \cdot \left(\frac{MSY_{G,std}}{C_{G,std}} \right) \quad (74)$$

여기서, $MSY_{G,F}$ 는 G그룹의 F어업에 대한 서해 잠재생산량, $MSY_{G,std}$ 는 G그룹의 기준어업에 대한 서해 잠재생산량이다.

따라서, 서해 연근해 전체 어획대상 잠재생산량 (MSY)은 식 (75)와 같다.

$$MSY = MSY_F + \sum MSY_{G,F} \quad (75)$$

여기서, MSY_F 는 서해 주요 6개 어업에 대해 추정된 잠재생산량의 합이다.

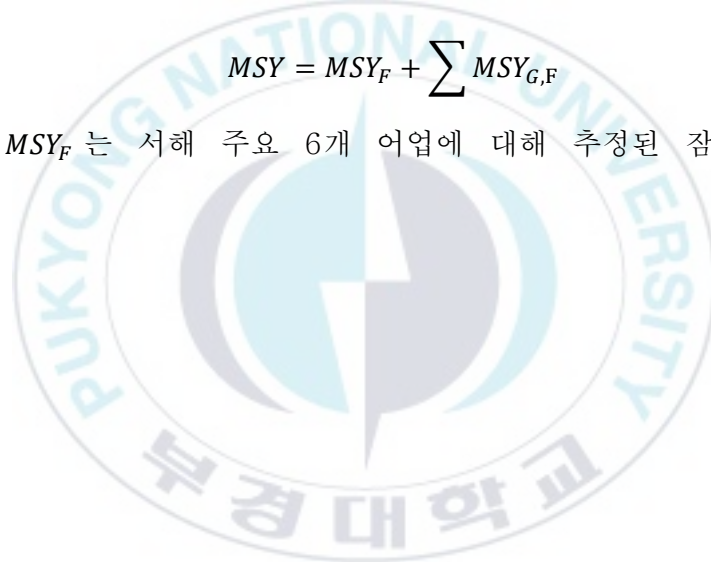


Table 8. Fishereis excepting mojour 6 fishereis and standard fishereis for classification by group

Group num.	Classification	Fisheries of excepting major 6 fisheries	Standard fisheries to major 6 fishereis
1	Trap nets	Large Purse Seiner, Small Purse Seiner, Coastal Purse seiner, Coastal Lift Net, Coastal Beam Trawl Fisheries	Coastal gillnet
2	Hiding places for traps	Offshore Eel Pots, Offshore Fishtrap	Coastal fish pot
3	Bag nets	Bottom Trawl, Dredge, Large Trawl, Boat Seine, Coastal Dredge, Set Net, Stow Nets, Fyke net, Gape Net, Shrimp Beam Trawl, Glass eels Stow Net	Coastal improved stow net
4	Fishing without gear	Diving Apparatus	Community fisheries
5	Etc.	Coastal Angling, Offshore Angling, Coastal Longlines, Offshore Longlines, Coastal complex, Other designated area	-

결 과

1. 통합생산량 분석법

1.1 어획노력량의 표준화

1.1.1 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 어획노력량 제외

어획노력량의 마력수에 대하여 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 어획노력량을 제외한 결과는 Fig. 2와 Table 9와 같다. 어획노력량의 톤수에 대하여 서해 양식어업과 내수면어업의 연도별 어획노력량을 제외한 결과는 Fig. 2와 Table 10과 같다.



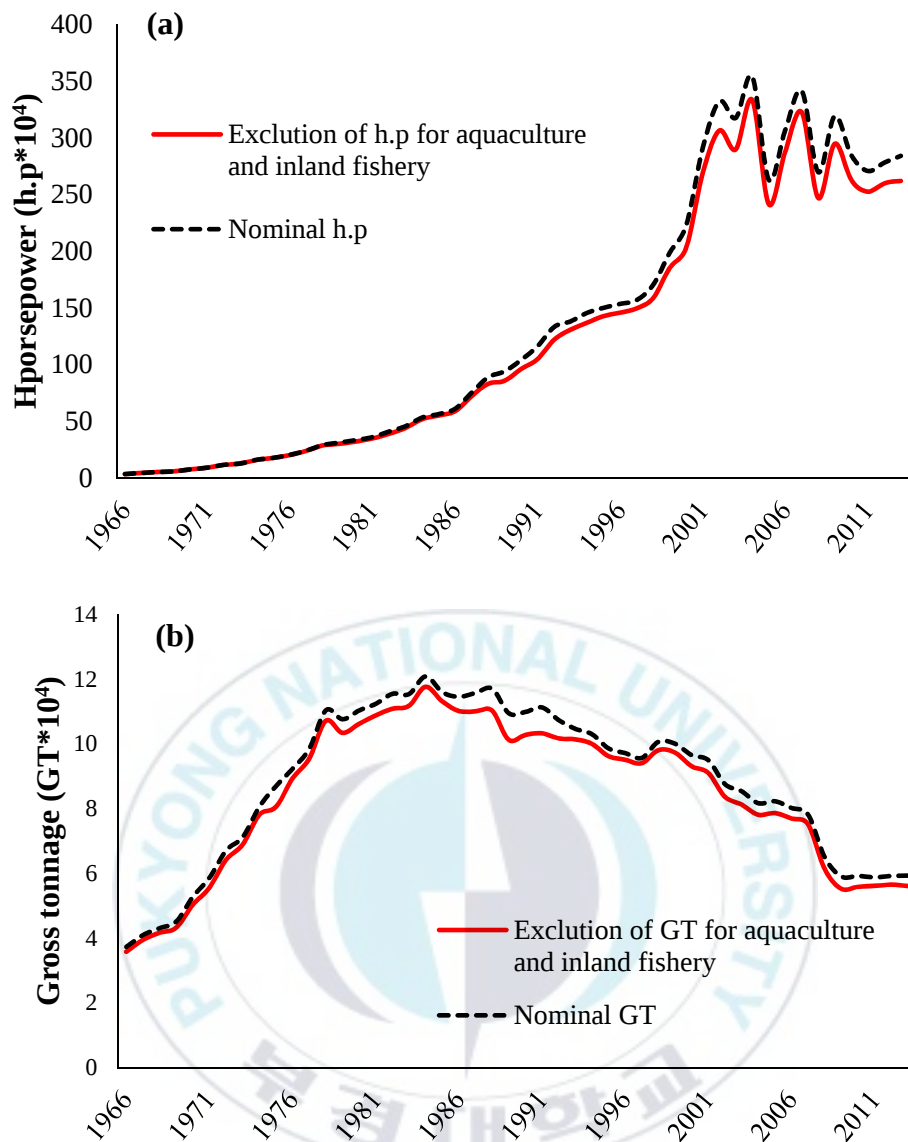


Fig. 2. (a) Comparison between nominal total horsepower and exclusion of aquaculture and inland fishery for total horsepower, and (b) Comparison between nominal total gross tonnage and exclusion of aquaculture and inland fishery for total gross tonnage from 1966 to 2013 of total target species in Korean west coast.

Table 9. Standardized data of horsepower (h.p) from 1966 to 2013 of total target species in Korean west coast

Year	Nominal h.p	Exclusion of h.p for aquaculture and inland fishery	Standardized h.p
1966	31,093	38,259	69,028
1967	97,965	48,349	77,881
1968	103,960	56,252	85,677
1969	50,536	62,355	90,249
1970	63,652	79,944	108,305
1971	68,223	94,179	120,777
1972	81,316	119,206	143,604
1973	81,138	130,631	153,784
1974	91,581	163,615	181,442
1975	96,974	179,817	196,132
1976	121,012	205,666	221,451
1977	154,629	242,135	254,228
1978	211,664	290,741	300,830
1979	315,938	303,477	315,161
1980	338,750	325,553	337,333
1981	364,411	350,707	361,644
1982	413,090	392,567	403,855
1983	460,721	443,946	455,041
1984	536,343	521,390	532,001
1985	566,464	553,388	563,300
1986	613,865	591,454	600,502
1987	755,465	722,338	731,007
1988	891,243	833,312	839,055
1989	943,807	859,208	863,405
1990	1,044,040	963,074	967,134
1991	1,165,774	1,050,715	1,054,091
1992	1,334,863	1,221,100	1,225,087
1993	1,384,246	1,310,058	1,314,927
1994	1,459,213	1,370,783	1,374,747
1995	1,503,685	1,429,561	1,432,967
1996	1,537,723	1,459,594	1,461,966
1997	1,571,760	1,497,292	1,498,805
1998	1,706,161	1,587,838	1,589,557
1999	1,988,775	1,854,289	1,855,885
2000	2,230,595	2,031,215	2,032,589
2001	2,910,045	2,688,142	2,689,208

Table 9. Continued

Year	Nominal h.p	Exclution of h.p for aquaculture and inland fishery	Standardized h.p
2002	3,321,632	3,062,676	3,063,596
2003	3,176,334	2,897,073	2,897,952
2004	3,539,285	3,331,382	3,332,239
2005	2,630,035	2,415,017	2,415,908
2006	3,069,656	2,879,948	2,880,816
2007	3,412,676	3,223,965	3,224,620
2008	2,698,061	2,468,744	2,469,378
2009	3,192,699	2,946,800	2,947,388
2010	2,847,409	2,627,333	2,627,975
2011	2,708,494	2,524,243	2,524,896
2012	2,781,784	2,598,386	2,598,993
2013	2,841,329	2,619,610	2,620,003



Table 10. Standardized data of gross tonnage (GT) from 1966 to 2013 of total target species in Korean west coast

Year	Nominal GT	Exclusion of GT for aquaculture and inland fishery	Standardized GT
1966	34,023	35,776	225,063
1967	60,976	39,423	212,233
1968	63,649	41,636	220,355
1969	40,110	43,177	226,960
1970	45,376	50,279	225,104
1971	47,531	55,528	229,546
1972	51,428	64,161	232,431
1973	49,886	68,874	228,219
1974	51,100	78,057	230,240
1975	52,624	80,510	232,553
1976	57,505	89,306	246,457
1977	63,671	95,387	250,913
1978	75,842	107,084	245,488
1979	107,522	103,349	239,001
1980	110,245	106,150	222,976
1981	112,289	108,760	229,492
1982	115,377	110,804	224,689
1983	115,323	111,705	225,063
1984	120,722	117,568	212,233
1985	115,888	113,109	220,355
1986	114,530	110,108	226,960
1987	115,713	110,018	225,104
1988	116,994	110,230	229,546
1989	109,430	101,210	232,431
1990	109,834	102,722	228,219
1991	111,224	103,241	230,240
1992	107,330	101,648	232,553
1993	104,621	101,357	246,457
1994	102,962	99,995	250,913
1995	98,577	96,177	245,488
1996	97,115	95,066	239,001
1997	95,653	93,980	222,976
1998	100,627	98,029	229,492
1999	100,009	97,254	224,689
2000	96,481	93,054	225,063
2001	94,922	90,996	212,233

Table 10. Continued

Year	Nominal GT	Exclusion of GT for aquaculture and inland fishery	Standardized GT
2002	87,540	83,638	220,355
2003	85,352	81,230	226,960
2004	81,660	78,079	225,104
2005	82,259	78,604	229,415
2006	80,189	76,923	229,347
2007	78,119	75,138	225,632
2008	64,960	61,332	184,696
2009	59,030	55,212	167,285
2010	59,204	55,837	172,153
2011	58,773	56,096	176,020
2012	59,175	56,497	180,145
2013	59,291	56,066	181,720



1.2.2 마력수 (Horsepower, $h.p$)의 표준화

무동력선에 대한 연도별 총 마력수는 1966년에 30,769 $h.p$ 로 가장 높게 추정되었고, 이후 무동력선의 척수가 지속적으로 감소하여 2013년 가장 낮은 393 $h.p$ 의 값을 보였다. 따라서, 무동력선 마력수를 고려한 표준화된 연도별 총 마력수는 Table 9와 Fig. 3에서 나타냈다.



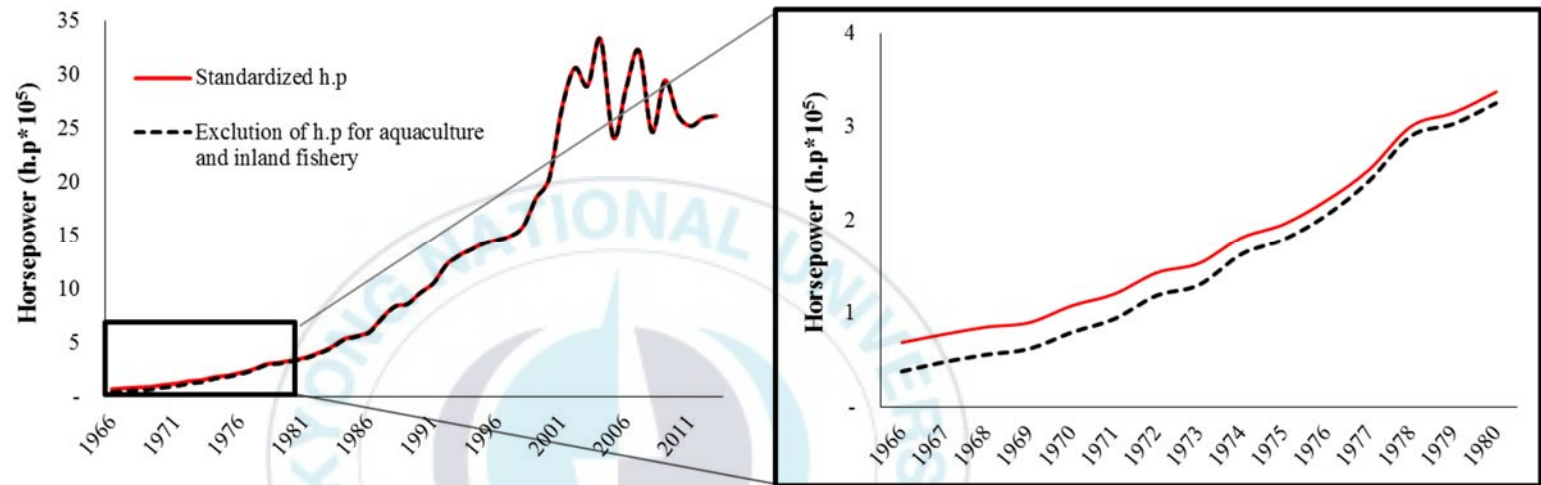


Fig. 3. (a) Comparison between nominal total horsepower and standardized total horsepower considering about non-powered vessel from 1966 to 2013, and (b) from 1966 to 1980 of total target species in Korean west coast.

1.2.3 총톤수 (Gross tonnage, GT)의 표준화

각 어업별 동력선에 대하여 연도별 어획효율을 반영한 어획노력량을 추정, 연도별 동력선 총 어획노력량을 구하였으며, 연도별 무동력선 총 어획노력량까지 고려하여 표준화된 연도별 총톤수를 추정하였다. 표준화된 연도별 총톤수는 2013년에 56,066GT에서 181,720GT로 약 125,654GT 증가하였다 (Table 10와 Fig. 4).



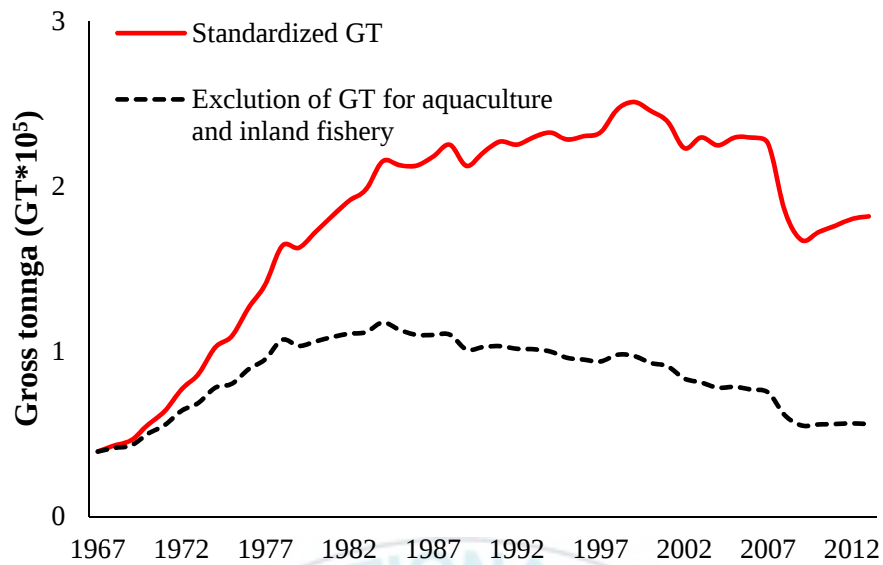


Figure 4. Comparison between nominal total gross tonnage and standardized total gross tonnage considering catching efficiency from 1966 to 2013 of total target species in Korean west coast.

1.2 잉여생산량모델의 적용

1.2.1 Fox모델

표준화된 마력수 자료를 이용하여 Fox모델로 추정된 잠재생산량 (MSY)은 330,373mt 이었으며, 여기서 결정계수 (Coefficient of determination, R^2)는 0.916, 오차의 제곱 평균 제곱근 (Root Mean Square Error, RMSE)은 0.199, Theil의 U통계량 (Theil's U-statistic, U)는 3.272로 계산되었다 (Fig. 5와 Table 11). 표준화된 총톤수 자료를 이용하여 Fox모델로 추정된 MSY는 201,943mt 이었으며, 여기서 R^2 는 0.795, RMSE는 0.218, U는 2.323으로 계산되었다 (Fig. 6과 Table 11).



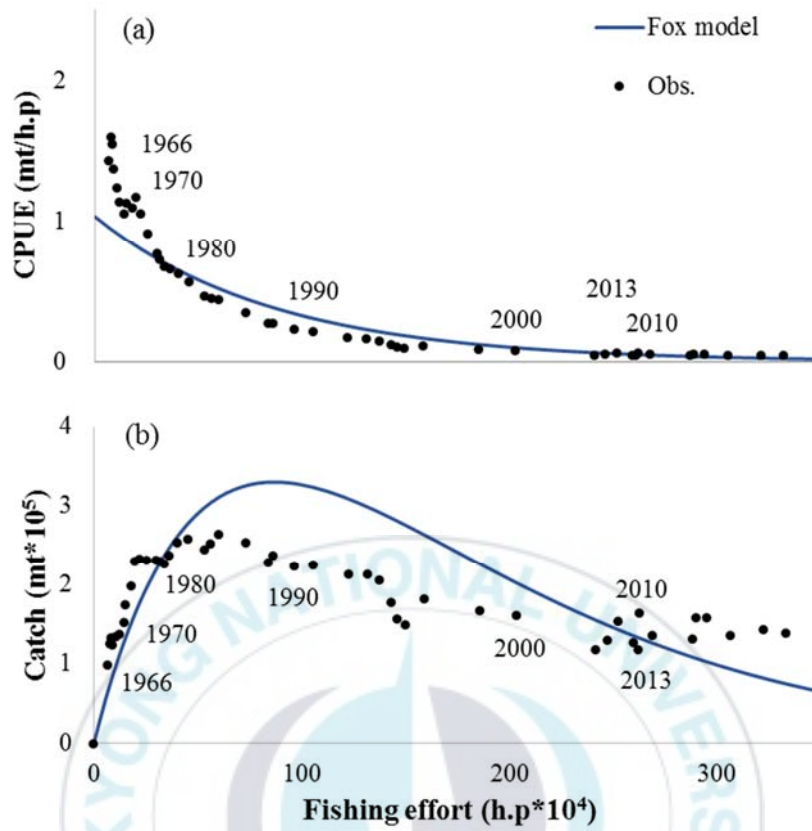


Fig. 5. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by Fox model using horsepower for effort.

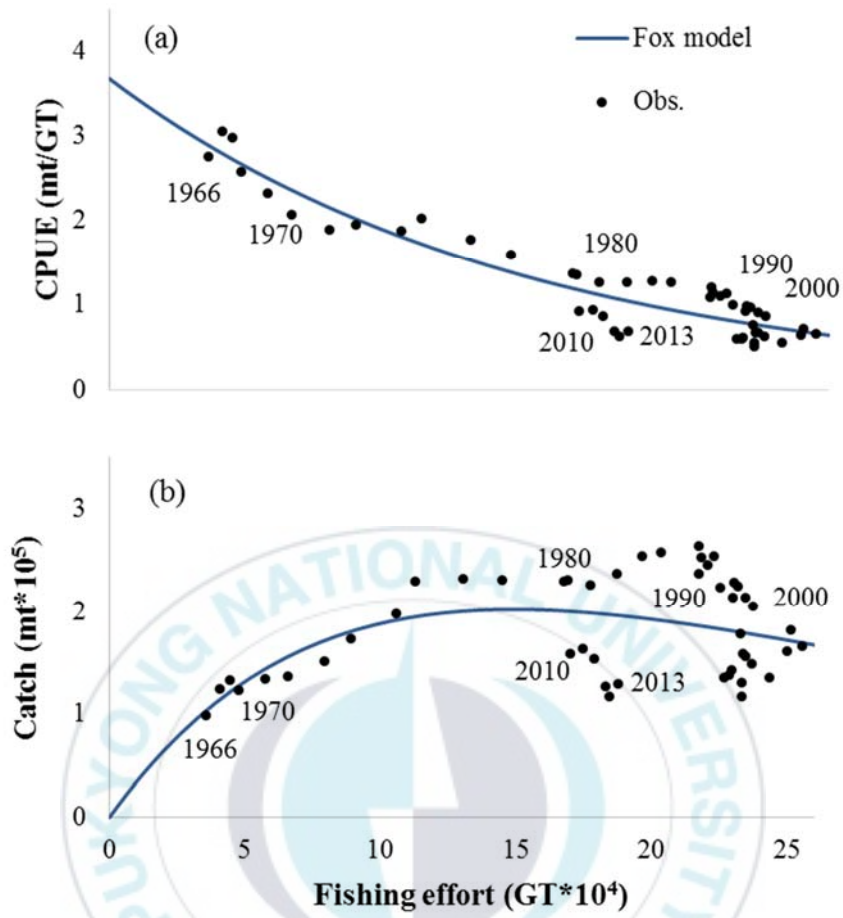


Fig. 6. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by Fox model using gross tonnage for effort.

Table 11. Summary of the estimated results for total target species of Korean west coast fisheries by each model using horsepower for effort

Parameter	Fox model	CYP model	ASPIC model	ME model (Cobb-Douglas equation)	ME model (Simple yield equation)
$MSY (mt)$	330,373	2,680,692	436,700	116,954	336,228
$B_{MSY} (mt)$	-	-71,127,858	263,600	896,197	672,457
$f_{MSY} (h.p)$	869,759	697,446	1,510,000	0.1	471,288
$K (mt)$	-	-193,345,565	527,100	1,792,394	1,344,914
q	-	-5.40E-08	1.10E-06	5.05E-01	1.06E-06
r	-	-0.038	3.314	0.261	1.000
R^2	0.916	0.945	0.670	0.987	0.985
$RMSE$	0.199	4.416	0.393	0.059	0.104
U	3.272	70.004	6.974	0.951	10.754

Table 12. Summary of the estimated results for total target species of Korean west coast fisheries by each model using gross tonnage for effort

Parameter	Fox model	CYP model	ASPIC model	ME model (Cobb-Douglas equation)	ME model (Simple yield equation)
MSY (mt)	201,943	163,656	199,100	149,696	218,304
B_{MSY} (mt)	-	995,188	1,057,000	865,294	522,885
f_{MSY} (GT)	149,106	168,923	150,900	519	151,590
K (mt)	-	2,705,202	2,115,000	1,730,587	1,045,769
q	-	9.74E-07	1.25E-06	5.05E-01	2.75E-06
r	-	0.164	0.377	0.346	0.835
R^2	0.795	0.898	0.938	0.995	0.945
$RMSE$	0.217	0.382	0.168	0.179	0.156
U	2.323	2.526	1.235	0.796	1.040

1.2.2 CYP모델

CYP 모델에서는 MSY 와 f_{MSY} 추정치와 더불어 생태학적으로 중요한 파라미터인 환경수용량 (K), MSY 시의 자원량 (B_{MSY})과 어획능률 (q), 내적증가율 (r) 도 중회귀분석에 의해 추정되었다. 그러나 표준화된 마력수 자료를 이용하여 CYP모델로 추정된 파라미터들은 K , B_{MSY} q , r 이 마이너스 값으로 추정됨으로써 비현실적인 결과를 보여주었다 (Table 11과 Fig. 7). 표준화된 총톤수 자료를 이용하여 CYP모델로 추정된 MSY 는 163,656mt 이었으며, K 는 2,115,000mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.898, RMSE는 0.382, U 는 2.526으로 계산되었다 (Table 12와 Fig. 8).



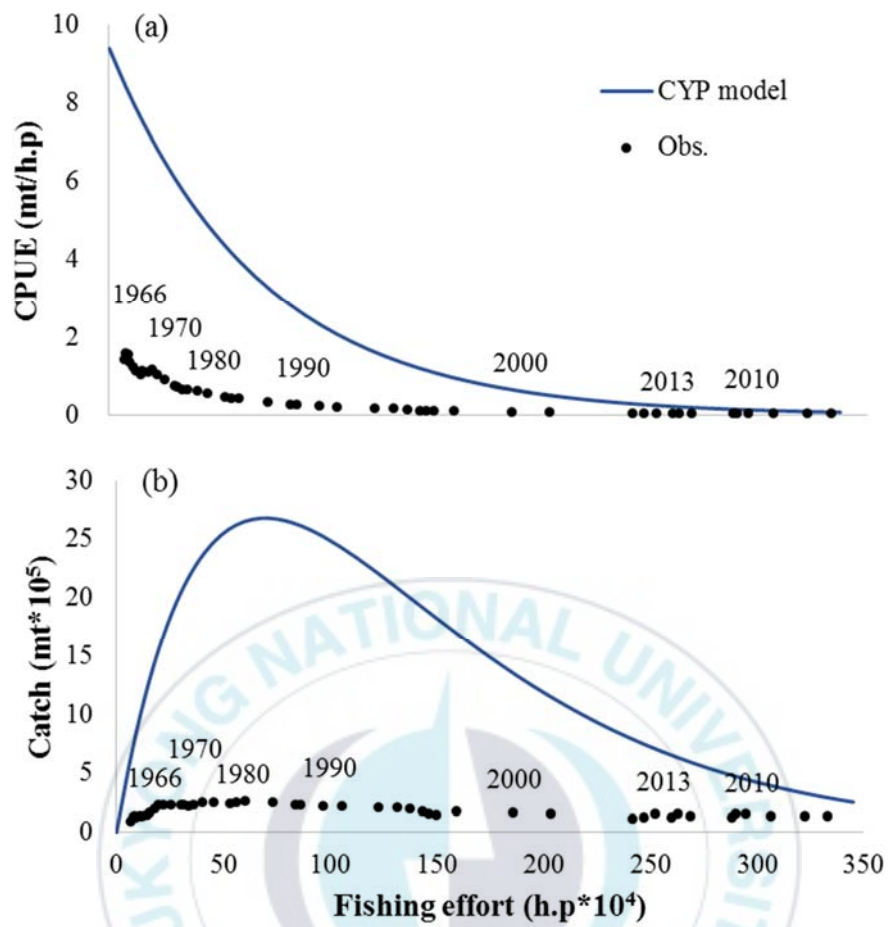


Fig. 7. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by CYP model using horsepower for effort.

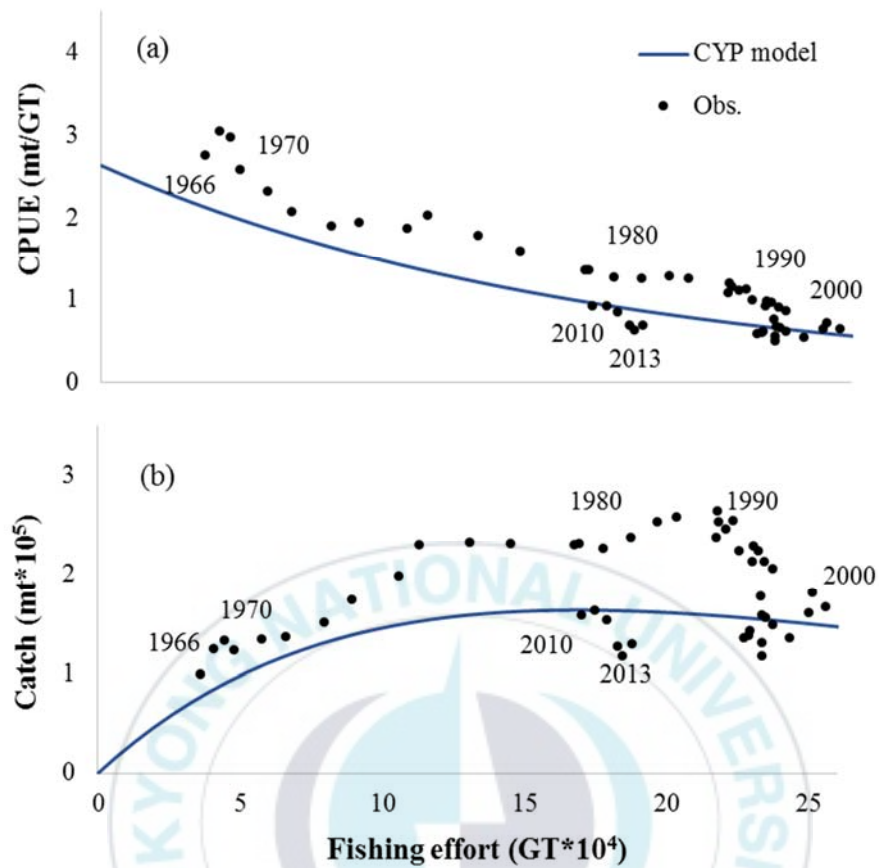


Fig. 8. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by CYP model using gross tonnage for effort.

1.2.3 ASPIC모델

표준화된 마력수 자료를 이용하여 ASPIC모델로 추정된 MSY는 436,700mt 이었으며, K는 1,510,000mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.670, RMSE는 0.393, U는 6.974로 계산되었다 (Table 11과 Fig. 9). 표준화된 총톤수 자료를 이용하여 추정된 MSY는 199,100mt 이었으며, K는 2,115,000mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.938, RMSE는 0.168, U는 1,235로 계산되었다 (Table 12와 Fig. 10).



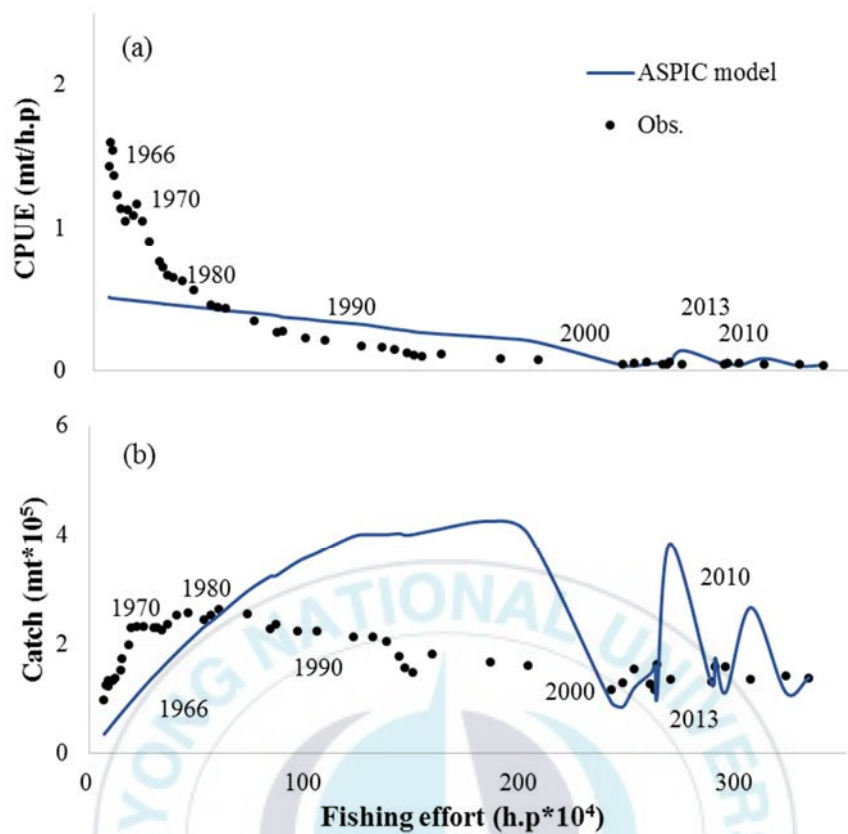


Fig. 9. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ASPIC model using horsepower for effort.

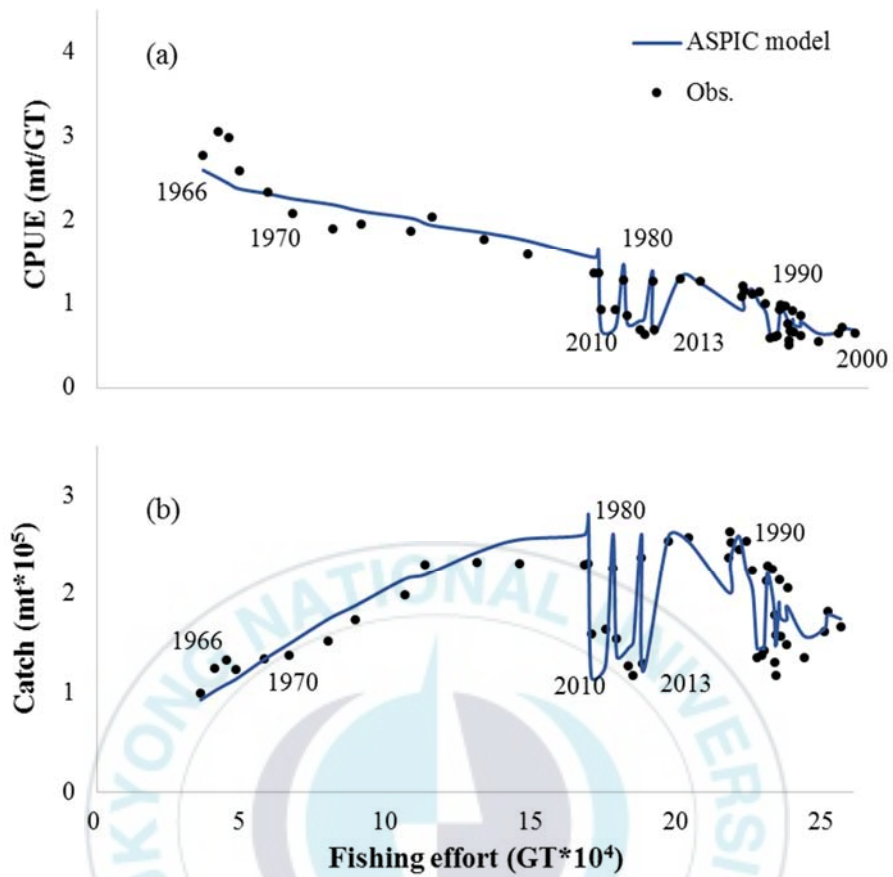


Fig. 10. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ASPIC model using gross tonnage for effort.

1.2.4 최대엔트로피모델

① Cobb-Douglas 생산함수

표준화된 마력수 자료를 이용하여 Cobb-Douglas 생산함수의 최대엔트로피모델로 추정된 MSY는 116,954mt 이었으며, K는 1,792,394mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.987, RMSE는 0.059, U는 0.951로 계산되었다 (Table 11과 Fig. 11). 표준화된 총톤수 자료를 이용하여 추정된 MSY는 149,696mt 이었으며, K는 1,730,587mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.995, RMSE는 0.179, U는 0.796으로 계산되었다 (Table 12와 Fig. 12).



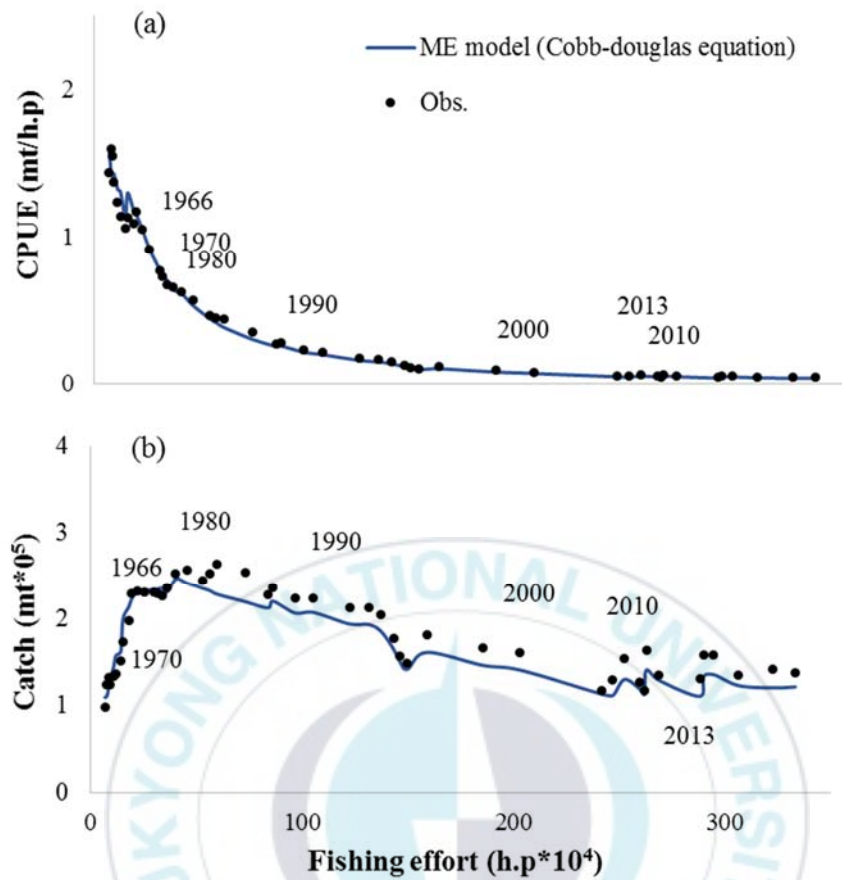


Fig. 11. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ME model (Cobb-Douglas equation) using horsepower for effort.

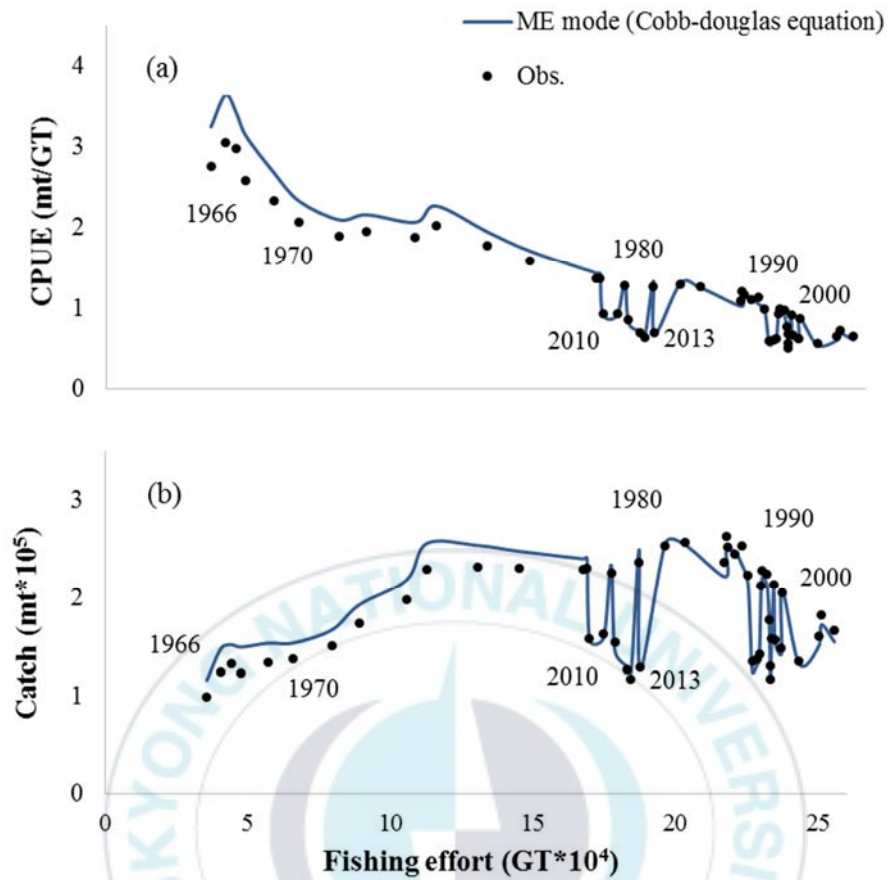


Fig. 12. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ME model (Cobb-Douglas equation) using Gross tonnage for effort.

② 단순형 생산함수

표준화된 마력수 자료를 이용하여 단순형 생산함수의 최대엔트로피모델로 추정된 MSY는 336,228mt 이었으며, K는 1,344,914mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.985, RMSE는 0.104, U는 10.754로 계산되었다 (Table 11과 Fig. 13). 표준화된 총톤수 자료를 이용하여 추정된 MSY는 218,304mt 이었으며, K는 1,045,769mt으로 추정되었다. 여기서 R^2 는 0.945, RMSE는 0.156, U는 1.040으로 계산되었다 (Table 12와 Fig. 14).



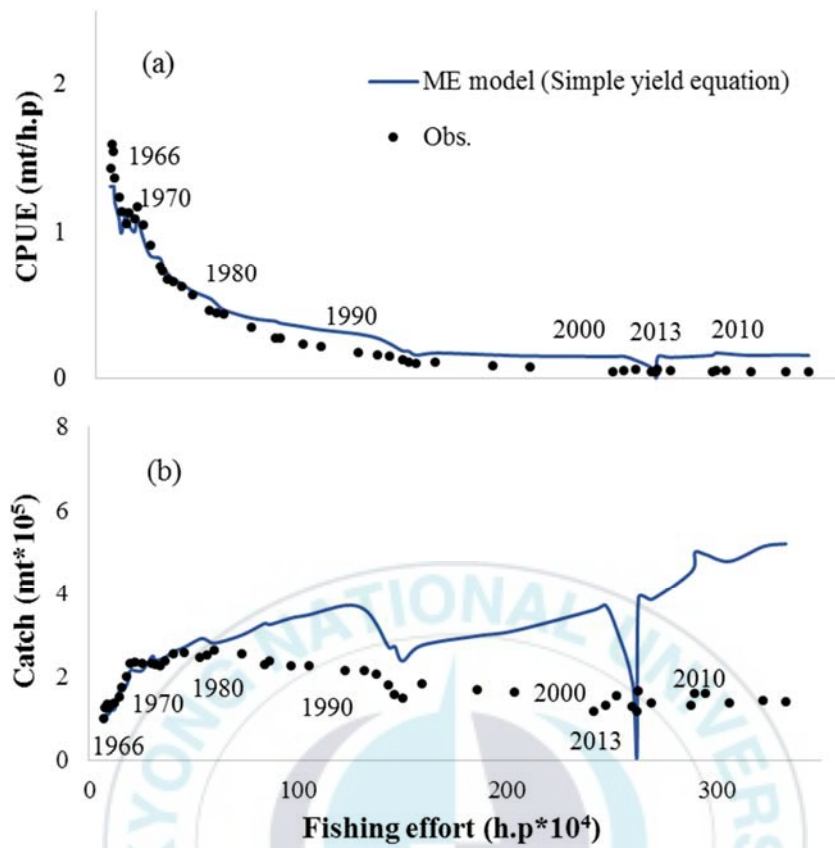


Fig. 13. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ME model (Simple yield equation) using horsepower for effort.

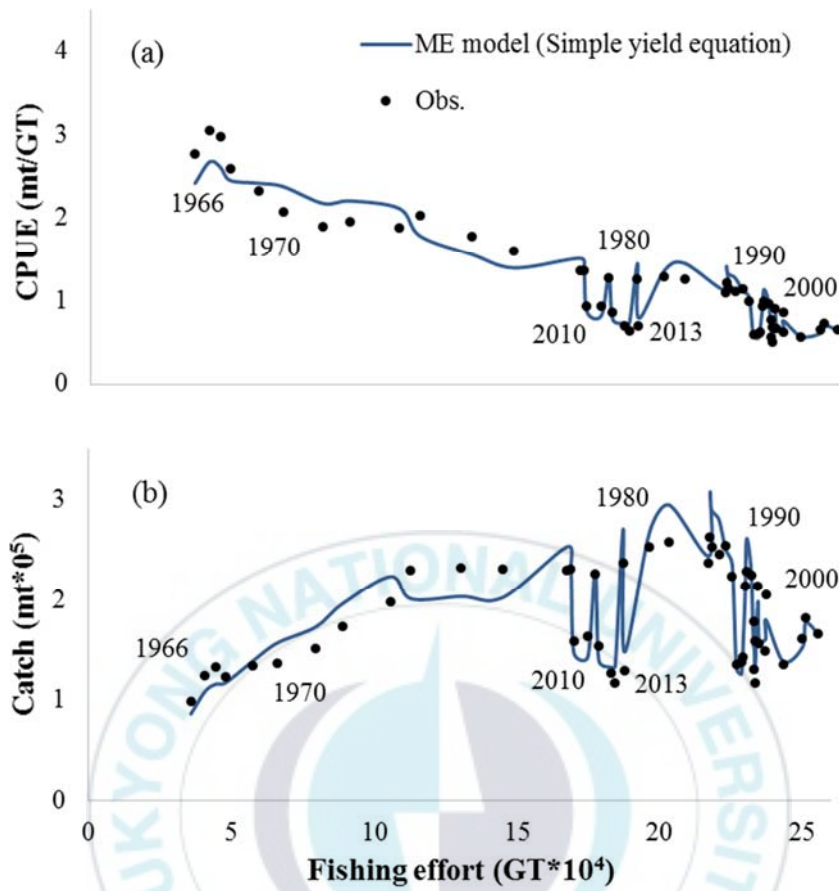


Fig. 14. The estimated CPUE (a) and catch (b) of total target species of Korean west coast fisheries by ME model (Simple yield equation) using gross tonnage for effort.

2. 개체군생산량 분석법

2.1 주요 어획대상 35종 대한 환경수용량 추정

2.2.1 잉여생산량모델에 의한 추정

단순형 생산함수를 사용한 최대엔트로피모델에 의해 멸치, 아귀, 살오징어, 갑오징어, 갈치, 붕장어, 강달이, 복어, 삼치, 가오리, 개조개, 민어, 임연수어의 환경수용량을 추정하였다 (Table 13). R^2 은 복어가 0.476으로 가장 낮은 값을 나타냈고, 아귀, 갑오징어, 갈치, 붕장어, 삼치, 가오리의 6어종은 0.9이상의 값으로 추정되었다.



Table 13. Estimated carrying capacity with such species by maximum entropy model based on surplus production model

Species		Carrying capacity (K, mt)	R^2
Scientific name	Korean name		
<i>Engraulis japonicas</i>	멸치	115,685	0.562
<i>Lophiomus setigerus</i>	아귀	22,290	0.935
<i>Todarodes pacificus</i>	살오징어	53,265	0.833
<i>Sepia officinalis</i>	갯오징어	8,202	0.951
<i>Trichiurus lepturus</i>	갈치	70,576	0.950
<i>Conger myriaster</i>	붕장어	3,979	0.923
<i>collichthys niveatus</i>	강달이	23,310	0.674
<i>Takifugu chinensis</i>	복어	10,943	0.476
<i>Scomberomorus niphonius</i>	삼치	4,678	0.932
<i>Batoidea</i>	가오리	28,026	0.897
<i>Saxidomus purpuratus</i>	개조개	11,264	0.681
<i>Miichthys miiuy</i>	민어	1,615	0.514
<i>Pleurogrammus azonus</i>	임연수어	6,155	0.649

2.2.2 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용한 추정

① 처녀자원량 모델에 의한 역추정

처녀자원량 모델에 의해 꽃게, 바지락, 키조개, 대구, 젓새우, 참조기, 가자미, 병어, 서대, 고등어, 참홍어, 보구치, 쥐치, 소라, 갯장어 총 15어종에 대한 환경수용량을 추정하였다 (Table 14). 바지락이 114,290mt으로 가장 높은 환경수용량을 나타냈으며, 소라는 약 19mt으로 가장 낮은 추정값을 보였다.



Table 14. Estimated carrying capacity with such species by gulland model

Species		Natural mortality (<i>M</i> ,/year)	Carrying capacity (K, mt)
Scientific name	Korean name		
<i>Portunus trituberculatus</i>	꽃게	1.4	25,526
<i>Tapes philippinarum</i>	바지락	0.545	114,290
<i>Atrina pectinata</i>	키조개	0.39	25,785
<i>Gadus macrocephalus</i>	대구	0.4	12,380
<i>Acetes japonicus</i>	젓새우	0.893	22,015
<i>Larimichthys polyactis</i>	참조기	0.46	11,032
<i>Pleuronectidae</i>	가자미	0.313	14,311
<i>Pampus argenteus</i>	병어	0.45	4,189
<i>Cynoglossus joyneri</i>	서대	0.484	2,228
<i>Scomber japonicus</i>	고등어	0.41	4,731
<i>Raja pulchra</i>	참홍어	0.31	3,181
<i>Argyrosomus argentatus</i>	보구치	0.458	1,893
<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	쥐치	0.45	156
<i>Batillus cornutus</i>	소라	0.874	19
<i>Muraenesox cinereus</i>	갯장어	0.312	1,415

② 어획량과 자원량 관계식에 의한 역추정

어획량과 자원량 관계식에 의해 넙치, 민꽃게, 동죽, 노래미, 숭어, 조피볼락, 전어로 총 7어종에 대한 환경수용량을 추정하였다 (Table 15). 동죽이 48,451mt으로 가장 높은 환경수용량을 나타냈으며, 전어는 약 3,387mt으로 가장 낮은 추정치를 보였다.



Table 15. Estimated carrying capacity with such species by relation equation between biomass and catch

Species		Highest catch from 1966 to 2013 (mt)	Natural mortality (M ,/year)	Fishing mortality (F ,/year)	Carrying capacity (K, mt)
Scientific name	Korean name				
<i>Paralichthys olivaceus</i>	넙치	4,472	0.685	1.121	8,621
<i>Charybdis japonica</i>	민꽃게	4,080	1.4	0.92	11,410
<i>Mactra veneriformis</i>	동죽	27,234	0.745	1.337	48,451
<i>Agrammus agrammus</i>	노래미	1,760	0.532	0.24	10,525
<i>Mugil cephalus</i>	숭어	3,819	1.205	0.865	10,459
<i>Sebastes schlegeli</i>	조피볼락	1,588	0.572	0.64	4,281
<i>Konosirus punctatus</i>	전어	1,357	0.468	0.672	3,387

2.2 주요 어획대상 35어종에 대한 잠재생산량 추정

2.2.1 논문 및 보고서의 추정치 사용

① 한국 전체 해역에 대한 잠재생산량 추정치 이용 (22어종)

22어종은 전체 해역에 대한 잠재생산량 추정치를 인용하여 한국 전체 해역에 대한 서해의 어획비율을 이용하여 서해에 대한 잠재생산량 추정치를 나타냈다 (Table 16). 꽃게가 17,868mt으로 가장 큰 잠재생산량을 나타냈으며, 소라는 8mt으로 가장 작은 값으로 추정됐다.



Table 16. Estimated potential yield with such species by using papers and reports

Species		MSY for all coast (mt)	Catch ratio of west coast to all coast (%)	MSY for west coast (mt)
Scientific name	Korean name			
<i>Portunus trituberculatu</i>	꽃게	19,801	0.90	17,868
<i>Engraulis japonicas</i>	멸치	213,287	0.09	22,644
<i>Atrina pectinata</i>	키조개	6,737	0.75	5,028
<i>Acetes japonicus</i>	젓새우	35,083	0.28	9,830
<i>Larimichthys polyactis</i>	참조기	29,147	0.09	2,537
<i>Lophiomus setigerus</i>	아귀	11,693	0.21	2,496
<i>Pleuronectidae</i>	가자미	17,146	0.12	2,018
<i>Todarodes pacificus</i>	살오징어	225,497	0.02	4,937
<i>Sepia officinalis</i>	갑오징어	3,729	0.33	1,233
<i>Trichiurus lepturus</i>	갈치	113,272	0.02	2,722
<i>Pampus argenteus</i>	병어	9,226	0.10	943
<i>Conger myriaster</i>	붕장어	16,414	0.03	569
<i>Cynoglossus joyneri</i>	서대	1,694	0.32	539

Table 16. Continued

Species		MSY for all coast (mt)	Catch ratio of west coast to all coast (%)	MSY for west coast (mt)
Scientific name	Korean name			
<i>Scomber japonicus</i>	고등어	171,266	0.01	970
<i>Takifugu chinensis</i>	복어	5,357	0.04	230
<i>Scomberomorus niphonius</i>	삼치	31,922	0.01	375
<i>Batoidea</i>	가오리	3,393	0.31	1,038
<i>Argyrosomus argentatus</i>	보구치	5,059	0.09	433
<i>Miichthys miiuy</i>	민어	2,698	0.02	43
<i>Pleurogrammus azonus</i>	임연수어	3,453	0.06	214
<i>Batillus cornutus</i>	소라	1,799	0.00	8
<i>Muraenesox cinereus</i>	갯장어	6,620	0.03	221

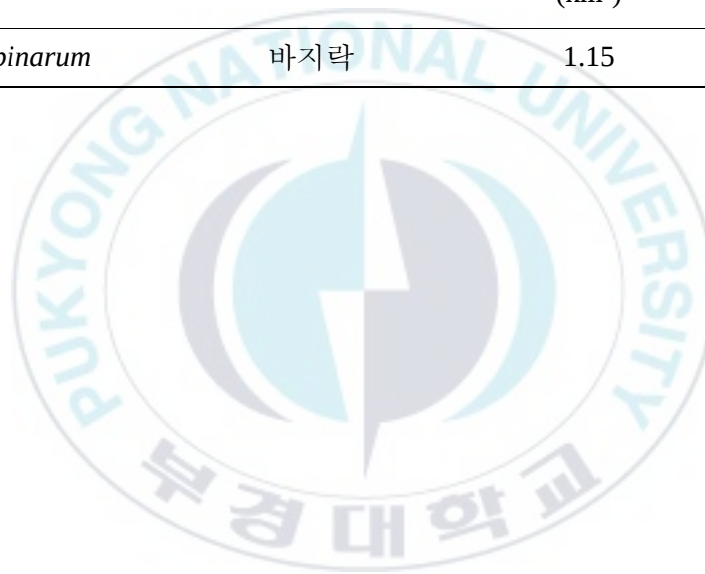
② 지역적 범위에 대한 잠재생산량 추정치 사용 (바지락)

새만금 어장면적 1.15km^2 에 대하여 바지락의 잠재생산량은 236mt이다 (Koh, 2001). 서해 시도별 어장면적인 151.95 km^2 에 대한 새만금 어장면적 비율을 새만금 바지락의 잠재생산량에 적용하여 서해 잠재생산량을 추정한 결과 31,144mt으로 추정되었다 (Table 17).



Table 17. Estimated potential yield with such species by using papers and reports

Species		Fishing ground area for Saemanguem (km ²)	MSY for Saemanguem (mt)	MSY for west coast (mt)
Scientific name	Korean name			
<i>Tapes philippinarum</i>	바지락	1.15	236	31,144



2.2.2 생물학적 허용어획량 (ABC) 자료를 사용한 역추정

Tier 5로 추정된 생물학적 허용어획량 (ABC) 자료를 사용하여 역추정한 어종은 대구, 참홍어, 강달이 귀치로 4어종이다 (Table 18). 여기서, 대구와 강달이의 자원동향은 증가, 평형을 나타냈고, 참홍어와 귀치는 감소를 나타냄에 따라 어획량을 고려하여 잠재생산량을 추정한 결과 한국 전체 해역에 대한 참홍어의 잠재생산량은 682mt으로 추정되었고, 귀치는 6,410mt으로 추정되었으며, 최종적으로 한국 전체 해역에 대한 서해의 어획 비율을 고려한 결과, 서해의 잠재생산량은 대구가 2,476mt, 참홍어가 493mt, 강달이가 247mt, 귀치가 35mt으로 추정되었다.



Table 18. Estimated potential yield with such species by Inverse estimation using data of acceptable biological catch

Species		ABC (mt)	Trend of resources	Catch of 2012 (mt)	Average catch from 2008 to 2012 (mt)	MSY for all coast (mt)	Catch ratio of west coast to all coast (%)	MSY for west coast (mt)
Scientific name	Korean name							
<i>Gadus macrocephalus</i>	대구	5,523	Increase	-	-	5,523	0.45	2,476
<i>Raja pulchra</i>	참홍어	467	Decrease	320	467	682	0.72	493
<i>collichthys niveatus</i>	강달이	7,481	Equilibrium	-	-	7,481	0.03	247
<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	쥐치	2,612	Decrease	1,419	3,482	6,410	0.01	35

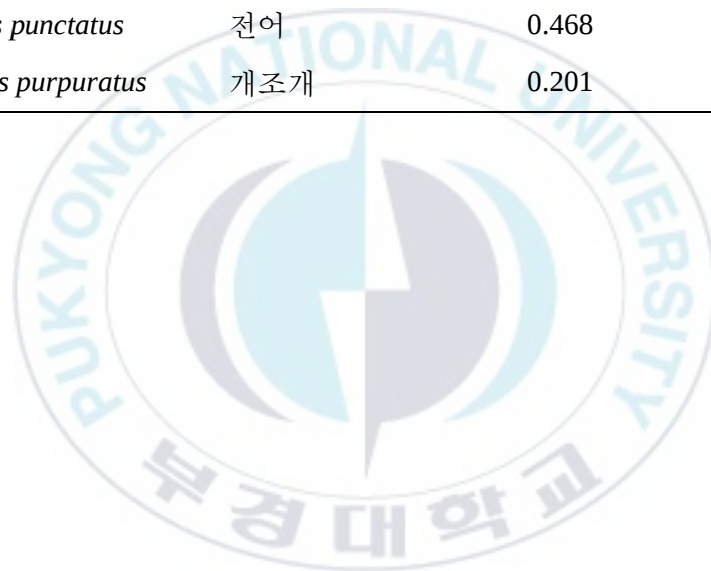
2.2.3 논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용한 추정

논문 및 보고서의 생태학적 특성치를 사용하여 처녀자원량 모델에 의해 잠재생산량을 추정할 수 있었던 어종은 넙치, 민꽃게, 동족, 노래미, 숭어, 조피볼락, 전어, 개조개로 총 8어종이었다. 환경수용량은 앞서 추정한 결과를 이용하였으며, 추정된 잠재생산량은 동족의 18,048mt가 가장 큰 값을 나타냈고, 전어의 793mt가 가장 낮은 값을 보였다.



Table 19. Estimated potential yield with such species by using population ecological characteristics of papers and reports

Species		Natural mortality (M ,/year)	MSY (mt)
Scientific name	Korean name		
<i>Paralichthys olivaceus</i>	넙치	0.685	2,953
<i>Charybdis japonica</i>	민꽃게	1.400	7,987
<i>Mactra veneriformis</i>	동죽	0.745	18,048
<i>Agrammus agrammus</i>	노래미	0.532	2,800
<i>Mugil cephalus</i>	송어	1.205	6,302
<i>Sebastes schlegeli</i>	조피볼락	0.572	1,224
<i>Konosirus punctatus</i>	전어	0.468	793
<i>Saxidomus purpuratus</i>	개조개	0.201	1,132



2.3 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

선별된 주요 35어종을 제외한 어종들의 분류군별 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다 (Table 20). 홍어류 (States)의 환경수용량과 잠재생산량은 각각 11,217mt, 1,740mt으로 추정되었다. 포식성 표영성어류 (Predator pelagic)는 각각 79mt, 16mt으로 추정되었고, 소형 표영성어류 (Small pelagic)는 각각 26,855mt, 5,230mt으로 추정되었다. 조기류 (Croaker)는 각각 1,174mt, 269mt, 기타 저서어류 (Other demersal)는 각각 16,334mt, 3,684mt, 두족류 (Cephalopds)는 각각 70,483mt, 6,534mt, 표생동물 (Epifauna)은 각각 19,202mt, 13,417mt, 내생동물 (Infauna)은 각각 120,219mt, 23,513mt, 그리고 기타 (Etc.)는 43,911mt, 9,585mt으로 추정되었다.

따라서 주요 35어종의 환경수용량과 이를 제외한 어종들의 분류군별 환경수용량을 합한 결과 서해 전체 어획대상 환경수용량은 1,009,746mt으로 추정되었으며, 주요 35어종의 잠재생산량과 이를 제외한 어종들의 분류군별 잠재생산량을 합한 결과 216,517mt으로 추정되었다.

Table 20. Estimation of K and MSY for other species excluded major 35 species by extrapolation method

Group num.	Classification	Catch of species excepting 35 species (mt)	Ratio of K to Catch of standard species (K/C, %)	K of species excepting 35 species (mt)	Ratio of MSY to Catch of standard species (MSY/C, %)	MSY of species excepting 35 species (mt)
1	States	1,192	9.41	11,217	1.46	1,740
2	Predator pelagic	13	6.05	79	1.24	16
3	Small pelagic	5029	5.34	26,855	1.04	5,230
4	Croaker	242	4.85	1,174	1.11	269
5	Other demersal	3,212	5.32	16,334	1.20	3,684
6	Cephalopds	5,585	12.62	70,483	1.17	6,534
7	Epifauna	12,309	1.56	19,202	1.09	13,417
8	Infauna	18,962	6.34	120,219	1.24	23,513
9	Etc.	7,430	5.91	43,911	1.29	9,585

3. 어업생산량 분석법

3.1 주요 6개 어업에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

3.1.1 잉여생산량모델에 의한 추정

잉여생산량모델에 의해 추정된 근해안강망, 연안자망, 연안개량안강망, 연안통발 근해자망의 환경수용량과 잠재생산량 그리고 모델 적합도를 나타내기 위한 R^2 는 Table 21과 같다. 근해안강망이 환경수용량과 잠재생산량이 159,313mt, 33,257mt으로 가장 높게 추정되었으며, 근해자망의 환경수용량이 33,565mt, 잠재생산량이 3,524mt으로 가장 낮게 추정되었다. R^2 는 근해자망의 0.655로 가장 낮았으며, 연안자망이 0.817로 가장 높은 값을 나타냈다.



Table 21. Estimated carrying capacity and potential yield with such fishery by maximum entropy model based on surplus production model

fisheries		K (mt)	MSY (mt)	R^2
English name	Korean name			
Offshore Stow net	근해안강망	159,313	33,257	0.681
Coastal gillnet	연안자망	78,061	19,515	0.817
Coastal improved stow net	연안개량안강망	126,296	26,364	0.755
Coastal fish pot	연안통발	61,682	12,876	0.746
Offshore gill net	근해자망	33,565	3,524	0.655



3.1.2 어업 대상어종의 자원평가를 사용한 추정

새만금 마을어업 어장면적 (6.42km^2)에서 새만금 마을어업의 현존 자원량은 $3,794\text{mt}$, 잠재생산량은 $1,834\text{mt}$ 이다 (Koh, 2001). 서해 시도별 어장면적인 151.95km^2 에 대한 새만금 마을어업 어장면적 비율을 새만금 마을어업의 현재자원량에 적용하여 서해 현존자원량을 추정한 결과 $1,834\text{mt}$ 이다 (Talbe 22). 여기에 잉여생산량 모델로 추정된 근해자망, 근해안강망의 2009년 현존자원량에 대한 환경수용량 비율은 2.36이었으며, 이를 서해 현존자원량에 적용하여 서해 환경수용량은 $212,058\text{mt}$ 으로 추정되었다. 잠재생산량은 어장면적 비율을 새만금 마을어업 잠재생산량에 적용하여 서해 잠재생산량은 $43,410\text{mt}$ 으로 추정되었다.



Table 22. Estimated carrying capacity and potential yield with such fishery by usinf data for stock assessment

fisheries		Fishing ground area for Saemanguem (km ²)	Current biomass for Saemanguem (mt)	MSY for Saemanguem (mt)	K for west coast (mt)	MSY for west coast (mt)
English name	Korean name					
Community fisheries	마을어업	6.42	3,794	1,834	212,058	43,410

3.2 전체 어획대상에 대한 환경수용량과 잠재생산량 추정

선별된 주요 6어업을 제외한 어업들의 분류군별 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다 (Table 23). 함정그물류 (Trap nets)의 환경수용량과 잠재생산량은 각각 33,544mt, 5,222mt으로 추정되었고, 은신함정류 (Hiding places for traps)는 각각 12,441mt, 1,452mt으로 추정되었다. 자루그물류 (Bag nets)는 각각 72,170mt, 12,357mt으로 추정되었으며, 맨손류 (Fishing without gear)는 각각 39,446mt, 8,075mt으로 추정되었고, 기타 (Etc.)는 각각 299,026mt, 54,802mt으로 추정되었다.

따라서 주요 6어업의 환경수용량과 이를 제외한 어업들의 분류군별 환경수용량을 합한 결과 서해 전체 어획대상 환경수용량은 1,106,296mt으로 추정되었으며, 주요 6어종의 잠재생산량과 이를 제외한 어종들의 분류군별 잠재생산량을 합한 결과 208,060mt으로 추정되었다.

Table 23. Estimation of K and MSY for other fishereis excluded major 6 fishereis by extrapolation method

Group num.	Classification	Catch of fisheries excepting 6 fisheries (mt)	Ratio of MSY to Catch of standard fisheries (MSY/C, %)	MSY of fisheries excepting 6 fisheries (mt)	Ratio of K to Catch of standard fisheries (K/C, %)	K of species excepting 6 fisheries (mt)
1	Trap nets	5,222	1.61	5,222	6.42	33,544
2	Hiding places for traps	1,452	1.93	1,452	9.26	12,441
3	Bag nets	12,357	1.22	12,357	5.84	72,170
4	Fishing without gear	3,761	2.15	8,075	10.49	39,446
5	Etc.	32,180	1.70	54,802	9.29	299,026

고 찰

본 연구에서는 어업관리에 앞서 선행되어야 하는 어획대상 자원평가를 위해 이용 가능한 정보 및 자료가 제한된 상황에서 서해 연근해 전체 어획대상 환경수용량과 잠재생산량을 세가지 방법으로 추정하였다.

총생산량 분석법 (APA)에 의해 추정된 환경수용량과 잠재생산량은 입력자료와 모델별로 상이한 결과를 나타냈다. 개체군생산량 분석법 (PPA)과 어업생산량 분석법 (FPA)에 의해 추정된 환경수용량은 각각 1,009,746mt, 1,106,296mt이었고, 잠재생산량은 각각 216,517mt, 208,060mt이었다.

총생산량 분석법 (APA)에서는 서해 전체 어획대상 어획량과 어획노력량 자료만을 변수로 하여 현재까지 개발된 여러 가지의 잉여생산량모델로 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 본 분석법의 문제점은 첫째, 잉여생산량모델의 입력자료로써 통계청에 집계된 1966~2013년의 48개년 어획량 자료를 이용하였다. 여기에는 IUU 어업, 폐기량, 생계어업, 낚시, 갯벌체험 등에 의한 어획량 자료가 미포함되어 잠재생산량이 과소 추정되었을 가능성이 있다. 둘째, 어획노력량의 어선 총톤수의 표준화 방법으로 해외 연구 논문에서 인용한 1965년~1995년사이의 어업성능 향상에 대한 기술계수를 우리나라 어선의 톤수에 외삽하였다. 우리나라 어업에 대한 어획효율 추정 연구 사례가 없었으므로 해외 연구의 추정치를 적용하였다. 특히, 1995년

이후의 어선 총톤수 자료에 대해서는 이전의 어획효율 증가율과 같다는 가정에 의해 어선 총톤수에 대한 어업성능을 외삽하여 사용하였는데 이에 대한 불확실성과 부정확성이 존재한다. 셋째, 마력수의 표준화 방법으로 마력수와 와트가 같은 일률 단위라는 개념을 사용하여 무동력선의 어획량을 반영하기 위한 연도별 마력수를 추정하였다. 이 경우 무동력선 한 척에 대한 연도별 마력수를 구하는 데는 무동력선 평균 속도가 사용되는데, 해외 연구로부터 알려진 카누의 평균 속도를 우리나라 어업의 무동력선 평균 속도로 가정하여 48개년 자료에 동일하게 사용하였기 때문에 이에 대한 추정치의 불확실성과 부정확성이 존재한다.

개체군생산량 분석법 (PPA)에서는 어종별로 사용가능한 자료에 따라 적절한 방법을 통해 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 본 분석법의 문제점은 첫째, 1990년 이전의 시도별 어종별 어획노력량 자료 수집이 불가능하여 자원이 이미 개발되어 감소된 이후의 평가자료만을 사용함으로써 잠재생산량이 과소 추정되었을 가능성이 있다. 둘째, 어종별 특성은 해역에 따라 다르지만, 이를 고려하지 않고 단순히 동일한 어종의 생태학적 특성치들을 사용하였다. 셋째, ABC 추정치를 본 연구에서 사용하였는데 이 경우 평가 단계가 5단계에 있는 일부 어종들에 대한 추정치를 사용함으로써 부정확성이 증가하였다.

어업생산량 분석법 (FPA)은 어업별로 사용가능한 자료에 따라 적절한 방법을 통해 환경수용량과 잠재생산량을 추정하였다. 본 분석법의 문제점은 1998년 이전의 시도별 어업별 어획노력량 자료 수집이

불가능하여 자원이 이미 개발되어 감소된 이후의 자료만을 사용함으로써 잠재생산량이 과소 추정되었을 가능성이 있다.

이러한 문제점에도 불구하고 총생산량 분석법 (APA)이 48개년의 자원 개발 초기 단계 자료부터 사용하였고, 상대적으로 적은 가정과 파라미터를 이용함에 따라 추정치가 상대적으로 오차가 적을 것으로 판단하였다.

총생산량 분석법 (APA)에서 어획노력량 자료로 표준화된 마력수와 어획량자료를 사용하여 잉여생산량 모델에 의해 추정된 결과는 톤수를 어획노력량의 입력자료로 한 추정 결과보다 전반적으로 모델 적합도 (R^2 , RMSE, U)가 낮았다. 따라서 톤수가 마력수보다 어획량을 잘 반영한다고 판단하였다. 또한 세계어업의 잠재생산량 추정 연구 (FAO, 2001)에서 표준화된 톤수의 사용을 선호하여 산정한바 있다.

총생산량 분석법 (APA)에서 어획노력량으로 사용된 톤수자료에 대한 잉여생산량모델들의 모델 적합도 (R^2 , RMSE, U)를 비교하였다. ASPIC모델과 생산함수에 따른 두 최대엔트로피모델이 R^2 와 RMSE를 비교해 볼 때 상대적으로 양호한 추정방법으로 보인다. 또한, 생산함수에 따른 두 최대엔트로피모델들의 U가 1미만으로 나타나 상대적으로 모델 적합도가 높았다.

자원평가를 위한 대상자원은 현재 어획되고 있는 자원이기 때문에 이를 잉여생산량모델에 적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. Fox모델은 평형상태를 가정하며, 선형회귀방법이므로 기타 중요한 생태학적 파라미터와 환경수용량의 추정이 불가능했다.

CYP모델은 모든 파라미터를 추정할 수는 있으나 중회귀방법으로써 입력 자료에 대해 추정치가 상당히 민감하여 이상적인 값을 추정하기에는 어려움이 따른다. ASPIC모델은 환경수용량을 추정시에 초기값을 설정한다. 이 경우 사용되는 어업자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 환경수용량과 내적자연증가율 (r)을 추정하기 때문에 마찬가지로 사용하는 어업자료에 민감하다 (권, 2013). 반면에 최대엔트로피모델은 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률론적으로 계산되기 때문에 추정된 파라미터들이 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 최대엔트로피모델은 비평형 상태를 고려하며, 관측된 자료에 오차가 있는 상태에서 최소한의 사전정보를 이용하여 자원평가에 필요한 파라미터들을 추정할 수 있는 방법이다 (Pyo, 2006).

최대엔트로피 모델은 Cobb-Douglas 생산함수 또는 단순형 생산함수 사용에 따라 두 가지의 추정결과를 도출하였다. Cobb-Douglas 생산함수를 사용한 최대엔트로피 모델은 잠재생산량 시의 어획노력량 (f_{MSY}) 이 519GT로 추정되었다. 이 추정치는 어획노력량으로 사용된 톤수에서 가장 작은 톤수를 나타내는 34,023GT의 약 2%에 못미치는 값으로써 비현실적이다. 이러한 원인을 분석해보면, 총생산량 분석법 (APA)에서는 1966년부터 2013년까지의 48개년에 대한 어종별 특성이 고려되지 않은 연도별 총 어획량과 어획노력량 자료를 이용하였는데, Cobb-Douglas 생산함수 모델은 단순형 생산함수 모델에 대하여 추가적인 파라미터로 α 와 β 를 포함한다. 여기서 α 는 어획노력량 (E)이 1% 증가할 때 늘어난 어획량 증가율 (%)을 표시하는 탄성치 역할을

한다. β 는 자원량 (B)의 증가분에 대한 어획량의 증가분을 나타내는 탄성치를 의미한다. 따라서 Cobb-Douglas 생산함수를 사용한 최대엔트로피 모델의 파라미터 수가 상대적으로 많은데도 불구하고 추가적인 파라미터를 만족시키기 위한 탄성치 역할을 고려할 수 있는 수준의 자료를 사용함하지 못함으로써 비현실적인 추정결과를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서, 모델 적합도가 양호하고 추정되는 파라미터들에 대한 모델의 신뢰성이 높으며, 추정된 파라미터들이 자원역학적 현상을 잘 반영하는 단순형 생산함수를 이용한 최대엔트로피 모델이 잠재생산량을 추정하는 가장 적합한 모델로 생각된다.

단순형 생산함수를 이용한 최대엔트로피 모델로 추정된 서해 어업의 환경수용량은 1,045,760mt, 잠재생산량은 218,304mt이었다. 또한 연도별 자원량을 Fig. 15와 같이 나타냈다. 1966년의 자원량은 878,891mt으로 추정되었으며, 최근까지 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 1977년부터 B_{MSY} 의 아래로 자원량이 떨어졌으며, 2013년 자원량은 B_{MSY} 의 절반수준인 263,797mt으로 추정되었다. 적정 자원량 수준인 B_{MSY} 를 목표자원량으로 설정하여 관리방안을 수립하여 실시해 나간다면, 현재 수준의 어획량을 목표 자원량에 따른 어획량 수준인 잠재생산량만큼 어획 가능할 것이다. 2013년 자원량 263,797mt을 적절한 관리방안을 통하여 목표자원량 522,885mt만큼 자원을 회복시킨다면, 2013년 어획량 117,000톤에서 약 2배 증가한 218,304mt의 어획량을 기대할 수 있을 것이다.

한편, 본 연구에서는 이용 가능한 정보 및 자료가 제한된 상황에서 가장

합리적인 방법으로 잠재생산량을 추정하였기 때문에 기초자료 사용에 따른 분석법별 문제점을 앞서 언급한 바 있다. 요약하자면, 총생산량분석법 (APA)의 문제점은 통계청에 집계된 자료를 이용함으로써 IUU어업, 낚시 어업 등에 의한 미포함되어 잠재생산량이 과소 추정되었을 가능성이 있다. 또한, 어획노력량의 표준화를 위해 여러 해외 연구의 결과를 적용한 것에 대한 불확실성과 부정확성 문제가 있다. 개체군생산량 분석법 (PPA)의 문제점은 자원이 이미 개발되어 감소된 이후의 평가자료만을 사용하였고, 해역별 어종별 특성을 고려하지 않은 동일한 어종의 생태학적 특성치들을 사용하였으며, ABC 추정치를 본 연구에서 사용하였는데, 이 경우 낮은 평가단계의 5단계에 있는 어종들의 추정치를 사용하였다. 어업생산량 분석법 (FPA)의 문제점은 자원이 이미 개발되어 감소된 이후의 자료인 1998년 이후의 일부 어업에 대한 자료만을 사용하였다.

따라서, 각 방법에 대한 기초자료 사용의 문제점을 보완하기 위한 연구를 제안하였다. 세가지 생산량분석법에 대한 공통적인 기초자료 보완 연구로써, 우리나라 어획량 수집방법 재구축 연구가 필요하다. 여기에는 IUU어업, 생계어업, 레저활동, 폐기량 등을 고려하여 어획량이 재구축되어야 한다. 총생산량 분석법 (APA)에 대한 기초자료 보완 연구는 우리나라 어선 및 어구의 발달에 따른 어획효율 추정 연구가 실시되어야 한다. 개체군생산량 분석법 (PPA)에 대한 기초자료 보완 연구는 시도별 어종별로 자원이 개발되어 감소되기 이전부터 약 50개년 이상의 자료 수집 방안 연구가 필요하다. 또한 해역별 주요어종에 대한

생태학적 특성치 추정 연구가 필요하며, 해역별 주요어종의 자원평가에 이용가능한 정보수준이 향상될 수 있도록 자원평가 기초자료 수집 방안도 새로이 마련되어야 한다. 어업생산량 분석법 (FPA)에 대한 기초자료 보완 연구는 시도별 어업별로 자원이 개발되어 감소되기 이전부터 약 50개년 이상의 자료 수집 방안 연구가 필요하다.

차후에 위의 연구들이 수행되어, 각 방법에 사용된 기초자료의 문제점들이 보완된다면, 총생산량 분석법 (APA), 개체군생산량 분석법 (PPA), 어업생산량 분석법 (FAP)을 비교분석해서 보다 과학적이고 정확하며 합리적인 서해 어획대상 잠재생산량 추정치를 도출할 수 있을 것이다. 또한, 이번 연구에서는 서해에 한정하였지만, 향후 보완된 기초자료를 바탕으로 동해와 남해의 어획대상 잠재생산량 추정 연구까지 실시한다면 어업관리에 앞서 선행되어야 하는 우리나라 연근해 전체 어획대상에 대한 자원평가를 실시할 수 있을 것이다.

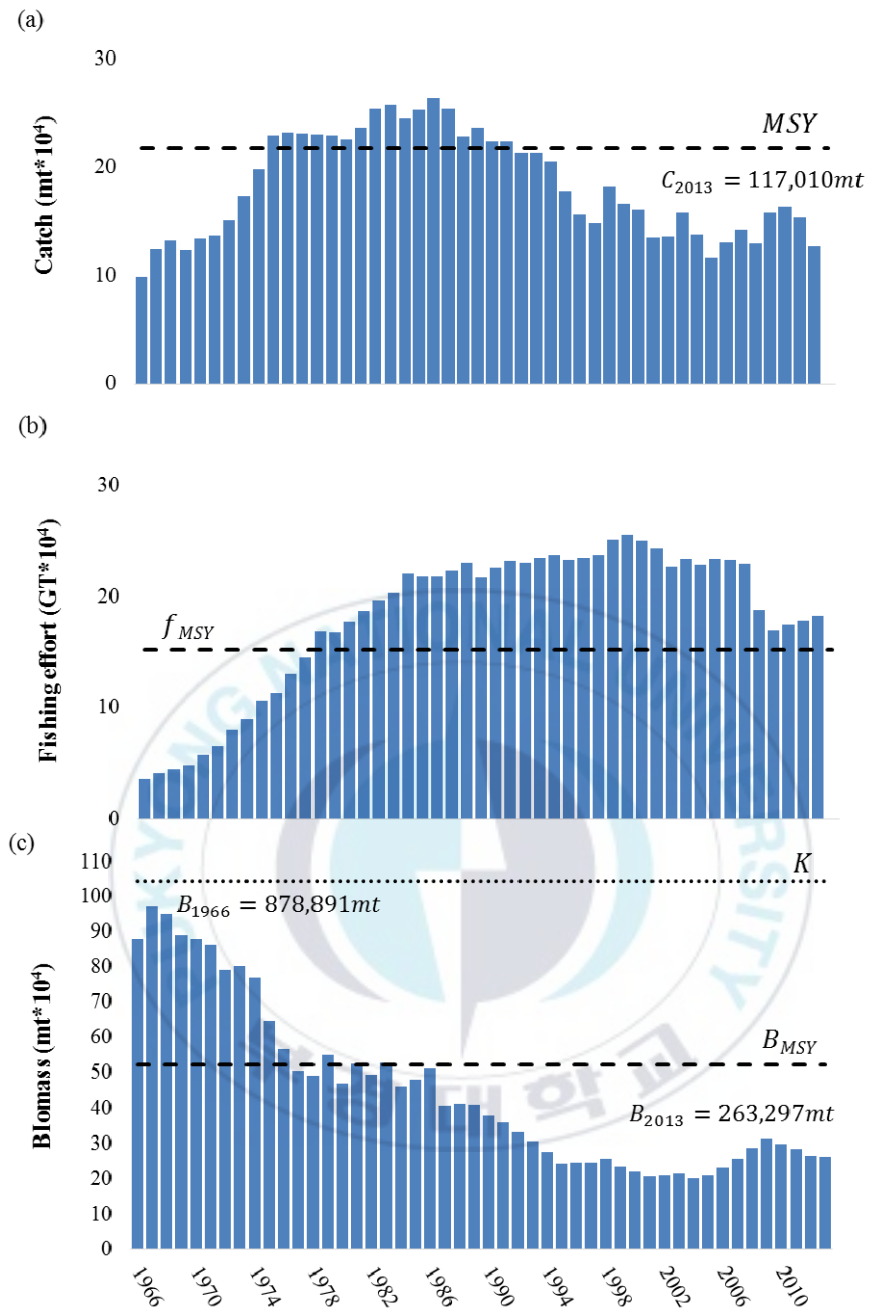


Figure 15. Estimated annual catch, fishing effort and biomass by ME model using simple yield equation.

참고문헌

- Kang SK, Park JH and Kim SA. 2013. Size-class estimation of the number of Walleye Pollock *Theragra chalcogramma* caught in the southwestern east sea during the 1970s-1990s. Kor. J. Fish. Aquat. Sci., 46(4), 445-453.
- Kim SA and Kand SK. 1999. Recent development in the concept and research direction for carrying capacity of marine ecosystem. J. Korean Soc. Fish. Res., 2, 101-110.
- Kim SH, Park SW, Bae JH and Kim YH. 2009. Mesh selectivity of drift gill net for Yellow croaker in the coastal sea of Gageo-do, J. Kor. Soc. Fish. Aquat. Sci., 42(5), 518-522.
- Kim YH, Lee SK and Lee JB. 2006. Age and Growth of yellow croaker, *Larimichthys polyactis* in the South Sea of Korea. Korean J. Ichthyol., 18(1), 45-54.
- KIOST (Korea Institute of Science and Technology). 1998. Yellow sea large marine ecosystem. KIOST, 418pp.
- KMI (Korea Maritime Institute). 2001. Optimal exploitation of Mackerel stocks in Korea: an application of Bioeconomic model. KMI, 109pp.
- Kvamm C and Bogstad B. 2007. The effect of including length structure in yield-per-recruit estimates for northeast Arctic cod. ICES Journal of Marine Science, 64, 357-368.
- California Natural Resources Agency, 1964. Problems of the lower san Joaquin river influencing the 1963 Salmon run. The resources agency of California, 40pp.
- Cha CP. 2006. A study on mediation for fishing fraud of offshore fisheries in the Fisheries Act in Korea. The Korea Institut of Maritime Law, 17(2), 27-54.
- Charmaine MG, Robert WH and Gillbert S. 2004. A comparison of yield per recruit and revenue per recruit models for the Oregon ocean shrimp fishery. Fisheries Research, 71-84.

- Clark RP, Yoshimoto SS and Pooley SG. 1992. A bioeconomic analysis of the northwestern Hawaiian Islands lobster fishery. *Marine Resource Economics* 7, 115–140.
- 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.
- Fitzpatrick J. 1996. Technology and Fisheries Legislation. FAO Fisheries Technical Paper. No. 350, Part 2.
- Golan A, Judge G and Karp L. 1996a. A maximum entropy approach to estimation and inference in dynamic models or counting fish in the sea using maximum entropy. *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, 559–582.
- Golan A, Judge G and Miller D. 1996b. A maximum entropy econometrics. John Wiley & Sons Ltd., 24–25.
- Hwang BN and Choi SH. 1980. Age and Growth of Yellow Croaker in the Yellow Sea and the East China Sea. *Bull. Natl. Fish. Res. Dev. Institute, Korea*, 23, 171–178.
- Lee JH, Seo YI, Oh TY and Lee DW. 2013. Estimations on population ecological characteristics of small yellow croaker, *Larimichthys polyactis* by the drift gillnet fishery in Korean waters. *J. Korean Soc. Fish. Tech.*, 49(4), 440–448.
- Lee MW, Zhang CI and Lee JU. 2000. Age determination and estimation of growth parameters using otoliths of small yellow croaker, *Pseudosciaena polyactis* Bleeker in Korean waters. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 36(3), 222–233.
- NFRDI (National Fisheries Research and Development Institute). 1979. Oceanographic handbook of the neighboring seas of Korea. NFRDI, 650pp.
- Oh TY, Cho TB, Seo YI, Kim BY and Lee CH. 2014. Fishing characteristics of small yellow croaker drift gill net by net height. *J. Korean Soc. Fish. Tech.*, 50(3), 368–377.
- Pauly D. 1984. Length–converted catch curves. A powerful tool for

- fisheries research in the tropics (Part 2). ICLARM Fishbyte, 2(3), 9–10.
- Pella JJ and Tomlinson PK. 1969. A generalized stock production model. Inter Am Trop Tuna Comm Bull 13, 419–496.
- Prager MH. 1992a. ASPIC: A surplus–production model incorporating covariates. ICCAT Collected Volume of Scientific Papers 28, 218–229.
- Prager MH. 1992b. Recent Developments in Extending the ASPIC Production Model. ICCAT Working Document SCRS/92/127, p. 10.
- Prager MH. 2005. User's Manual for ASPIC: A Stock–Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program. National Marine Fisheries Service Beaufort Laboratory Document BL–2004–01, p. 27.
- Prager MH. 2011. User's Manual for ASPIC: A Stock–Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program, p. 26.
- Schaefer MB. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. Inter. Am. Trop Tuna Comm Bull 1, 25–56.
- Schaefer MB. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. Inter Am Trop Tuna Comm Bull 2, 245–285.
- Ubunye challenge website. 2013. Indian ocean row for Sports Challenges. <http://ubunychallenge.com/row/indian-ocean-row> (accessed February, 26, 2015).
- Ye Y. 1998. Assessing effects of closed seasons in tropical and subtropical penaeid shrimp fisheries using a length–based yield–per–recruit model. ICES Journal of Marine Science, 55, 1112–1124.
- Zhang CI. 2010. Marine Fisheries Resource Ecology. Sejong Publ Co Busan Korea, 561pp.
- Zhang CI and Megrey BA. 2006. A revised Alverson and Carney model for estimating the instantaneous rate of natural mortality. Trans.

Amer. Fish. Soc., 135(3), 620–633.

Zhang CI, Kim YM, Yoo SJ, Park CS, Kim SA, Kim CK and Yoon SB.
1992c. Estimation of population ecological characteristics of
small yellow croaker, *Pseudosciaena polyactis* off Korea. Bull
Kor Fish Soc., 25, 29–36.

