

SFA를 이용한 근해어업의 온실가스 배출 효율성 및 감축잠재량 추정

전용한 · 심성현[†]

부경대학교(전임연구원) · *한국해양수산개발원(전문연구원)

Estimating Greenhouse Gas Emission Efficiency and Mitigation Potential of Offshore Fisheries Using SFA

Yong-Han JEON · Seong-Hyun SIM[†]

Pukyong National University(associate researcher) · *Korea Maritime Institute(senior researcher)

Abstract

The purpose of this study is to estimate greenhouse gas(GHG) emission efficiency(GEE) and GHG mitigation potential(GMP) of offshore fisheries in preparation for carbon neutral and negative promotion in the ocean and fisheries sector, and to suggest policy improvements related to GHG mitigation. To this end, this study used stochastic frontier analysis(SFA) considering exogenous determinants of GHG emission inefficiency. As a result, the GEE of fleet and drag net fisheries with high fuel cost and vessel age was lower than other fisheries. In addition, the GMP and mitigation ratio of large purse seine, large pair trawl, large otter trawl, and anchovy drag net were higher than those of other fisheries. Lastly, as policy improvements to reduce GHG emission from offshore fisheries, fleet size reduction, development of low-energy used fishing gear, easing of conditions for participation in fishing vessel modernization projects, revising laws to supply eco-friendly fishing vessel, and improvement of the tax-free petroleum supply system were proposed.

Key words : Offshore fisheries, Greenhouse gas(GHG), GHG emission efficiency(GEE), GHG mitigation potential(GMP), Stochastic Frontier Analysis(SFA), Carbon neutral, Carbon negative

I. 서론

최근 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 연차보고서에서는 산업혁명 이전 대비 평균 기온 상승폭을 1.5℃ 아래로 억제하려면 2030년까지 2019년 온실가스 배출량의 약 43%를 감축해야 하며, 2050년까지는 무려 84% 정도를 줄여야 할 것으로 예측하였다(IPCC, 2022). 이러한 전망 이전에도 세계 각국은 2019년 UN 기후행동 정상회의에서 기후변화 문제의 해결책으로

온실가스 순배출량이 0이 되도록 하는 탄소중립(Carbon Neutral)을 선언하였고, 이는 국제사회의 기후변화 대응체제로 자리 잡았다(IISD, 2019).

이에 맞춰 우리 정부도 국제사회의 기후변화 대응 노력에 동참하고, 탄소중립 달성과 국내 온실가스 배출 저감을 위해 2020년 산업부문별 탄소중립 로드맵 수립 계획이 포함된 「2050 탄소중립」 추진전략을 발표하였다(Joint Ministry, 2020). 이에 따라 수산업 부문에서는 2050년까지 탄소 순배출량이 음(-)을 의미하는 ‘탄소 네거티브

[†] Corresponding author : 051-797-4558, shaef@kmi.re.kr

브(negative)'를 목표로 설정한 '해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵'이 수립되었다(MOF, 2021). 이어서 2022년 해양수산부는 2030년까지 해양수산분야 온실가스 배출량을 2018년 대비 70% 감축하여 약 120만 tCO_2eq 까지 줄이겠다는 목표를 제시한 바 있다(KOREA, 2022).

2018년 기준 수산업에서 발생하는 온실가스 배출량의 약 83%는 어업에서 배출하였으며(MOF, 2021), 2020년 기준 근해어업의 온실가스 배출량은 어업 부문 배출량의 약 60%를 차지하는 것으로 추정되었다(NIFS, 2022). 이처럼 온실가스 다(多)배출 산업인 근해어업이 해양수산부문 탄소 네거티브 달성에 중추적인 역할을 하기 위해서는 여러 방법론을 활용하여 도출된 지표를 통해 온실가스 배출 실태를 살피는 것이 선행되어야 한다. 그러나 근해어업은 업종별로 조업형태와 어법, 규모가 상이함에도 불구하고, 주로 근해어업 전체의 온실가스 배출량이 관련 지표로 활용되어 근해어업의 업종별 온실가스 배출 실태를 세부적인 관점에서 파악하는데 한계가 있었다.

따라서 근해어업의 업종별 투입 및 산출수준까지 고려하는 계량경제학적 모형으로 온실가스 배출 효율성을 추정하여 업종별 상대적인 온실가스 배출 수준을 살펴볼 필요가 있다. 이와 동시에 온실가스 배출량 감축이 수산분야 탄소 네거티브 달성의 주요 수단 중 하나인 만큼 근해어업의 업종별 온실가스 감축잠재량을 정량적으로 추정해 보는 것 또한 현시점에서 시의적으로나 정책적, 산업적 측면에서 의미있는 시도라 판단된다.

그동안 본 연구와 관련된 선행연구에서는 확률변경분석(SFA, Stochastic Frontier Analysis)을 이용하여 국내·외 산업이나 지역을 대상으로 온실가스 배출 효율성과 감축잠재량을 추정해왔다. 국내에서는 15개 산업 또는 석유화학기업, 철강기업을 대상으로 온실가스 배출 효율성을 추정하였고(Kim et al., 2019; Kim, 2020a; Kim, 2020b), 음식료품 제조업의 온실가스 배출 효율성 및 감축잠재량까지 추정하였다(Kang and Suh, 2022). 국

외에서는 중국 수도권에 위치한 39개 산업 또는 양쯔강 유역 11개 성(省)의 온실가스 배출 효율성 및 감축잠재량을 추정하였다(Wang et al., 2019; Wang et al., 2021).

수산분야에서는 Undesirable SBM(Slack-based Measure) 모형이나 Global Malmquist Luenberger 생산성 지수를 이용하여 온실가스 배출량을 반영한 근해어업의 효율성 또는 근해어업의 생산성을 분석하였다(Jeon and Nam, 2021a; Jeon and Nam, 2021c). 이 외에도 동태적 최적 어업이론을 이용하여 근해어업 또는 연안어업의 업종별 온실가스 감축잠재량을 추정하여 왔다(Jeon and Nam, 2020; Jeon and Nam, 2021b). 그러나 상기 연구는 비모수적(non-parametric) 분석방법을 사용함에 따라 온실가스 배출량을 고려한 효율성이나 생산성이 다소 부정확하게 추정될 수 있다는 한계를 지니고 있으며, 온실가스 배출 효율성과 생산성의 결정요인도 추정하지 못하였다. 그리고 근해어업 또는 연안어업의 온실가스 감축비용을 모든 업종에 동일하게 적용하여 업종별 온실가스 감축잠재량을 추정하였다는 한계가 존재한다.

이에 본 연구에서는 수산분야 선행연구의 한계를 극복하고, 효율변경으로부터의 편차를 기술적 비효율성 및 확률적 오차항으로 구분할 수 있는 모수적(parametric) 분석방법인 SFA를 이용하여 근해어업의 온실가스 배출 비효율성의 결정요인과 연도별·업종별 온실가스 배출 효율성을 도출해 보고자 한다. 더불어 도출된 근해어업의 온실가스 배출 효율성을 활용하여 연도별·업종별 온실가스 감축잠재량을 추정하며, 분석결과를 토대로 정책적 개선사항을 제시하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서는 비효율성의 외생적 결정요인을 고려한 SFA 모형의 이론을 설명한다. III장에서는 SFA 모형의 추정결과와 근해어업의 연도별·업종별 온실가스 배출 효율성 및 감축잠재량 추정결과를 살펴본다. 마지막 IV장에서는 분석결과에 요약 및 정책적 시사점을 서술하고, 연구의 의의와 함께 연구

의 한계점, 후속 연구에 대해 간략히 언급하며 글을 맺고자 한다.

II. 이론적 배경 및 분석 모형

1. 온실가스 배출량 산정

근해어업은 어선 및 기관의 제원과 조업 및 운항특성이 천차만별이며, 어선의 무선설비 장치(V-Pass) 오작동으로 인해 조업시간을 정확하게 파악하는 것은 불가능하다. 이에 본 연구는 유류사용량과 국가고유 배출계수만으로도 근해어업이 배출하는 이산화탄소(CO_2) 추정이 가능한 Tier2 수준의 산정방법과 IPCC의 기본 배출계수 및 유류사용량만으로도 메탄(CH_4)과 아산화질소(N_2O) 배출량을 추정할 수 있는 Tier1 수준의 산정방법을 동시에 활용하였다. 본 연구에서는 근해어업의 온실가스 배출량 추정을 위해 수협(수협)의 근해어업 업종별 면세유류 공급실적(2004~2020년)으로 유류사용량을 대체하였고, CO_2 및 CH_4 , N_2O 배출량 산정에는 온실가스종합정보센터 및 '2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서'의 산정식을 활용하였다(GIR, 2022, Jeon and Park, 2022).

식 (1)은 근해어업의 CO_2 배출량 산정식으로, FS 는 유류공급량이며, NCV 는 순발열량, CEF 는 탄소배출계수, OF 는 산화율을 나타낸다. i 는 14종의 근해어업(근해안강망어업, 근해연승어업, 근해자망어업, 근해채낚기어업, 근해통발어업, 기선권현망어업, 대형선망어업, 대형트롤어업, 동해구외끌이중형저인망어업, 동해구중형트롤어업, 서남해구외끌이중형저인망어업, 쌍끌이대형저인망어업, 외끌이대형저인망어업, 잠수기어업)이며, j 는 연도(2004~2020년), k 는 유종(휘발유, 경유, 중유)이다. 10^{-6} 은 CO_2 배출량을 톤으로 전환하는 상수이며, $\frac{44}{12}$ 는 탄소배출량을 CO_2 배출량으로 환산하는데 활용된다.

$$CO_2 \text{ Emissions}_{ijk}(t) \quad \dots (1) \\ = FS_{ijk} \times NCV_k \times CEF_k \times OF_k \times 10^{-6} \times \frac{44}{12}$$

근해어업의 CH_4 와 N_2O 배출량 산정식은 식 (2)와 (3)과 같으며, CF_j 는 전환계수, $EF_j(CH_4)$ 와 $EF_j(N_2O)$ 는 CH_4 와 N_2O 의 배출계수를 의미한다. 그리고 10^{-3} 은 CH_4 , N_2O 배출량을 톤으로 전환하는 상수이고, 41.868은 열량 단위인 TOE로 나타낸 유류공급량을 에너지 측정 단위인 Joule로 환산하는 계수이다.

$$CH_4 \text{ Emissions}_{ijk}(t) \quad \dots (2) \\ = FS_{ijk} \times 41.868 \times CF_k \times EF_k(CH_4) \times 10^{-3}$$

$$N_2O \text{ Emissions}_{ijk}(t) \quad \dots (3) \\ = FS_{ijk} \times 41.868 \times CF_k \times EF_k(N_2O) \times 10^{-3}$$

추정된 CH_4 와 N_2O 배출량을 CO_2 단위로 환산하기 위해 CH_4 에는 27.2를 곱하고, N_2O 에는 273의 지구온난화지수를 곱하였다(IPCC, 2022). 여기서, 지구온난화지수는 CO_2 를 기준으로 하여 각 온실가스가 지구온난화에 영향을 주는 정도를 의미한다(IPCC, 2022). 위의 과정을 거쳐 CO_2 로 환산된 CH_4 와 N_2O 배출량은 식 (1)의 추정결과와 합산하여 분석에 활용한다. 한편, 2021년의 면세유류 공급량은 연구목적으로도 공개하고 있지 않아 2018~2020년 온실가스 배출량을 평균하여 2021년의 온실가스 배출량을 추정하였다.

2. SFA 적용을 위한 산출물 거리함수 전환

통상적으로 어업인은 조업의 목표를 어업비용 절감보다는 어업수입 극대화로 설정하고 조업하는 경우가 많다. 본 연구는 이러한 어업의 특성이 반영된 산출물 거리함수(output distance function)와 기술적 효율성(technical efficiency)은 거리함수의 역수라는 개념을 활용하고자 한다(Farrell, 1957; Shephard, 1970). 근해어선이 배출하는 온실가스는 조업과정에서 발생하는 부산물

(by-product)인 비소망 산출물(undesirable output)로 볼 수 있으며, 근해어업의 온실가스 배출량을 포함한 산출물 거리함수와 온실가스 배출 효율성(GEE, Greenhouse gas Emission Efficiency)은 식 (4) 및 식 (5) 같다(Kim et al., 2019; Kim, 2020a).

$$D[(Y, C), (L, HP, GT)] = \max\{\lambda | (Y, C/\lambda) \in P(X)\} \quad (4)$$

$$GEE = 1/D[(Y, C), (L, HP, GT)] \quad (5)$$

여기서, D 는 산출물 거리함수이며, Y 와 C 는 소망 산출물과 비소망 산출물로 각각 어업수입과 온실가스 배출량을 의미한다. L 과 HP , GT 는 투입물로 선원수, 어선 마력수, 어선 톤수를 의미하며, $P(X)$ 는 투입물을 활용한 생산가능집합을 표현한 것이다. 식 (4)의 의미는 어업수입과 선원, 어선 마력수 및 어선 톤수를 유지하면서 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 최대 비율(λ)을 도출하는 것이다(Kim et al., 2019).

본 연구에서는 식 (5)와 같이 정의된 GEE 를 추정하기 위해 SFA를 활용하고자 한다. SFA는 함수의 형태와 오차항의 분포를 먼저 가정한 후 분석하지만, 효율변경과의 편차를 기술적 비효율성 오차항과 확률적 오차항으로 분리할 수 있어 자료포락분석(DEA)보다 효율성 추정이 정확하다고 알려져 있다(Belotti et al., 2013; Jeon and Nam, 2022). 하지만 SFA를 이용한 근해어업의 GEE 추정을 위해서는 우선 식 (4)의 거리함수를 분석에 활용할 수 있는 형태로 전환(transformation)해야 한다. 이를 위해 식 (4)의 거리함수가 산출물에 대해 선형동차성(linear homogeneity)을 만족한다는 조건을 이용해야 하며(Kumbhakar et al., 2015), 이 조건을 식 (4)의 좌변에 적용하면 식 (6)을 도출할 수 있다(Kim et al., 2019; Kim, 2020a; Kim, 2020b).

$$D\left[\left(\frac{Y}{C}, \frac{C}{C}\right), (L, HP, GT)\right] = \frac{1}{C} D[(Y, C), (L, HP, GT)] \quad (6)$$

다음으로 식 (6)의 양변에 자연로그를 취한 후, 우변의 $\ln D[(Y, C), (L, HP, GT)]$ 를 온실가스 배출 비효율성에 대한 오차항(u)으로 가정하면, 분석에 활용할 수 있는 형태가 완성된다. 이를 정리한 결과는 식 (7)과 같다(Kim et al., 2019).

$$-\ln(C) = \ln D\left[\left(\frac{Y}{C}, 1\right), (L, HP, GT)\right] - u \quad (7)$$

3. 온실가스 배출 비효율성의 외생적 결정 요인을 포함한 SFA 모형

본 연구에서는 분석에 앞서 도출된 식 (7)의 $\ln D\left[\left(\frac{Y}{C}, 1\right), (L, HP, GT)\right]$ 가 Translog 함수의 형태를 보이는 것으로 가정한다(Wang et al., 2019; Wang et al., 2021). 왜냐하면 Translog 함수는 추정과정에서 측정오차를 최소화할 수 있고, 규모수익의 변화를 허용함에 따라 Cobb-Douglas 함수에 비해 유연하기 때문이다(Jeon and Nam, 2022). SFA를 활용하기 위해 Translog 함수에 확률적 오차항(v)을 추가하고, 모든 변수와 오차항에 14개 근해어업의 업종(i)과 2004년부터 2021년까지의 시간 흐름(t)을 고려한 근해어업의 온실가스 배출 효율함수는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} -\ln(C_{i,t}) = & \beta_0 + \beta_1 \ln(L_{i,t}) + \beta_2 \ln(HP_{i,t}) \quad (8) \\ & + \beta_3 \ln(GT_{i,t}) + \beta_4 \ln\left(\frac{Y_{i,t}}{C_{i,t}}\right) \\ & + \beta_5 \ln(L_{i,t}) \ln(HP_{i,t}) + \beta_6 \ln(L_{i,t}) \ln(GT_{i,t}) \\ & + \beta_7 \ln(HP_{i,t}) \ln(GT_{i,t}) + \beta_8 \ln\left(\frac{Y_{i,t}}{C_{i,t}}\right) \ln(L_{i,t}) \\ & + \beta_9 \ln\left(\frac{Y_{i,t}}{C_{i,t}}\right) \ln(HP_{i,t}) + \beta_{10} \ln\left(\frac{Y_{i,t}}{C_{i,t}}\right) \ln(GT_{i,t}) \\ & + \frac{1}{2} \beta_{11} \ln(L_{i,t})^2 + \frac{1}{2} \beta_{12} \ln(HP_{i,t})^2 \\ & + \frac{1}{2} \beta_{13} \ln(GT_{i,t})^2 + \frac{1}{2} \beta_{14} \ln\left(\frac{Y_{i,t}}{C_{i,t}}\right)^2 - u_{i,t} + v_{i,t} \end{aligned}$$

여기서, 식 (8)의 복합확률오차항을 구성하는 $u_{i,t}$ 와 $v_{i,t}$ 는 상호 독립이다. 한편, SFA를 이용하여 온실가스 배출 효율함수를 추정하기 위해서는

$u_{i,t}$ 에 대한 분포를 가정해야 한다. 본 연구에서는 모형의 확장성을 고려하여 $u_{i,t}$ 를 절삭된(truncated) 정규분포인 $u_{i,t} \sim iidN^+(0, \sigma_u^2)$ 로 가정하였으며, $v_{i,t}$ 는 선형회귀모형의 확률오차항 분포인 $v_{i,t} \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ 를 따른다고 가정하였다(Battese and Coelli, 1995). 더불어 본 연구에서는 온실가스 배출 비효율성인 $u_{i,t}$ 의 외생적 결정요인을 모형에 포함할 수 있도록 SFA 모형을 확장하였으며(Battese and Coelli, 1995), 이를 반영한 $u_{i,t}$ 는 식 (9)와 같다.

$$u_{i,t} = \alpha_0 + \alpha_1 FLEET_{i,t} + \alpha_2 DRAG_{i,t} + \alpha_3 \ln(AGE_{i,t}) + \alpha_4 \ln(FC_{i,t}) + \alpha_5 \ln(DC_{i,t}) + w_{i,t} \dots \dots \dots (9)$$

여기서, *FLEET*과 *DRAG*는 가변수로, 선단(대형선망어업, 기선권현망어업, 쌍끌이대형저인망어업) 또는 인망(기선권현망어업, 대형트롤어업, 동해구외끌이중형저인망어업, 동해구중형트롤어업, 서남해구외끌이중형저인망어업, 쌍끌이대형저인망어업, 외끌이대형저인망어업) 업종이면 1, 비선단 또는 비인망 업종이면 0으로 구분한다. 그리고 *AGE*는 어선의 선령, *FC*는 연료비, *DC*는 감가상각비를 의미한다. 식 (9)의 오차항인 $w_{i,t}$ 는 절삭된 정규분포인 $w_{i,t} \sim iidN^+(0, \sigma_w^2)$ 로 가정한다(Battese and Coelli, 1995).

나아가 본 분석에서는 추정의 효율성을 위해 최우추정법(MLE, maximum likelihood estimation)을 이용하여 식 (8)과 (9)를 동시에 추정하는 1단계 추정방법(single-stage estimation procedure)을 사용하였다(Wang and Schmidt, 2002; Belotti et al., 2013). 상기 분석과정을 거쳐서 추정된 $u_{i,t}$ 를 활용하면, 근해어업의 *GEE*는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다(Kim et al., 2019; Wang et al., 2019).

$$GEE_{i,t} = \exp(-u_{i,t}) \dots \dots \dots (10)$$

이때, 근해어업의 *GEE*는 0과 1 사이의 값을 보이며, 1에 가까울수록 온실가스 배출이 효율적

임을 의미한다(Kang and Suh, 2022). 그리고 상기 분석을 통해 근해어업의 온실가스 배출 효율성이 현재보다 개선되어 온실가스 배출 효율적인 수준에 도달하기 위해 저감해야 할 온실가스 감축잠재량(GMP, GHG Mitigation Potential) 도출이 가능하다. 근해어업이 온실가스 배출 효율적으로 변화하기 위한 GMP는 온실가스 배출량($C_{i,t}$)과 온실가스 배출 비효율성($1 - GEE_{i,t}$)을 곱하여 도출할 수 있으며, 이는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다(Wang et al., 2019; Kang and Suh, 2022).

$$GMP_{i,t} = C_{i,t} \times (1 - GEE_{i,t}) \dots \dots \dots (11)$$

III. 분석 결과

1. 자료 분석

본 연구의 분석대상은 국가승인통계인 통계청 어업경영조사의 조사 대상에 해당하는 14개 근해어업이며, 분석기간은 2004년부터 2021년까지 총 18년으로 패널자료의 형태로 분석자료를 구축하였다. 분석에 활용하는 관측치는 총 252개이며, 분석에 활용되는 변수는 온실가스 배출량(GHG)과 어업수입(Revenue), 선원수(Labor), 어선 마력수(HP)와 어선 톤수(GT), 선령(Vessel age), 연료비(Fuel cost), 감가상각비(Depreciation cost)이다. 분석에 사용된 변수의 평균과 표준편차, 변동계수, 최솟값, 최댓값을 정리한 기초통계량은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Basic statistics of analysis data
(Unit: tCO_2eq , million won, person, year)

Variable	Obs	Avg.	S.D.	C.V.	Min.	Max.
GHG	252	1,631	2,428	1.49	44	12,000
Revenue	252	2,033	2,966	1.46	149	16,824
Labor	252	17	18	1.07	3	78
HP	252	1,485	1,975	1.33	327	8,478
GT	252	149	236	1.58	4	1,083
Vessel age	252	20	9	0.43	5	45
Fuel cost	252	417	684	1.64	7	3,606
Depreciation cost	252	56	116	2.09	1	766

분석자료 중 온실가스 배출량은 식 (1)~(3)과 수협의 연도별 면세유 공급실적에 기초하여 추정하였고, 이외의 변수들은 통계청에 공표된 연도별 어업경영조사 자료를 활용하였다. 분석에 이용한 각 변수의 수치는 근해어업의 업종별 허가 기준이며, 어업수입과 연료비, 감가상각비는 통계청에서 공개하고 있는 수산물 생산자물가지수 (2015=100)를 적용하여 실질가치로 변환하였다.

2. 온실가스 배출 효율함수 추정 결과

근해어업의 온실가스 배출 효율함수 추정을 위해서는 우선 Cobb-Douglas 함수와 Translog 함수 중 본 연구의 분석에 적합한 함수를 선정해야 한다. 본 연구에서는 최소제곱법(OLS)을 통해 추정한 Cobb-Douglas 함수와 Translog 함수의 로그우도값으로 우도비 검정을 시행하여 분석에 적합한 함수의 형태를 결정하였다. 함수 선정 이후 분석에 적합한 모형을 선택하기 위해 선정된 함수를 OLS와 SFA를 통해 추정하였으며, 도출된 로그우도값으로 우도비 검정을 시행하여 분석에 적합한 모형을 선택하였다.(Jeong and Kang, 2019; Jeon and Nam, 2022).

<Table 2> Results of log likelihood ratio test between models

Restricted model	Unrestricted model	LR stat.
Cobb-Douglas	Translog	$\chi^2_{(10)}=111.72***$
OLS	SFA	$\chi^2_{(1)}=269.36***$

Note 1: Null hypothesis(H_0) of log likelihood ratio test is that restricted model nested in unrestricted model.

Note 2: * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

우도비 검정을 통해 온실가스 배출 효율함수의 형태 및 분석 모형을 선정한 결과, 1% 유의수준에서 귀무가설을 모두 기각하였다. 따라서 Translog 형태의 함수를 SFA로 추정하는 분석모형이 통계적으로 적합한 것으로 확인되었다.

<Table 2>의 검정 결과에 근거하여 온실가스 배출 비효율성의 외생적 결정요인을 고려한 근해어업의 SFA 온실가스 배출 효율함수를 추정한 결과는 <Table 3>과 같다. <Table 3>의 $\lambda(\sigma_u/\sigma_v)$ 는 확률오차항의 σ_v 와 온실가스 배출 비효율성 오차항인 σ_u 의 비율을 의미하는데(Jeong and Kang, 2019), 1% 유의수준에서 ‘ $\lambda=0$ ’이라는 귀무가설을 기각하여 두 가지 오차항의 분포에 비대칭성이 존재하였다(Kang and Park, 2022). 따라서 OLS 추정법이 아닌 MLE 추정법에 기반한 SFA를 활용하는 것이 바람직하며, 온실가스 배출 비효율성을 결정하는 외생적 결정요인을 동시에 추정하는 것이 통계적으로도 적합하였다.

이어서 온실가스 배출 비효율성의 외생적 결정요인의 계수인 α_1 와 $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 추정치 중 통계적으로 유의한 결과만을 살펴보았다. 우선 선단(FLEET) 가변수 추정치(α_1)는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하였다. 즉, 선단어업이 비선단어업에 비해 온실가스 배출 비효율이 32.85% ($100 \times [e^{-0.3982} - 1]$)정도 낮은 것으로 분석되어, 선단어업이 비선단어업보다 온실가스 배출 비효율적 것이라는 통념과 상반된 결과가 도출되었다. 이는 식 (8)에 활용된 어업수입의 영향에 기인한 것으로, 선단어업의 높은 어업수입이 온실가스 배출 비효율성의 일부를 상쇄하였기 때문으로 풀이된다.

인망(DRAG) 가변수 추정치(α_2)는 10%의 유의수준에서 통계적으로 유의하였고, 인망어업이 비인망어업보다 온실가스 배출 비효율이 6.79% ($100 \times [e^{0.0679} - 1]$) 높은 것으로 분석되었다. 인망어업은 어망을 끌면서 조업을 실시하는데, 이 같은 어망과정에서 많은 연료가 소모된다. 이에 따라 인망어업은 비인망어업에 비해 상대적으로 온실가스를 많이 배출하게 되면서 어법이 인망어업의 온실가스 배출 효율성을 저하시키는 요인이 된 것으로 보여진다.

<Table 3> Results of estimating GHG emission efficiency function using SFA considering exogenous determinants

Coefficient	Estimate	S.E.	z-stat.
$Constant(-\ln(C_{i,t}))$	β_0 -32.4768***	5.6876	-5.71
$\ln(L_{i,t})$	β_1 -7.1550***	1.4070	-5.09
$\ln(HP_{i,t})$	β_2 5.0612***	1.2277	4.12
$\ln(GT_{i,t})$	β_3 2.1347**	0.8379	2.55
$\ln(Y_{i,t}/C_{i,t})$	β_4 3.7344***	0.8766	4.26
$\ln(L_{i,t})*\ln(HP_{i,t})$	β_5 0.0209	0.1776	0.12
$\ln(L_{i,t})*\ln(GT_{i,t})$	β_6 0.7759***	0.1884	4.12
$\ln(HP_{i,t})*\ln(GT_{i,t})$	β_7 -0.0923	0.1060	-0.87
$\ln(Y_{i,t}/C_{i,t})*\ln(L_{i,t})$	β_8 0.5067***	0.1397	3.63
$\ln(Y_{i,t}/C_{i,t})*\ln(HP_{i,t})$	β_9 -0.3353***	0.0866	-3.87
$\ln(Y_{i,t}/C_{i,t})*\ln(GT_{i,t})$	β_{10} -0.1506	0.0939	-1.60
$\ln(L_{i,t})^2$	β_{11} -0.1705	0.2755	-0.62
$\ln(HP_{i,t})^2$	β_{12} -0.4162**	0.1798	-2.31
$\ln(GT_{i,t})^2$	β_{13} -0.5086*	0.1514	-3.36
$\ln(Y_{i,t}/C_{i,t})^2$	β_{14} -0.1901**	0.0930	-2.04
$Constant(u_{i,t})$	α_0 -5.4203***	0.3817	-14.20
$FLEET_{i,t}$	α_1 -0.3982***	0.0749	-5.32
$DRAG_{i,t}$	α_2 0.0657*	0.0383	1.72
$\ln(AGE_{i,t})$	α_3 0.1711***	0.0482	3.55
$\ln(FC_{i,t})$	α_4 0.4778***	0.0250	19.11
$\ln(DC_{i,t})$	α_5 0.0261	0.0215	1.22
$\lambda(\sigma_u/\sigma_v)$	1.8863***		
χ^2	831.53***		
Log likelihood	110.39		

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

선령(AGE) 추정치(α_3)는 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하였고, 선령이 1% 증가하면 온실가스 배출 비효율성이 0.1711% 증가하는 것으로 분석되었다. 선령이 높은 어선은 일본의 선형을 참고하여 건조되었으나 양국의 해양 및 조업환경과 어법이 상이하여 우리나라 어업상황에 최적화되지 못하였다(Lee et al., 2008). 또한 선령이 높은 어선은 기관의 노후화로 선령이 낮은 어선에 비해 연료 이용 효율이 상대적으로 낮다. 이러한 문제는 어선의 에너지 효율을 저하시키고, 온실

가스 배출량 증가를 유발한다. 따라서 상기의 원인으로 인해 선령이 온실가스 배출 비효율성을 악화시키는 요인이 된 것으로 보여진다.

연료비 추정치(α_4)는 통계적으로 1%의 유의성을 갖는 것으로 분석되었고, 연료비가 1% 오르면 온실가스 배출 비효율성이 0.4778% 증가하는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 유류사용량으로 온실가스 배출량을 추정하다 보니 연료비를 온실가스 배출 비효율성의 결정요인으로 대용할 수밖에 없었다. 이를 위해 연료비를 실질가치로 변환하였고, 연료비와 유류사용량 간의 상관관계를 검정하여 두 변수 간 상관관계수(0.9482)가 1% 유의수준에서 통계적으로 유의함을 확인하였다. 따라서 연료비 상승은 유류사용량 증가를 의미하는 것으로 볼 수 있으며, 이는 곧 온실가스 배출량의 증가를 가져오기 때문에 연료비 상승이 온실가스 배출 비효율성 증가에 정(+)의 영향을 미치는 것으로 해석해도 무방할 것으로 판단된다.

3. 연도별·업종별 온실가스 배출 효율성(GEE) 추정 결과

근해어업의 온실가스 배출 효율함수에 기반하여 연도별 GEE를 도출한 결과는 <Table 4>와 같다. 2004년부터 2021년까지 근해어업의 연도별 GEE는 2004년(0.4704)이 가장 높았고, 2013년(0.3335)이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 근해어업의 연도별 온실가스 배출 효율성을 자세히 살펴보면, GEE가 가장 낮았던 2013년을 기점으로 GEE의 변화추이가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로 2004년(0.4704)부터 2013년(0.3335)까지는 근해어업의 연도별 GEE가 악화되고 있었으나 2013년(0.3335)부터 2021년(0.4527)까지는 연도별 GEE가 개선되는 국면으로 전환되었다.

이와 같은 근해어업의 연도별 GEE 변화 원인으로 온실가스 배출 비효율성의 변수인 선령과 연료비의 변화에서 찾을 수 있다. 근해어업의 선령은 2016년 이후로 소폭 감소하였고, 연료비도

2013년 이후로 감소추세를 보였다. 이 외에도 온실가스 배출 비효율성의 외생적 결정요인 추정식에는 어업분야 온실가스 배출 저감 기술개발 변수가 포함되지 않았지만 2012년 이후 근해어선의 추진효율 향상을 위해 프로펠러 성능 개선과 근해채낚기어선의 LED 집어등 실용화 기술 개발, 기선권현망어업 및 트롤어업의 에너지 저소비형 어구 연구·개발 등도 연료비 감소에 일정부분 긍정적인 영향을 미쳤을 것으로 보여진다(Lee et al., 2012; Yang et al., 2013; NIFS, 2022).

<Table 4> Results of estimating GHG emission efficiency(GEE) by year

Year	GEE	Rank	Confidence interval	
			95% Low	95% Up
2004	0.4704	1	0.4137	0.5312
2005	0.4193	5	0.3686	0.4743
2006	0.4136	7	0.3662	0.4644
2007	0.4072	9	0.3615	0.4566
2008	0.3924	11	0.3474	0.4403
2009	0.4168	6	0.3676	0.4694
2010	0.3776	12	0.3337	0.4242
2011	0.3470	15	0.3049	0.3923
2012	0.3399	17	0.2998	0.3819
2013	0.3335	18	0.2944	0.3745
2014	0.3429	16	0.3017	0.3868
2015	0.3492	14	0.3074	0.3936
2016	0.3652	13	0.3239	0.4091
2017	0.3959	10	0.3502	0.4446
2018	0.4074	8	0.3616	0.4567
2019	0.4441	3	0.3917	0.5003
2020	0.4239	4	0.3748	0.4765
2021	0.4527	2	0.3989	0.5104
Avg.	0.3944		0.3482	0.4437
S.D.	0.0414		0.0365	0.0469
Min.	0.3335		0.2944	0.3745
Max.	0.4704		0.4137	0.5312
C.V.	0.1049		0.1049	0.1056

<Table 5>는 근해어업의 업종별 GEE 추정결과이며, 평균적으로 인망어업(0.3118)이 비인망어업(0.4770)에 비해 GEE가 낮은 것으로 분석되었다.

이는 인망어업이 어구를 끌면서 조업하는 어법의 특성으로 연료비가 높을 뿐만 아니라 선령도 비인망어업보다 높음에 기인한 결과로 풀이된다. 더불어 선단어업(0.1966)도 비선단어업(0.4483)보다 GEE가 낮은 것으로 추정되었다. 선단어업은 비선단어업보다 온실가스 배출량이 많지만 어획강도가 높아 조업형태만을 고려하였을 때 선단어업의 온실가스 배출 비효율성이 낮은 것으로 분석되었다. 그러나 2척 이상의 어선으로 조업하여 연료비 지출이 상당히 많고, 선단을 구성하는 어선의 선령도 비선단어업에 비해 높았다. 따라서 상기 원인들을 종합적으로 고려하면, 연료비 및 선령증가에 따른 선단어업의 온실가스 배출 비효율성 증가분이 조업형태에 따른 온실가스 배출 비효율성의 감소분을 넘어섰기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다.

<Table 5> Results of estimating GHG emission efficiency(GEE) by gear

Gear	GEE	Rank	Confidence interval	
			95% Low	95% Up
(O) Stow net	0.4018	6	0.3522	0.4584
(O) Long line	0.4669	5	0.4092	0.5327
(O) Gill net	0.5675	2	0.4975	0.6467
(O) Angling	0.4838	4	0.4241	0.5520
(O) Trap	0.3418	9	0.2996	0.3900
<i>Anchovy drag net*</i>	0.2973	10	0.2606	0.3392
<i>(L) Purse seine</i>	0.1269	14	0.1112	0.1447
<i>(L) Otter trawl*</i>	0.1994	12	0.1748	0.2276
<i>(E) Danish seine*</i>	0.5312	3	0.4656	0.6061
<i>East sea trawl*</i>	0.3682	7	0.3227	0.4201
<i>(M) Danish seine*</i>	0.2684	11	0.2353	0.3063
<i>(L) Pair trawl*</i>	0.1655	13	0.1450	0.1888
<i>(L) Danish seine*</i>	0.3523	8	0.3087	0.4019
Diver	0.9504	1	0.8686	0.9977
Avg.	0.3944		0.3482	0.4437
S.D.	0.2082		0.1899	0.2202
Min.	0.1269		0.1112	0.1447
Max.	0.9504		0.8686	0.9977
C.V.	0.5280		0.5454	0.4963

Note: Italics are applied for fleet fisheries, and asterisks(*) is indicated for drag net fisheries.

한편, 근해통발어업(0.3418)은 선단어업과 인망어업이 아님에도 불구하고 GEE가 9위로 낮았다. 반면, 동해구외끌이중형저인망어업(0.5312)은 인망어업에 해당되지만 GEE가 세 번째로 높았다. 이는 근해통발어업이 비선단·비인망어업 중에서 연료비가 가장 높았고, 동해구외끌이중형저인망어업은 인망어업 중에서 연료비가 가장 낮았기 때문이다. 구체적으로 근해통발어업은 근해 업종 중 서·남해 12해리와 동해 24해리 밖 원거리에서 조업하는 비율(42.4%)이 높아 연료사용이 많은 반면, 동해구외끌이중형저인망어업은 원거리 조업 비율(7.1%)이 가장 낮아 연료사용이 적음에 기인한 것으로 판단된다(PCAFRP, 2020). 끝으로 잠수기어업(0.9504)은 14개 업종 중 GEE가 가장 높았다. 이는 다른 업종에 비해 선령이 가장 낮았고, 잠수부가 수중에서 직접 수산동·식물을 포획·채취하는 어법의 특성상 가까운 연안에서 조업하여 연료비가 가장 낮았기 때문이다.

4. 연도별·업종별 온실가스 감축잠재량(GMP) 추정 결과

식 (11)에 따라 1에서 근해어업의 GEE와 GEE의 95% 신뢰구간 상·하한을 차감한 수치를 온실가스 배출량에 곱하여 연도별·업종별 GMP를 추정한 결과는 <Table 6>과 <Table 7>에 제시하였다. 우선 근해어업의 연도별 평균 GMP는 991,387tCO₂eq이었고, 온실가스 감축비율은 67.08%로 추정되었다. 연도별 근해어업의 GMP는 전반적으로 감소하는 추세를 보이는데 반해 감축비율은 2013년(72.62%)까지 증가하여 정점을 기록한 이후 다시 감소하였다. 근해어업의 GMP가 가장 높았던 시기는 2005년(1,119,687tCO₂eq)이었고, 감축비율이 가장 높은 연도는 2013년(72.62%)이었다. 반면, 근해어업의 GMP가 가장 낮았던 시기는 2008년(813,742tCO₂eq)이었고, 감축비율이 가장 낮은 연도는 2021년(61.51%)이었다.

온실가스 배출 저감 기술수준이 동일하고, 다른 산출 또는 투입요소들은 변하지 않는다는 가정하에 근해어업의 연도별 평균 온실가스 감축비율의 최솟값(62.51%)과 최댓값(71.12%)을 최근 3년(2019~2021년) 평균 어획노력량에 곱하여 GMP를 척, 톤, 마력단위로 환산한 결과는 다음과 같다. GEE만을 고려하였을 경우, 근해어업은 전체 2,385척 가운데 1,163~1,423척을 감축해야 하며, 117,208톤 중 72,104~82,426톤, 1,829,798마력 중 967,766~1,155,289마력을 줄여야만 온실가스 배출 효율적으로 변화할 것으로 분석되었다.

다음으로 업종별 GMP는 대형선망어업(193,410tCO₂eq)과 쌍끌이대형저인망어업(152,727tCO₂eq), 근해채낚기어업(123,845tCO₂eq) 순으로 많았다. GMP가 낮은 업종은 잠수기어업(554tCO₂eq)과 동해구외끌이중형저인망어업(6,328tCO₂eq), 동해구중형트롤어업(15,509tCO₂eq) 순으로 나타났다. 더불어 업종별 감축비율을 살펴보면, 대형선망어업(87.50%)과 쌍끌이대형저인망어업(83.31%), 대형트롤어업(80.37%) 순으로 높았다. 반면, 잠수기어업(4.98%)과 근해자망어업(43.22%), 동해구외끌이중형저인망어업(47.29%)은 감축비율이 가장 낮은 업종으로 분석되었다.

근해어업의 온실가스 감축비율이 높은 3개 업종의 최솟값과 최댓값을 최근 3년(2019~2021년) 어획노력량에 곱하여 업종별 GMP를 척, 톤, 마력단위로 환산한 결과는 다음과 같다. GEE만을 고려하였을 경우, 대형선망어업(85.74~89.04%)은 각각 107~111척, 18,422~19,132톤, 152,505~158,386마력에 달하는 어획노력량을 줄여야하며, 쌍끌이대형저인망어업(80.96~85.37%)은 각각 59~62척과 6,852~7,225톤, 81,480~85,923마력, 대형트롤어업(77.60~82.80%)은 현재보다 38~41척, 5,117~5,460톤, 58,518~62,432마력 정도의 어획노력량을 감축해야만 이들 업종이 온실가스 배출 효율적으로 변화할 것으로 분석되었다.

<Table 6> Results of estimating GHG mitigation potential(GMP) by year

(Unit: tCO_2eq , %)

Year	GHG Emission	GMP	Minimum of GMP	Maximum of GMP	Rank.
2004	1,782,605	1,107,856 (62.15)	1,014,751 (56.93)	1,190,820 (66.80)	17
2005	1,668,428	1,119,687 (67.11)	1,043,054 (62.52)	1,187,301 (71.16)	8
2006	1,595,341	1,051,374 (65.90)	975,840 (61.17)	1,118,014 (70.08)	12
2007	1,548,525	1,014,581 (65.52)	940,558 (60.74)	1,079,844 (69.73)	13
2008	1,227,295	813,742 (66.30)	756,532 (61.64)	864,312 (70.42)	10
2009	1,400,158	898,113 (64.14)	828,320 (59.16)	959,777 (68.55)	14
2010	1,439,989	988,093 (68.62)	925,419 (64.27)	1,043,502 (72.47)	7
2011	1,344,741	960,343 (71.41)	906,712 (67.43)	1,007,707 (74.94)	4
2012	1,319,604	942,261 (71.40)	889,914 (67.44)	988,589 (74.92)	5
2013	1,392,302	1,011,097 (72.62)	958,164 (68.82)	1,057,905 (75.98)	1
2014	1,371,781	983,144 (71.67)	929,015 (67.72)	1,030,988 (75.16)	3
2015	1,500,645	1,077,687 (71.81)	1,018,806 (67.89)	1,129,735 (75.28)	2
2016	1,538,727	1,076,374 (69.95)	1,012,293 (65.79)	1,132,942 (73.63)	6
2017	1,514,081	1,010,291 (66.73)	940,430 (62.11)	1,072,010 (70.80)	9
2018	1,420,972	937,382 (65.97)	870,484 (61.26)	996,412 (70.12)	11
2019	1,490,459	938,737 (62.98)	862,066 (57.84)	1,006,474 (67.53)	16
2020	1,582,862	1,014,286 (64.08)	935,357 (59.09)	1,083,975 (68.48)	15
2021	1,463,134	899,925 (61.51)	821,557 (56.15)	969,135 (66.24)	18
Avg.	1,477,869	991,387 (67.08)	923,849 (62.51)	1,051,080 (71.12)	-

Note 1: Parentheses inside the table mean the GHG mitigation ratio.

Note 2: The ranking in the table is given in order of the highest GHG mitigation ratio.

<Table 7> Results of estimating GHG mitigation potential(GMP) by gear

(Unit: tCO_2eq , %)

Gear	GHG Emission	GMP	Minimum of GMP	Maximum of GMP	Rank.
(O) Stow net	103,715	62,294 (60.06)	56,456 (54.43)	67,411 (65.00)	9
(O) Long line	116,833	62,051 (53.11)	54,330 (46.50)	68,818 (58.90)	10
(O) Gill net	93,113	40,248 (43.22)	32,864 (35.29)	46,768 (50.23)	13
(O) Angling	240,600	123,845 (51.47)	107,389 (44.63)	138,268 (57.47)	11
(O) Trap	152,709	100,440 (65.77)	93,073 (60.95)	106,897 (70.00)	6
<i>Anchovy drag net*</i>	141,543	99,474 (70.28)	93,544 (66.09)	104,671 (73.95)	5
(L) <i>Purse seine</i>	221,039	193,410 (87.50)	189,516 (85.74)	196,823 (89.04)	1
(L) Otter trawl*	111,871	89,911 (80.37)	86,816 (77.60)	92,624 (82.80)	3
(E) Danish seine*	13,381	6,328 (47.29)	5,334 (39.87)	7,200 (53.80)	12
East sea trawl*	24,056	15,509 (64.47)	14,304 (59.46)	16,565 (68.86)	8
(M) Danish seine*	29,446	21,642 (73.50)	20,542 (69.76)	22,606 (76.77)	4
(L) <i>Pair trawl*</i>	183,320	152,727 (83.31)	148,415 (80.96)	156,507 (85.37)	2
(L) Danish seine*	35,116	22,954 (65.37)	21,239 (60.48)	24,456 (69.64)	7
Diver	11,126	554 (4.98)	25 (0.23)	1,466 (13.18)	14
Sum	1,477,869	991,387 (67.08)	923,849 (62.51)	1,051,080 (71.12)	-

Note 1: Italics are applied for fleet fisheries, and asterisks(*) is indicated for drag net fisheries.

Note 2: Parentheses inside the table mean the GHG mitigation ratio.

Note 3: The ranking in the table is given in order of the highest GHG mitigation ratio.

IV. 결론

본 연구는 해양수산분야 탄소중립 및 네거티브 추진에 대비하여 근해어업의 온실가스 배출 실태를 파악하기 위해 온실가스 배출 효율성(GEE)과 감축잠재량(GMP)을 추정하고, 근해어업의 온실가스 배출 저감과 관련된 정책적 개선사항을 제시해 보았다. 이에 본 연구에서는 온실가스 배출 비효율성의 외생적 결정요인을 고려한 SFA를 이용하여 근해어업의 온실가스 배출 효율함수를 추정하였고, 이를 바탕으로 연도별·업종별 GEE 및 GMP를 도출하였다.

본 연구의 분석결과를 요약 정리하면 다음과 같다. 첫째, 근해어업의 연도별 GEE는 2013년(0.3335)에 최저점을 기록한 후, 연도가 경과할수록 GEE가 개선되는 것으로 분석되었다. 둘째, 근해어업을 조업형태 또는 어법으로 구분하여 집단별 GEE를 비교한 결과, 연료비와 선령이 높았던 선단어업(0.1966)과 인망어업(0.3118)이 비선단어업(0.4483)과 비인망어업(0.4770)에 비해 온실가스 배출 비효율적이었다. 반면, 선단어업과 인망어업에 속하지 않고, 연료비와 선령이 낮았던 잠수기어업(0.9504)은 GEE가 가장 높은 업종으로 분석되었다. 셋째, 업종별 GEE가 하위권에 속한 대형선망어업(193,410tCO₂eq, 87.50%)과 쌍끌이대형저인망어업(152,727tCO₂eq, 83.31%), 대형트롤어업(89,911tCO₂eq, 80.37%), 기선권현망어업(99,474tCO₂eq, 70.28%)은 다른 업종보다 GMP와 감축비율이 높은 것으로 분석되었다. 그러나 GEE가 가장 높았던 잠수기어업(554tCO₂eq, 4.98%)은 어느 업종보다도 GMP와 감축비율이 낮았다.

상기 분석결과에 기초하여 근해어업의 온실가스 배출 저감 정책의 개선사항을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 내구연한(25년)을 초과한 노후 근해어선에 국한하여 어선현대화 사업의 자부담 비율 및 이자율을 낮춤으로써 어업인이 부담을 갖는 사업 참여 문턱을 낮출 필요가 있다. 둘째, 근

해어업인의 과도한 연료비 지출을 방지하고, 온실가스 배출 효율적으로 조업하도록 유도하기 위해 수협이 「유류공급사업요령」에 어선별 한도량까지만 면세유 공급이 가능하다는 조항의 추가를 검토해야 한다. 셋째, 선단업종 중 대형선망어업(6척)과 기선권현망어업(5척)의 조업에 부정적인 영향을 미치지 않는 선에서 선단슬림화를 추진하여 두 어업이 유류비 절감과 온실가스 배출을 저감을 동시에 달성할 수 있도록 해야 한다. 넷째, 저인망과 트롤, 권현망이 속한 인망어업은 예망과정에서 발생하는 온실가스 배출을 최소화할 수 있도록 수증저항을 낮춘 에너지 저소비형 어구 개발 및 보급을 지속해야 한다. 다섯째, 근해어업을 온실가스 배출 효율적으로 변화시킬 수 있는 전기·LPG·수소·하이브리드 어선 보급의 제도적 기반 마련을 위해 「어선법」과 하위법령의 개정 관련 논의를 시작해야 한다.

본 연구는 방법론적 측면에서 모수적 분석방법인 SFA를 적용하여 국내 최초로 근해어업의 온실가스 배출 비효율성의 결정요인과 온실가스 배출 효율성을 추정하고, 업종별로 상이한 온실가스 감축비율을 적용하여 감축잠재량을 도출하였다는데 의의가 있다. 더불어 분석결과에 기초하여 근해어업의 온실가스 배출 저감과 관련된 정책의 개선사항을 다양하게 제안한 점도 연구의 의리라 할 수 있다. 끝으로 정부와 수산업계가 향후 온실가스 배출 효율화 달성을 위한 정책 수립 시 근해어업의 온실가스 배출 실태를 파악하는 지표로 본 연구의 결과를 참고할 수 있다는 부분도 연구의 의리라 할 수 있을 것이다.

다만, 본 연구는 가능한 최근의 동향까지 반영하기 위해 2018~2020년 온실가스 배출량 및 어선 마력수 평균치를 활용하여 2021년 온실가스 배출량을 추정한 후 분석을 진행하였다는 점에서 연구의 한계가 존재한다. 더불어 본 연구의 분석은 온실가스 저감기술을 반영하지 못한 채 다차원의 투입 및 산출공간에서 근해어업의 온실가스 배출 효율성만을 고려한 결과이므로 추정 결과를 개별

어선에 일괄적으로 적용하는 데에는 주의를 기울일 필요가 있다.

향후 연구에서는 어업수입에 강처분성(strong disposability) 가정을 부여하고, 어업수입과 온실가스 배출량 사이에는 약처분성(weak disposability) 가정을 부여하여 산출물 거리함수를 구성해 볼 필요가 있다. 또한, SFA 모형 가운데 수산업에 미적용된 TFE(True Fixed Effects) 또는 TRE(True Random Effects) 모형을 활용한다면, 근해어업의 업종별 고유한 특성까지 고려한 온실가스 배출 효율성과 감축잠재량을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Battese GE and Coelli TJ(1995). A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production Function for Panel Data. *Empirical Economics*, 20, 325~332.
<https://doi.org/10.1007/BF01205442>
- Belotti F, Daidone S, Ilardi G and Atella V(2013). Stochastic frontier analysis using Stata. *The Stata Journal*, 13(4), 719~758.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.2145803>
- Energy greenhouse gas total information platform service. 2022. CO₂ Emissions calculation. Retrieved from <http://www.tips.energy.or.kr>. Accessed 28 October 2022.
- Farrell MJ(1957). The measurement of productive efficiency. *JRSS, Series A*, 120(3), 253~290.
<https://doi.org/10.2307/2343100>
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center(2022). 2021 National Greenhouse Gas Inventory Report. Ministry of Environment, 1~435.
- IISD(2019). 77 Countries, 100+ Cities Commit to Net Zero Carbon Emissions by 2050 at Climate Summit. Retrieved from <https://sdg.iisd.org>. Accessed 29 October 2022.
- IPCC(2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change: Summary for Policymakers. 1~52.
- 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.
<https://doi.org/10.35372/kmiopr.2020.35.2.002>
- Jeon YH and Nam JO(2021a). Comparative Analysis of Productivity Changes by Gear of Offshore Fisheries with or without Considering Greenhouse Gas. *JMB*, 49, 123~147.
- Jeon YH and Nam JO(2021b). Estimating Potential Greenhouse Gas Reductions of Offshore Fisheries Based on Implementation of 「2050 Carbon Neutral」 Strategy. *JFMSE*, 33(3), 620~633.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.6.33.3.620>
- Jeon YH and Nam JO(2021c). 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>
- Jeon YH and Nam JO(2022). Energy Efficiency Evaluation of Offshore Fisheries in Preparation for Changes in Fishery Circumstances. *JFMSE*, 34(3), 384~394.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.6.34.3.384>
- Jeon YH and Park YJ(2022). Analysis on the Decoupling of Greenhouse Gas Emissions in Offshore Fisheries. *Ocean Policy Research*, 37(2), 181~204.
- Jeong DS and Kang SM(2019). Analysis of the Cost Efficiency and its Determinants in the Korean Wind Component Industry : Using Stochastic Frontier Model. *JIEB*, 32(6), 2273~2293.
<https://doi.org/10.22558/jieb.2019.12.32.6.2273>
- Joint Ministry(2020). 「2050 Carbon Neutral」 Strategy, 1~24.
- Kang DH and Park CH(2022). An Estimation of Technical Efficiency and Productivity of Smoked, Seasoned Aquatic Animal Product Companies. *Ocean Policy Research*, 37(1), 115~138.
- Kang HN and Suh DH(2022). Examining the Greenhouse Gas Emission Efficiency of the Food and Beverage Industry. *JRD*, 45(1), 63~83.
<http://dx.doi.org/10.36464/jrd.2022.45.1.004>
- Kim GH(2020a). Examining the Impact of Inventory Management Performance on the Greenhouse-gas Emission Efficiency in Korean Steel Companies. *LMR*, 18(1), 113~134.
<https://doi.org/10.22724/LMR.2020.18.1.7>

- Kim GH(2020b). Investigating the relationship between the marginal effect of relative greenhouse-gas emission on greenhouse-gas efficiency and firm size. *JEM*, 12(1), 1~24.
- Kim GH, Noh DW and Lee JW(2019). Estimating Greenhouse Gas Emission Efficiency of Firms in South Korea: A Stochastic Frontier Analysis Approach. *J.Climate Change Res.*, 10(2), 117~128. <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2019.10.2.117>
- KOREA(2022). Establishment Comprehensive Plans for the Ocean and Fisheries to Response to Climate Change. Retrieved from <https://korea.kr>. Accessed 30 October 2022.
- KOSIS(2022). Fishery managements survey. Retrieved from <http://kosis.kr>. Accessed 7 August 2022.
- KOSIS(2022). Statistic Database for Producer Price Index. Retrieved from <http://kosis.kr>. Accessed 7 August 2022.
- Kumbhakar SC, Wang H and Horncastle AP(2015). *A Practitioner's Guide to Stochastic Frontier Analysis Using Stata*. Cambridge University Press, 1~374.
- Lee KH, Lee CW, Yang YS and Lee JH(2012). Development of a low-energy used large midwater trawl using a numerical method. *JKSFT*, 48(3), 195~207. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.48.3.195>
- Lee YG, Jee HW, Yu JW, Kang DS and Kwon SY(2008). Characteristics and improvement plans of the hull form of Korean fishing boats in connection with the performance of hull form resistance. *JKSSTA*, 25, 47-63.
- Ministry of Oceans and Fisheries(2021). 2050 Carbon Neutral Roadmap for Oceans and Fisheries. 1~17.
- NIFS(2022). Annual report for Climate change Trends in Fisheries, 2022. 1~87.
- Presidential Committee on Agriculture, Fisheries and Rural Policy(2020). Sustainable Coastal and Offshore Fisheries Innovation Plan, 1~87.
- Shepherd RW(1970). *Theory of cost and production functions*. Princeton University Press, 1~322.
- Wang HJ and Schmidt P(2002). One-Step and Two-Step Estimation of the Effects of Exogenous Variables on Technical Efficiency Levels. *Journal of Productivity Analysis*, 18, 129~144. <https://doi.org/10.1023/A:1016565719882>
- Wang JY, Sun KS, Ni JP and Xie DT(2021). Evaluation and Factor Analysis of Industrial Carbon Emission Efficiency Based on "Green-Technology Efficiency"—The Case of Yangtze River Basin, China. *Land*, 10(1408), 1~23. <https://doi.org/10.3390/land10121408>
- Wang C, Zhan JY, Bai YP, Chu X. and Zhang F(2019). Measuring carbon emission performance of industrial sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China: A stochastic frontier approach. *Science of the Total Environment*, 685, 786~794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.064>
- Yang YS, Lee CW, Lee KH, Park SB, Park SK, Kang MJ and Lee JH(2013). Development of a low energy used anchovy dragnet using a numerical method. *JKSFT* 49(3), 175~187. <http://dx.doi.org/10.3796/KSFT.2012.49.3.175>

-
- Received : 05 January, 2023
 - Revised : 15 February, 2023
 - Accepted : 22 February, 2023