

동태적 최적어업이론을 이용한 주요 연안어업의 온실가스 배출량 추정

The Estimation of Greenhouse Gas Emissions for Major Coastal Fisheries using Dynamic Optimal Fisheries Theory

전용한* · 남종오**

Jeon, Yong Han · Nam, Jong Oh

목 차

- I. 서 론
- II. 추정모형
- III. 실증분석
- IV. 요약 및 결론

〈Abstract〉

The purpose of this study is to estimate the greenhouse gas(GHG) emissions at the optimum horsepower level of major coastal fisheries for marine ecosystem management in South Korea by utilizing dynamic optimal fisheries theory. As a result of analysis, major coastal fisheries at recent 3 years has emitted 9.8% more GHG than dynamic optimum horsepower level. This result could be used as a reference when government raises target(5.2%) of reducing GHG in the fisheries sector to recover the coastal marine ecosystem and respond to climate change. In addition, if coastal fisheries had to reduce GHG by 9.8%, the proportion of emission right purchasing cost was analyzed to be up to 0.2% of fishing profits per fishing vessel. Even if the emission regulation was implemented, individual coastal fishing vessels would not be affected adversely to their business.

* 제1저자, 부경대학교 경제학부 강사, n14cruijff@naver.com

** 교신저자, 부경대학교 경제학부 부교수, namjo1234@pknu.ac.kr

Key words: Marine ecosystem, Coastal fisheries, Greenhouse Gas, Dynamic optimal fisheries theory, Emission right purchasing cost

I. 서 론

국제사회는 온실가스(GHG, Greenhouse Gas) 배출에 따른 기후변화의 심각성을 인지하고, 이러한 문제의 해결방안을 모색하기 위해 1988년 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)를 설립하였다. 그동안 IPCC는 1~5차에 걸쳐 평가보고서를 발간하였고, 이를 토대로 1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC) 체결, 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol) 채택, 2015년 파리협정(Paris Agreement)이 체결되어 모든 국가에 온실가스 감축 의무를 부과하고 있다.

정부도 국제사회의 온실가스 감축 노력에 동참하고자 2010년 「저탄소 녹색성장 기본법」을 제정하고, 2012년 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률(약칭: 배출권거래법)」을 제정하여 2015년부터 온실가스 배출권 거래제를 시행하고 있다. 또한, 정부는 2030년까지 온실가스 배출전망 대비 37%를 감축하는 목표를 수립하고, ‘2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵’을 발표했다.

상기 로드맵을 바탕으로 ‘제1차 기후변화대응 기본계획(2017~2036)’을 확정하였는데, 농림어업부문에서는 온실가스 배출전망 대비 5.2%의 감축 목표를 제시하였다. 그러나 어업부문 사업체는 「배출권거래법」 제8조(할당대상업체의 지정 및 지정취소)의 온실가스 배출량 기준에 미달하므로 상기 목표는 강제성이 없는 선언적 의미로만 남게 되었다. 그러나 정부의 온실가스 감축 목표량이 증가추세를 고려하면 온실가스 배출량 기준을 하향 조정하거나 타 산업과의 형평성 및 오염원인자부담원칙 등을 적용함으로써 어업부문도 향후 온실가스 배출규제를 받을 가능성은 여전히 열려 있다. 특히 연안어업의 경우 국토에 근접한 주변 해역에서 대부분의 조업이 이루어짐에 따라 온실가스 배출의 원인자부담원칙이 적용될 가능성이 크다.

이에 본 연구는 연안어업이 온실가스 배출규제의 대상이 될 수 있다는 가정하에

Gompertz 지수성장함수에 기반한 생물경제모형 및 동태적 최적화 이론을 이용하여 주요 연안어업의 온실가스 최적배출량과 배출권 구입비용을 가상으로 추정해보고자 한다. 이를 위해 온실가스 배출의 주원인인 연료 소모와 관련성이 높은 마력수를 대상으로 해양생태계의 자원상태, 경제적 변수, 사회적 할인율을 고려한 동태적 최적수준의 마력을 추정한다. 이후 동태적 최적마력과 최근 마력에서의 온실가스 배출량을 비교하여 가상의 온실가스 배출 저감량을 도출하고, 온실가스 배출권 가격을 활용하여 온실가스 배출권 구입비용을 정량적으로 도출해보고자 한다.

본 연구의 사회과학 선행연구로 생물경제모형을 이용하여 정태적 수준에서의 고등어 어획량 당 탄소배출량과 기후변화의 영향을 분석한 최종두(2017)의 연구와 Park J-A 외(2015)의 한국 근해어업의 온실가스 배출량을 추정한 연구가 존재한다. 아울러 본 분석에 이용한 Gompertz 성장함수에 기반한 동태적 최적어업이론을 활용하여 삼치와 갈치를 분석한 조훈석·남종오(2020), 남종오·조훈석(2018)의 연구가 있다. 자연과학 선행연구로는 전과정평가방법을 이용해 연안어업의 온실가스 배출량을 추정한 김현영 외(2017)의 연구가 존재한다. 그리고 이석형 외(2018)의 연근해자망과 통발어선의 실측한 온실가스 배출계수와 기존 계수를 비교한 연구와 김필수 외(2014)의 운항특성을 반영한 분류체계별 연근해어선의 온실가스 배출계수를 제시한 연구가 있다. 이외에도 어업 및 수산물 가공업을 대상으로 온실가스 배출량을 산정한 Winther 외(2009), Ziegler 외(2009), Ziegler (2007), Ziegler·Hausson (2003) 등의 연구도 있다.

선행연구를 종합해보면 동태적 최적어업이론을 활용한 연구들은 어종을 대상으로 최적 어획량, 어획노력량, 자원량을 추정하였으나, 상기 이론을 이용해 연안어업을 분석한 연구는 없는 실정이다. 또한 근해 및 연안어업의 온실가스 배출량을 추정한 선행연구들은 분석 당시 어선의 마력수준에서 배출량을 추정하는 데 그치고 있다.

따라서 본 연구는 상술한 사회과학 및 자연과학 선행연구에 비해 몇 가지 차별성이 존재한다. 첫째, Gompertz 지수성장함수에 기초한 잉여생산모형과 동태적 최적화이론을 적용해 자원상태, 경제적 변수, 사회적 할인율을 반영하여 어업이윤의 순현재가치를 극대화하는 연안어업의 동태적 최적수준의 마력을 도출하였다. 둘째, 온실가스 배출과 연관성이 높은 연안어업의 마력수를 대상으로 동태적 최적마력수준에서의 이산화탄소(CO_2), 메탄

(CH_4), 아산화질소(N_2O) 배출량을 가상추정하여 현재 마력수준에서의 배출량과 비교하고, 온실가스 감축량을 제시하였다.

본 연구의 구성으로 II장에서는 생물경제모형, 동태적 최적화 이론과 온실가스 종류별 배출량 산정식을 제시한다. III장에서는 연안어업의 동태적 최적마력수준을 도출하고, 동마력에서 온실가스 세 종의 배출량을 추정하여 현재 마력에서의 배출수준과 비교·분석한다. 끝으로 IV장에서는 분석결과를 요약하고, 본 연구의 의의 및 향후 연구 방향 등을 언급할 것이다.

II. 추정모형

본 장에서 서술할 연안어업의 동태적 최적마력수준에서의 온실가스 배출량 분석과정은 어획노력량 표준화, 잉여생산모형 분석, 동태적 최적어업어획함수, 온실가스 배출량 추정의 4단계로 구성된다.

Ⅰ 그림-1. 주요 연안어업의 온실가스 배출량 추정 분석체계도 Ⅰ



주 : r (어자원의 본원적 성장률), q (어획능력계수), k (어자원의 환경수용능력), p (단위당 어획물의 가격), c (마력당 어업비용), δ (사회적 할인율)

1. 수산자원평가 모형의 기본가정

본 분석의 기본 가정은 연안자망(CGN, Coastal Gill Net), 연안통발(CT, Coastal Trap), 연안복합(CCF, Coastal Composite Fishery), 연안개량안강망(CSN, Coastal Stow Net)이 조업구역 내에서 한 어업의 어획량이 증가하면 다른 어업에서는 어획량이 감소하

는 경제적 상호작용이 존재한다는 것이다. 여기서 어획량은 분석대상 업종으로 제한하였는데, 이는 분석대상이 아닌 어업의 어획량이 분석대상에 포함되면, 온실가스 배출량이 과대 추정될 수 있기 때문이다.

2. 어획노력량 표준화

본 연구에서는 어구와 어법이 서로 다른 네 개 어업의 어획노력량에 영향을 미치는 다른 요인변수의 영향을 분리시키고, 개별 어획노력량을 동일한 단위로 표준화하기 위해 Gavaris (1980)의 일반선형모형(GLM, General Linear Model)을 이용하였다. 식 (1)에서 U_g 는 요인변수 수준의 기준 단위노력당어획량(CPUE)을 나타내며, g 는 연도, 어업, 어구, 어장 등을 의미한다. P_{ij} 는 i 에서 j 에 관한 상대적 어획능력으로 i 는 요인변수, j 는 요인변수의 수준을 의미한다. 요인변수별 기준이 되는 수준에 대해 P_{ij} 는 1로 정의한다. 분석자료가 요인변수 i 의 j 수준을 의미할 때 가변수(Dummy Variable) X_{ij} 는 1로 표시하며, 그렇지 않으면 0으로 나타낸다. 로그정규분포를 따르는 CPUE의 일반모형에서 ϵ 는 평균이 0이고, 일정한 분산인 σ^2 을 가지는 정규확률변수이다.¹⁾

$$\ln U = \ln U_g + \sum_i \sum_j X_{ij} \ln P_{ij} + \epsilon \quad (1)$$

연안자망, 연안통발, 연안복합, 연안개량안강망의 어획노력량을 표준화하기 위하여 요인변수로 어업과 연도를 선정하고, 개별 요인변수의 수준으로 네 개 어업과 42년 동안의 기간(1977~2018년)을 설정하였다. 위의 변수와 개별수준을 조합하여 가변수가 1 또는 0 인지를 결정한 후, 가변수들로 회귀식을 구성해 최소자승법(OLS, Ordinary Least Squares)을 이용하여 네 개 어업의 CPUE와 어획노력량 단위를 표준화한다.²⁾ 네 개 어업의 표준화된 어획노력량은 개별 어업의 추정된 CPUE와 어획량에 의해 추정된다. 여기서 네 개 어업의 표준화된 총 어획노력량은 개별 어업의 추정된 어획노력량을 합하여 도출된다.

1) Quinn and Deriso(1999), p.560, 전용한·남종오(2018), p.254.

2) Quinn and Deriso(1999), p.560.

3. CYP 모형

잉여생산모형(Surplus Production Model)은 Verhulst (1838)의 연구에서 처음 제시되었으며, 수산자원의 성장량만큼 어획한다면 균형상태를 유지하여 지속가능한 수준에서 어업자원을 이용할 수 있다는 균형이론에서 시작한다. 동 모형은 어자원의 출생률, 사망률, 연령별 정보 등 생물학적 자료 및 어획능률계수에 대한 접근이 차단된 경우에 어획량과 어획노력량 자료로 최대지속적 어획량, 최대지속적 어획노력량, 최대지속적 자원량 추정이 가능하다는 장점이 있다. 특히 Clarke와 Yoshimoto, Pooley는 Gompertz 지수성장함수(Exponential Growth Function)에 기반을 둔 Fox 모형(1970)을 토대로 CYP(Clarke, Yoshimoto, Pooley) 모형(1992)을 개발하였는데, Fox 모형의 $\frac{\Delta U}{U}$ 를 $\frac{1}{U} \frac{dU}{dt}$ 로 가공하여 식 (2)를 도출하였다. 식 (2)의 U_t 는 t 시점의 CPUE, F 는 어획노력량, r 은 어자원의 본원적 성장률, q 는 어획능률계수, k 는 어자원의 환경수용능력을 의미한다.

$$\ln \left[\frac{U_{t+1}}{U_t} \right] = r \ln(qk) - r \int_t^{t+1} \ln(U) dt - qF \quad (2)$$

Taylor 급수 근사를 사용하여 식 (2)에 $\int_t^{t+1} \ln(U) dt$ 의 적분 추정치 $\ln(\bar{U})$ 를 도출한 후 식 (2)에 대입하고, Schnute이 가정한 $\bar{U}_t \cong \sqrt{U_t U_{t+1}}$ 을 적용하면 식 (3)으로 정리 가능하다. 식 (3)의 \bar{U}_t 는 t 시점의 평균 CPUE, \bar{F}_t 는 t 시점의 평균 어획노력량을 나타낸다.

$$\ln(\bar{U}_{t+1}) = \frac{2r}{2+r} \ln(qk) + \frac{2-r}{2+r} \ln(\bar{U}_t) - \frac{q}{2+r} (\bar{F}_t + \bar{F}_{t+1}) \quad (3)$$

최소자승법으로 식 (3)의 상수항인 $\frac{2r}{2+r} \ln(qk)$, 독립변수의 계수인 $\frac{2-r}{2+r}$, $\frac{q}{2+r}$ 를 추정한 후, 삼원연립방정식을 풀이하여 동태적 최적어업어획함수 분석에 필요한 q , k , r 을 도출한다.

4. 최적어획량 추정모형의 기본가정

아래 식 (4)의 Gompertz 지수성장함수에 기초한 최적어획량 추정모형에서 $G(X_t)$ 는 t 시점에서 어업자원의 성장량이며, X_t 는 t 시점에서 어업자원량, \dot{x} 는 시간의 흐름에 따라 달라지는 자원량을 나타낸다.³⁾ 식 (4)의 지수성장함수에 어업인의 t 시점에서 어획량을 차감하면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$G(X_t) = rX_t \ln\left(\frac{k}{X_t}\right), \text{ where } \frac{dX_t}{dt} = \dot{x} \quad (4)$$

$$\frac{dX}{dt} = G(X_t) - Y_t \quad (5)$$

Y_t 는 t 시점의 어획노력량(F_t)과 X_t 에 의존하는 어획함수이며, 어획능력계수인 q 와 어획노력량의 특성을 반영하는 승수 α 및 수산자원의 특성을 고려한 승수 β 를 이용해 아래의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 어획함수의 α 와 β 를 각각 1로 가정한 후 선형함수의 형태로 나타낸다. 식 (7)은 어획비용함수 $TC(F_t)$ 로 단위노력당 어획비용(c)에 F_t 를 곱하여 도출한다.

$$Y_t = qF_t^\alpha X_t^\beta \quad (6)$$

$$TC(F_t) = cF_t \quad (7)$$

3) 남종오·조훈석(2018), p.240.

5. 동태적 최적어업어획함수⁴⁾

Clark·Munro (1975)는 어업자원량을 어업의 자본(Stock)이라 가정하고, 시간의 흐름에 따른 어획활동에서 생성되는 사회적 이익을 극대화하는 동태적 최적이론을 제시하였다.⁵⁾ 동태적 최적화 이론의 함수와 제약조건(subject to)은 식 (8)과 같다.

$$Max NPV = \int_0^{\infty} [pY_t - cF_t]e^{-\delta t} dt = \int_0^{\infty} [pqF_tX_t - cF_t]e^{-\delta t} dt \quad (8)$$

$$(s. t.) \quad dX/dt = \dot{x}, X(0) = X_0, X_t \geq 0, 0 \leq Y_t \leq Y_{t_{max}}$$

이때, F_t 는 t 시점의 어획노력량, Y_t 는 t 시점의 어획량, δ 는 사회적 할인율을 의미한다. $pY_t - cF_t$ 는 어획활동을 통해 t 시점에서 얻게 되는 어업이익이며, X_0 는 초기 어업자원량을 나타내고, $Y_{t_{max}}$ 는 t 시점에서 최대어획량을 의미한다. 식 (8)의 제약조건하에서 목적함수의 최적화를 위한 현재가치 해밀토니안 함수식 H_c 는 식 (9)와 같다.

$$H_c = [pqF_tX_t - cF_t] + \lambda[G(X_t) - qF_tX_t] \quad (9)$$

식 (9)의 λ 는 그림자가격(Shadow Price)으로 어업자원의 미래가치를 현재가치로 환산한 할인율을 의미한다. 식 (9)의 X_t 는 상태변수를 뜻하며, F_t 는 제어변수를 의미한다. H_c 의 최적해는 H_c 를 어획노력량(F)과 자원량(X)으로 편미분한 1계 필요조건(First Order Necessary Condition)에 F 를 편미분하여 얻을 수 있는 상태효율조건식(SEC, Static Efficiency Condition)의 λ 를 t 로 편미분하여 추정할 수 있다. 그리고 동태효율조건식(DEC, Dynamic Efficiency Condition)은 H_c 를 X 에 대해 편미분한 1계 필요조건으로부터 도출이 가능하다.

4) 동태적 최적어업어획함수의 도출과정은 남종오(2011), pp.27-29, 남종오 외(2015), pp.63-64, 남종오·조훈석(2018), pp.240-241를 참고하여 작성하였다.

5) Clark·Munro (1975), pp.95, 최종열·김도훈(2011), pp.2.

$$\text{SEC: } \frac{\partial H}{\partial F} = pqX - c - \lambda qX = 0, \quad p - \frac{c}{qX} = \lambda \quad (10)$$

$$\text{DEC: } \frac{\partial H}{\partial X} = pqF + \lambda G'(X) - \lambda qF = -\dot{\lambda} + \delta \lambda \quad (11)$$

상태효율조건식(SEC)인 식(10)의 λ 를 t 로 편미분하면 식 (12)와 같다.

$$\dot{\lambda} = \frac{c}{qX^2} \dot{x} = \frac{c}{qX^2} [G(X - qFX)] \quad (12)$$

위의 식 (10), (11), (12)를 정리하면 최적어업자원량을 추정하기 위해 필요한 황금률 (Golden rules)을 도출할 수 있는데, 이는 식(13)과 같다.

$$G'(X^*) + G(X^*) \frac{c}{X^*(qpX^* - c)} = \delta \quad (13)$$

식 (13)의 $G'(X^*)$ 는 어업자원의 한계성장률이며, $G(X^*) \frac{c}{X^*(qpX^* - c)}$ 는 어업자원의 한계효과를 의미한다. 식 (13)과 같이 어업자원의 한계성장률과 어업자원의 한계효과를 더한 $G'(X^*) + G(X^*) \frac{c}{X^*(qpX^* - c)}$ 가 사회적 할인율(δ)과 같을 때, 최적어업자원량 수준이 달성된다.

식 (13)에 식 (4)의 Gompertz의 지수성장함수를 대입하여 최적어업자원량(X^*)을 도출하게 되며, 이를 정리한 결과는 식 (14)와 같다.

$$X^* = \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{c}{pq} + \frac{\delta}{r \ln(\frac{k}{X^*})} \right\} \pm \sqrt{\left\{ \left(\frac{c}{pq} + \frac{\delta}{r \ln(\frac{k}{X^*})} \right)^2 - 4 \left(\frac{\delta c}{pq r \ln(\frac{k}{X^*})} + \frac{c}{pq} \right) \right\}} \right] \quad (14)$$

식 (14)를 통해 최적자원량인 X^* 가 도출되면 어업자원의 평형 상태를 의미하는 식인

$\dot{x} = G(X^*) - Y^* = 0$ 으로부터 어업의 최적어획노력량(F^*)을 도출할 수 있는데 이는 식 (15)와 같다.

$$F^* = \frac{r \ln\left(\frac{k}{X^*}\right)}{q} \quad (15)$$

앞서 CYP 모형을 통해 추정한 어획능력계수(q)와 X^* , F^* 를 어획함수인 식 (6)에 대입하면 식 (16)과 같은 최적어획량(Y^*)을 도출할 수 있다.

$$Y^* = qF^* X^* \quad (16)$$

6. 온실가스 배출량 산정

본 연구의 분석대상인 연안자망, 연안통발, 연안복합, 연안개량안강망의 2018년 기준 어선척수는 35,149척으로 어선의 제원, 마력, 톤급에 따라 엔진의 부하율이 다양하다. 그리고 선장의 어로경험에 따라 어선의 조업 패턴, 어선의 활동도 등 운항특성도 상이하다. 또한, 어선에 설치된 무선설비 장치(V-PASS)를 임의로 조작하는 경우가 있어 정확한 엔진 가동시간을 산정하기 어렵다.

이러한 연안어업의 특성에서 기인한 자료의 한계로 인하여 연안어업에 폭넓게 적용 가능한 Tier1 온실가스 배출량 산정방법론을 본 연구에서 사용하였다. Tier1 온실가스 배출량 산정방법론은 유종별 연료소비량과 온실가스 종류에 따른 유종별 배출계수를 이용하여 유종별·온실가스 종류별 배출량을 산정할 수 있다. 석유류를 연소하면 온실가스 6종 중 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)를 배출하는데 이를 산정하기 위해 유류사용량은 2016~2018년 수협 연안어업 업종별 유류공급량으로 대응하였고, CO_2 배출량 산정식은 온실가스종합정보센터에서 제안하는 산정식을 사용하였으며, CH_4 , N_2O 배출량 추정은 ‘2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서’의 산정식을 활용하였다.

아래의 식 (17)은 연안어업의 업종별·유종별 CO_2 배출량 산정식으로 FS 는 유류공급

량을 의미하며, NCV 는 순발열량, CEF 는 탄소배출계수를 나타낸다. i 는 자망, 통발, 복합, 개량안강망 등 네 개 업종이며, j 는 유종으로 휘발유와 경유를 의미한다. 10^{-6} 은 CO_2 배출량을 톤으로 환산하기 위한 상수이며, $\frac{44}{12}$ 는 탄소원자량에 대한 이산화탄소 분자량으로 탄소배출량을 CO_2 배출량으로 환산하는데 사용된다.

$$CO_2 \text{ Emissions}_{ij}(t) = FS_{ij} \times NCV_j \times CEF_j \times 10^{-6} \times \frac{44}{12} \quad (17)$$

다음의 식 (18)과 (19)는 연안어업의 업종별·유종별 CH_4 , N_2O 배출량 산정식으로 CF_j 는 전환계수, $EF_j(CH_4)$ 와 $EF_j(N_2O)$ 는 CH_4 와 N_2O 의 배출계수이다. i 는 연안업종(자망, 통발, 복합, 개량안강망), j 는 유종(휘발유, 경유), 10^{-3} 은 CH_4 , N_2O 배출량을 톤으로 환산하기 위한 상수이다. 식 (18)과 (19)의 41.868은 열량 단위인 TOE로 표현된 유류공급량을 Joule로 환산하는 계수를 의미한다.

$$CH_4 \text{ Emissions}_{ij}(t) = FS_{ij} \times 41.868 \times CF_j \times EF_j(CH_4) \times 10^{-3} \quad (18)$$

$$N_2O \text{ Emissions}_{ij}(t) = FS_{ij} \times 41.868 \times CF_j \times EF_j(N_2O) \times 10^{-3} \quad (19)$$

III. 실증분석

1. 자료분석

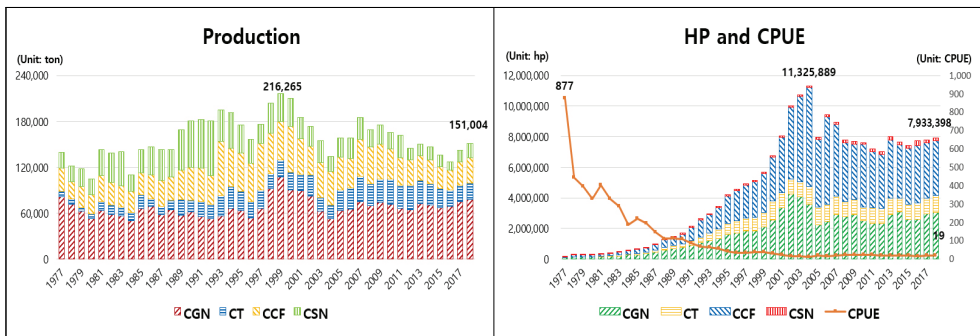
본 연구의 분석대상인 연안자망(CGN), 연안통발(CT), 연안복합(CCF), 연안개량안강망(CSN) 등 네 개 연안어업의 1977~2018년 기간동안 어획량(톤)과 마력수·CPUE(kg/마력) 추이는 그림-2와 같다.

우선, 주요 연안어업의 같은 기간 어획량을 살펴보면, 1999년 216,265톤으로 집계되었으나 과잉 어획노력량 투입, 기후변화, 해양환경 악화 등의 복합적 요인으로 인해 2004년 134,625톤으로 급격히 감소하였다. 2018년 151,004톤으로 어획량이 소폭 증가하였는데, 이는 어선감척사업과 연안바다목장 사업, 종자방류 등의 정책효과가 어느 정도 영향을 미쳤기 때문으로 추정된다.

다음으로, 연안어업의 마력수는 1977년부터 급격히 증가하여 2004년 11,325,889마력을 기록하였으나, 2004년부터 연안어업을 대상으로 감척사업을 실시하여 2018년 7,933,398마력으로 어선세력이 축소되었다. 마지막으로, 주요 연안어업의 CPUE는 1977년 877에서 급속도로 감소하여 2018년 19로 나타났다.

이는 상술한 어획량 감소요인으로 1977년 대비 최근 어획량이 정체된 반면, 당시 국가 경제가 고속성장하면서 무동력이던 연안어선의 동력화가 진행되었기 때문으로 보인다. 또한 분석에 이용한 어획량과 어획노력량 자료의 기초통계량은 아래의 표-1과 같다.

■ 그림-2. 주요 연안어업의 어획량과 마력수·CPUE 추이(1977~2018년) ■



자료: 국가통계포털(<http://kosis.kr>) 어업생산통계; 해양수산부 해양수산통계연보 각 연호 재가공.

■ 표-1. 분석에 활용한 자료의 기초통계량 ■

구분	관측치	평균	중앙값	표준편차	최소값	최대값
어획량(톤)	42	158,333	155,800	26,114	104,393	216,265
어획노력량(마력)	42	4,821,702	5,046,679	3,539,407	158,966	11,325,889

2. 어획노력량 표준화 결과

연안자망, 연안통발, 연안복합, 연안개량안강망으로 구성된 네 개 연안어업의 마력수를 표준화하여 어획노력량 변수로 이용하기 위해 개별어업의 연도별 CPUE에 자연로그를 취한 후, Gavaris의 일반선형모형을 구성하여 표준화를 실시하였다. 표-2의 회귀분석 결과, 모든 연도별 변수와 가변수, 상수항이 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하였다. 결정계수인 R^2 는 0.9506으로 모형의 설명력이 약 95%이었으며, 조정된 결정계수인 \bar{R}^2 는 0.9329이고 모형의 설명력이 약 94% 이상으로 높은 수준을 나타내었다. 아울러 F -통계량도 1% 유의수준에서 통계적으로 유의적인 것으로 분석되어 통계적으로 유의한 모형인 것을 확인할 수 있다.

■ 표-2. Gavaris 일반선형모형 검정 결과 요약 ■

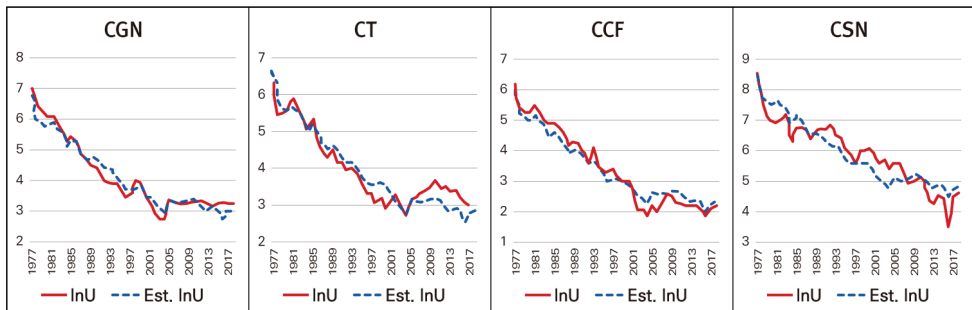
식	R^2 (\bar{R}^2)	F -Statistic (Prob.)	유의적 변수의 개수 (Prob. < 0.01)
일반선형	0.9506 (0.9329)	53.7877*** (0.0000)	45

주1: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 유의함을 의미한다.

주2: Gavaris 일반선형모형의 상세 검정 결과는 표 부록-2에 기재하였다.

그림-3의 4개 어업에서 연도별 로그화된 CPUE 관측치와 CPUE 추정치가 수치상으로는 소폭 차이가 존재하는 것으로 보이지만 연도가 지남에 따라 관측치와 추정치는 동일하게 감소하는 추세를 나타내고 있다.

■ 그림-3. 주요 연안어업의 업종별 로그화된 CPUE 관측치와 추정치 비교 ■



3. 잉여생산모형 분석 결과

로지스틱성장함수 또는 Gompertz 지수성장함수를 기반으로 한 잉여생산모형의 선정을 위해 우선 표준화된 CPUE를 종속변수로 두고, 추정된 어획노력량을 독립변수로 지정하여 회귀분석을 실시해야 한다. 이는 추정된 어획노력량과 표준화된 CPUE의 관계가 선형 또는 지수형태인지에 따라 성장함수를 달리 적용해야 하기 때문이다.

이에 표-3에 작성한 회귀분석 결과, 지수모형의 \overline{R}^2 가 0.9820으로 로지스틱모형에 비해 상대적으로 높았으나 두 모형의 F -통계량, 상수항과 어획노력량(Effort)은 1% 유의수준 하에서 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다. 따라서 지수모형과 로지스틱모형에 기초한 잉여생산모형을 분석하였다.

표-3. 주요 연안어업의 로지스틱 및 지수모형 분석 결과

식	R^2 (\overline{R}^2)	F -Statistic (Prob.)	C	Effort
			Coefficient (Prob.)	Coefficient (Prob.)
로지스틱	0.5227 (0.5107)	43.7991*** (0.0000)	250.6782*** (0.0000)	-0.0000*** (0.0000)
지수	0.9824 (0.9820)	2236.9420*** (0.0000)	17.8566*** (0.0000)	-0.9320*** (0.0000)

주: *, **, *** 는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 유의함을 의미한다.

로지스틱성장함수를 기반으로 한 Schaefer, Schnute, WH 모형과 Gompertz 지수성장함수에 기초한 Fox, CYP 모형 등 5개 잉여생산모형의 분석 결과는 표-4에 제시하였다. 5개 잉여생산모형 중 CYP 모형을 제외한 4개 모형의 R^2 및 \overline{R}^2 는 모형의 설명력이 20% 이하로 나타났다. 통계적으로 비교적 우수한 CYP 모형의 분석 결과, R^2 은 0.9686, \overline{R}^2 는 0.9669로 모형의 설명력이 약 97%로 추정되었으며, 모형의 F -통계량과 상수항인 C , 독립변수인 X_1 과 X_2 의 계수 모두 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하였다.

5개 잉여생산모형의 예측력을 평가해보기 위해서 모형별 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)와 RMSE(Root Mean Squared Errors)를 도출하였다. 관측치에 대한 추

정치와 관측치간 차이의 비율을 합산한 후, 기간으로 나눈 MAPE 추정 결과에서는 CYP 모형이 26으로 가장 낮았다. 또한, 관측치와 추정치의 차이를 제곱한 후, 이를 합하여 기간으로 나눈 평균제곱오차(MSE, Mean Squared Errors)의 제곱근인 RMSE 역시 CYP 모형이 49,359로 가장 낮았다.

표-4. 5개 잉여생산모형 분석 결과

모형	R^2 (\bar{R}^2)	F-stat. (Prob.)	C	X_1	X_2	MAPE	RMSE
			Coef. t-stat. (Prob.)	Coef. t-stat. (Prob.)	Coef. t-stat. (Prob.)		
Schaefer	0.1717 (0.1146)	3.0068 (0.0651)	-0.2237 -1.3521 (0.1868)	0.0004 0.2812 (0.7806)	0.0000 1.2391 (0.2252)	815	1,494,148
Schnute	0.0918 (0.0312)	1.5158 (0.2360)	-0.2116 -0.9049 (0.3727)	0.0002 0.1319 (0.8960)	0.0000 0.8330 (0.4114)	238	444,038
WH	0.1868 (0.1326)	3.4453 (0.0450)	-0.3397* -1.7107 (0.0975)	0.0011 0.7289 (0.4717)	0.0000 1.7881 (0.0839)	178	298,113
Fox	0.1713 (0.1141)	2.9963 (0.0656)	-0.3846 -0.4640 (0.6461)	0.0410 0.2483 (0.8057)	0.0000 0.6681 (0.5094)	86	140,922
CYP	0.9686 (0.9669)	585.9768 (0.0000)	1.7033*** 3.0235 (0.0045)	0.6621*** 6.5756 (0.0000)	-0.0000*** -2.6848 (0.0107)	26	49,359

주 1: Schaefer모형: $C=r$, $X_1 = \frac{r}{qk}$, $X_2 = q$, Schnute모형: $C=r$, $X_1 = \frac{r}{qk}$, $X_2 = q$

WH모형: $C=r$, $X_1 = \frac{r}{qk}$, $X_2 = q$, Fox모형: $C=r \ln(qk)$, $X_1 = r$, $X_2 = q$

CYP모형: $C = \frac{2r}{2+r} \ln(qk)$, $X_1 = \frac{2-r}{2+r}$, $X_2 = \frac{q}{2+r}$

주 2: $MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i}}{n} \times 100$, $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$

(여기서, Y_i : 실제어획량, \hat{Y}_i : 추정된 어획량, n : 기간)

주 3: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 유의함을 의미한다.

표-4의 결과에 따라서 통계적으로 비교적 유의하며, 예측력이 우수한 CYP 모형을 분석에 활용하기 전 고전적 선형회귀 모형의 기본가정 중 하나인 ‘오차항은 동분산이며, 상관관계가 없다’라는 가정을 확인해볼 필요가 있다.⁶⁾

따라서 CYP 모형의 오차항에 대한 이분산 및 자기상관 유무를 검정하기 위해서 White 이분산 및 LM 검정을 실시하였다. 표-5의 White 이분산 검정통계량은 2.0043이며, 유의확률이 0.3671로 귀무가설인 ‘동분산이다.’를 10% 유의수준 하에서도 채택함으로써 이분산이 존재하지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 자기상관 검정통계량인 LM 통계량은 0.5819이며, 유의확률이 0.7475로 귀무가설인 ‘자기상관이 없다.’를 10% 유의수준 하에서 채택하여 자기상관이 없는 것으로 분석되었다.

▮ 표-5. CYP 모형의 이분산 및 자기상관 검정 결과 ▮

모형	White Statistic (Prob.)	LM Statistic (Prob.)
CYP	2.0043 (0.3671)	0.5819 (0.7475)

4. 동태적 최적수준 추정 결과

본 연구의 분석대상인 주요 연안어업의 동태적 최적수준을 분석하기 위해서 CYP 모형을 통해 기술적·생물적 계수인 어획능력계수(q), 어자원의 환경수용능력(k), 어자원의 본원적 성장률(r)을 도출하였다. 여기에 추가적으로 경제적 변수인 마력당 어업비용(c), 단위당 어획물의 가격(p)과 사회적 할인율(δ)이 요구된다.

동태적 최적수준 분석에 필요한 경제적 변수는 2016년부터 2018년까지 최근 3년 동안의 자료를 이용하였다. 첫째, 분석대상의 c (원/마력)는 2017년부터 2019년까지의 ‘연안어업 실태조사’ 비용자료에 2015년을 100으로 한 수산물 생산자물가지수를 이용하여 실질화한 후, 연도별 총 어업비용을 총 마력수로 나누고 가중평균하여 도출하였다. 둘째, 분석대상의 p (원/kg)는 통계청 어업생산동향조사의 생산금액에서 생산량으로 나눈 연도별 금액을 수

6) Kennedy (2003), pp.48-52.

산물 생산자물가지수를 이용하여 2015년 100을 기준으로 실질화한 후 가중평균하여 산정하였다. 셋째, 동태적 최적수준 분석에 필요한 δ 는 「예비타당성조사 수행 총괄지침」 제52조(사회적 할인율)를 활용하였다.

표-6에서는 주요 연안어업의 동태적 최적수준 분석에 활용한 계수 및 변수를 정리하였다. 동태적 최적수준 분석에는 $q=0.000001$, $k=1,358,410,594\text{kg}$, $r=0.4065$, $c=177,987\text{원/마력}$, $p=8,468\text{원/kg}$, $\delta=4.5\%$ 를 적용하여 최적어획량, 최적어획노력량, 최적자원량을 도출하고자 한다.

▮ 표-6. 동태적 최적수준 분석에 활용한 기술적·생물적 계수 및 경제적 변수 ▮

q	$k(\text{kg})$	r	$c(\text{원/마력})$	$p(\text{원/kg})$	$\delta(\%)$
0.0000001	1,358,410,594	0.4065	177,987	8,468	4.5

어업을 영위하면서 시간이 변함에 따라 발생하는 어업이윤의 순현재가치를 극대화하는 어획량(Y^*), 어획노력량(F^*), 자원량(X^*)을 도출하기 위해서는 식 (14)의 X^* 를 찾아야 한다. 식 (14)의 X^* 추정한 결과, 최적자원량인 X^* 는 약 184,577톤으로 도출되었다. 이후 식 (15)를 통해 최적어획노력량인 F^* 는 약 7,125,751마력으로 분석되었고, 식 (16)을 통해 최적어획량인 Y^* 는 약 149,779톤으로 도출되었다.

우선 표-7의 동태적 최적어획노력량과 최근 3년 평균(2016~2018) 어획노력량을 비교해보면, 주요 연안어업은 동태적 최적수준에 비해 695,249마력 높은 것으로 나타나 2004년 이후 꾸준히 연안어업을 대상으로 감척사업이 실시 중임에도 불구하고 여전히 과잉 어획노력량이 투입됨으로써 경쟁적 조업을 벌이고 있는 것으로 분석되었다. 이에 반해 최근 3년 평균(2016~2018) 어획량은 동태적 최적어획량에 비해 9,757톤 낮은 것으로 나타났다. 이는 그동안 어획노력량이 최고 1,133만 마력까지 과잉 투입된 경쟁적 조업과 함께 이들 연안어업이 배출하는 온실가스로 인한 기후변화와 해양환경 변화 등이 어획량 감소에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.)

7) 연안어업실태조사(2017)에서는 연안어업의 과잉어획노력량 투입을 개선하기 위해 연안어선을 감척해야 하는 것으로 분석되었으며, 최종두(2017)에 따르면 온실가스 배출에 따른 기후변화 및 해양환경이 변화할 경우 어류의 생체량이 6~66.9%

■ 표-7. 주요 연안어업의 동태적 최적 수준과 최근 3년 평균 수준 비교 ■

구분	어획량(톤)	어획노력량(마력)
동태적 최적 수준	149,779	7,125,751
최근 3년 평균(2016-2018)	140,022	7,821,000

5. 온실가스 배출량 추정 결과

표-8의 주요 연안어업 온실가스 배출량 산정에 활용한 CO_2 순발열량은 「에너지법 시행규칙」 [별표]의 수치를 사용하였고, 배출계수는 ‘2018년 승인 국가 온실가스 배출·흡수 계수’의 자료를 참조하였다. CH_4 와 N_2O 배출계수는 ‘2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서’의 자료를 활용하였고, 전환계수는 「에너지법 시행규칙」 [별표]의 순발열량을 총발열량으로 나눠서 산정하였다.

■ 표-8. 주요 연안어업의 온실가스 배출량 산정에 이용한 변수 ■

구분	유종	순발열량(MJ/l)	배출계수(kg/TJ)	전환계수
CO_2	휘발유	30.4	19,548	-
	경유	35.2	20,111	-
CH_4	휘발유	-	20	0.930
	경유	-	5	0.931
N_2O	휘발유	-	0.6	0.930
	경유	-	0.6	0.931

표-9의 동태적 최적마력 및 최근 3년 평균(2016~2018) 마력에서 주요 연안어업의 CO_2 배출량은 마력당 CO_2 배출량에 개별수준에서의 마력을 곱하여 도출하였다. 분석결과, 주요 연안어업의 동태적 최적마력에서 CO_2 배출량은 657,118톤으로 추정되었으며, 최근 3년 평균 마력에서는 721,232톤으로 분석되어 동태적 최적마력보다 64,114톤 더 배출하는 것으로 나타났다. 유종별 CO_2 배출량은 휘발유가 경유보다 높았으며, 업종별 CO_2 배출량은 연안복합, 연안자망, 연안통발, 연안개량안강망 순으로 높게 분석되었다.

감소하는 것으로 나타났다.

표-9. 주요 연안어업의 수준별 CO_2 배출량(톤) 추정 결과 비교

구분		연안자망	연안통발	연안복합	연안개량안강망	합계
동태적 최적수준 (A)	경유	178,882	85,538	242,737	32,668	539,826
	휘발유	47,624	13,306	55,832	530	117,292
	소계	226,506	98,844	298,569	33,199	657,118
최근 3년 (2016~2018) 평균(B)	경유	196,336	93,884	266,421	35,856	592,496
	휘발유	52,270	14,604	61,280	582	128,736
	소계	248,606	108,488	327,700	36,438	721,232
차이 (C=B-A)	경유	17,453	8,346	23,683	3,187	52,670
	휘발유	4,647	1,298	5,447	52	11,444
	소계	22,100	9,644	29,131	3,239	64,114

표-10의 동태적 최적마력 및 최근 3년 평균(2016~2018) 마력에서 연안어업의 CH_4 배출량은 CO_2 배출량 도출과정과 동일하다. CH_4 배출량 분석결과, 연안어업의 동태적 최적마력에서 CH_4 배출량은 69.3389톤, 최근 3년 평균 마력에서는 76.1042톤으로 추정되어 최근 3년 평균마력에서 6.7653톤 더 배출하는 것으로 분석되었다. 유종별 CH_4 배출량은 연안자망을 제외하고 휘발유가 경유보다 높았으며, 업종별 CH_4 배출량은 연안복합, 연안자망, 연안통발, 연안개량안강망 순으로 높았다.

표-10. 주요 연안어업의 수준별 CH_4 배출량(톤) 추정 결과 비교

구분		연안자망	연안통발	연안복합	연안개량안강망	합계
동태적 최적수준 (A)	경유	12.1330	5.8018	16.4640	2.2158	36.6146
	휘발유	13.2869	3.7123	15.5772	0.1480	32.7243
	소계	25.4199	9.5141	32.0412	2.3638	69.3389
최근 3년 (2016~2018) 평균(B)	경유	13.3168	6.3678	18.0704	2.4320	40.1870
	휘발유	14.5833	4.0745	17.0970	0.1624	35.9172
	소계	27.9001	10.4423	35.1674	2.5944	76.1042
차이 (C=B-A)	경유	1.1838	0.5661	1.6064	0.2162	3.5724
	휘발유	1.2964	0.3622	1.5198	0.0144	3.1929
	소계	2.4802	0.9283	3.1262	0.2306	6.7653

표-11의 동태적 최적마력 및 최근 3년 평균(2016~2018) 마력에서 연안어업의 N_2O 배출량 추정과정은 CO_2 배출량 도출과정과 동일하다. N_2O 배출량 분석결과, 연안어업의 동태적 최적마력에서 N_2O 배출량은 5.3755톤, 최근 3년 평균 마력에서는 5.9톤으로 추정되어 동태적 최적마력보다 0.5245톤 더 배출하는 것으로 분석되었다. 유종별 N_2O 배출량은 휘발유가 경유보다 높았으며, 업종별 N_2O 배출량은 업종별 유류공급량이 큰 순서인 연안복합, 연안자망, 연안통발, 연안개량안강망 순으로 나타났다.

표-11. 주요 연안어업의 수준별 N_2O 배출량(톤) 추정 결과 비교

구분		연안자망	연안통발	연안복합	연안개량안강망	합계
동태적 최적수준 (A)	경유	1.4560	0.6962	1.9757	0.2659	4.3938
	휘발유	0.3986	0.1114	0.4673	0.0044	0.9817
	소계	1.8546	0.8076	2.4430	0.2703	5.3755
최근 3년 (2016~2018) 평균(B)	경유	1.5980	0.7641	2.1684	0.2918	4.8224
	휘발유	0.4375	0.1222	0.5129	0.0049	1.0775
	소계	2.0355	0.8864	2.6814	0.2967	5.9000
차이 (C=B-A)	경유	0.1421	0.0679	0.1928	0.0259	0.4287
	휘발유	0.0389	0.0109	0.0456	0.0004	0.0958
	소계	0.1809	0.0788	0.2384	0.0264	0.5245

주요 연안어업이 최근 3년 수준의 마력을 유지하며 온실가스를 배출하고, 정부는 동태적 최적마력수준의 온실가스 배출량을 상한선으로 설정하여 배출량을 규제한다면, 연안어업은 온실가스 배출량 상한선의 초과분에 해당하는 온실가스 배출권을 구매해야 한다.

온실가스 배출권 구입비용을 추정하기 위해, 온실가스 배출권은 CO_2 톤 단위로 배출권시장에서 거래되므로 CH_4 와 N_2O 를 CO_2 단위로 변환해야 한다. CO_2 의 지구온난화지수가 1일 때, CH_4 는 21, N_2O 는 310인데, 이는 CO_2 가 지구온난화에 미치는 영향보다 21배, 310배 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다. 각 지수를 CH_4 와 N_2O 에 적용하여 CO_2 단위로 환산한 온실가스 배출량을 합산한 후, 한국거래소 배출권시장 거래플랫폼에서 KAU19 할당배출권(2019년 10월 2일~2020년 7월 20일)의 평균가격 23,298원/ CO_2 톤을 적용하여 연안어업의 온실가스 배출권 구입비용을 도출하였다.

표-12는 주요 연안어업의 온실가스 배출권 구입비용을 추정한 결과로 총 구입비용은 약 15억 원으로 산정되었다. 유종별로 살펴보면, 경유사용으로 인한 배출권 구입비용은 약 12억 3천만 원이었고, 휘발유 연소에 따른 배출권 구입비용은 약 2억 7천만 원으로 도출되었다. 업종별로 배출권 구입비용을 살펴보면 연안복합이 약 6억 8천만 원으로 가장 높았고, 연안자망 약 5억 2천만 원, 연안통발 약 2억 3천만 원, 연안개량안강망 약 7천 6백만 원 순으로 나타났다. 개별업종의 어선당 온실가스 배출권 구입비용은 연안개량안강망(약 127,700원)이 가장 크고, 다음으로는 연안통발(약 46,427원), 연안자망(약 41,124원), 연안복합(약 37,359원) 순으로 추정되었다. 상기 업종별 어선의 척당 배출권 구입비용과 척당 평균어업이익을 비교해본 결과 배출권 구입비용은 어업이익의 0.1~0.2% 수준에 불과한 것으로 분석되었다.

표-12. 주요 연안어업의 온실가스 배출권 구입비용(원) 추정 결과

구분	연안자망	연안통발	연안복합	연안개량안강망	합계
경유	408,232,057	195,208,812	553,956,116	74,553,128	1,231,950,112
휘발유	109,170,645	30,501,835	127,988,489	1,215,796	268,876,766
소계	517,402,702	225,710,647	681,944,605	75,768,924	1,500,826,878

IV. 요약 및 결론

본 연구는 연안어업의 유종별·온실가스 종류별 최적 배출량을 추정하기 위해서 첫 단계로 Gompertz 지수성장함수에 기초한 CYP 모형(1992)을 적용하여, 연안어업의 기술적·생물적 계수를 추정하였다. 다음으로 Gompertz 지수성장함수에 기반한 동태적 최적화 이론을 적용하여 주요 연안어업의 최적자원량, 최적어획노력량(마력), 최적어획량을 도출하였다. 마지막으로 Tier1 수준의 온실가스 배출산정식을 활용하여 업종별 연안어업의 동태적 최적마력수준과 최근 3년 평균 마력수준의 유종별·온실가스 종류별 배출량을 비교·분석하였다.

이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, Gavaris(1980)의 일반선형모형을 사

용하여 연안자망, 연안통발, 연안복합, 연안개량안강망의 어획노력량을 표준화하였다. 표준화된 어획노력량을 사용하여 다섯 개의 잉어생산모형을 분석하였고, 이 중 CYP 모형이 다른 모형에 비해 비교적 높은 설명력과 예측력을 보였다. 또한, CYP 모형의 상수항 및 계수, 모형의 유의성을 의미하는 F -통계량도 통계적으로 가장 유의적이었고, 이분산 및 자기상관도 관찰되지 않았다. 이에 CYP 모형을 사용하여 기술적·생물적 계수를 추정한 결과 어획능력계수는 0.0000001, 본원적 성장률은 0.4065, 환경수용능력은 1,358,410,594kg으로 추정되었다.

둘째, CYP 모형을 이용하여 추정된 기술적·생물적 계수와 어업비용, 어획물의 가격, 사회적 할인율 등 경제적 변수를 이용해 동태적 어업이윤의 순현재가치(NPV)를 최대화하는 주요 연안어업의 자원량, 어획노력량, 어획량을 분석하였다. 주요 연안어업의 최적자원량(X^*)은 약 184,577톤, 최적어획노력량(F^*)은 약 7,125,751마력, 최적어획량인(Y^*)은 약 149,779톤으로 추정되었다. 위의 추정 결과와 최근 3년 평균 어획노력량을 비교하면, 연안어업은 동태적 최적수준에 비해 9.8%(695,249마력) 높은 것으로 나타나 여전히 경쟁적 조업을 하는 것으로 분석되었다. 그러나 최근 3년 평균 어획량은 동태적 최적어획량에 비해 6.5%(9,757톤) 낮았다.

셋째, 온실가스 배출량 산정을 위해 유류공급량과 유종별·온실가스별 배출계수를 사용한 Tier1 수준의 산정식을 이용하여 연안어업의 업종별 동태적 최적마력과 3년 평균마력에서의 유종별·온실가스 종류별 배출량을 도출하고 이를 비교하였다. 동태적 최적마력에서의 연안어업의 CO_2 배출량은 657,118톤, 최근 3년 평균 마력에서는 721,232톤으로 추정되어 동태적 최적마력보다 배출량이 64,114톤 높은 것으로 나타났다. 연안어업의 동태적 최적마력에서 CH_4 배출량은 69.3389톤, 최근 3년 평균 마력에서는 76.1042톤으로 추정되어 최근 3년 평균마력에서 6.7653톤 더 배출하는 것으로 추정되었다. 연안어업의 동태적 최적마력에서 N_2O 배출량은 5.3755톤, 최근 3년 평균 마력에서는 5.9톤으로 추정되어 동태적 최적마력보다 0.5245톤 더 배출하는 것으로 나타났다. 추가적으로 연안어업의 온실가스별 배출량 초과분에 해당하는 배출권 구입비용을 산정한 결과, 약 15억 원으로 나타났다. 경유연소에 따른 배출권 구입비용은 약 12억 3천만 원, 휘발유 사용에 따른 배출권 구입비용은 약 2억 7천만 원으로 추정되었다.

본 연구의 의의는 근해 또는 연안어업의 유류공급량 자료를 활용하여 온실가스 배출량 추정을 시도한 연구나 정태적 분석방법을 통해 온실가스 배출량을 추정한 연구와 다르게 Gompertz 지수성장함수에 기초한 동태적 최적화 이론을 활용하여 연안어업의 동태적 최적마력수준에서 온실가스 배출량을 추정함에 있다. 이 과정에서 식 (14)의 양변에 최적자원량(X^*)이 포함되어있기 때문에 수치해석(Numerical Method)의 이분법(Bisection Method)을 적용하여 방정식을 풀이하였고, 도출된 X^* 를 검산하여 결과값의 신뢰성을 제고하였다. 아울러 주요 연안어업의 동태적 최적마력에 비해 최근 마력수준에서 CO_2 , CH_4 , N_2O 등 온실가스를 9.8% 더 배출하고 있음을 정량적으로 분석하여 향후 정부의 어업부문 온실가스 배출저감 목표인 5.2%를 상향 조정할 경우, 본 분석결과를 논리적 근거 및 참고자료로 활용할 수 있다는 것이다. 이외에도 온실가스 배출규제시 연안업종별 어선당 연간 배출권 구입비용(약 37,359~127,700원)과 경영수지를 비교해본 결과, 배출규제를 받는 타 산업과의 형평성 및 오염원인자부담원칙 등을 고려하여 연안어업을 온실가스 배출규제대상에 포함하여도 경영상으로 심각한 영향이 없는 것을 확인하였다는 점이다.

본 연구의 한계로 우선, 8개 연안어업 중 어선세력이 큰 4개 연안어업을 분석대상으로 선정한 점이다. 향후 연구에서는 분석대상에서 제외된 4개 연안어업(조망, 들망, 선망, 선인망)을 포함하여 연안어업 전체를 재분석하고, 유류사용량의 규모가 큰 근해어업을 추가하여 분석한다면 국내 연근해어업의 총 온실가스 배출량 규모와 적정 온실가스 배출량 수준을 추정할 수 있을 것이다. 다음으로 온실가스 배출원인 연안어업의 어선별 특성을 고려하지 못한 Tier1 수준의 온실가스 배출량 산정식을 활용한 점이다. 추후 연안어업의 어선별 제원, 톤급, 마력에 따라 표준화된 엔진 부하율이나 엔진 가동시간 등의 자료가 확보되어서 Tier3 수준의 온실가스 배출량 산정식을 적용한다면 연안어업의 어선별 특성을 충분히 반영한 온실가스 배출량 추정이 가능할 것으로 판단된다.

투고일	2020. 08. 03
1차 심사일	2020. 11. 19
게재확정일	2020. 12. 08

■ ■ 참고문헌

1. 김필수·김정화·손지환·김정수·최상진·박성규·박건진. 2014. 「어선 분류체계별 온실가스 배출량 추정방법에 관한 연구」. 『한국기후변화학회지』, 제5권 제4호, pp. 301-311.
2. 김현영·양용수·황보규·이지훈. 2017. 「전과정평가방법에 의한 주요 연안어업의 온실가스 배출량 정량적 분석」. 『수산해양기술연구』, 제53권 제1호, pp. 77-88.
3. 관계부처합동. 2016. 『제1차 기후변화대응 기본계획(2017~2036)』.
4. 남종오. 2011. 「해밀토니안기법을 이용한 대형선망어업의 고등어·전갱이 최적어획량 결정」. 『해양정책연구』, 제26권 제2호, pp. 21-46.
5. 남종오·심성현·권오민. 2015. 「해밀토니안기법을 이용한 복수어업의 참조기 최적어획량 추정」. 『수산경영론집』, 제46권 제2호, pp. 59-74.
6. 남종오·조훈석. 2018. 「다수어업의 갈치 자원평가 및 최적어획량 추정」. 『Ocean and Polar Research』, 제40권 제4호, pp. 237-247.
7. 신용민·정겨운. 2018. 「우리나라 근해어업의 CO_2 배출 저감비용함수 추정」. 『자원·환경경제연구』, 제27권 제3호, pp. 399-420.
8. 이석형·김현영·양용수·강다영. 2018. 「연근해 자망과 통발 어업의 온실가스 배출량 현장실측 연구」. 『수산해양기술연구』, 제54권 제4호, pp. 315-323.
9. 전용한·남종오. 2018. 「수산보조금 폐지에 따른 주요 연안어업의 가상피해규모 추정」. 『해양정책연구』, 제33권 제1호, pp. 247-282.
10. 조훈석·남종오. 2020. 「삼치어종의 동태적 최적어업관리」. 『자원·환경경제연구』, 제29권 제3호, pp. 363-388.
11. 최종두. 2017. 「기후변화가 대형선망 고등어 어업의 최적탄소배출량에 미치는 영향분석」. 『Ocean and Polar Research』, 제39권 제3호, pp. 195-203.
12. 최종열·김도훈. 2012. 「도루묵 수산자원회복계획 하에서 동해구기선저인망어업의 최적 어획노력량과 어획량 수준 결정에 관한 탐색적 연구」. 『수산경영론집』, 제43권 제1호, pp. 1-9.
13. 해양수산부. 『1978-2019년 해양수산통계연보』 각 연호.
14. _____. 『2017-2019년 연안어업실태조사』 각 연호.
15. 환경부. 2019. 『2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서』.

16. Clarke, C. W., Munro, G. R. 1975. "The Economics of Fishing and Modern Capital Theory: A Simplified Approach." *J Env Econ Mann*, Vol. 2, pp. 92-106.
17. Clarke, R. P., Yoshimoto, S. S. and Pooley S. G. 1992. "A bioeconomic analysis of the Northwestern Hawaiian Islands lobster fishery." *Marine Resource Economics*, Vol. 7, pp. 115-140.
18. Fox Jr, W. W. 1970. "An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations." *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 99, pp. 80-88.
19. Gavaris, S. 1980. "Use of a Multiplicative Model to Estimate Catch Rate and Effort from Commercial Data." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, Vol. 37, pp. 2272-2275.
20. Kennedy, P. 2003. *A guide to conometrics*, Fifth edition, MIT Press. p. 623.
21. Park, J-A., Gardner, C., Chang, M-I., Kim, D-H. and Jang, Y-S. 2015. "Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions from Offshore Fisheries of the Republic of Korea." *PLoS ONE*, Vol. 10.
22. Quinn, T. J. and Deriso, R. B. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*, University of Oxford. p. 560.
23. Robert, W. R. Parker., Julia, L. Blanchard., Caleb Gardner, Bridget, S. Green, Klaas Hartmann, Peter, H. Tyedmers and Reg, A. Watson. 2018. "Fuel use and greenhouse gas emissions of world fisheries." *Nature Climate Change*, Vol. 8, pp. 333-337.
24. Verhulst, P. F. 1838. "Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement." *Correspondances mathématiques et physiques*, Vol. 10, pp. 113-121.
25. Winther, U., Ziegler, F., Hognes, E. S., Emanuelsson, A. and Sund Vand Ellingsen, H. 2009. "Carbon footprint and energy use of Norwegian seafood products." *SINTEF Fisheries and Aquaculture Report*, p. 87.
26. Ziegler, F. 2007. "Environmental life cycle assessment of seafood products from capture fisheries." *Int J Life Cycle Assess*, Vol. 12, p. 61.
27. Ziegler, F., Eichelsheim, J. L., Emauelsson, A., Flysjö, A., Ndiaye, V. and Thrane, M. 2009. "Life Cycle Assessment of southern pink shrimp products from SENEGAL: An

- environmental comparison between artisanal fisheries in the Casamance region and a trawl fishery based in Dakar.” FAO Fisheries and Aquaculture Circular No. 1044, pp. 1-32.
28. Ziegler, F. and Hausson, P. A. 2003. “Emissions from fuel combustion in Swedish cod fishery.” J Cleaner Prod, Vol. 11, pp. 303-314.
 29. 국가법령정보센터, 2020. 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」.
<http://www.law.or.kr> (2020년 6월 28일)
 30. _____, 2020. 「에너지법 시행규칙 별표」. <http://www.law.or.kr> (2020년 7월 1일)
 31. _____, 2020. 「예비타당성조사 수행 총괄지침」. <http://www.law.or.kr> (2020년 7월 1일)
 32. _____, 2020. 「저탄소 녹색성장 기본법」. <http://www.law.or.kr> (2020년 6월 28일)
 33. 국가통계포털, 2018. 생산자물가지수. <http://www.kosis.kr> (2020년 6월 11일)
 34. _____, 2018. 어업생산통계. <http://www.kosis.kr> (2020년 6월 11일)
 35. 에너지온실가스 종합정보 플랫폼, 2020. 이산화탄소배출량 산정식.
<http://www.tips.energy.or.kr> (2020년 7월 10일)
 36. 한국거래소 배출권시장 정보플랫폼, 2020. 배출권 시세조회. <http://www.ets.krx.co.kr> (2020년 7월 10일)
 37. 환경부, 2019. 2018년 승인 국가 온실가스 배출·흡수계수. <http://www.gir.or.kr> (2020년 7월 2일)

부 록

■ 부록-1. 연안어업 업종별 어획량 및 어획노력량(1977~2018년) ■

연도	어획량(톤)				어획노력량(마력)			
	자망	통발	복합	개량안강망	자망	통발	복합	개량안강망
1977	81,603	6,799	30,675	20,414	74,135	12,365	67,725	4,741
1978	71,514	7,343	22,318	20,804	121,812	32,331	109,250	11,777
1979	62,690	4,874	27,011	23,951	127,198	20,051	132,033	21,365
1980	52,845	5,971	25,123	20,454	125,165	23,698	147,260	20,786
1981	63,337	12,197	33,638	34,467	145,996	34,351	141,616	34,779
1982	58,071	12,978	29,024	38,258	174,248	46,822	165,271	35,617
1983	56,406	11,927	27,437	45,010	201,873	59,411	196,590	32,718
1984	50,007	10,657	27,996	21,252	271,020	70,225	209,046	40,104
1985	66,519	17,721	28,467	30,686	296,184	87,484	230,108	35,250
1986	68,646	10,462	30,921	36,898	341,816	100,082	264,661	42,883
1987	58,539	10,706	33,391	40,799	457,686	122,144	347,311	52,274
1988	64,239	12,697	30,176	36,344	581,249	171,593	482,857	62,861
1989	57,205	20,385	38,364	53,485	667,921	215,085	537,710	69,696
1990	62,105	15,315	42,373	60,814	750,908	247,850	619,486	71,882
1991	56,000	19,262	44,092	63,021	894,653	308,059	850,955	79,344
1992	52,605	19,397	37,486	71,472	1,074,004	374,840	1,101,736	74,537
1993	56,119	27,344	70,252	40,932	1,207,479	494,026	1,202,704	61,655
1994	66,283	28,641	50,074	46,397	1,358,075	609,979	1,395,157	76,712
1995	63,725	25,322	49,399	36,736	1,601,437	731,441	1,770,624	85,712
1996	53,554	21,703	49,973	31,148	1,723,118	792,171	1,958,357	90,211
1997	66,364	24,357	60,667	24,509	1,844,799	852,902	2,146,090	94,711
1998	92,190	19,760	52,588	39,542	1,825,227	928,785	2,299,741	101,103
1999	107,672	22,559	49,990	36,044	2,094,793	949,337	2,536,795	89,988
2000	90,556	22,751	59,879	36,816	2,575,372	1,233,214	2,865,986	83,614
2001	89,501	21,714	46,299	27,642	3,345,793	1,000,749	3,600,959	85,279
2002	82,764	27,123	37,915	25,405	4,233,517	1,008,855	4,701,207	93,788
2003	62,362	18,485	45,404	28,971	4,066,242	983,879	5,581,220	100,154
2004	53,107	17,788	43,444	20,287	3,565,587	1,194,713	6,472,040	93,549
2005	63,697	27,068	42,720	24,646	2,223,563	1,180,169	4,442,944	95,384
2006	65,528	27,295	38,580	26,802	2,463,382	1,124,809	5,732,999	106,530

연도	어획량(톤)				어획노력량(마력)			
	자망	통발	복합	개량안강망	자망	통발	복합	개량안강망
2007	75,478	32,581	48,318	28,830	2,930,659	1,173,754	4,697,993	156,996
2008	69,978	28,710	48,546	21,664	2,781,977	970,351	3,849,722	165,618
2009	74,218	30,542	45,221	25,020	2,915,413	969,287	3,638,781	157,802
2010	71,807	32,682	39,449	21,669	2,528,584	872,595	4,093,554	124,747
2011	65,929	31,097	35,433	29,265	2,328,404	1,024,034	3,653,366	186,560
2012	64,651	32,499	32,894	15,164	2,328,404	996,617	3,513,750	197,892
2013	72,665	30,505	32,097	14,758	2,921,037	1,076,380	3,802,505	206,328
2014	71,109	27,471	31,115	16,783	3,075,366	923,928	3,471,988	178,019
2015	67,022	25,195	29,007	14,520	2,582,496	980,087	3,699,174	169,222
2016	68,586	22,091	25,599	10,516	2,601,036	1,078,386	3,752,110	322,212
2017	75,599	20,875	30,266	15,531	2,937,963	1,066,868	3,588,079	182,949
2018	77,544	22,202	32,287	18,971	3,038,273	1,137,753	3,564,269	193,103

■ 부록-2. Gavaris의 일반선형모형 검정 결과 ■

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
c	8.5152***	0.1940	43.8872	0.0000
1978	-0.8000***	0.2651	-3.0178	0.0031
1979	-0.9401***	0.2651	-3.5463	0.0006
1980	-1.0478***	0.2651	-3.9525	0.0001
1981	-0.8707***	0.2651	-3.2846	0.0013
1982	-1.0539***	0.2651	-3.9757	0.0001
1983	-1.1742***	0.2651	-4.4295	0.0000
1984	-1.5967***	0.2651	-6.0233	0.0000
1985	-1.3711***	0.2651	-5.1723	0.0000
1986	-1.5817***	0.2651	-5.9666	0.0000
1987	-1.8116***	0.2651	-6.8340	0.0000
1988	-2.0732***	0.2651	-7.8207	0.0000
1989	-1.9711***	0.2651	-7.4358	0.0000
1990	-2.0730***	0.2651	-7.8199	0.0000
1991	-2.2249***	0.2651	-8.3929	0.0000
1992	-2.3916***	0.2651	-9.0217	0.0000
1993	-2.3447***	0.2651	-8.8448	0.0000
1994	-2.5186***	0.2651	-9.5010	0.0000
1995	-2.7949***	0.2651	-10.5433	0.0000

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
1996	-2.9915***	0.2651	-11.2851	0.0000
1997	-2.9911***	0.2651	-11.2834	0.0000
1998	-2.9296***	0.2651	-11.0515	0.0000
1999	-2.9288***	0.2651	-11.0485	0.0000
2000	-3.0488***	0.2651	-11.5009	0.0000
2001	-3.2745***	0.2651	-12.3525	0.0000
2002	-3.4608***	0.2651	-13.0552	0.0000
2003	-3.5925***	0.2651	-13.5520	0.0000
2004	-3.7780***	0.2651	-14.2519	0.0000
2005	-3.3728***	0.2651	-12.7234	0.0000
2006	-3.4731***	0.2651	-13.1018	0.0000
2007	-3.4203***	0.2651	-12.9024	0.0000
2008	-3.4441***	0.2651	-12.9921	0.0000
2009	-3.3809***	0.2651	-12.7538	0.0000
2010	-3.3511***	0.2651	-12.6415	0.0000
2011	-3.4282***	0.2651	-12.9322	0.0000
2012	-3.6032***	0.2651	-13.5925	0.0000
2013	-3.7089***	0.2651	-13.9911	0.0000
2014	-3.6312***	0.2651	-13.6979	0.0000
2015	-3.6956***	0.2651	-13.9409	0.0000
2016	-4.0248***	0.2651	-15.1829	0.0000
2017	-3.7504***	0.2651	-14.1476	0.0000
2018	-3.6988***	0.2651	-13.9529	0.0000
D1	-1.7911***	0.0818	-21.8934	0.0000
D2	-1.9710***	0.0818	-24.0928	0.0000
D3	-2.5020***	0.0818	-30.5835	0.0000
R-squared	0.9506	Mean dependent var		4.3392
Adjusted R-squared	0.9329	S.D. dependent var		1.4475
S.E. of regression	0.3749	Akaike info criterion		1.0996
Sum squared resid	17.2869	Schwarz criterion		1.9364
Log likelihood	-47.3646	Hannan-Quinn criter.		1.4392
F-statistic	53.7877***	Durbin-Watson stat		0.4047
Prob(F-statistic)	0.0000			

주: *, **, ***는 각각 10%, 5%, 1% 유의수준에서 유의함을 의미한다.