

최대 엔트로피 기법을 이용한 한국 연근해 고등어 최적 관리에 관한 연구

박윤선* · 권오상**

요약 : 고등어는 국내에서 가장 많이 소비되는 어종 중 하나로 최근 기후변화, 해양 생태계 악화, 과잉 어획 등으로 인해 자원 고갈에 대한 우려가 커지고 있다. 본 연구에서는 이러한 고등어의 최적어획량, 자원량, 어획노력량 등을 최대 엔트로피 기법을 이용하여 추정하는 것을 목적으로 한다. 또한 부트스트래핑을 이용하여 최대 엔트로피 추정치의 통계적 유의성을 확인하고자 하였다. 분석 결과 고등어 자원량은 1990년대 중반 최대로 증가하였다가 2000년대 이후 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 자원량 대비 어획량을 비교하면 1990년대 이전에는 28.5%, 1990년대 약 43.1%, 2000년 이후 36.3%로 추정되었다. 이는 1990년대 남획에 가까운 어획으로 고등어 자원량이 감소하였다가 정부의 수산 자원 관리 정책으로 인해 차츰 자원이 회복되었음을 의미한다. 그럼에도 불구하고 본고가 추정한 사회적 최적 자원량이나 최대지속가능어획량과 비교하면 현재 자원 스톡은 이 두 기준치를 달성하지 못해 현재보다 더 강화된 어획량 관리제도가 필요함이 확인된다.

주제어 : 고등어 자원량, 최대 엔트로피, 부트스트랩, 최적 제어

JEL 분류 : C61, Q22, Q28

접수일(2018년 12월 1일), 수정일(2019년 3월 14일), 게재확정일(2019년 4월 8일)

* 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 박사과정, 제1저자(e-mail: yunsun1228@snu.ac.kr)

** 서울대학교 농경제사회학부 농업·자원경제학전공 교수 겸 농업생명과학연구원 겸무연구원, 교신저자(e-mail: kohsang@snu.ac.kr)

Optimal Management of Mackerel in Korea: A Maximum Entropy Approach

Yunsun Park* and Oh-Sang Kwon**

ABSTRACT : Mackerel is one of the most widely consumed aquatic products in Korea. Concerns about the depletion of stocks have also arisen as the catch has decreased. The primary purpose of this study is to estimate the mackerel stock and derive the optimal level of catch in Korea. We apply a generalized maximum entropy econometric method to estimate the mackerel growth function, which does not require the steady state assumption. We incorporate a bootstrapping approach to derive the significance levels of parameter estimates. We found that the average ratio of catch to the estimated total stock was less than 30% before the 1990s but exceeded 40% in the 1990s. After 2000, it dropped back to about 36%. This finding indicates that mackerel may have been over-fished in the 1990s, but the government regulations introduced in the 2000s alleviated over-fishing problems. Nevertheless, our dynamic optimization analysis suggests that the total allowable catch may need to be carefully controlled to achieve socially optimal management of resources.

Keywords : Mackerel stock, Maximum Entropy, Bootstrapping, Optimal Control

Received: December 1, 2018. Revised: March 14, 2019. Accepted: April 8, 2019.

* Ph.D. Student, Department of Agricultural Economics and Rural Development, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, First author(e-mail: yunsun1228@snu.ac.kr)

** Professor, Department of Agricultural Economics and Rural Development, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Corresponding author(e-mail: kohsang@snu.ac.kr)

I. 서론

소득 증가와 더불어 건강에 대한 개인적, 사회적 관심이 높아지면서 건강식품으로서 수산물에 대한 수요가 증가하고 있다. 수산물 소비는 2000년대 들어 꾸준히 증가하여 2016년 1인당 수산물 소비량이 59.9kg에 달했고(최종우·황윤재, 2018), 수산물 판매 금액 또한 2000년 약 4조 1천억 원에서 2017년 8조 6천억 원으로 약 2.1배 증가하였다(『어업생산동향조사』, 2018). 이 중에서도 고등어는 2017년 기준 전체 어류 판매량의 약 15.6%를 차지하며, 멸치, 갈치 등과 함께 5대 어종으로 분류되고 있다. 그러나 지구온난화, 해양생태계 악화, 과잉 어획 등으로 고등어 어획량이 감소 추세를 보이고 있어 자원 고갈에 대한 우려도 커지고 있다.

수산자원의 고갈을 막기 위해서는 자원을 효과적으로 관리해야 하고, 이를 위해서는 자원량을 정확하게 추정하는 작업이 선행되어야 한다. 그러나 수산자원은 그 성장함수가 복잡한 형태의 재생가능한 자원이라는 점, 직접적으로 자원량을 관찰할 수 없다는 한계 때문에 자원의 동태적 변화 형태에 대한 정보를 정확히 얻기가 어렵다. 이러한 한계에도 불구하고 수산 자원량 및 성장함수를 추정하기 위한 연구가 어족자원평가(fishery stock assessment) 연구라는 이름으로 진행되어 왔다. 어족자원과 그 성장함수에 대한 추정방법은 특정 종 전체 스톡의 변화를 분석하는 연구에서부터 연령과 크기분포도 분석하는 연구까지 다양한데(Bonfil, 2005; Berg et al., 2013; Maunder and Piner, 2015), 기본적으로 어획량 자료, 자원의 부존량 관련 자료, 연령이나 크기 분포 관련 자료, 그 외 해양환경 관련 자료 등을 필요로 한다. 분석의 목적이 특정 어종 전체의 스톡일 경우 이 가운데 첫 번째와 두 번째 자료를 주로 필요로 하지만, 특히 두 번째인 부존량 관련 자료를 얻는 것이 어렵다. 트롤(trawl)조사나 여타 해양 표본조사를 활용하는 서베이 기법이 이용되기도 하지만 실측치보다는 어획노력 대비 어획량, 즉 CPUE(catch per unit effort) 변수를 주로 사용하며, 이 경우 관측이 되지 않는 스톡은 소거하고 어획노력량(effort)과 어획량(yield) 변수만을 이용해 성장함수를 추정할 수 있다. 그러나 Bell(1972) 등의 고전적 연구가 보여준 바와 같이 이 경우 추정되는 로지스틱 혹은 쉐퍼(Schaeffer)형 성장함수의 고유성장률(intrinsic growth rate)이나 최대생존가능자원량(natural carrying capacity)의 추정치가 부호나 크기 면에서 허용범위 밖에 존재하는 것이 흔히 관측되며,

복잡한 비선형모형의 추정 자체가 용이하지 않은 면이 있다. 아울러 자원성장함수에서 자원스톡을 소거하고 어획노력량과 어획량 변수를 대신 사용하기 위해서는 자원량이 이미 정상상태(steady state)에 도달하였다고 가정해야 하는 한계도 있다.

생물자원의 스톡과 성장방정식 추정법이 가지는 이러한 문제점을 완화하고자 Golan et al.(1996a, 1996b)은 제한된 자료로부터 통계 정보를 최대한 추출해내는 방법 중 하나인 최대 엔트로피(generalized maximum entropy, GME) 기법을 사용할 것을 제안하였다. 그들은 이 방법을 사용할 경우 어획량자료와 CPUE자료만을 가지고도 자원 스톡이 정상상태에 이미 이르렀다는 제약 없이 자원량과 성장함수를 동시에 추정할 수 있음을 보여주었다. 그러나 이들은 실제 생물자원 관련 자료에 본인들의 모형을 적용하지는 않았으며, 국내 연구자인 김기철·권오상(2000)이 이들의 제안을 실제로 적용하여 한국 연근해의 최대 어족인 멸치의 자원량과 그 성장함수의 특성을 추정한 바 있다. 이후 표희동(2006)이 멸치 자원량에 대해 최대 엔트로피 모형과 잉여생산모형을 비교하였고, Tendaupenyu&Pyo(2017) 또한 카리브호수 카펜타 자원량을 같은 방법론을 통해 추정한 바 있다.

본고는 Golan et al.(1996a, 1996b)이 제안하고, 김기철·권오상(2000)이 멸치에 대해 적용한 바가 있는 GME방법을 멸치와 더불어 가장 중요한 어족자원인 고등어의 자원스톡과 성장함수 추정에 사용하고자 한다. 그러나 본고는 Golan et al.(1996a, 1996b) 및 김기철·권오상(2000)의 연구와 크게 두 가지 점에 있어 차이가 있다. 첫째, 기존 연구와 달리 추정 파라미터의 통계적 유의성을 확보한다. GME기법은 통상적인 계량경제모형인 회귀분석이나 최우추정법과는 달라 추정치의 통계적 유의성에 대한 정보를 제공하지 않는다. 따라서 이 방법을 이용할 경우 성장함수의 주요 파라미터 추정치의 통계적 신뢰도를 확인할 수 없다는 문제가 있다. 본고는 GME기법에 부트스트래핑(bootstrapping) 방법을 적용하여 Golan et al.(1996a, 1996b)류의 분석이 파악할 수 없었던 추정치의 통계적 신뢰도를 확인하는 작업을 한다. 둘째, 본고는 성장함수의 추정에서 나아가 자원의 가격변수와 어획비용자료, 그리고 할인율을 적용하여 최적의 자원이용량과 유지해야 할 자원량을 명시적으로 도출한다. 따라서 생물학적 성장함수에만 의존하여 최대지속가능 수확량(maximum sustainable yield, MSY)과 그에 해당되는 자원량만을 제시하는 기존 연구들에 비해 자원관리에 필요한 보다 구체적인 정보를 제공한다. 본고는 이렇게

GME추정법을 보완, 확장한 연구를 수행하고, 그 결과를 전통적인 분석법을 고등어자원
에 적용한 조정희 외(2001), 김도훈(2004), 남종오(2011) 등의 기존 연구결과와 비교한다.

본고의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 연구에서 사용할 자료 및 최대 엔트로피기법
과 부트스트래핑에 대해 설명하고, III 장에서는 고등어 자원량 및 성장함수 추정결과에
대해 설명한다. 마지막으로 IV 장에서는 결과를 요약하고 결론을 도출한다.

II. 분석모형과 분석자료

1. 고등어 생산 및 정책 동향

고등어는 우리나라 전 연근해에 서식하며 난류성, 추광성, 군집 회유를 하는 어종으
로, 봄~여름 북쪽으로 이동했다가 가을~겨울 월동을 위해 남쪽으로 이동하며, 4~6월에
제주도 동부 해역에서 산란한다(국립수산과학원, 2016).

고등어의 연도별 어획량을 파악하기 위해 본 연구에서는 통계청에서 제공하는
1977~2015년 『어업생산동향조사』 및 해양수산부의 『해양수산통계연보』를 활용하였
다. 또한 고등어 어획량의 대부분이 대형선망을 통해 어획되기 때문에 대형선망에 의해
어획된 고등어의 어획량을 분석 대상으로 선정하였다. 1977년부터 2015년까지 대형선
망의 고등어를 포함하는 전체 어획량, 대형선망에 의해 어획된 고등어의 어획량, 그리고
대형선망에서 고등어 어획량 및 비중은 <표 1>에 제시되어 있다. 고등어 어획량을 시기
별로 나누어서 살펴보면, 1977~1989년 평균 어획량은 99,376톤, 1990~1999년 162,911
톤, 2000~2015년 125,573톤으로 나타났다. 2000년대에 들어서며 고등어 어획량이 감
소한 것은 고등어 어종에 대한 총허용어획량(TAC: Total Allowable Catch) 제도가 시행
됨에 따라 어획량의 상한선이 설정되었기 때문이다. 그러나 최근 5년(2011~2015년)간
평균 어획량은 116,933톤으로 2000년대 초반에 비해 감소한 것으로 나타나고 있어, 어
획량 감소에는 고등어의 자원량 감소도 영향을 미쳤을 것으로 보인다. 대형선망 어획량
에서 고등어가 차지하는 비중을 고등어 어획량과 마찬가지로 시기별로 나누어 살펴보
면 1977~1989년 35%, 1990~1999년 61%, 2000~2015년 65%로 나타났지만, 연도별 변
동 폭도 존재함이 확인된다.

다음으로 본 연구에서는 대형선망 고등어의 양망횟수를 어획노력량으로 활용하였다¹⁾. 국립수산물과학원(2006, 2016)에서 제공하는 대형선망 고등어의 양망 당 어획노력량(catch per unit effort, CPUE) 자료를 바탕으로 대형선망의 양망횟수를 추정하고, 대형선망의 양망횟수에 대형선망 내 고등어 어획비중을 곱하여 다시 고등어 양망횟수로 전환하였다²⁾³⁾.

2000년대 이후 고등어 자원 고갈에 대한 우려가 증가하면서, 다양한 고등어 어업 자원 보호 정책이 시행되고 있다. 대표적인 고등어 자원 보호 정책으로는 총허용어획량(TAC) 적용, 금어기 설정, 미성어 어획규제 등이 있다. TAC제도는 어업자원의 지속적 이용을 위해 어획량을 제한하는 제도로, 1999년 대형선망(고등어, 전갱이, 정어리) 및 근해통발(붉은대게)을 대상으로 시행되었다. TAC는 국립수산물과학원의 대상 어종별 자원 평가 결과에 따라 생물학적허용어획량(acceptable biological catch, ABC)의 목표값 및 최근 어획 실적을 감안하여 설정된다(해양수산부, 2016). 고등어의 경우 부산에 100% 할당되며, 어선별(총 24개) 승인 어획량이 할당되어 있다. 이 외에도 2016년부터 산란기 인 5월 경 금어기를 설정하고, 21cm이하 미성어 포획 금지 정책 등을 시행하고 있다.

〈표 1〉 대형선망 어획량, 고등어 어획량 및 고등어 양망횟수

연도	대형선망 어획량(톤)	고등어 어획량(톤)	고등어 어획비중(%)	대형선망 양망횟수	고등어 양망횟수
1977	168,997	104,401	0.62	5,409	3,342
1978	178,467	85,421	0.48	5,177	2,478
1979	186,656	65,938	0.35	3,663	1,294

- 1) 한국해양학회(2005)에 따르면 어획노력량이란 특정 기간 동안 어획 활동을 위해 사용되는 어구의 수리적 정보를 의미한다. 어획노력량으로 양망횟수, 어선세력(척수, 톤수, 마력 수 등) 등이 이용될 수 있고, 본 연구에서는 양망횟수를 어획노력량 변수로 이용하였다.
- 2) 제공받은 대형선망 고등어의 CPUE 자료는 다음과 같은 형태로 전환되었다. 이때 Y_L : 대형선망 어획량, E_L : 대형선망 어획노력량(양망횟수), Y_M : 대형선망 내 고등어 어획량, E_M : 고등어 어획노력량(양망횟수)를 의미한다. $CPUE = \frac{Y_L}{E_L} \times \frac{Y_M}{Y_L} \rightarrow E_L = \frac{Y_M}{CPUE} \rightarrow E_M = E_L \times \frac{Y_M}{Y_L}$
- 3) 대형선망의 어획노력량(양망횟수)에 단순히 고등어 어획 비중을 곱하여 조정할 경우 대형선망에서 어획되는 모든 어종이 같은 생산성을 가진다는 한계가 있다. 그러나 대형선망의 경우 2018년 기준 생산량의 49.6%가 고등어이고, 고등어와 유사한 어종인 망치고등어가 30.7%, 전갱이류 5.7%로 전체 어획량의 86%를 차지한다(통계청, 『어업생산동향조사』). 따라서 현재의 제한된 자료 하에서는 대형선망의 어획노력량에 고등어의 어획비중을 곱하여 고등어의 어획노력량을 도출하는 것이 최선의 방법이라 사료된다.

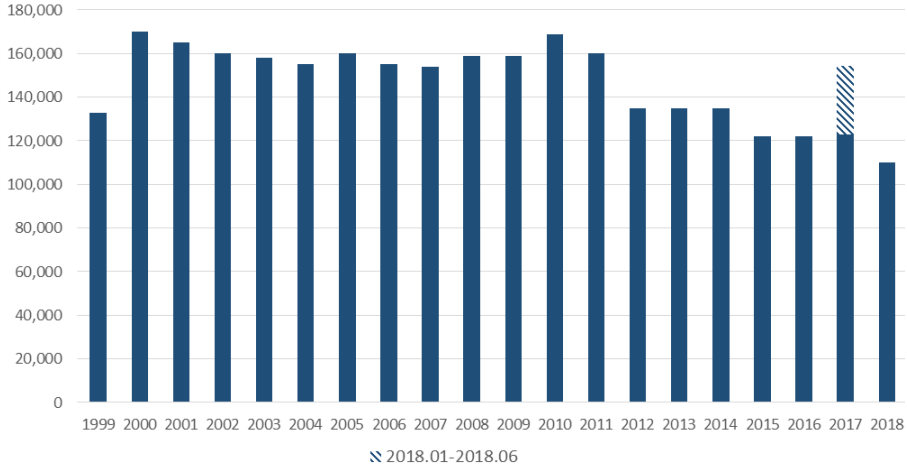
〈표 1〉 대형선망 어획량, 고등어 어획량 및 고등어 양망횟수(계속)

연도	대형선망 어획량(톤)	고등어 어획량(톤)	고등어 어획비중(%)	대형선망 양망횟수	고등어 양망횟수
1980	218,651	60,578	0.28	5,825	1,614
1981	250,007	100,528	0.40	7,674	3,086
1982	257,931	93,272	0.36	9,327	3,373
1983	328,028	119,508	0.36	8,986	3,274
1984	349,325	99,444	0.28	10,147	2,889
1985	314,154	62,419	0.20	9,046	1,797
1986	458,785	98,202	0.21	11,976	2,563
1987	355,817	88,490	0.25	9,724	2,418
1988	409,708	154,948	0.38	10,062	3,805
1989	415,603	158,744	0.38	10,176	3,887
1990	358,993	92,775	0.26	9,467	2,447
1991	191,815	82,541	0.43	6,822	2,935
1992	212,475	108,848	0.51	8,373	4,289
1993	283,577	156,573	0.55	9,376	5,177
1994	310,967	197,761	0.64	12,360	7,860
1995	227,995	159,820	0.70	12,294	8,618
1996 ¹⁾	453,337	386,877	0.85	10,599	9,045
1997	184,789	139,293	0.75	9,606	7,241
1998	205,037	148,892	0.73	8,272	6,007
1999	229,927	155,728	0.68	9,107	6,168
2000	179,988	109,025	0.61	9,318	5,644
2001	231,821	177,935	0.77	11,121	8,536
2002	181,849	126,519	0.70	9,585	6,668
2003	158,662	113,121	0.71	8,023	5,720
2004	220,004	175,831	0.80	8,255	6,598
2005	173,795	127,983	0.74	8,532	6,283
2006	146,839	93,787	0.64	7,816	4,992
2007	194,093	138,086	0.71	7,464	5,310
2008	234,525	164,375	0.70	6,133	4,299
2009	241,052	109,459	0.45	4,259	1,934
2010	160,409	87,796	0.55	5,075	2,778
2011	219,109	126,301	0.58	4,821	2,779
2012	177,050	117,486	0.66	4,815	3,195
2013	163,859	96,020	0.59	5,135	3,009
2014	171,082	119,866	0.70	5,791	4,057
2015	218,267	124,994	0.57	6,127	3,509

주1) 1996년 고등어 어획량이 예년에 비해 급증한 것은 개체가 일시적으로 특정 연도에 우세하게 나타나는 ‘탁월 연급군(卓越年級群)’현상이라 볼 수 있다(수산물안전정보서비스, 2007).

자료: 해양수산부 『해양수산통계연보』, 통계청 『어업생산동향조사』 각 연도.

〈그림 1〉 고등어 총허용어획량(TAC)



주: 2018년부터 국내 연근해어업의 주어기가 가을-봄임을 감안하여 TAC 어기를 기존 1~12월에서 7~6월로 변경하였다. 따라서 2017년은 2017.01-2018.06, 2018년은 2018.07-2019.06에 해당된다.
 자료: 수산정보포털(www.fips.go.kr), 해양수산부(2007)

2. 최대 엔트로피 기법

수산자원의 양은 직접 관측이 불가능하기 때문에 그 동태적 변화 형태를 분석하기가 어렵다. 따라서 어획행위와 그로 인한 어획량에 관한 자료와 같은 간접적인 자료를 통해 자원의 동태적 양과 변화 형태를 통계학적으로 주로 분석하는데, 추정대상인 자원량 자체는 관측이 되지 않는다는 점에서 일반적인 계량분석모형과는 다른 방법의 사용이 필요하다. GME기법은 이 예처럼 통상적인 계량모형 추정방법이 다루기 어려운 문제를 추정하는 방법으로 개발되었는데, 이 방법을 적용하기 위해 본 연구의 고등어 어획량 및 성장함수 모형을 설정하면 식 (1), (2)와 같다.

$$Y_t = AE_t^\beta X_t^\omega \exp(\epsilon_t) \quad (1)$$

$$X_{t+1} = \left[X_t + rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K} \right) - Y_t \right] \exp(\mu_t) = [X_t + F(X_t) - Y_t] \exp(\mu_t) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 Y_t 는 연도별 어획량, E_t 는 고등어 어획노력량, X_t 는 각 연도의 추정된 고등어 자원량이다. 또한 A 는 생산함수의 상수항 부분으로, 생산함수에서 투입요소 외 생산 변화를 나타내는 총요소생산성(TFP)을 의미한다. 식 (2)의 구성요소 중 $F(X_t) = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right)$ 는 로지스틱형태의 자원 성장함수이다. 성장함수 중 r 은 최초의 자원 한 단위가 늘어나는 정도를 나타내는 고유성장률(intrinsic growth rate), K 는 우리나라 연근해가 수용할 수 있는 최대 고등어량인 최대생존가능자원량(natural carrying capacity)을 의미한다.

즉, 본고에서 어획생산함수 식 (1)은 Cobb-Douglas 형태의 생산함수를, 성장함수 식 (2)는 Schaefer(1954)에 의해 제안된 로지스틱 성장함수를 가정하였다. 생산함수의 파라미터 β 와 ω 가 1로 고정되지 않기 때문에 어획량이 어획노력량이나 자원스톡에 완전 비례한다고는 보지 않는다. 아울러 로지스틱 성장함수는 생물경제모형에서 많이 사용되는 함수 형태로 개체의 상한이 있는 성장 과정을 나타내는 데 적합한 모형이다.

위의 모형에서 추정해야 할 파라미터는 A, β, ω, r, K 이고 ϵ_t, μ_t 는 오차항이다. 모형 내에서 내생적으로 도출되어야 할 추정모수는 추정 파라미터 A, β, ω, r, K 와 자원량 X_t , 오차항 ϵ_t, μ_t 의 확률변수이다. 특히 자원량(X_t)이 직접 관측되지 않으며, 이 수치들도 실제로는 추정해야 하기 때문에 전체적으로 추정해야 할 미지수의 수가 이용 가능한 관측치의 수보다 더 큰 일종의 ‘자유도 부족 문제(ill-posed problem)’가 된다. 이러한 문제는 통상적인 회귀분석이나 최우추정법으로는 다룰 수 없지만 GME기법으로는 가능하다.

최대 엔트로피 기법이 채용하는 절차에 따라 생산함수 식에서 A, β, ω 은 $[0,1]$, 성장함수의 r 은 $[0,1]$ 의 범위를 가진다고 가정하고⁴⁾, 모수를 3등분하여 다음의 식 (3)~(6)과 같이 변환하였다⁵⁾.

$$A = p_1^A \times 0 + p_2^A \times 0.5 + p_3^A \times 1 \quad (3)$$

4) 생산함수가 Cobb-Douglas 형태임을 감안하고, 고유성장률(r)은 1 단위의 자원량이 1 기간 동안 늘어나는 성장률인데 관련 국내외 선행연구의 수치를 감안할 때 이들 파라미터들에 대해 $[0,1]$ 범위를 가정하는 것이 합리적이다.
5) 최대 엔트로피 모형의 확률변수를 설정할 때 3등분 이상 세분화하는 것이 가능하지만, 일반적으로 분석의 편의를 위해 3등분, 5등분 등으로 구분하여 추정하고 있다.

$$\beta = p_1^\beta \times 0 + p_2^\beta \times 0.5 + p_3^\beta \times 1 \quad (4)$$

$$\omega = p_1^\omega \times 0 + p_2^\omega \times 0.5 + p_3^\omega \times 1 \quad (5)$$

$$r = p_1^r \times 0 + p_2^r \times 0.5 + p_3^r \times 1 \quad (6)$$

식 (3)~(6)에서 p_j^k 는 각각의 추정모수 A, β, ω, r 이 0, 0.5, 1의 값을 가질 확률을 의미하고, 최대 엔트로피 모형에서는 이들 추정모수 대신 확률변수 p_j^k 들을 최종적으로 추정한다.

최대(생존가능)자원량 K 가 가질 수 있는 범위는 국내 고등어 자원량 관련 선행 연구의 결과를 바탕으로 [0, 2,000,000]으로 설정하였다(식 (7))⁶⁾.

$$K = p_1^K \times 0 + p_2^K \times 1,000,000 + p_3^K \times 2,000,000 \quad (7)$$

자연성장률, 어획량, 최대자원량을 고려하여 각 연도에서의 자원스톡 X_t 의 범위를 [0, 700,000]로 설정하였다⁷⁾. 오차항 ϵ_t, μ_t 은 Pukelsheim(1994)의 3시그마법(3σ rule)에 따라 [-1, 1]로 설정하였으며, 오차항에 대한 식은 식 (9)~(10)과 같다.

$$X_t = p_{t1}^X \times 0 + p_{t2}^X \times 350,000 + p_{t3}^X \times 700,000 \quad (8)$$

$$\epsilon_t = p_{t1}^\epsilon \times (-1) + p_{t2}^\epsilon \times 0 + p_{t3}^\epsilon \times 1 \quad (9)$$

$$\mu_t = p_{t1}^\mu \times (-1) + p_{t2}^\mu \times 0 + p_{t3}^\mu \times 1 \quad (10)$$

추정의 편의를 위해 식 (1), (2)를 다음과 같이 로그변환하였다.

6) 조정희 외(2009)에서는 로지스틱 성장함수의 생물계수를 추정하고자 하였으나 여러 가지 생물경제모형의 통계 값 설명력이 낮게 나타나 국립수산물관리원에서 이미 추정한 연도별 고등어 자원량과 어획량에 기초하여 생물적 계수를 재추정하였고, 그 결과 K 는 155만 3,266톤으로 나타났다. 여타 연구들은 대부분 이 보다 더 적은 K 를 제시하고 있으므로 K 의 상한을 200만 톤으로 정하였다.

7) 최대(생존가능)자원량(K), 고유성장률(r), 연간 자원량(X_t)을 어떻게 설정하느냐에 따라 추정 값에 차이가 나타난다. 따라서 본 연구에서는 예측 정확성(forecast accuracy)를 측정하는 여러 지표(평균절대오차(MAE), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대백분율오차(MAPE), Theil's U-statistics 등)를 추정한 뒤 오차 값이 가장 작은 값을 보이는 범위를 설정하였다. 이에 대한 결과는 <부록 A>에 제시되어 있다.

$$\ln Y_t = \ln A + \beta \ln E_t + \omega \ln X_t + \epsilon_t \quad (11)$$

$$\ln X_{t+1} = \ln X_t + \ln S_t + \mu_t, \text{ 단, } S_t = 1 + r - \frac{r}{K} X_t - \frac{Y_t}{X_t} \quad (12)$$

따라서 최대엔트로피 문제의 최종 식은 (13)이고, 제약 식은 (3)~(12), (14)~(17)이다.

$$\max \left[- \sum_j \sum_i p_i^j \ln p_i^j - \sum_k \sum_t \sum_i p_{ti}^k \ln p_{ti}^k \right] \quad (13)$$

$i = 1, 2, 3, j = A, \beta, \omega, r, K, k = X, \epsilon, \mu$

$$\sum_{i=1}^3 p_i^j = 1, \quad j = A, \beta, \omega, r, K \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^3 p_{ti}^X = 1, \quad t = 1977, 1978, \dots, 2015 \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^3 p_{ti}^\epsilon = 1, \quad t = 1977, 1978, \dots, 2015 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^3 p_{ti}^\mu = 1, \quad t = 1977, 1978, \dots, 2014 \quad (17)$$

3. 부트스트래핑(Bootstrapping)⁸⁾

이상 도출된 추정모형은 통상적인 최소자승법이나 최우추정법이 아니기 때문에 추정 파라미터의 통계적 유의성을 직접 확인하기 어렵다. 따라서 본고는 추정치의 표준편차 등을 부트스트래핑기법을 이용해 도출하고자 한다.

부트스트래핑은 표본 생성을 통해 통계적 추정치의 정확성을 평가하는 방법 중 하나인데, 특히 부트스트래핑은 표본의 수가 적을 때 표본 개수를 늘릴 수 있고, 확률적인 분포를 가정하지 않은 경우에도 사용할 수 있다는 장점이 있다. 추가적인 표본을 어떻게 생성하느냐에 따라 부트스트래핑은 크게 모수적(parametric) 방법과 비모수적(nonparametric)

8) 본 내용은 Efron and Tibshirani(1994), Carpenter and Bithell(2000)을 참조하였다.

방법으로 구분된다. 비모수적 부트스트래핑은 데이터나 모형에 어떠한 확률적인 분포를 가정하지 않고 추정하는 방법으로, 주어진 데이터를 모수인 것처럼 두고 이를 무작위 복원 추출하여 추가적인 표본을 생성하는 기법이다. 반면 모수적 부트스트래핑은 특정 분포 하에서 재추출을 시행하는 기법으로, 가정한 분포가 표본에 적합할 경우 비모수적 부트스트래핑에 비해 더 정확한 통계적 결과를 제시한다는 장점이 있다.

본 연구에서는 오차항(ϵ_t)에 정규분포를 가정하는 모수적 부트스트래핑을 사용하여 연구를 진행하였다⁹⁾. 또한 부트스트래핑을 통해 얻은 오차항과 앞서 최대 엔트로피 기법을 통해 추정한 파라미터($\hat{A}, \hat{\beta}, \hat{\omega}, \hat{r}, \hat{K}, \hat{X}_t$)를 생산 및 성장함수에 넣어 새로운 어획량(\hat{Y}_t)을 도출한 뒤 최대 엔트로피 기법을 반복적으로 시행하였다. 1000번의 반복 시행을 통해 새롭게 추정된 파라미터를 바탕으로 표준오차와 신뢰구간을 추정하였다. 부트스트래핑 표준오차는 식 (18)이 보여주는 바와 같이 반복적 시행을 통해 도출된 표본들의 표준편차(standard deviation)와 같다. 이때 B 는 부트스트래핑 반복 수, $\hat{\theta}^*$ 는 부트스트래핑 표본의 추정량을 의미한다.

$$\widehat{se}_B = \left\{ \sum_{b=1}^B [\hat{\theta}^*(b) - \hat{\theta}^*(.)]^2 / (B-1) \right\}^{1/2} \quad \text{where } \hat{\theta}^*(.) = \sum_{b=1}^B \hat{\theta}^*(b) / B \quad (18)$$

이를 바탕으로 백분위수 신뢰구간을 식 (19)와 같이 추정하였고, 이때 α 는 유의 수준을 나타낸다($\alpha = 0.05$).

$$[\widehat{\theta}_{lo}, \widehat{\theta}_{up}] = \left[\widehat{\theta}_B^{*\left(\frac{\alpha}{2}\right)}, \widehat{\theta}_B^{*\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)} \right] \quad (19)$$

9) 시계열 데이터가 자기상관성을 가질 때에는 블록을 설정하여 재추출을 시행하는 블록 부트스트래핑을 사용하는 것이 더 적절하다(Hall et al, 1995). 그러나 본 연구에서 자기상관검정(DW-test)을 시행한 결과 자기 상관이 낮은 것으로 나타나(DW-statistic=1.71), 시계열 부트스트래핑을 사용하지 않고, 모수적 부트스트래핑을 사용하였다.

III. 분석결과

1. 고등어 연도별 자원량 추정

앞에서 설명한 바와 같이 최대 엔트로피 기법을 이용하여 고등어의 생산함수 및 성장함수 파라미터를 추정하였다. 또한 추정 파라미터의 통계적 유의성을 확인하기 위해 부트스트래핑을 통해 표준오차와 유의수준 5% 하의 신뢰구간을 추정하였고 결과는 <표 2>에 제시되어 있다.

<표 2> 최대 엔트로피 및 부트스트래핑 추정 결과

파라미터	추정치 (표준오차 ¹⁾)	표준정규 신뢰구간
A	0.502 (0.004)	[0.500, 0.516]
β	0.537 (0.027)	[0.486, 0.591]
ω	0.621 (0.017)	[0.586, 0.653]
r	0.543 (0.010)	[0.520, 0.559]
K	1,094,835 (17,076)	[1,032,797, 1,101,481]

주: 부트스트래핑 표준오차(bootstrapped standard error)를 의미한다.

<표 2>의 추정결과에서 모든 파라미터 추정치의 통계적 유의성이 5% 유의수준에서 확보된다. 추정결과에 따르면, 고등어의 생산함수에 있어 어획노력량(E)의 탄력성은 0.537, 자원량(X)의 탄력성은 0.621로 어획량($=Y$)에 미치는 한계적인 영향의 크기는 어획노력량보다도 자원량의 경우가 더 크다는 것이 확인되며, 따라서 자원관리의 중요도가 강조된다. 연근해가 허용하는 최대의 자원량($=K$)은 1,094,835톤으로 추정되며, 자원의 고유성장률($=r$), 즉 최초의 자원 한 단위가 증식하는 비율은 0.543으로 추정되었다.

한편, 해양자원은 바닷물의 수온 등과 같은 환경변수에 의해서도 어획량이 달라질 수가 있어 본고는 생산함수가 수온을 포함하도록 모형을 추정하였고, 그 결과는 <부록 B>에 정리되어 있다. 결과적으로 수온의 영향은 GME모형에서 잘 추정되긴 하였으나, 추정치의 통계적 유의성이 확보되지 않아 그 결과는 부록에만 신기로 하였다. 아울러 수온 변수를 포함하여도 r 과 K 의 추정치가 거의 달라지지 않음도 확인되었다.

고등어자원의 중요도를 반영하여 국내 연구자들이 고등어 자원의 성장함수를 추정하

려는 시도를 수차례 하였으며, 이들 연구들은 서론에서 밝힌 바와 같은 전통적 방법들을 사용하였다. 이들 연구들이 제시하는 고유성장률 r 과 최대자원량 K 의 추정치들은 <표 3>과 같이 정리된다. 본 연구가 제시하는 두 가지 추정치는 조정희 외(2009)의 추정치와 비교적 가까운 편이다. 반면 남종오(2011)의 추정치는 매우 작은 고유성장률과 매우 큰 최대생존가능량을 제시하는데, 대형 해양생물이 아닌 고등어의 고유성장률로서는 남종오(2011)의 추정치 0.08은 지나치게 작은 감이 있다¹⁰⁾. 또한 고등어와 관련된 해외 연구들을 살펴보면 어떤 지역인지에 따라 고유성장률(r)과 최대자원량(K) 값에 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 다만 IOTC(2016)에 따르면, 연안 어종의 경우 대부분 높은 회복력(resilience)을 가지기 때문에 고유 성장률(r)을 비교적 높게 추정하는 것이 적합하고, 최대자원량(K)의 경우 최대 어획량과 최대 어획량의 50배 사이 정도로 설정할 것을 제안하고 있다.

<표 3> 국내·외 고등어 연구 주요 변수 추정 결과

단위: 톤

저자(연도)	어종	지역	고유성장률(r)	최대자원량(K)
본 연구(2019)	고등어	한국	0.543	1,094,835
부경대학교·국립수산진흥원(2000)	고등어	한국	0.41	-
최종두·조정희(2008) ¹⁾	고등어	한국·일본	0.39	3,061,900
조정희 외(2009)	고등어	한국	0.54	1,553,266
남종오(2011)	고등어	한국	0.08	16,067,267
Kishida&Wada(2003)	고등어, 쾅치, 정어리	일본	0.2-1.4	5,000,000-25,000,000
Puthy(2007)	고등어	캄보디아	1.52	15,467
IOTC(2015)	삼치(Spanish mackerel)	인도양	0.6-1.5	160,000-8,024,000
IOTC(2016)	삼치(Spanish mackerel)	인도양	1.0-1.5	158,000-7,882,000
Fishbase(2019)	삼치(Spanish mackerel)	전 세계	0.54	-

주: 이 연구는 한·일 간 고등어 자원의 최적 어획량을 분석한 것으로, 연구에서 제공하는 자원량은 한일 공동자원량이므로 한국의 어획량 비중(67%)을 곱하여 재계산하였다.

10) <표 3>의 국내 연구들 중 부경대학교·국립수산진흥원(2000)은 r 과 고등어의 연령, 성장, 체장, 체중관련 파라미터는 선행연구를 통해 얻고, 사망률관련 추정치까지 반영하는 일종의 코호트 분석법을 적용한 분석결과이다. 이 연구를 제외한 나머지 연구들은 대부분 이 연구의 성장률 수치를 취하거나, 아니면 국립수산과학원의 내부 자료나 전문가 의견을 참조하여 성장함수와 최대자원량 파라미터를 결정하였다.

본고의 GME 추정결과를 바탕으로 각 연도별 고등어 자원량을 계측한 결과는 <표 4>, <그림 2>에 제시되어 있다. 정상상태를 가정하는 여타 연구와 달리 본고는 이를 가정하지 않기 때문에 모형이 예측하는 매년의 어획량 추정치를 얻을 수 있다. 이를 실제 관측된 어획량과 비교하여 모형의 적합성에 관한 어느 정도의 정보를 얻을 수 있다. 실제 어획량과 추정 어획량의 오차를 보면 최저 0.2%에서 최대 41.0%까지 차이가 나는 것으로 나타났다. 실제 어획량과 추정 어획량 간의 오차가 가장 큰 연도는 1996년인데, 이 해에는 어획량이 다른 연도에 비해 2배 이상 많았기 때문에 큰 오차가 발생한 것으로 보인다. 이처럼 어획량의 예측오차가 크게 나타나는 경우는 모형에 반영되지 못한 변수들의 영향으로 실제 어획량이 예년에 비해 급등 혹은 급락했던 연도에 주로 나타난다.

또한 시기별 평균 자원량 대비 어획량 비중을 살펴보면 1990년 이전(1977~1989년)에는 약 28.5%, 1990년대(1990~1999년) 약 43.1%, 2000년 이후(2000~2015년) 36.3%로 변화했음을 알 수 있다. 고등어 어획이 1990년 이전에 비교적 안정적으로 이루어지다 1990년대에 들어서면서 어획량이 급증하였고, 이로 인해 TAC 정책 등 수산 자원 관리 정책이 시행되어 2000년 이후 자원 대비 어획량 비율이 점차 낮아진 것으로 보인다.

<표 4> 고등어 추정 자원량 및 어획량

연도	추정 자원량(톤)	자연 성장량(톤)	실제 어획량(톤)	자원량 대비 어획량(%) ¹⁾	추정 어획량(톤)	어획량 추정오차(%) ²⁾
1977	324,673	124,017	104,401	32.2	104,168	0.2
1978	324,379	123,951	85,421	26.3	88,663	3.8
1979	329,894	125,157	65,938	20.0	63,211	4.1
1980	328,585	124,873	60,578	18.4	70,998	17.2
1981	346,422	128,587	100,528	29.0	103,908	3.4
1982	337,400	126,748	93,272	27.6	107,217	15.0
1983	353,691	130,010	119,508	33.8	108,654	9.1
1984	335,226	126,293	99,444	29.7	98,266	1.2
1985	322,336	123,497	62,419	19.4	74,321	19.1
1986	354,746	130,212	98,202	27.7	95,446	2.8
1987	358,900	130,998	88,490	24.7	93,179	5.3

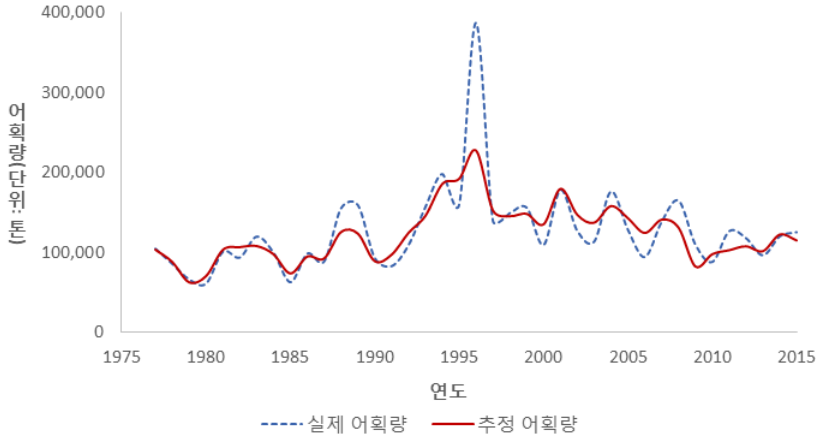
〈표 4〉 고등어 추정 자원량 및 어획량(계속)

연도	추정 자원량(톤)	자연 성장량(톤)	실제 어획량(톤)	자원량 대비 어획량(%) ¹⁾	추정 어획량(톤)	어획량 추정오차(%) ²⁾
1988	395,137	137,123	154,948	39.2	126,181	18.6
1989	377,645	134,329	158,744	42.0	124,093	21.8
1990	333,909	126,015	92,775	27.8	89,665	3.4
1991	329,015	124,966	82,541	25.1	97,958	18.7
1992	351,673	129,620	108,848	31.0	125,160	15.0
1993	385,023	135,544	156,573	40.7	146,486	6.4
1994	395,514	137,180	197,761	50.0	186,387	5.8
1995	385,993	135,700	159,820	41.4	192,889	20.7
1996	485,194	146,704	386,877	79.7	228,198	41.0
1997	309,527	120,556	139,293	45.0	153,156	10.0
1998	336,852	126,634	148,892	44.2	146,015	1.9
1999	339,787	127,243	155,728	45.8	148,904	4.4
2000	316,308	122,133	109,025	34.5	135,794	24.6
2001	348,817	129,062	177,935	51.0	180,198	1.3
2002	313,540	121,495	126,519	40.4	147,702	16.7
2003	320,498	123,085	113,121	35.3	137,896	21.9
2004	355,113	130,282	175,831	49.5	158,682	9.8
2005	314,789	121,784	127,983	40.7	143,414	12.1
2006	307,850	120,159	93,787	30.5	125,010	33.3
2007	357,069	130,654	138,086	38.7	141,700	2.6
2008	380,470	134,801	164,375	43.2	131,598	19.9
2009	361,830	131,541	109,459	30.3	83,068	24.1
2010	347,714	128,844	87,796	25.2	98,432	12.1
2011	376,456	134,128	126,301	33.6	103,432	18.1
2012	359,428	131,096	117,486	32.7	108,316	7.8
2013	344,879	128,278	96,020	27.8	102,224	6.5
2014	359,017	131,020	119,866	33.4	123,049	2.7
2015	368,065	132,670	124,994	34.0	115,600	7.5

주1) 실제 어획량 / 추정 자원량

2) | 추정 어획량 - 실제 어획량 | / 실제 어획량 × 100

〈그림 2〉 고등어 실제 어획량 및 추정 어획량 비교



2. 동태최적화

GME기법을 이용하여 추정한 결과를 바탕으로 고등어의 사회적 최적 어획량을 계측할 수 있다. 본 연구에서는 동태최적화를 시행하여 사회적 최적 어획량을 추정하였고 최적화 모형은 식 (20)과 같다. 이때 $R(X_t, Y_t)$ ¹¹⁾는 보상함수 혹은 이윤함수, δ 는 사회적 할인율을 의미한다.

$$\max \int_0^{\infty} R(X_t, Y_t) e^{-\delta t} dt \quad (20)$$

$$\text{s.t.}, X_t' = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) - Y_t$$

$$R(X_t, Y_t) = pY_t - cE_t = pY_t - c \left(\frac{1}{A} \frac{Y_t}{X_t^\omega} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

최적제어모형 (20)의 경사가격 해밀토니안(current value Hamiltonian)은 식 (21)과

11) 식(20)에서 이윤함수 $R(X_t, Y_t)$ 는 식(1)의 생산함수 $Y_t = AE_t^\beta X_t^\omega$ 를 E_t 에 대해 정리한 뒤($E_t = \left(\frac{1}{A} \frac{Y_t}{X_t^\omega}\right)^{\frac{1}{\beta}}$), 이를 대입하여 어획량(Y_t)과 자원량(X_t)의 함수로 표현한 것이다.

같고, 그로부터 식 (22)~(24)와 같은 최적화 조건이 도출된다¹²⁾.

$$\widehat{H} = pY_t - c\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{\beta}} Y_t^{\frac{1}{\beta}} X_t^{-\frac{\omega}{\beta}} + \mu_t \left[rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) - Y_t \right] \quad (21)$$

$$\widehat{H}_Y = p - \frac{c}{\beta} \left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{\beta}} Y_t^{\frac{1-\beta}{\beta}} X_t^{-\frac{\omega}{\beta}} - \mu_t = 0 \quad (22)$$

$$\mu' - \delta\mu = -\widehat{H}_X = - \left[c\left(\frac{1}{A}\right)^{\frac{1}{\beta}} Y_t^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\omega}{\beta}\right) X_t^{-\left(\frac{\omega}{\beta}+1\right)} + \mu \left(r - \frac{2rX_t}{K}\right) \right] \quad (23)$$

$$X_t' = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) - Y_t = 0 \quad (24)$$

식 (21)~(24)의 최적화 조건식을 풀기 위해서는 고등어의 가격 p 와 단위당 어획 비용 c , 그리고 사회적 할인율 δ 를 결정하여야 한다. 고등어의 가격 및 단위 비용은 수협이 『어업경영조사』 자료를 바탕으로 최근 5개년 평균값인 1,859원, 41,766원을 각각 사용하였다. 3개년, 7개년 등의 기타 평균 가격 및 비용을 활용한 추정 결과는 <부록 C>에 제시되어 있다.

수산자원 등 생태자원은 미래세대를 고려하여 이용해야 하고, 할인율이란 미래의 어떤 시점에 발생할 비용이나 편익을 현재가치로 환산하기 위해 사용되는 비율을 의미한다. 이때 할인율의 크기를 어느 정도로 하느냐에 따라 현 시점의 최적 자원 이용량이 달라질 수 있다. 일반적으로 사회적 할인율이 높을수록 현 시점에서 자원을 많이 사용하게 된다. 할인율과 관련된 최근의 국내 연구는 <표 5>에 제시된 바와 같다. 이들 할인율을 감안하여 선택된 몇 가지 할인율 하에서는 본고의 정상상태에서의 최적 자원량 및 어획량은 <표 6>과 같이 도출된다. 본고는 <표 5>의 할인율들의 평균치라 할 수 있는 3.45%를 대표 할인율로 선택한다.

12) 단 μ 는 해밀토니안의 승수(multiplier)이다.

〈표 5〉 주요 국내 사회적 할인율³⁾

		단위: %
사례		할인율
공공 부문(기획재정부, 2018) ¹⁾		4.5
수자원 부문(기획재정부, 2018) ¹⁾		3.5~4.5
국내 공공투자 사업(김상겸, 2013)		2.9~4.9
공공 사업(이지용 외, 2016)		3.26
기후변화 경제적 평가 (한국환경정책평가연구원, 2011) ²⁾	~2030년	2.76
	2031~2050년	1.45
	2051년~	0.62

주1) 한국개발연구원(2008)은 공공 부문 사업에 대해 5.5%의 사회적 할인율을 적용하고, 철도, 수자원과 같은 장기 사업에 대해서는 30년 동안 5.5%, 그 이후에는 4.5%의 차등 할인율(differentiated discount rates, DDR)을 적용할 것을 제안하였다. 그러나 2017년 시장금리와 경제성장을 추세를 반영하여 1.0%포인트 낮추어 일반 공공 부문에 대해서는 4.5%의 할인율을, 장기 사업에 대해서는 30년 동안 4.5%, 이후 3.5%의 할인율을 적용하도록 하였다.

주2) 한국환경정책평가연구원(2011)은 기후변화의 경제학적 분석과 관련하여 차등 할인율 개념을 적용하였다.

주3) 1), 2)와 같은 차등 할인율의 경우 그 평균값을 이용하였다(1): 4.0%, 2): 1.61%).

〈표 6〉 사회적 할인율(δ) 변화에 따른 정상상태에서의 최적량 변화

단위: %, 톤		
δ	최적 자원량(X^*)	최적 어획량(Y^*)
1	735,890	131,006
3	729,554	132,171
3.45	728,174	132,419
5	723,542	133,239
8	715,092	134,680
10	709,814	135,544
15	697,744	137,416

본고의 분석에서도 사회적 할인율이 커짐에 따라 최적자원량 및 어획량이 감소한다. 3.45%인 대표 할인율에서는 장기적으로는 728,174톤의 자원량($=X^*$)을 유지하면서 연간 132,419톤의 고등어를 어획하는 것($=Y^*$)이 최적의 선택으로 추정된다.

동태적 최적화를 통해 최적균제상태에서의 어획량 및 자원량뿐만 아니라 최대지속가

능어획량(Maximum sustainable yield, MSY)¹³⁾, 자유입어(Open access, OA)¹⁴⁾하의 균형 어획량도 도출할 수 있고, 이는 <표 7> 및 <그림 3>에 제시되어 있다. 고등어 자원량을 줄이지 않으면서 유지할 수 있는 최대의 어획량(= Y_{MSY})은 148,624톤이고 이때 유지할 수 있는 자원량 X_{MSY} 는 547,417톤으로 추정된다. 2015년 실제 어획량(= Y_{2015})은 124,994톤으로 Y_{MSY} 보다 적지만 추정 자원량 또한 368,065톤(= X_{2015})으로 X_{MSY} 에 비해 적은 것으로 나타났다. 또한 자유입어하에서의 균형은 어획량(Y_{∞}) 103,185톤, 자원량(X_{∞}) 244,734톤으로 추정된다. 자유입어하에서 개별 어업인은 단기 이윤을 추구하기 때문에 균형 자원량이 사회적 최적에 비해 현저히 줄어들음을 확인할 수 있다.

<표 7> 각 균형별 자원량, 어획량 및 어획노력량 비교

단위: 톤

구 분	자원량(X)	어획량(Y)	어획노력량(E)
2015년(X_{2015})	368,065	124,994	3,509
최적 정상상태 (Optimal Steady state, X^*)	728,174	132,419	2,071
최대지속가능 어획량 상태 (Maximum Sustainable Yield, X_{MSY})	547,417	148,624	3,572
자유입어(Open access, X_{∞})	244,734	103,185	4,593

즉, 2015년 현재 우리 연근해에서 유지되고 있는 자원량은 GME의 성장함수 추정결과에 기초한 동태최적화모형이 제시하는 최적 균형량 X^* 의 약 51%에 불과하다. 아울러 연간 어획량을 최대한으로 유지하면서도 지속적으로 유지할 수 있는 자원량으로서 생물학적으로 추천되는 X_{MSY} 의 67.2% 수준이다. 그러나 수산업에 대한 규제가 전혀 없이 누구나 조업을 할 수 있게 허용했을 때 유지될 것으로 전망되는 자원량, 즉 X_{∞} 보다는 50%가 더 많은 수준이라 정부의 자원보존정책이 완전하지는 않지만 어느 정도는 효

13) 최대지속가능 어획량이란 자원량을 현 상태로 유지하면서 얻을 수 있는 최대 어획량을 의미한다(Schaefer, 1954).

14) 자유입어란 수산자원에 사적, 공적 재산권이 존재하지 않는 상태를 의미한다. 자유입어 하 균형은 자원의 생산을 통한 이윤이 0이 되어야 하고, 자원의 성장량과 어획량이 같아야 한다는 조건하에서 달성될 수 있다(Gordon, 1954).

과를 발휘하고 있다고 할 수 있다.

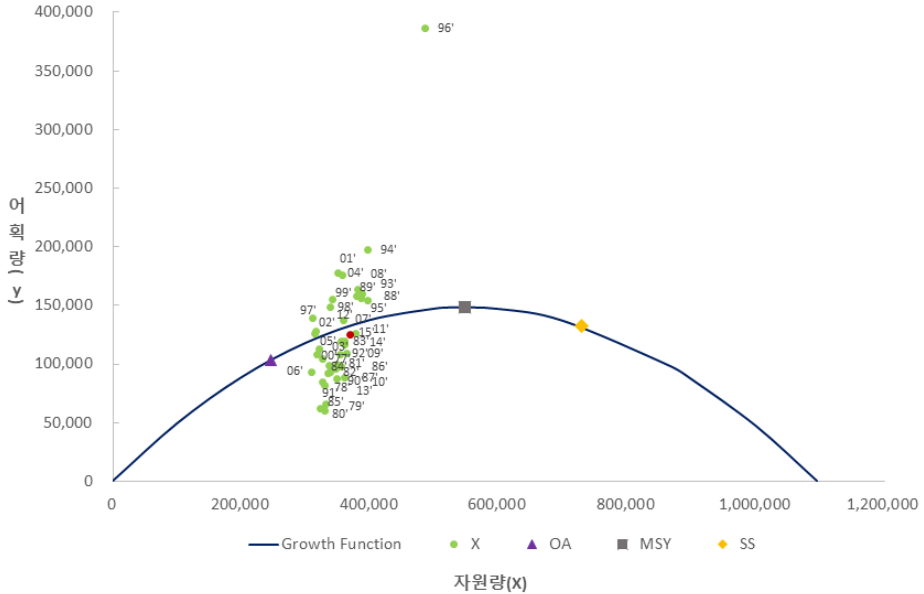
어획량의 경우 2015년 실제 어획량(Y_{2015})이 124,994톤인데, 이는 2015년 추정 자원량에 비하면 과도한 어획량이라 할 수 있다. 하지만 과잉 어로행위로 인한 자원량 감소로 인해 적절한 수준 이상의 어획노력이 이루어짐에도 이 실제 어획량은 최적 정상상태에서의 어획량($Y^*=132,419$)이나 최대지속가능 어획량($Y_{MSY}=148,624$)보다 오히려 적다. 그러나 역시 정부정책의 효과로 인해 완전 자유입어가 이루어질 때 보다는 자원량이 더 많기 때문에 어획량도 자유입어 어획량($Y_{\infty}=103,185$)보다는 더 큰 것으로 판단된다.

한편, 본고의 분석에 의하면 장기적으로 유지되어야 할 최적의 정상상태 자원량 X^* (=728,174)가 생물학적으로 권고되는 최대지속가능 어획량에서의 자원량, 즉 X_{MSY} (=547,417)보다도 더 많다. 양자 간의 관계는 다음과 같은 생물자원의 기본방정식 (fundamental equation of renewable resources, Conrad 2010, p.98; Clark 1990, p.40)을 통해 파악된다.

$$\delta = F'(X^*) + \frac{\partial R/\partial X}{\partial R/\partial Y} \text{ 단, } F'(X) \text{는 성장함수의 도함수} \quad (25)$$

식 (25)의 관계는 식 (22)~(24)의 최적화조건을 모두 만족하는 정상상태에서 성립해야 하는 조건이다. 이 관계식에서 자원의 스톡효과, 즉 자원량 자체가 생산성 증대를 통해 자원이용의 이윤 R 을 증가시키는 정도인 $\frac{\partial R/\partial X}{\partial R/\partial Y}$ 가 δ 보다 크게 되면 $F'(X^*)$ 는 0보다 작게 되고, 로지스틱 성장함수가 X 에 대해 감소하는 영역에서 X^* 가 선택된다. 따라서 $F(X)$ 가 정점이 되는 수준의 스톡량인 X_{MSY} 에 비해 X^* 가 더 큰 값을 가져야 한다. 본고의 분석결과에 의하면 자원스톡이 풍부할수록 어획량이 크게 늘어나고, 따라서 자원량 자체가 어업이윤에 미치는 영향이 충분히 커 최적의 정상상태 자원량이 생물학적 기준인 X_{MSY} 보다 더 커야 함이 보여진다.

<그림 3> 고등어 성장곡선 및 균형별 어획량



마지막으로 <그림 3>은 이상 도출된 최적 자원량 X^* , 최대지속가능 어획량에서의 자원량 X_{MSY} , 그리고 지난 약 40년간의 실제 자원량 추정치와 어획량의 관계를 보여준다. 지속적으로 X^* 나 X_{MSY} 보다는 적은 수준의 자원량이 유지되어 왔던 것으로 추정된다. 특정 자원량에서의 자원의 성장함수 상의 값보다 더 많은 양을 어획하면 자원량의 추가적인 감소가, 그보다 더 적은 양을 어획하면 자원량의 회복이 이루어지는데, 이는 <그림 3>의 점들이 성장함수 곡선보다 위쪽에 위치하는지 아니면 아래쪽에 위치하는지의 문제이다. 특히 1990년대에 있어 해당 점들이 곡선의 위쪽에 위치하여 과잉 어로문제가 상대적으로 심했지만, 이후 자원량 관리가 강화되면서 그래프의 아래쪽으로 점들이 이동하는 현상이 관측된다.

IV. 요약 및 결론

본고는 한국 연근해 고등어의 생산 및 성장함수를 최대 엔트로피 기법을 이용하여 추정하였고, 이를 바탕으로 고등어의 연도별 자원량을 추정하였다. 수산자원은 물리적인 한계로 인해 자원량을 직접 추정하는 것이 어렵고, 기존의 통계분석에서는 대부분 정상 상태를 가정하기 때문에 완전한 형태의 자원의 동태변화를 파악하기 힘들다는 한계가 있었다. 본 연구에서는 최대 엔트로피 기법을 사용하여 기존의 연구가 가진 한계를 극복 하면서, 부트스트래핑을 사용하여 추정 파라미터의 통계적 유의성 또한 검정하였다. 또한 최적제어이론을 이용하여 사회적 할인율에 따른 고등어의 최적 자원량 및 어획량을 추정하여 고등어 자원 관리에 대한 방향을 제시하고자 하였다.

분석 결과에 따르면 고등어의 자원량은 1990년대 중반 최대로 증가하였다가 점차 감소하여 2000년대에는 1980년대와 유사한 수준을 보이는 것으로 나타났다. 자원량 대비 어획량을 비교하면 1990년대 이전 28.5%, 1990년대가 약 43.1%, 2000년 이후가 36.3%로 나타났는데, 이는 고등어가 1990년 이전 안정적으로 어획되다 1990년대 남획에 가까운 어획으로 자원량이 감소하였고, 이에 따라 총허용어획량제도, 자율관리어업제도 등 여러 수산 자원 관리 정책이 시행되어 최근 차츰 자원이 회복되고 있음을 의미한다. 그러나 본고가 추정한 사회적 최적 자원량이나 최대지속가능어획량을 유지할 수 있는 자원량 수준과 비교하면 현재의 자원스톡은 이 두 가지 기준치를 달성하지 못해 현재와 같은 혹은 그보다 더 강화된 어획량 관리제도가 필요함이 확인된다.

본 연구가 사용한 방법은 최소한의 자료만을 이용해서도 자원이용이 정상상태에 도달했다는 가정 없이 유용한 분석결과를 도출할 수 있음이 보여졌다. 그러나 본고는 해수 온도 외의 보다 많은 종류의 해양환경요인을 변수화하여 반영하지는 못했다는 한계가 있고, 연근해 자원이긴 하지만 경계 왕래성을 지녀 중국이나 일본 관리수역으로 이동하기도 하는 고등어의 특성상 주변국가의 영향까지 분석에 반영할 필요성이 있다는 점도 충족하지 못하였다. 분석의 현실성을 높일 수 있는 이러한 조치들은 모두 추가적인 정보와 자료를 필요로 하는데, 향후 관련된 학제적 연구가 필요할 것이다.

[References]

- 국립수산과학원, 「2015년 자원회복 대상종에 대한 자원상태 및 권고안」, 해양수산부, 2016.
- 국립수산과학원, 「한국 연근해 2007년도 TAC 대상어종에 대한 어획동향 분석 및 자원상태 평가」, 2006.
- 국립수산과학원, 『해양조사연보』, 각 연도.
- 국립수산물품질관리원 수산물안전정보서비스(FSIS), “[FTA 시대 수산물 경쟁력⑥] 고등어 경쟁력 향상 방안”, 2007.
- 기획재정부, 「예비타당성조사 수행 총괄지침」, 2018.04.17.
- 김기철·권오상, “한국 연근해 멸치자원량 추정-Maximum Entropy 기법의 응용”, 「자원·환경 경제연구」, 제9권 제2호, 2000, pp. 285~309.
- 김도훈, “총허용어획량 (TAC) 어업관리정책의 개선방안에 관한 연구-고등어 TAC 어업관리 정책을 사례로”, 「한국정책학회보」, 제13권 제2호, 2004, pp. 91~116.
- 김상겸, “사회적할인을 조정이 공공투자사업의 경제성 평가에 미치는 영향: 환경투자사업을 중심으로”, 「환경정책연구」, 제12권, 제4호, 2013, pp. 71~92.
- 남종오, “해밀토니안기법을 이용한대형선망어업의 고등어 전갱이최적어획량 결정”, 「해양 정책연구」, 제26권 제2호, 2011, pp. 21~46.
- 부경대학교, 국립수산진흥원, 「EEZ 체제하에서의 TAC 어업자원 관리기법 및 공동이용자원에 대한 쿼터시스템 개발에 관한 연구」, 해양수산부, 2000.
- 수산업협동조합중앙회, 『어업경영조사』, 각 연도.
- 수산정보포털(www.fips.go.kr: 접속일자: 2018.11.22.)
- 이지용·김성균·김길환, “전문가 대상 설문조사를 통한 우리나라 적정 사회적 할인을 추정”, 「에너지경제연구」, 제15권, 제1호, 2016, pp. 207~237.
- 조정희·이정삼·남종오, 「생물경제모형을 이용한 수산물 최적생산량 추정 및 활용에 관한 연구」, 한국해양수산개발원 연구보고서, 2009.
- 조정희·홍성걸·오순택·정명생·이상민, 「생물경제모형을 이용한 고등어자원의 최적어획량 추정에 관한 연구」, 한국해양수산개발원 연구보고서, 2001.
- 최종두·조정희, “협조적 게임이론을 이용한 국가 간 수산자원관리에 관한 연구”, 「Ocean and Polar Research」, 제30권 제2호, 2008, pp. 173~180.
- 최종우·황윤재, 『식품수급표』, 한국농촌경제연구원, 2018.

- 통계청, 『어업생산동향조사』, 각 연도. (<http://kosis.kr/>)
- 표희동, “우리나라 멸치자원량 추정을 위한 잉어생산모델과 최대엔트로피모델의 비교분석”, 『수산해양교육연구』, 제18권 제1호, 2006, pp. 19~30.
- 한국개발연구원, 「예비타당성 조사 수행을 위한 일반지침 수정·보완 연구(제 5판)」, 2008.
- 한국해양학회, 『해양과학용어사전』, 서울: 아카데미서적, 2005.
- 한국환경정책·평가연구원, 「우리나라 기후변화의 경제학적 분석(II)」, 2011.
- 해양수산부, 「2008년도 총허용어획량(TAC)제도 기본계획 및 시행계획」, 2007.
- 해양수산부, 「2016년도 총허용어획량의 설정 및 관리에 관한 시행계획」, 2016.
- 해양수산부, 『해양수산통계연보』, 각 연도.
- Bell, F. W., “Technological externalities and common-property resources: An empirical study of the US northern lobster fishery,” *Journal of Political Economy*, Vol. 80, No. 1, 1972, pp. 148~158.
- Berg, C. W., H. Madsen, U. Thygesen, and N. Anders, *Statistical aspects of fish stock assessment*, Technical University of Denmark, 2013.
- Bliemel, F. “Theil's forecast accuracy coefficient: a clarification,” *Journal of Marketing Research*, Vol. 10, No. 4, 1973, pp. 444~446.
- Bonfil, R., “Fishery stock assessment models and their application to sharks,” in J. A. Musick and R. Bonfil, eds., *Elasmobranch Fisheries Management Techniques*, pp. 205~240, FAO Fisheries Technical Paper, 474, 2005.
- Carpenter, J. and J. Bithell, “Bootstrap confidence intervals: when, which, what? A practical guide for medical statisticians,” *Statistics in Medicine*, Vol. 19, No. 9, 2000, pp. 1141~1164.
- Clark, C. W., *Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1990.
- Conrad, J. M., *Resource Economics*, 2nd ed., Cambridge University Press, 2010.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani, *An introduction to the bootstrap*, CRC press, 1994.
- Fishbase(www.fishbase.org: 접속일자: 2019.03.12.)
- Golan, Amos, George Judge, and Douglas Miller., *Maximum Entropy Econometrics*, John Wiley & Sons Ltd, 1996a.
- Golan, Amos, George Judge, and Larry Karp., “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*, Vol. 20, No. 4, 1996b, pp. 559~582.
- Gordon, H. S., "The economic theory of a common-property resource: the fishery," *The Journal of Political Economy*, Vol. 62, No. 2, 1954, pp. 124~142.
- Hall, P., J. L. Horowitz, and B. Y. Jing, "On blocking rules for the bootstrap with dependent data," *Biometrika*, Vol. 82, No. 3, 1995, pp. 561~574.
- Hyndman, R. J., and A. B. Koehler, "Another look at measures of forecast accuracy," *International journal of forecasting*, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 679~688.
- Kishida, T., T. Wada, S. Pascoe, and D. Greboval, "A relationship between fishing effort and fishing capacity in fluctuating fish stocks," in Pascoe, S and Greboval, D.F, eds., *Measuring Capacity in Fisheries*, pp. 305~314, FAO Fisheries Technical Paper, 445, 2003.
- Maunder, M. N. and K. R. Piner, "Contemporary Fisheries Stock Assessment: Many Issues Still Remain," *ICES Journal of Marine Science*, Vol. 72, No. 1, 2015, pp. 7~18,
- Pukelsheim, Friedrich, "The three sigma rule," *The American Statistician*, Vol. 48, No. 2, 1994, pp. 88~91.
- Puthy, E. M., and D. M. Kristofersson, *Marine fisheries resource management potential for mackerel fisheries of Cambodia*. Reykjavik: The United Nations University, 2007.
- Schaefer, Milner B, "Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries," *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, Vol. 1, No. 2, 1954, pp. 23~56.
- Secretariat, I.O.T.C. "Assessment of Indian Ocean narrow-barred Spanish mackerel (*Scomberomorus commerson*) using data poor catch-based methods," IOTC-2015-WPNT05-23, 2015.
- Secretariat, I.O.T.C. "Assessment of Indian Ocean narrow-barred Spanish mackerel (*Scomberomorus commerson*) using data poor catch-based methods," IOTC-2016-WPNT06-18, 2016.
- Tendaupenyu, I. H., and H. D. Pyo, "A Comparative Analysis of Maximum Entropy and Analytical Models for Assessing Kapenta (*Limnothrissa miodon*) Stock in Lake Kariba," *Environmental and Resource Economics Review*, Vol. 26, No. 4, 2017, pp. 613~639.
- Theil, H. *Applied Economic Forecasts*. Amsterdam:North Holland, 1966.

[부록 A]

예측치의 정확도를 측정하는 지표는 크게 1) 규모 종속(scale-dependent), 2) 규모 독립(scale-independent)로 구분된다(Hyndmand and Koehler, 2006). 이 중 가장 기본적으로 많이 이용되는 지표는 규모 종속적 지표인 ①평균절대오차(mean absolute error, MAE), ②평균제곱근오차(root mean squared error, RMSE)와 규모 독립적인 지표인 ③평균절대백분율오차(mean absolute percent error, MAPE) 등이 있다. 이뿐만 아니라, Theil(1966)은 예측치의 정확도(accuracy) 및 우수성(quality)을 측정하는 U-통계량을 제시한 바 있다(Bliemel, 1973).

$$① MAE = mean(|e_t|), e_t = Y_t - \hat{Y}_t \quad (Y_t: \text{관측치}, \hat{Y}_t: \text{예측치}, e_t: \text{오차})$$

$$② RMSE = \sqrt{mean(e_t^2)}$$

$$③ MAPE = mean(|p_t|), p_t = 100 \times \frac{(Y_t - \hat{Y}_t)}{Y_t}$$

$$④ U_1 = \frac{\left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \right]^{1/2}}{\left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T Y_t^2 \right]^{1/2} + \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \hat{Y}_t^2 \right]^{1/2}}$$

$$⑤ U_2 = \frac{\left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T-1} \left(\frac{\hat{Y}_{t+1} - Y_{t+1}}{Y_t} \right)^2 \right]^{1/2}}{\left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T-1} \left(\frac{Y_{t+1} - Y_t}{Y_t} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

본 연구에서는 최대생존가능자원량(K), 고유성장률(r), 연도별 자원량(X_t)의 범위 설정에 따라 각각의 추정량에 큰 차이가 있음을 파악하였고, 이러한 예측치 정확도를 바탕으로 최대생존가능자원량(K)은 [0, 2,000,000], 고유성장률(r) [0,1], 자원량(X_t)는 [0, 700,000] 범위로 설정하였다<부표 1>.

①~⑤의 지표는 그 값이 작을수록 예측치의 정확도가 높다고 할 수 있다. 따라서 1~12 모형 중 7번 모형을 선택하는 것이 가장 적합하나 7번 모형은 파라미터가 부트스트래핑을 통한 통계적 유의성을 확보하지 못해, 1번 모형으로 분석을 진행하였다.

〈부표 1〉 예측치 정확도 측정

모형	자원량(X) (단위: 만 톤)	최대생존 가능자원량(K) (단위: 만 톤)	고유 성장률(r)	①MAE	②RMSE	③MAPE (%)	⑤Theil U_1	⑥Theil U_2
1	70	200	1	17,010	30,318	12.041	0.1142	0.5114
2	100	200	1	17,521	31,754	12.331	0.1198	0.5336
3	150	200	1	17,925	32,751	12.577	0.1237	0.5491
4	70	300	1	17,086	30,479	12.085	0.1148	0.5136
5	100	300	1	17,581	31,885	12.363	0.1203	0.5354
6	150	300	1	17,957	32,838	12.590	0.1240	0.5502
7	70	200	2	16,985	30,319	12.027	0.1143	0.5117
8	100	200	2	17,456	31,836	12.287	0.1202	0.5358
9	150	200	2	17,914	33,005	12.565	0.1247	0.5545
10	70	300	2	17,082	30,504	12.083	0.1149	0.5140
11	100	300	2	17,527	31,864	12.323	0.1203	0.5352
12	150	300	2	17,904	32,948	12.557	0.1245	0.5534

[부록 B]

고등어는 수온에 민감한 어종이기 때문에, 산란기(4월-5월)의 평균 수온¹⁵⁾을 고등어 생산함수 모형에 반영하였다. 그러나 추정 결과 다른 변수들의 추정치가 크게 변하지 않고, 수온 변수 또한 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

$$\ln Y_t = \ln A + \beta \ln E_t + \omega \ln X_t + \gamma \ln T_t + \varepsilon_t \tag{A.1.1}$$

$$\gamma = p_1^{\gamma} \times (-1) + p_2^{\gamma} \times 0 + p_3^{\gamma} \times 1 \tag{A.1.2}$$

이때 T_t 는 산란기 평균 수온, γ 는 수온이 1% 증가했을 때 어획량 증가(감소)율을 의미한다.

〈부표 2〉 수온변수를 포함한 최대 엔트로피 및 부트스트래핑 추정 결과

파라미터	추정치(표준오차)	표준정규 신뢰구간
A	0.500 (0.004)	[0.499, 0.514]
β	0.534 (0.028)	[0.482, 0.589]
ω	0.607 (0.017)	[0.577, 0.643]
r	0.543 (0.010)	[0.519, 0.558]
K	1,094,950 (16,980)	[1,032,499, 1,100,826]
γ	0.076 (0.045)	[-0.020, 0.130]

주) 부트스트래핑 표준오차(bootstrapped standard error)를 의미한다.

15) 고등어의 산란장은 제주도 동쪽 부근이므로 국립수산물과학원의 『해양조사연보』에서 제공하는 우도(1976~2008년), 제주(2009~2015년) 관측점의 월별 표면 수온 자료를 이용하였다.

[부록 C]

〈부표 3〉 가격 및 비용 변화에 따른 각 균형점 변화

평균연도	가격(원)	비용(원)	최적균제상태 ($\delta = 0.0345$)		자유입어	
			자원량(X)	어획량(Y)	자원량(X)	어획량(Y)
3	1,690	38,485	730,726	131,958	250,854	105,004
5	1,859	41,766	728,174	132,419	244,734	103,185
7	1,816	39,741	723,241	133,292	232,991	99,591
10	1,653	36,156	723,148	133,308	232,772	99,522
15	1,499	30,941	712,477	135,111	207,818	91,425