

「탄소중립 2050」 추진전략 이행에 따른 근해어업의 온실가스 감축잠재량 추정

전용한 · 남종오*
부경대학교(강사) · *부경대학교(교수)

Estimating Potential Greenhouse Gas Reductions of Offshore Fisheries Based on Implementation of 「2050 Carbon Neutral」 Strategy

Yong-Han JEON · Jong-Oh NAM*
Pukyong National University(lecturer) · *Pukyong National University(professor)

Abstract

The purpose of this study is to estimate potential greenhouse gas(GHG) reductions of offshore fisheries following the implementation of 「2050 Carbon Neutral」 strategy and then to suggest policy alternatives based on the analysis results. To estimate the potential GHG reductions, a dynamic optimal fisheries theory was used in the analysis. As a result, the offshore fisheries' fishing effort was inputted 30% more than the optimal level. If excess fishing effort were reduced, the potential GHG reductions of offshore fisheries was estimated to 464,683tCO₂. In addition, when GHG emissions are regulated, the profit rate of offshore fisheries decreases by 0.46%, but it is analyzed that there is no significant damage. Thus, in order to reduce GHG emissions, it is necessary to expand fishing vessel buyback program and start discussion on the development of electric hybrid fishing vessels.

Key words : 「2050 Carbon Neutral」 strategy, Offshore fisheries, Greenhouse gas(GHG), Potential GHG reductions, Dynamic optimal fisheries theory

I. 서론

전 세계적으로 기후변화 이슈가 강조되는 가운데 국제사회는 그동안 기후변화의 주요한 원인으로 지목된 온실가스의 배출량 감축을 위해 1992년 유엔기후변화협약(UNFCCC)을 체결하였다. 이어서 1997년에는 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었고, 2015년에는 선진국뿐만 아니라 개도국에도 온실가스 감축의무를 부담하도록 하는 파리협정(Paris Agreement)이 체결되었다.

특히, 2016년 파리협정이 발효되고, 2019년 UN

기후정상회의 이후 우리나라를 포함한 121개국이 칠레의 주도로 설립된 ‘기후목표 상향동맹’에 가입하면서 2050년까지 온실가스 순배출량이 영(0)을 의미하는 탄소중립(carbon neutral)이 국제사회의 새로운 패러다임으로 떠오르게 되었다. 이에 정부는 2020년 12월 UNFCCC에 ‘2050년 장기저탄소 발전전략’을 제출하기에 앞서 「2050 탄소중립」 추진전략을 발표하였다.

「2050 탄소중립」 추진전략에 따르면, 정부는 탄소중립이라는 새로운 패러다임에 선제적으로 대응하기 위해 3대 정책방향과 10대 과제를 추진

† Corresponding author : 051-629-5317, namjo1234@pknu.ac.kr

전략으로 제시하였다. 이를 이행하기 위해 2021년 6월까지 탄소중립 시나리오를 위한 산업별 온실가스 감축잠재량을 분석하고, 2021년 하반기부터는 시나리오를 토대로 각 산업의 구체적인 추진전략을 마련하는 계획을 수립하였다(JM, 2020).

전 산업을 대상으로 상기 추진전략이 이행되는 만큼 수산업 부문에도 생산과정에서 탄소배출량을 줄이는 ‘저탄소 생산기반의 확대’ 전략이 수립되어 있다. 이를 이행 시 어선어업 중에서도 온실가스 배출량이 높을 것으로 예상되는 근해어업은 온실가스 감축 대상이 될 가능성이 다분히 있으며, 경영상의 부담 또한 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 「탄소중립 2050」 추진전략 이행에 앞서 근해어업의 온실가스 감축잠재량을 가상으로 추정해보고, 그것이 근해어업의 경영에 미치는 영향을 검토해보는 것은 산업적으로나 정책적으로 의미있는 시도라 여겨진다.

본 연구와 유사한 선행연구로는 정태적 자원평가 모형을 이용하여 대형선망의 최적탄소배출량을 추정한 연구와 동태적 최적어업이론을 적용하여 4개 연안어업의 최적탄소배출량을 추정한 연구가 존재한다(Choi, 2017; Jeon and Nam, 2020). 이 외에도 전과정평가(LCA, life cycle assessment) 방법을 활용하여 쌍끌이대형저인망과 외끌이대형저인망, 대형선망, 대형트롤, 근해자망, 근해연승, 근해채낚기, 기선권현망의 온실가스 배출량을 추정한 연구도 시도된 바 있다(Lee and Lee; 2011, Lee, 2013; Lee et. al., 2015; Yang et.al., 2015; Bae et. al., 2019). 추가적으로 Tier1 수준의 온실가스 배출량 산정식을 적용하여 우리나라 근해어업 전 업종의 온실가스 배출량을 추정하기도 하였다(Park et. al., 2015).

그러나 상술한 선행연구의 대부분은 분석 당시 근해어업의 어획노력량 수준에서의 온실가스 배출량 추정에만 국한되어 있었고, Choi(2017)의 연구도 정태적인 자원평가모형에 기반하여 단일 업종의 최적탄소배출량을 분석하는데 그쳤다. 따라서 본 연구는 동태적 최적 어업생산 함수를 활용

하여 15개 근해어업의 온실가스 감축잠재량을 추정해보고, 온실가스 배출규제가 경영에 미치는 영향을 분석해보고자 한다.

이를 위해 본 연구는 우선 15개 근해어업의 어획노력량을 표준화한 후 잉여생산모형을 통해 기술적·생물적 계수를 추정한다. 다음으로 동태적 최적 어업생산 함수에 추정한 계수와 경제계변수를 대입하여 근해어업의 최적 어획노력량을 도출한다. 그리고 최근 어획노력량 수준과 최적 수준에서의 온실가스 배출량을 비교하여 업종별 온실가스 감축잠재량을 추정한다. 끝으로 「탄소중립 2050」 추진전략 이행에 따라 온실가스 배출규제 시 근해어업의 어업이익률 변화를 추정하여 경영에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

본 연구의 II장에서는 분석에 이용한 어획노력량 표준화, 잉여생산모형, 동태적 최적 어업생산 함수와 온실가스 배출량 추정방법을 제시한다. 다음으로 III장에서는 15개 근해어업의 업종별 온실가스 감축잠재량 추정 결과와 온실가스 배출규제에 따른 어업이익률 변화를 비교·분석한다. 끝으로 IV장에서는 분석결과의 요약 및 연구의 시사점을 도출하고, 연구의 의의와 한계점, 향후 연구과제를 제안하며 글을 맺고자 한다.

II. 연구 방법

1. 어획노력량 표준화

본 연구에서는 Gavaris(1980)가 제안한 일반선형모형(GLM, general linear model)을 로그로 치환한 모형을 이용하였다. 동 모형을 활용하여 어구·어법이 상이한 15개 업종의 어획노력량에 영향을 주는 다른 요인변수의 영향을 분리한 후 업종별 어획노력량을 표준화하였다.

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

식 (1)에서 U_g 는 요인변수의 수준별 기준 단위 노력당어획량(CPUE)이며, g 는 연도, 어업을 나타

낸다. 여기서 i 는 요인변수, j 는 요인변수별 수준이며, P_{ij} 는 i 에서 j 에 대한 상대적인 어획능력을 의미하는데, 요인변수별 기준 수준에 대해서는 P_{ij} 를 1로 설정한다(Quinn and Deriso, 1999). 또한 가변수(dummy variable) X_{ij} 는 분석자료가 요인변수 i 의 j 수준을 의미하면 1로 정의하고, 그렇지 않으면 0으로 설정한다. 로그정규분포를 이루는 CPUE의 일반선형모형인 식 (1)의 ϵ 는 평균이 0이며, 일정한 분산인 σ^2 을 가지는 정규확률변수를 의미한다(Quinn and Deriso, 1999; Sim and Nam, 2015).

어법이 상이한 15개 근해어업의 어획노력량을 표준화하기 위하여 어업 및 연도를 요인변수로 두고, 요인변수별 수준으로 15개 어업과 34년의 연도(1985~2018년)를 설정한다. 상기 변수와 개별수준의 조합에 따라 가변수가 1 또는 0인지 결정하고, 이들 가변수로 회귀식을 구성한 후 최소자승법(OLS, ordinary least squares)을 활용하여 15개 어업의 CPUE와 어획노력량을 표준화한다(Quinn and Deriso, 1999; Jeon and Nam, 2020).

15개 어업별 표준화된 어획노력량은 각 어업의 추정된 CPUE와 어획량에 의해 도출된다. 여기서 15개 어업의 표준화된 전체 어획노력량은 어업별로 추정된 어획노력량을 합하여 도출한다.

2. CYP 모형

Verhulst(1838)가 소개한 잉여생산모형(surplus production model)은 어업자원의 성장량만큼 어획한다면 어업자원을 지속가능한 수준에서 이용할 수 있다는 균형이론에 바탕을 두었다. 동 모형의 장점은 어획량과 어획노력량이라는 최소한의 자료로 기술적·생물적 계수의 추정이 가능하다는 것이다.

Clarke, Yoshimoto, Pooley는 Gompertz 지수성장함수(exponential growth function)에 기반한 Fox 모형(1970)을 변형하여 CYP(Clarke, Yoshimoto, Pooley) 모형(1992)을 개발하였다. 구체적으로 이

들은 Fox 모형의 $\frac{\Delta U}{\bar{U}}$ 를 $\frac{1}{U} \frac{dU}{dt}$ 로 변환하여 식 (2)를 도출하였다(Clarke et. al., 1992; Sim and Nam, 2015). 여기서 U_t 는 t 시점의 단위어획노력당어획량(CPUE), F 는 어획노력량, r 은 어업자원의 본원적 성장률, q 는 어획능력계수, k 는 어업자원의 환경수용능력을 의미한다.

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

Taylor 급수 근사를 활용하여 $\int_t^{t+1} \ln(U) dt$ 의 적분 추정치인 $\ln(\bar{U})$ 를 도출하여 식 (2)에 대입하고, Schnute이 제안한 $\bar{U}_t \cong \sqrt{U_t U_{t+1}}$ 을 이용하면 식 (3)과 같이 정리할 수 있다(Clarke et. al., 1992; Jeon and Nam, 2020). 식 (3)의 \bar{U}_t 는 t 시점에서 CPUE의 평균, \bar{F}_t 는 t 시점에서 어획노력량의 평균을 나타낸다.

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

최소자승법을 이용하여 식 (3)의 상수항인 $\frac{2r}{2+r} \ln(qk)$, 설명변수의 계수인 $\frac{2-r}{2+r}$, $\frac{q}{2+r}$ 를 추정한다. 다음, 세 개의 방정식을 풀이하여 동태적 최적 어업생산 함수 분석에 활용하는 q , k , r 을 도출한다.

3. 최적 어획량 추정모형의 기본가정

본 연구에서는 동태적 최적수준을 추정하기 위해 Gompertz 지수성장함수에서 출발한 기본모형을 활용한다. 식 (4)의 $G(X_t)$ 와 X_t 는 t 시점에서 어업자원의 성장량과 어업자원량을 의미하며, \dot{x} 는 시간이 지남에 따라 변화하는 어업자원량을 나타낸다. 식 (4)의 Gompertz 지수성장함수에 어업인의 t 시점에서 어획량을 제하면 식 (5)와 같

이 나타낼 수 있다.

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

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

Y_t 는 t 시점에서의 어획노력량(F_t)과 X_t 에 따라 결정되는 어획함수로서 어획능률계수(q)와 어획노력량의 특성을 반영한 승수 α 및 어업자원의 특성을 반영한 승수 β 를 활용해 아래의 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 한편, 본 연구에서는 어획함수의 α 와 β 가 1인 선형함수의 형태를 가정한다(Clark, 1990; Nam et. al., 2015). 그리고 식 (7)은 단위노력당 어획비용(c)에 F_t 를 곱하여 도출한 어획비용함수를 의미한다.

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

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

4. 동태적 최적 어업생산 함수

동태적 최적 어업이론은 어업자원량을 어업의 자본(stock)이라고 가정하고, 시간이 흐름에 따라 어업활동에서 발생하는 사회적 이익을 극대화하는 이론을 의미한다(Clark and Munro, 1975). 동태적 최적화 모형의 함수 및 제약조건(subject to)은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Max NPV} &= \int_0^\infty [pY_t - cF_t]e^{-\delta t} dt \quad \dots\dots\dots (8) \\ &= \int_0^\infty [pqF_tX_t - cF_t]e^{-\delta t} dt \\ (\text{s.t.}) \quad & dX/dt = \dot{x}, X(0) = X_0 \\ & X_t \geq 0, 0 \leq Y_t \leq Y_{t_{\max}} \end{aligned}$$

식 (8)의 F_t 와 Y_t 는 t 시점의 어획노력량과 어획량이며, δ 는 사회적 할인율을 의미한다. $pY_t - cF_t$ 는 t 시점에서 얻는 어업이윤을, X_0 는 초기 어업자원량을 의미하고, $Y_{t_{\max}}$ 는 t 시점에서 어업의 최대어획량을 뜻한다. 식 (8)의 제약조건

을 고려하여 목적함수를 최적화하는 현재가치 해밀토니안 함수식 H_c 는 식 (9)로 나타낼 수 있다 (Clark and Munro, 1975; Nam, 2011).

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

식 (9)의 λ 는 어업자원의 미래가치를 현재가치로 할인하는 그림자가격(shadow price)을 나타내며, X_t 는 상태변수를, F_t 는 제어변수를 의미한다. H_c 의 최적해는 H_c 를 어획노력량(F)과 자원량(X)으로 각각 편미분한 1계 필요조건(first order necessary condition)에 F 를 편미분하여 도출한 상태효율조건식(SEC, static efficiency condition)의 λ 를 t 로 편미분하여 구할 수 있다. 더불어 동태효율조건식(DEC, dynamic efficiency condition)은 H_c 를 X 에 대해 편미분한 1계 필요조건으로부터 도출할 수 있다(Clark and Munro, 1975; Nam, 2011; Nam et. al., 2015).

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

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

식(10)의 상태효율조건식(SEC)에서 λ 를 t 로 편미분하면 식 (12)로 정리할 수 있다.

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

상기 식 (10), (11), (12)를 정리하여 풀면 최적 어업자원량 추정에 필요한 ‘황금률(golden rules)’을 구할 수 있는데, 이는 식(13)과 같다(Nam, 2011; Nam et. al., 2015).

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

식 (13)의 $G'(X^*)$ 는 어업자원의 한계성장률이며, $G(X^*) \frac{c}{X^*(qpX^* - c)}$ 는 어업자원의 한계효과를 의미하는데, 이들의 합이 사회적 할인율(δ)과 같아질 때, 최적 어업자원량 수준이 달성된다(Nam, 2011; Nam et. al., 2015). 최적 어업자원량

(X^*)을 추정하는 식 (14)는 Gompertz 지수성장함수를 식 (13)에 대입하여 구할 수 있으며, X^* 는 기술적·생물적 계수와 경제적 변수를 대입하여 도출할 수 있다(Nam and Cho, 2018). X^* 가 도출되면 식 (15)를 통해 최적 어획노력량(F^*)도 추정할 수 있다.

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

$$F^* = \left[r \ln\left(\frac{k}{X^*}\right) \right] / q \dots\dots\dots (15)$$

마지막으로 식 (14)에 따라서 X^* 를 도출하면 어업자원의 균형 상태를 의미하는 식인 $\dot{x} = G(X^*) - Y^* = 0$ 또는 식 (16)으로부터 어업의 최적 어획량(Y^*)을 추정할 수 있다(Nam, 2011; Nam and Cho, 2018).

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

5. 온실가스 배출량 추정

분석대상인 15개 근해어업은 업종별로 조업특성 및 운항특성이 상이하다. 따라서 본 연구는 개별업종에 폭넓게 적용할 수 있는 Tier1 수준의 온실가스 배출량 산정방법론을 활용하였다(Park et. al., 2015; Jeon and Nam, 2021). 상기 산정방법론은 유종별 연료소비량과 온실가스 종류별·유종별 배출계수를 이용하여 온실가스 6종 가운데 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O)의 배출량을 추정할 수 있다. 온실가스 배출량 추정을 위해 유류사용량은 2014-2018년 수협이 근해어업 업종별 유류공급량으로 대체하였고, CO_2 배출량 산정식은 ‘에너지온실가스 종합정보 플랫폼’의 산정식을 이용하였으며, ‘2020 국가 온실가

스 인벤토리 보고서’의 산정식을 적용하여 CH_4 , N_2O 배출량을 추정하였다.

식 (17)은 근해어업의 업종별·유종별 CO_2 배출량 산정식으로 FS 는 유류공급량, NCV 는 순발열량, CEF 는 탄소배출계수를 의미한다. i 는 근해어업 15개 업종, j 는 유종(휘발유, 경유, 중유)을 의미한다. 10^{-6} 은 CO_2 배출량을 톤으로 환산하는 상수이며, 44/12는 탄소배출량을 CO_2 배출량으로 환산하기 위해 활용된다. 식 (18)과 (19)는 근해어업의 업종별·유종별 CH_4 , N_2O 배출량 산정식이며, CF_j 는 전환계수, $EF_j(CH_4)$ 와 $EF_j(N_2O)$ 는 CH_4 와 N_2O 의 배출계수를 의미한다. 10^{-3} 은 CH_4 , N_2O 배출량을 톤으로 환산하는 상수이다. 또한, 41.868은 열량 단위인 TOE를 Joule로 환산하는 계수이다.

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

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

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

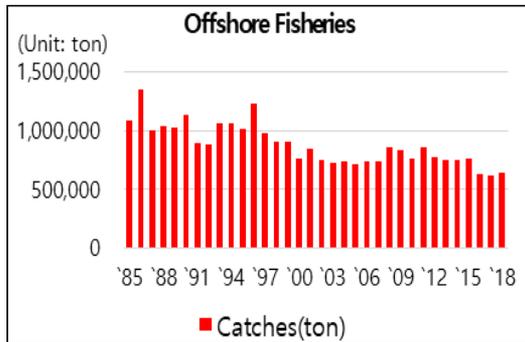
III. 연구 결과

1. 분석대상 및 자료

본 연구는 「수산업법 시행령」 제24조(근해어업의 종류)에 따라 분류된 21개 근해어업 중 15개 업종(대형트롤, 동해구트롤, 쌍끌이대형저인망, 외끌이대형저인망, 서남해구쌍끌이중형저인망, 서남해구외끌이중형저인망, 대형선망, 소형선망, 근해안강망, 근해자망, 기선권현망, 근해채낚기, 근해

연승, 근해통발, 잠수기)을 분석대상으로 선정하였다. 나머지 6개 업종을 분석에서 제외한 이유는 그동안 업종이 통폐합되고, 신설되는 과정을 거치면서 분석기간(1985~2018년) 동안의 어획량과 어획노력량(마력) 자료가 누락되어 있는 경우가 많았기 때문이다.

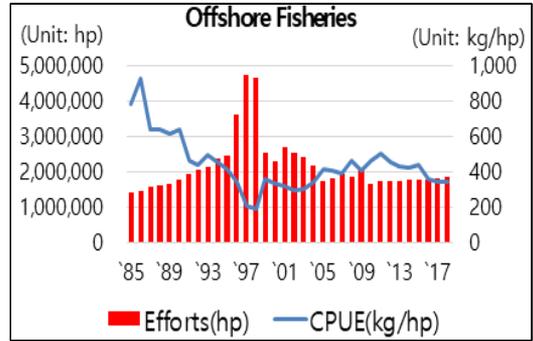
15개 근해어업의 어업현황을 살펴보면, 어획량은 1985년 약 109만 톤으로 집계되었고, 이후 증감을 반복하며 1996년 약 123만 톤을 기록하였다. 그러나 기후변화, 해양환경 악화, 조업구역의 축소, 주변국과의 조업경쟁 심화, 과잉 어획노력량 투입 등의 복합적인 요인으로 인해 15개 업종의 어획량은 지속적으로 감소하여 2018년 기준 약 64만 톤을 기록하였다([Fig. 1] 참조).



Source: Statistical yearbook of fisheries(1986-2019).

[Fig. 1] Trends in catches of offshore fisheries.

15개 근해어업의 어획노력량은 1985년 약 139만 마력으로 나타났으며, 지속적으로 마력이 증가하여 1997년에 들어서는 약 474만 마력으로 급증하였다. 그러나 근해어업을 대상으로 실시된 어선감척사업의 영향으로 15개 근해어업의 마력이 계속해서 감소하여 2018년 기준 약 186만 마력으로 집계되었다([Fig. 2] 참조). 15개 근해어업의 CPUE(kg/hp)는 1985년 약 785로 나타났으나 어획량 감소 및 마력 증가로 인해 1998년에는 약 193으로 급감하였다. 그러나 근해어선을 감척하여 어획노력량(마력)을 축소하면서 2018년 CPUE는 약 342로 증가하였다([Fig. 2] 참조).



Source: Statistical yearbook of fisheries(1986-2019).

[Fig. 2] Trends in efforts and CPUE of offshore fisheries.

본 연구는 해양수산부에서 발간하는 연도별 수산통계연보(1986~2019)에 기재된 15개 근해어업의 업종별 어획량과 어획노력량(마력) 자료를 사용하여 분석을 진행하였다. <Table 1>은 분석에 사용된 기간(1985~2018년) 동안 15개 근해어업의 어획량(catches)과 마력으로 표현된 어획노력량(efforts)의 기초통계량을 정리한 결과이다.

<Table 1> Basic statistics of analysis data

Level	Obs.	Avg.	S.D.	Min.	Max.
Catches (ton)	34	876,044	175,852	616,591	1,351,971
Efforts (hp)	34	2,149,590	777,772	1,387,338	4,743,772

2. 어획노력량 표준화 결과

Gavaris의 일반선형모형으로 어구와 어법이 상이한 15개 근해어업의 어획노력량을 표준화한 결과, 결정계수인 R^2 는 0.6708로 모형의 설명력이 약 67% 정도였으며, 모형의 적합도를 검정하는 F-통계량도 1% 수준에서 유의적이었다. 또한 47개의 연도 및 가변수 중 37개 변수가 10% 유의수준 이하에서 통계적으로 유의적이어서 어획노력량 표준화 결과를 잉어생산모형 분석에 활용 가능한 것으로 판단하였다(<Table 2> 참조).

<Table 2> Summary of Gavaris' GLM test results

R^2 (\bar{R}^2)	F-Stat. (Prob.)	Number of significant variables		
		(p<0.01)	(p<0.05)	(p<0.1)
0.6708 (0.6374)	20.0340*** (0.0000)	25	34	37

Note: * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

그리고 15개 근해어업 전체와 개별 업종의 연도별 로그화한 CPUE와 CPUE 추정치를 비교해보면 수치상으로 미세한 정도의 차이만 있고, 실제 수치와 추정치의 변화추이도 대체적으로 유사하였다. 그러나 동해구중형트롤, 서남해구쌍끌이중형저인망, 기선권현망, 잠수기는 다른 업종에 비해서 실제 수치와 추정치간 차이가 다소 존재하였다. 구체적으로 동 4개 업종의 로그화한 CPUE와 CPUE 추정치간 차이의 비율 합을 분석기간으로 나눈 MAPE(mean absolute percentage errors)는 12.3535로 나머지 11개 업종의 MAPE인 5.1703보다 높았다. 또한 관측치와 추정치 차이의 제곱합을 분석기간으로 나눈 RMSE(root mean squared errors)도 0.8417로 11개 업종의 RMSE인 0.3644보다 큰 것으로 나타났다. 이는 상기 4개 업종의 어획량과 어획노력량(마력)의 연도별 편차가 높아 연도별 CPUE의 변동폭이 다른 어업에 비해서 상대적으로 컸기 때문이다([Fig. 3] 참조).

3. 잉어생산모형 분석 결과

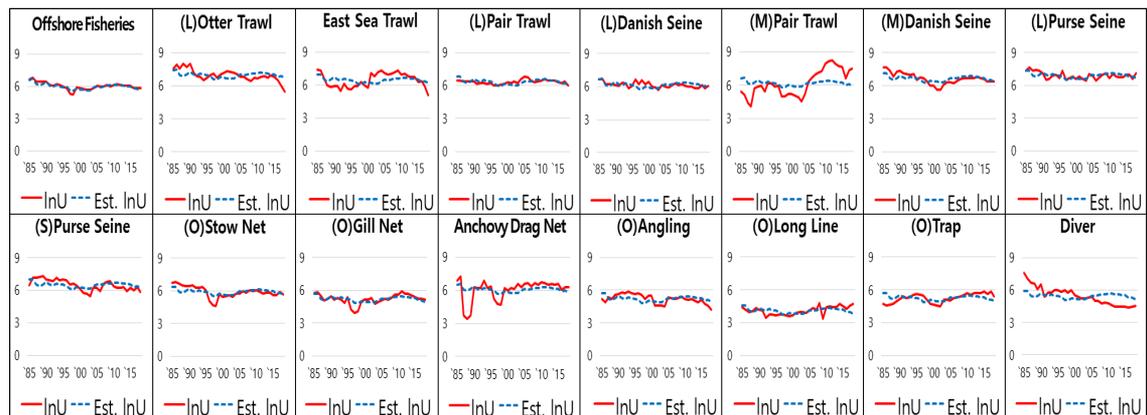
잉어생산모형은 로지스틱(logistic) 성장함수나 Gompertz 지수(exponential) 성장함수에 기초한 모형이다. 그러므로 잉어생산모형 선정에 앞서 표준화된 CPUE를 종속변수, 추정된 마력을 독립변수로 하여 회귀분석을 실시하고, 두 변수간 관계가 선형 또는 지수형태인지를 살펴봐야 한다.

<Table 3>의 회귀분석 결과, 지수모형의 R^2 는 0.4449이며, 로지스틱모형의 R^2 는 0.3677로 나타났다, 두 모형의 F-통계량도 1% 수준에서 유의적이었다. 그러나 분석에 이용한 두 모형의 R^2 와 F-통계량만으로 어느 모형이 적합한지 판단할 수 없으므로 로지스틱 또는 지수 성장함수에 기초한 잉어생산모형을 모두 분석해야 한다.

<Table 3> Test results of logistic and exponential growth function

Model	R^2 (\bar{R}^2)	F-Stat. (Prob.)	C	Efforts
			Coef. (Prob.)	Coef. (Prob.)
Logistic	0.3677 (0.3480)	18.6121*** (0.0001)	734.3871*** (0.0000)	-0.0001*** (0.0001)
Exponential	0.4449 (0.4276)	25.6521*** (0.0000)	6.7494*** (0.0000)	-0.0000*** (0.0000)

Note: * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01



[Fig. 3] Comparison of offshore fisheries' actual and estimated logarithm CPUE(kg/hp).

잉여생산모형 중 Schaefer, Schnute, WH 모형은 로지스틱 성장함수에, Fox, CYP 모형은 Gompertz 지수 성장함수에 기초한 모형이며, 이들 5개 모형 가운데 CYP 모형의 R^2 가 0.6967로 가장 높았고, 모형의 유의성을 검정한 통계량인 F-통계량도 1% 수준에서 유의적이었다. 또한 CYP 모형의 상수항인 C 와 X_1 , X_2 의 계수 모두 5% 이하의 유의수준에서 통계적으로 유의하게 분석되었다 (<Table 4> 참조).

5개 잉여생산모형의 예측력을 나타내는 지표인 MAPE와 RMSE를 도출한 결과, CYP 모형의 MAPE는 16, RMSE는 203,138로 가장 낮아서 예측력 또한 다른 4개 모형보다 우수한 것으로 분석되었다. 다음으로 선형회귀모형의 기본가정을 확인하기 위해 CYP 모형의 이분산, 자기상관, 다

중공선성을 확인한 결과, ‘오차항이 동분산’이며, ‘자기상관이 존재하지 않는다’는 귀무가설을 채택하고, 분산팽창계수(VIF, variance inflation factor)가 10 미만으로 나타났다. 따라서 CYP 모형은 오차항에 대한 이분산과 자기상관, 변수간 다중공선성이 없는 안정적인 모형으로 판명되었다(<Table 4> 참조).

4. 동태적 최적수준 추정 결과

15개 근해어업의 동태적 최적 어업자원량과 최적 어획노력량, 최적 어획량을 분석하기 위해 앞선 단계에서 선정된 CYP 모형의 C , X_1 , X_2 의 계수를 통해 어획능력계수(q), 어업자원의 환경수용능력(k), 어업자원의 본원적성장률(r)을 추정하였다.

<Table 4> Estimated results of each surplus production model

Model	R^2 (\bar{R}^2)	F-stat. (Prob.)	C	X_1	X_2	MAPE	RMSE	LM Stat. (Prob.)	White Stat. (Prob.)	VIF	
			Coef. (Prob.)	Coef. (Prob.)	Coef. (Prob.)					X_1	X_2
Schaefer	0.0889 (0.0260)	1.4140 (0.2594)	0.2665 (0.1605)	-0.0004 (0.1122)	0.0000 (0.2156)	26	415,825	4.8250* (0.0896)	0.4873 (0.7837)	1.5195	1.5195
Schnute	0.0481 (-0.0153)	0.7582 (0.4773)	0.2895 (0.2901)	-0.0004 (0.2405)	0.0000 (0.3490)	25	420,764	5.6577* (0.0591)	11.5477** (0.0415)	1.5725	1.5725
WH	0.1839 (0.1294)	3.3791** (0.0475)	0.3762* (0.0914)	-0.0006** (0.0185)	0.0000 (0.3459)	16	206,851	4.0379 (0.1328)	7.0817** (0.0290)	1.6179	1.6179
Fox	0.0884 (0.0256)	1.4065 (0.2612)	1.2415 (0.1147)	-0.1854 (0.1131)	0.0000 (0.1842)	18	249,600	5.4474* (0.0656)	0.5389 (0.7638)	1.7624	1.7624
CYP	0.6967 (0.6764)	34.4487*** (0.0000)	2.8784*** (0.0009)	0.5714*** (0.0000)	0.0000** (0.0198)	16	203,138	2.2817 (0.3196)	8.3676 (0.1371)	1.5421	1.5421

Note 1: * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

Note 2: $MAPE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \times 100/n \right]$, $RMSE = \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2/n \right]$.

where, Y_i means actual catches, \hat{Y}_i means estimated catches, n means number of year.

Note 3: Null hypothesis(H_0) of the LM test implies that there is no autocorrelation.

Note 4: Null hypothesis(H_0) of the White test means that variance of error is homoskedasticity.

한편 근해어업의 동태적 최적수준 추정에는 기술적·생물학적 계수뿐만 아니라 경제적 변수인 마력당 어업비용(c), kg당 어획물의 가격(p)과 사회적 할인율(δ)이 추가적으로 요구된다.

동태적 최적수준 추정에 필요한 경제적 변수 중 c (won/hp)는 ‘근해어업 실태조사(2017~2019)’를 참고하여 연도별 마력당 비용에 수산물 생산자물가지수(2015=100)를 적용하여 실질화한 후 가중평균하여 추정하였다. 다음으로 p (won/kg)는 ‘어업생산동향조사(2016~2018)’의 연도별 생산금액을 생산량으로 나눈 후 수산물 생산자물가지수(2015=100)를 적용하여 실질가치로 환산한 후 가중평균하여 도출하였다. 끝으로 δ 는 「에비타당성조사 수행 총괄지침」의 제52조(사회적 할인율)를 참조하였다.

기술적·생물학적 계수와 경제적 변수의 추정결과는 <Table 5>와 같으며, 이들 계수 및 변수를 활용하여 15개 근해어업의 동태적 최적수준을 추정하였다.

<Table 5> Technological-biological coefficients and economic parameters of offshore fisheries

q	k (kg)	r	c (won/hp)	p (won/kg)	δ (%)
0.0000002	4,297,602,734	0.5455	1,385,508	2,608	4.5

Note: $q = \frac{-X_2}{2+r}$, $k = \exp\left(\frac{2+r}{2rq} C\right)$, $r = \frac{2(1-X_1)}{1+X_1}$

시간이 경과하면서 발생하는 어업이윤의 순현재가치를 극대화하는 근해어업의 최적 어획량(Y^*), 최적 어획노력량(F^*), 최적 어업자원량(X^*)을 도출하기 위해서는 먼저 X^* 를 찾고, 이후 F^* , Y^* 의 순으로 추정하게 된다. 한편 X^* 를 도출하는 식의 양변에 X^* 가 존재하기 때문에 수치해석(numerical method)에서 사용되는 이분법(bisection method)을 활용해야 하며, 이를 통해 추정된 X^* 는 2,766,668톤으로 도출되었다.

추정된 X^* 를 활용한 결과, F^* 는 1,251,007마력, Y^* 는 664,678톤으로 분석되었다. 근해어업의 최근 5년 평균수준과 동태적 최적수준을 비교해보면, 최근 5년 평균 어획노력량은 1,796,516마력으로 최적 어획노력량에 비해 545,509마력 더 투입되고 있었다. 또한 근해어업의 최근 5년 평균 어획량도 최적 어획량보다 15,133톤 높은 679,811톤이었다(<Table 6> 참조).

<Table 6> Comparison of catches and fishing efforts between recent 5 years and dynamic optimization

Level	Efforts (hp)	Catches (ton)
Dynamic optimal level	1,251,007	664,678
Recent 5 years (2014-2018)	1,796,516	679,811
Difference	-545,509	-15,133

본 연구에서는 근해어업의 최근 어획노력량을 약 30% 줄여야만 동태적 최적 어획노력량 수준에 도달하는 것으로 분석되었다. 이러한 분석 결과의 적정성 여부를 검토하기 위해 관련 선행연구를 살펴보면, FIRA(2017)는 근해어선의 7~28%를 감척해야 하며, PCAFRP(2020)에서는 근해어선의 18~41%를 감척해야 하는 것으로 분석하였다. 이러한 선행연구의 결과와 비교해보면 본 분석에서 도출된 어획노력량 감축 비율은 어느정도 신뢰할 수 있는 분석결과라 보여진다.

정부는 근해어업을 대상으로 1994년부터 어선 감척사업을 시행중이나 본 분석의 결과에 따르면 근해어업은 여전히 동태적 최적수준 이상으로 어획노력량을 투입하여 초과 어획을 하고 있는 것으로 나타났다. 이 외에도 근해어업은 과잉 어획노력량 투입에 따라 유류를 필요 이상으로 사용함으로써 불필요한 온실가스도 배출하고 있을 것으로 추정된다. 온실가스 배출이 수온 상승과 해양 산성화를 유발하여 어류 생체량을 6.0~66.9% 감소시킨다는 연구(Kang et. al., 2012)도 존재하는 만큼 최근 어획노력량 수준과 동태적 최적 어획

노력량 수준에서의 온실가스 배출량을 추정하여 온실가스 감축잠재량을 도출해보는 것은 의미있는 시도라 사료된다.

5. 온실가스 감축잠재량 및 배출권 구입비용 추정 결과

<Table 7>은 15개 근해어업의 온실가스 감축잠재량 추정에 이용한 변수를 정리한 결과이다. CO₂ 추정을 위한 유종별 순발열량 및 배출계수와 CH₄와 N₂O의 배출계수 및 전환계수는 ‘2020 국가 온실가스 인벤토리 보고서’를 참조하였다.

<Table 7> Parameters used to calculate potential GHG reductions of offshore fisheries

Gas	Fuel	Net calorific value (MJ/l)	Emission Factor (kg/TJ)	Conversion Factor
CO ₂	Gasoline	30.4	19,548	-
	Diesel	35.2	20,111	-
	Heavy oil	36.4	20,657	-
CH ₄	Gasoline	-	20	0.930
	Diesel	-	5	0.931
	Heavy oil	-	8.84	0.933
N ₂ O	Gasoline	-	-	0.930
	Diesel	-	0.6	0.931
	Heavy oil	-	-	0.933

근해어업의 업종별 온실가스 감축잠재량을 추정하기 위해 첫째, <Table 6>의 최근 5년(2014~2018) 어획노력량과 동태적 최적수준에 각 업종의 마력 비중을 곱하여 업종별 마력을 도출하였다. 둘째, 개별 업종의 최근 5년 평균마력과 동태적 최적마력에 온실가스별(CO₂, CH₄, N₂O) 마력당 평균 배출량을 곱하여 최근 5년 및 동태적 최적수준에서의 업종별·온실가스별 배출량을 추정하였다. 셋째, 지구온난화지수(CO₂=1, CH₄=21, N₂O=310)를 활용하여 온실가스별 배출량을 CO₂ 단위로 통일하였다. 넷째, 업종별 온실가스

감축잠재량은 최근 5년 평균 업종별 온실가스 배출량에서 동태적 최적 어획노력량 수준에서의 업종별 온실가스 배출량을 차감하여 추정하였다.

온실가스 감축잠재량 추정 결과, 근해어업 중 대형선망(67,948tCO₂), 쌍끌이대형저인망(55,741tCO₂), 기선권현망(41,479tCO₂)은 2척 이상의 어선으로 선단을 구성하여 조업을 실시하기 때문에 다른 업종에 비해 온실가스 감축잠재량이 큰 것으로 분석되었다. 그리고 근해채낚기(70,807tCO₂)와 근해통발(51,567tCO₂)은 서·남해 12해리, 동해 24해리 밖에서 조업하는 어선의 비중이 높아 온실가스 감축잠재량도 높게 나타났다. 반면, 잠수기(3,357tCO₂)는 어법의 특성상 연안 근처에서 조업하기 때문에 온실가스 감축잠재량이 가장 적은 것으로 분석되었다. 또한 동해구중형트롤(7,377tCO₂), 소형선망(8,095tCO₂), 서남해구외끌이중형저인망(8,532tCO₂), 서남해구쌍끌이중형저인망(9,090tCO₂)은 비교적 어선세력이 작고, 서·남해 12해리, 동해 24해리 안에서 조업하는 어선의 비중이 높기 때문에 온실가스 감축잠재량도 낮은 것으로 분석되었다(<Table 8> 참조).

「탄소중립 2050」 추진전략의 이행에 따라 본 연구에서 추정된 동태적 최적마력수준에서의 업종별 온실가스 배출량만큼 상한선이 설정됨에도 불구하고, 15종의 근해어업이 최근 5년 수준의 마력에서 발생하는 온실가스와 동일한 양을 배출하고자 한다면 상한선을 초과하는 배출량만큼 온실가스 배출권을 구입해야 한다. 이러한 가정하에서 개별 업종의 온실가스 감축잠재량에 한국거래소의 KAU21 할당배출권(2021/1/4-27) 평균가격인 20,496원/tCO₂을 곱하여 온실가스 배출권 구입에 소요되는 비용을 추정하였다. 또한 업종별 배출권 구입비용에 업종별 허가정수를 나누어 업종별 허가당 온실가스 배출권 구입비용도 추정해보았다.

근해어업의 업종별 온실가스 배출권 구입비용은 근해채낚기(14억 5,125만 원), 대형선망(13억 9,264

만 원), 대형트롤(11억 4,244만 원), 근해통발(10억 5,691만 원), 기선권현망(8억 5,014만 원) 순으로 높았다. 업종별 배출권 구입비용이 낮은 어업은 잠수기(6,881만 원), 동해구중형트롤(1억 5,119만 원), 소형선망(1억 6,591만 원), 서남해구외끌이중형저인망(1억 7,487만 원), 서남해구쌍끌이중형저인망(1억 8,630만 원) 순이었다(<Table 8> 참조).

근해어업의 업종별 허가당 온실가스 배출권 구입비용을 살펴보면, 선단조업을 실시하고, 다른 어업에 비해 상대적으로 허가수가 작은 대형선망(5,803만 원), 쌍끌이대형저인망(3,173만 원), 서남해구쌍끌이중형저인망(2,070만 원), 대형트롤(1,301만 원), 기선권현망(1,149만 원) 순으로 허가당 배출권 구입비용이 높았다. 한편 근해어업 중 허가수가 많은 잠수기(29만 원), 근해자망(144만 원), 근해연승(299만 원), 근해채낚기(341만 원), 근해안강망(361만 원) 등은 허가당 온실가스 배출권 구입비용이 낮은 것으로 분석되었다(<Table 8> 참조).

추가적으로 온실가스 배출권 구입비용을 고려하였을 때, 근해어업의 경영에 미치는 영향을 분석해보았다. 이를 위해 최근 5년간(2014~2018년) 업종별 허가당 평균 경영수지에 생산자물가지수(2015=100)를 적용하여 실질가치화 한 후 온실가스 배출권 구입비용 반영 유무에 따른 업종별 어업이익률의 변화를 추정하였다. 분석 결과, 쌍끌이대형저인망(0.91%), 서남해구쌍끌이중형저인망(0.73%), 근해채낚기(0.72%), 근해통발(0.71%), 대형선망(0.58%) 순으로 어업이익률 감소폭이 높게 나타났다. 「탄소중립 2050」 추진전략의 이행에 따라 온실가스 배출을 규제할 경우, 상기 5개 업종이 다른 업종에 비해 상대적으로 민감하게 반응하는 것으로 분석되었지만 온실가스 배출권 구입비용을 반영하여도 근해어업의 업종별 어업이익률이 큰 폭으로 하락하지는 않는 것으로 나타났다(<Table 8> 참조).

<Table 8> Estimated results of offshore fisheries' potential GHG reductions(tCO_2), GHG emissions purchasing cost(won) and profit rate(%) change

Gear	Reductions	Purchasing cost		Cost per permit		Profit rate per permit			
		(Rank)	(Rank)	(Rank)	(Rank)	A	B	C=A-B	(Rank)
(L)Otter trawl	33,017	676,698,554	(8)	13,013,434	(4)	20.38	19.92	0.46	(8)
East sea trawl	7,377	151,191,549	(14)	3,978,725	(9)	45.69	45.49	0.20	(13)
(L)Pair trawl	55,741	1,142,444,852	(3)	31,734,579	(2)	12.84	11.94	0.91	(1)
(L)Danish seine	10,846	222,303,959	(10)	4,940,088	(7)	23.33	22.84	0.48	(7)
(M)Pair trawl	9,090	186,303,602	(11)	20,700,400	(3)	25.56	24.83	0.73	(2)
(M)Danish seine	8,532	174,869,002	(12)	4,066,721	(8)	26.97	26.62	0.35	(11)
(L)Purse seine	67,948	1,392,639,716	(2)	58,026,655	(1)	0.94	0.36	0.58	(5)
(S)Purse seine	8,095	165,906,435	(13)	3,858,289	(10)	19.58	19.21	0.37	(10)
(O)Stow net	35,185	721,144,535	(6)	3,605,723	(11)	26.73	26.35	0.38	(9)
(O)Gill net	27,317	559,876,132	(9)	1,439,270	(14)	30.90	30.76	0.15	(14)
Anchovy drag net	41,479	850,141,235	(5)	11,488,395	(5)	17.20	16.70	0.50	(6)
(O)Angling	70,807	1,451,247,436	(1)	3,414,700	(12)	18.75	18.03	0.72	(3)
(O)Long line	34,327	703,548,032	(7)	2,993,821	(13)	22.52	22.22	0.30	(12)
(O)Trap	51,567	1,056,910,355	(4)	7,887,391	(6)	25.57	24.86	0.71	(4)
Diver	3,357	68,805,141	(15)	292,788	(15)	32.78	32.66	0.12	(15)
Sum	464,683	9,524,030,535	-	11,429,399*	-	23.32*	22.85*	0.46*	-

Note 1: Star(*) means average.

Note 2: A is excluding emissions right cost and B is including emissions right cost.

IV. 결론

본 연구는 동태적 최적 어업생산 함수를 활용하여 근해어업의 동태적 최적 어획노력량(마력) 수준을 도출한 후, 동 수준에 기반하여 업종별 온실가스 감축잠재량을 추정하였다. 더불어 「탄소중립 2050」 추진전략의 이행으로 인한 온실가스 배출규제시 근해어업의 어업이익률 변화도 살펴보았다.

본 연구의 분석결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, Gavaris의 일반선형모형을 통해 표준화한 근해어업의 마력을 활용하여 5개 잉어생산모형 중 통계적으로 가장 유의한 CYP 모형으로부터 기술적·생물학적 계수를 추정하였다. 둘째, 동태적 최적 어업생산 함수를 이용하여 추정한 근해어업의 동태적 최적 어획노력량 및 어획량과 최근 5년 평균 수준을 비교해보면 어획노력량은 약 30% 감축해야하며, 어획량도 약 2% 줄여야 하는 것으로 나타났다. 셋째, 어획노력량 감축비율을 활용하여 추정한 업종별 온실가스 감축잠재량과 온실가스 배출규제를 가정하였을 경우 부담해야 하는 배출권 구입비용은 선단조업을 하거나 원거리에서 조업하는 어선의 비중이 높은 근해채낚기, 대형선망, 쌍끌이대형저인망 순으로 높았다. 반면, 근거리에서 조업하거나 어선세력이 작은 잠수기, 동해구중형트롤, 소형선망은 온실가스 감축잠재량과 배출권 구입비용이 낮은 것으로 분석되었다. 넷째, 근해어업의 업종별 허가당 온실가스 배출권 구입비용은 허가수가 작은 대형선망, 쌍끌이대형저인망, 서남해구쌍끌이중형저인망 순으로 높았으나 잠수기, 근해자망, 근해연승은 허가수가 많아 허가당 배출권 구입비용이 낮았다. 다섯째, 온실가스 배출권 구입비용 반영시 근해어업의 업종별 허가당 어업이익률은 평균적으로 0.46% 하락하지만 여전히 흑자가 발생하는 것으로 분석되었다.

상기 분석결과에 기초하여 도출한 본 연구의

시사점은 다음과 같다. 우선 근해어업의 어획노력량은 여전히 과잉투입되고 있으며, 이로 인해 온실가스도 과다하게 배출하고 있었다. 따라서 어획노력량을 줄여 온실가스 배출량을 감축할 수 있는 어선감척사업의 규모를 가능한 범위 내에서 지속적으로 확대할 필요가 있다. 또한 잔존 근해어업인과 정부는 온실가스 배출을 줄일 수 있을 것으로 예상되는 전기복합어선의 개발 및 보급에 필요한 재원 마련 방안에 관한 논의를 시작해야 할 것으로 판단된다. 그리고 근해어업이 「탄소중립 2050」 추진전략의 이행으로 인해 온실가스 배출규제 대상에 포함되어 배출권을 구입하더라도 어업이익률은 소폭 하락한 것에 그치는 만큼 업계의 도산과 같은 심각한 상황이 발생할 가능성은 낮을 것으로 예상된다.

본 연구는 동태적 최적 어업생산 함수를 활용하여 근해어업의 온실가스 감축잠재량을 추정하고, 온실가스 배출규제시 어업경영에 미치는 영향을 예상해 보았다는 점에서 의의가 있다. 더불어 향후 계획되어 있는 ‘해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵’ 수립 시 근해어업에 국한하여 본 분석의 결과를 논리적 근거 및 기초자료 중 하나로 활용할 수 있다는 점 또한 의의라 할 수 있을 것이다.

그러나 공식적인 어종별 자원평가 자료 획득의 어려움으로 개별 업종에 동일한 어획노력량 감축비율을 적용한 점이 본 연구의 다소 미흡한 부분이라고 할 수 있다. 추후 어종별 자원평가 자료를 활용하여 업종별 어획특성을 반영한 온실가스 감축잠재량을 도출할 수 있을 것이나, 이는 향후 과제로 남겨둔다.

References

- Bae JH, Yang YS, Kim HY, Hwang BK, Lee CW, Park SB and Lee JH(2019). A quantitative analysis of greenhouse gas emissions from the major

- offshore fisheries. *J Korean Soc Fish Ocean Technol*, 55(1), 50~61.
<http://dx.doi.org/10.3796/KSFOT.2019.55.1.050>
- Cho HS and Nam JO(2020). The Dynamic Optimal Fisheries Management for Spanish Mackerel. *Environmental and Resource Economics Review*, 29(3), 363~388.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2020.29.3.363>
- Choi JD(2017). A Study on the Optimal Emission of CO_2 due to Climate Change: An Application for Large Purse Seine. *Ocean and Polar Research* 39(3), 195~203.
<http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2017.39.3.195>
- Clark CW and Munro GR(1975). The Economics of Fishing and Modern Capital Theory: A Simplified Approach. *J Env Econ Mann* 2(2), 92~106.
[https://doi.org/10.1016/0095-0696\(75\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0095-0696(75)90002-9)
- Clark CW(1990), *Mathematical Bioeconomics*, John Wiley and Sons, 1~386.
- Clarke RP, Yoshimoto SS and Pooley SG(1992). A bioeconomic analysis of the Northwestern Hawaiian Islands lobster fishery. *Marine Resource Economics* 7(3), 115~140.
<https://doi.org/10.1086/mre.7.3.42629029>
- Energy greenhouse gas total information platform service. 2021. CO_2 Emissions calculation. Retrieved from <http://www.tips.energy.or.kr>. Accessed 25 Jan 2021.
- Fox Jr WW(1970). An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. *Transactions of the American Fisheries Society* 99, 80~88.
[https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1970\)99<80:AESMFO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1970)99<80:AESMFO>2.0.CO;2)
- Gavaris S(1980). Use of a Multiplicative Model to Estimate Catch Rate and Effort from Commercial Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 37(12), 2272~2275.
<https://doi.org/10.1139/f80-273>
- Jeon YH and Nam JO(2018). The Estimation of Virtual Damage to Major Coastal Fisheries Based on Prohibition of Main Fisheries Subsidies. *Ocean Policy Research* 33(1), 247~282.
<https://doi.org/10.35372/kmiopr.2018.33.1.010>
- Jeon YH and Nam JO(2020). The Estimation of Greenhouse Gas Emissions for Major Coastal Fisheries using Dynamic Optimal Fisheries Theory. *Ocean Policy Research* 35(2), 23~51.
- Jeon YH and Nam JO(2021). Production Efficiency Analysis of Offshore and Coastal Fisheries Considering Greenhouse Gas. *Environmental and Resource Economics Review*, 30(1), 79~105.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2021.30.1.79>
- Joint Ministry(2020). 「2050 Carbon Neutral」 Strategy, 1~24.
- Kang YH, Ju SJ and Park YG(2012). Predicting Impacts of Climate Change on Sinjido Marine Food Web. *Ocean and Polar Research* 34(2), 239~251.
<http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2012.34.2.239>
- Korea Exchange Permit Market Information Platform. 2020. Permit price inquiry. Retrieved from <http://www.ets.krx.co.kr>. Accessed 27 Jan 2021.
- Korean Statistical Information Service(KOSIS). 2021. Producer price index(2014~2018). Retrieved from <https://kosis.kr>. Accessed 25 Jan 2021.
- Lee JH(2013). A quantitative analysis of GHG emissions from the Korean large scale purse seine fishery using LCA method. *Kor J Fish Aquat Sci* 49(3), 282~290.
<http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.49.3.282>
- Lee JH and Lee CW(2011). A Quantitative Analysis of GHG Emissions from the Korean Offshore Large Scale Fisheries Using an LCA Method. *Kor J Fish Aquat Sci* 44(4), 383~389.
<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2011.0383>
- Lee JH, Lee CW and Kim JE(2015). A Quantitative Analysis of Greenhouse Gas Emissions from the Danish Seine Fishery using Life Cycle Assessment. *Kor J Fish Aquat Sci* 48(2), 200~206.
<http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2015.0200>
- Ministry of Environment(2020). 2020 National greenhouse gas inventory report of Korea, 1-436.
- Nam JO(2011). Determining Optimal Production of Mackerel and Jack Mackerel Caught by Large Purse Seine Based on Hamiltonian Method. *Ocean Policy Research* 26(2), 21~46.
<http://dx.doi.org/10.35372/kmiopr.2011.26.2.002>
- Nam JO and Cho HS(2018). Estimation of the Optimal Harvest and Stock Assessment of Hairtail Caught by Multiple Fisheries. *Ocean and Polar Research* 40(4), 237~247.

- <http://dx.doi.org/10.4217/OPR.2018.40.4.237>
- Nam JO, Sim SH and Kwon OM(2015). Estimating Optimal Harvesting Production of Yellow Croaker Caught by Multiple Fisheries Using Hamiltonian Method. *J. Fish. Bus. Adm.* 46(2), 59~74.
<http://dx.doi.org/10.12939/FBA.2015.46.2.059>
- National Assembly Library. 2021. Actual Condition Survey on Offshore Fisheries(2015-2019). Retrieved from <http://www.nanet.go.kr>. Accessed 21 Jan 2021.
- National Assembly Library. 2021. Statistical Yearbook of Fisheries(1986-2019). Retrieved from <http://www.nanet.go.kr>. Accessed 17 Jan 2021.
- National law information center. 2020. Enforcement Decree of the Fisheries Act. Retrieved from <http://www.law.or.kr>. Accessed 21 Jan 2021.
- National law information center. 2020. General guidelines for feasibility surveys. Retrieved from <http://www.law.or.kr>. Accessed 26 Jan 2021.
- Park JA, Gardner C, Chang MI, Kim DH and Jang YS(2015). Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions from Offshore Fisheries of the Republic of Korea. *PLoS ONE* 10(8): e0133778
<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0133778>
- Presidential Committee on Agriculture, Fisheries and Rural Policy(2020). Sustainable Coastal and Offshore Fisheries Innovation Plan, 1~87.
- Quinn TJ and Deriso RB(1999). Quantitative Fish Dynamics, University of Oxford, 1~560.
- Shin YM and Jeong GY(2018). A study on Estimation of CO_2 Abatement Cost in Korean Offshore Fishery. *Environmental and Resource Economics Review*, 27(3) 399~420.
<https://doi.org/10.15266/KEREA.2018.27.3.399>
- Verhulst PF(1838). Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondances mathématiques et physiques* 10, 113~121.
- Yang YS, Lee DG, Hwang BK, Lee KH and Lee JH(2015). A quantitative analysis of greenhouse gases emissions from bottom pair trawl using a LCA method. *Kor J Fish Aquat Sci* 51(1), 111~119.
<http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2015.51.1.111>
-
- Received : 18 March, 2021
 - Revised : 08 April, 2021
 - Accepted : 19 April, 2021