

우리나라 근해어업의 CO₂ 배출 저감비용함수 추정[†]

신용민*·정겨운**

요약 : 본 연구는 파리협정의 효과적인 이행을 위한 국내 환경정책이 어업분야에 미치는 영향을 살펴보기 위한 것이다. 이를 위해 수협 수산경제연구원의 어업경영조사 자료를 바탕으로 근해어업의 어획물 생산과 이산화탄소가 동시에 산출된다는 가정 하에 근해어업의 비용구조를 분석하였다. 근해어업의 이산화탄소(CO₂) 배출량은 수협의 면세유 공급량 자료(2003-2016)를 활용하여 도출하였다. Translog 형태의 비용함수를 추정하였으며, 분석에는 SUR(Seemingly Unrelated Regression)모형을 사용하였다. 비용함수 추정결과 표본기간동안의 어획량과 CO₂ 배출량 사이에 약처분성이 존재하는 것으로 나타났으며, 한계저감비용(MAC)은 연평균 1,457원으로 추산되었다. 또한 같은 기간 동안 마력당 1%의 CO₂를 저감하고자 할 때 MAC는 2.2% 상승하고, 어획량 1ton당 1%의 CO₂를 저감하고자 할 때 MAC는 1.4% 상승하는 것으로 각각 분석되었다.

주제어 : 근해어업, 저감비용함수, CO₂, 한계저감비용, 기후변화

JEL 분류 : Q2

접수일(2018년 3월 20일), 수정일(2018년 5월 12일), 게재확정일(2018년 5월 15일)

[†] 본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

* 부경대학교 인문사회과학대학 경제학부 조교수, 주저자(e-mail: ymshin@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 일반대학원 자원환경경제학과 석사과정, 교신저자(e-mail: ruwk03@gmail.com)

A study on Estimation of CO₂ Abatement Cost in Korean Offshore Fishery[†]

Yongmin Shin* and Gyeewoon Jeong**

ABSTRACT : This study has attempted environmental economic analysis on the cost structure of offshore fisheries based on fishery management data published by the Fisheries Research Institute to examine the effect of the environmental policy on the fisheries for the effective implementation of the Paris Convention. Under the assumption that both fisheries and carbon dioxide are simultaneously produced, the cost structure of offshore fisheries were analyzed. Cost function in a translog form was estimated and SUR (Seemingly Unrelated Regression) model was used for the analysis. Here, CO₂ emission of offshore fishery was calculated by using National Federation of Fisheries Cooperatives' data on supply of tax exemption oil (2003~2016). The cost function estimation showed that there is a weak disposition between catches and CO₂ emissions during the sample period, and the marginal abatement cost (MAC) is estimated at 1,457 won per year. In addition, for the same period, when 1% of CO₂ per horsepower is to be reduced MAC increases by 2.2%, and when 1% of CO₂ per 1 ton of catch is to be reduced, MAC increases by 1.4%.

Keywords : Offshore Fishery, Cost Function, CO₂, Marginal Abatement Cost, Climate Change

Received: March 20, 2018. Revised: May 12, 2018. Accepted: May 15, 2018.

[†] This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2017 year).

* Associate Professor, Division of Economics, College of Humanities and Social Sciences, Pukyong National University, First author(e-mail: ymshin@pknu.ac.kr)

** Master's student, Department of Resource and Environmental Economics, Graduate School, Pukyong National University, Corresponding author(e-mail: ruwk03@gmail.com)

I. 서론

2008년 이후 5년간 교토의정서에 의거하여 부속서B에 해당하는 국가들은 1990년 대비 평균 5.2%의 CO₂ 감축을 목표로 하였으나, 이를 훨씬 뛰어넘는 평균 22.6%를 감축하는 성과를 이루었다¹⁾. 그럼에도 불구하고 지구온난화 문제는 더 악화되었다고 평가되고 있다. 이런 점에서 2015년 12월 제21차 기후변화협약 당사국총회(COP 21)에서 채택된 기후변화에 관한 파리협정은 교토프로토콜 이후 신기후체제로의 이행에 있어 의미 있는 국제협정으로 평가받고 있다. 파리협정에 따라 당사국들은 자발적으로 감축목표를 강화하는 방향으로 나아가게 되는데, 우리나라는 2030년까지 BAU 대비 37%를 감축하기로 하였으며, 국제탄소시장에도 참여하기로 하였다. 특히 2016년 ‘제1차 기후변화 대응 기본계획(2017~2036)’ 및 ‘2030 국가온실가스감축 기본로드맵’ 등을 확정하면서 농림어업분야에서 BAU 대비 5.2%(약 1.5백만 톤)의 감축목표를 설정하기로 하였다.

이러한 점에서 파리협정의 효과적인 이행과 각 산업에 미치는 영향에 대비하기 위하여 산업별 오염물질 배출현황 파악과 관련 비용의 산정이 필요하다. 그러나 수산업 분야의 배출저감비용 산정에 대한 연구는 지금까지 거의 전무한 실정이며, 비용적 접근은 차치하더라도 배출계수 산정에 대한 연구조차도 타 산업에 비해 현저히 부족하다. 우리나라 수산업이 기후변화 대응면에서 국제 경쟁력을 갖추고 친환경적이며 지속가능한 산업으로 나아가기 위해서는 환경경제학적 접근을 바탕으로 한 다양한 연구들이 이루어져야 한다. 이러한 문제 인식에 따라 본 연구는 어업분야에 있어 가장 대표적 CO₂ 배출업종인 근해어업의 생산활동에 따른 CO₂ 배출량과 한계저감비용을 추정하고자 한다.

본 연구는 I 장에서 연구의 배경과 목적을 소개하고, II 장에서 선행연구 및 분석이론을 검토한 후, III 장에서 근해어업의 배출량을 추정하여 실증분석을 통해 비용함수 추정 결과를 제시하고, 마지막으로 IV 장에서 분석결과를 바탕으로 소결을 맺고 연구의 한계점을 밝히는 것으로 구성된다.

1) UNFCCC (2015), “Kyoto Protocol 10th Anniversary-Timely Reminder Climate Agreements Work”.

II. 선행연구 및 이론연구

1. 선행연구의 검토

온실가스 배출저감에 따른 비용함수를 추정하기 위해서는 먼저 온실가스 배출량을 산정하여야 한다. 수산업 분야에서의 온실가스 배출량 추정에 관한 연구는 2010년 들어서부터 주로 이루어지고 있다. 이동우 외(2010)는 국내 어업활동에서의 유류사용 현황을 분석하고, 각 연료소비량에 대하여 IPCC 2006 가이드라인에 따른 기본 배출계수를 곱하는 Tier1의 산정법에 근거한 이산화탄소 배출량을 제시하였다. 그러나 우리나라 수산업 부문의 연료연소에 대한 정확한 데이터가 부족하여 Tier2 이상의 배출계수기준을 마련하지 못하고 있음을 지적하였다. 따라서 정확한 통계 구축이 필요하며 이를 위해 지속적인 연구를 통해 수산업의 배출계수 산정을 보완해 나아갈 필요성을 제시하였다. 김필수 외(2014)는 어선부문의 배출량 추정에 관한 연구가 다양하게 이루어지지 못하는 이유를 어선활동 패턴의 불확실성이 높기 때문이라고 판단하였다. 그는 배출원에 대한 시험·분석을 통해 얻은 배출계수를 이용하는 Tier3을 적용하여 업종별 척당 연료 사용량과 온실가스 배출량을 추정하였다. 이를 위해 조업시간과 운항시간을 나누어 조업패턴과 그에 따른 엔진부하를 분석하였다.

한편 산업의 생산함수 특성을 정량적으로 규명하는 연구는 대부분 쌍대이론(Dual Approach)에 기초하여 우회적으로 비용함수나 이윤함수를 추정하는 방식으로 이루어지고 있다. 생산함수 자체에 대한 직접적 연구보다는 쌍대이론에 입각한 비용함수 추정이 주를 이루는 이유는 생산요소 투입의 다양한 특성을 반영할 수 있는 함수형태를 추정하더라도 간단히 미분을 통하여 기업의 이윤극대화를 위한 요소수요함수를 도출해낼 수 있기 때문이다. Halvorsen et al.(1986)은 이러한 접근법이 요소 투입량이 아닌 요소가격을 이용하여 비용함수를 추정함으로써 외생성(exo-geneity)을 향상시킨다고 하였다. 요소가격에 대한 자기탄력성과 대체탄력성의 산정공식이 단순한 형태로 구성되어, 생산함수 특성들에 대한 표준오차의 계산은 물론 추정치에 대한 신뢰성 여부를 파악할 수 있는 것이 장점이다. 또한 비용함수로부터 요소수요함수를 도출할 수 있도록 제안된 Shephard's Lemma를 이용하여 비용함수 도출에 필요한 계수를 보다 효율적으로 추정

할 수 있다. 우리나라 어업에서의 비용함수 추정에 관한 연구로는 김기수(1994)와 신용민(2017)이 있으며, 전자는 콥-더글라스 생산함수형태와 Shephard's Lemma를 이용하였다. 반면 후자는 생산과정의 제특성을 고려하기 위하여 초월대수함수를 도입, 패널분석을 실시하여 근해어업의 비용구조를 분석하고 업종별 규모의 경제를 산정하였다.

최근에는 산업의 생산구조와 오염물질 배출저감의 관계를 추정하는 연구가 증가하고 있다. Atkinson(1984)과 이명현(2015) 등은 환경경제학적 측면에서 위에서 제시한 비용함수 추정방법을 통하여 오염물질 저감비용의 산정을 시도하였으며, 그 외 다수의 연구는 거리함수를 이용하고 있다. 일반적인 산출물 거리함수를 이용하는 경우, 특정 산출물이 미치는 부정적 영향을 고려하지 못하고 모든 산출물이 동일한 비율로 확장되어 부정적 산출물을 더욱 많이 산출되도록 할 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위하여 강상목(2010)은 주어진 기술수준에서 유익한 산출물을 최대한으로 확장하면서 동시에 유해한 오염물을 최소한으로 축소하는 방식으로 측정되는 방향거리함수를 도입하고, 우리나라 도시별 오염물질배출에 대한 생산함수를 도출하였다. 비용측면에서의 접근을 시도한 연구로 Atkinson(1984)은 신고전주의의 비용함수가 산출물만을 제약조건으로 두는 반면에 일반화된 비용함수(*generalized cost function*)는 생산단계에서 규제에 의해 발생하는 새로운 제약을 반영한다고 하였으며, 추가적 제약이 가해질 경우 생산요소의 배분에 왜곡이 발생하여 생산비용(*market cost of output*)의 최소화를 달성하지 못할 가능성이 있다고 주장하였다. 이러한 주장에 따라 Atkinson(1994)은 발전소의 생산요소에 대한 왜곡상수를 추정하고 효율성을 검증하여 자본과 노동, 노동과 연료가 각각 비효율적으로 투입되고 있음을 밝혔다. 국내에서는 이명현(1993)이 제조업의 효율성을 분석하여 왜곡상수를 도출하였으며, 이를 통해 비용 상승효과가 발생함을 발견하였다. 이명현(2014)은 또한 쌍대이론을 이용해 배출제약 하에서의 투입물의 암묵비용을 산출하였으며, 요소간 비효율적 배분여부를 확인하고 오염배출의 저감비용을 도출하였다. 그는 해당 연구를 통해 요소간 비효율적 배분으로 인한 가격 상승효과를 반영하지 않는 경우 배출저감비용이 과소평가될 수 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 이러한 선행연구를 바탕으로 Tier1에 근거한 근해어업의 CO₂ 배출량을 산정하고, 어업비용과의 관계를 분석하여 CO₂ 저감비용을 추정한다.

2. 이론연구

1) 비용함수의 형태

비용함수는 요소가격이 주어진 상태에서 일정 산출량을 생산하기 위해 투입해야하는 최소비용을 나타낸다. 이윤극대화를 목적으로 하는 기업의 산출량이 주어지고, 그 생산을 위해 비용을 최소화하는 데에 필요한 생산요소의 결합을 보여준다. 환언하면 비용최소화의 문제는 제약된 최적화의 문제이며, 제약조건들은 목표생산량을 달성하기 위한 기술적 가능성을 의미한다. 완전경쟁시장에서의 기업의 비용함수는 통상적으로 아래와 같이 정의된다.

$$C(Q, X) = \min \{ X \cdot Q \mid f(X) \geq Q \} \quad (1)$$

X 는 생산요소의 집합으로 $X \in \{ x_1, x_2, \dots, x_n \}$ 이고 생산요소벡터로서 $X \in R_n^+$ 로 간단히 표기할 수 있다. 우선, 양의 산출량을 얻기 위해 투입되는 요소의 양은 음이 아니어야 한다. 또한 비용함수는 산출량에 대해 단조 증가하는 성질(non-decreasing in output)을 가진다. 즉 생산요소의 가격이 일정하다는 전제하에서 산출량이 증가하면 생산비용은 동일하거나 증가해야 한다. 단조성은 물론 요소가격에도 적용(nondecreasing in factor price)된다. 일정한 산출량 Q 를 생산하기 위해 투입되는 요소가격이 증가할 경우 생산비용은 감소하지 않는다. 요소가격의 두 가격수준이 $w_1, w_2 (w_1 \leq w_2)$ 이고, 요소투입량이 x_1, x_2 일 때, 비용함수의 요소가격에 대한 단조성은 아래와 같이 정의된다.

$$C(Q, w_1) = w_1 x_1 \leq w_1 x_2 \leq w_2 x_2 = C(Q, w_2) \quad (2)$$

생산활동에 있어 요소가격이 변화할 때 최적 요소투입량도 변화하게 되는데, 요소간 대체성은 비용함수로 하여금 생산요소에 대하여 오목성을 띠게 한다. 생산요소의 가격 w_1, w_2 의 가중평균가격은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$w_0 = \alpha w_1 + (1 - \alpha)w_2 \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (3)$$

요소가격이 w_0, w_1, w_2 이고 산출량 Q 의 생산을 위한 최소투입량을 x_0, x_1, x_2 으로 표기할 때, 아래와 같이 비용함수의 오목성을 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} C(w_0, Q) &= w_0 x_0 = [\alpha w_1 + (1 - \alpha)w_2]x_0 = \alpha w_1 x_0 + (1 - \alpha)w_2 x_0 \\ &\geq \alpha C(w_1, Q) + (1 - \alpha)C(w_2, Q) \end{aligned} \quad (4)$$

동조적인 생산구조는 생산량에 대한 비용탄력성이 일정할 때 동차성을 가진다. 비용은 각 생산요소의 최적투입량과 선형관계를 가지며, 각 생산요소의 최적투입량 $x(w, Q)$ 는 각 요소가격에 대해 0차 동차이므로 아래와 같이 요소가격에 대한 1차 동차성이 성립한다. 이는 일정 산출량을 생산할 때 모든 생산요소의 가격이 k 배 증가하다면 요소 투입량은 동일하고 생산비용만 k 배 증가함을 의미한다.

$$C(kw, Q) = (kw) \cdot X(kw, Q) = kwX(w, Q) = kC(w, Q) \quad (5)$$

비용함수의 요소가격에 대한 오목성과 동차성은 생산기술구조와는 무관하지만, 생산자가 이윤극대화를 목적으로 의사결정을 한다는 대가정에 의한 성질로 비용함수의 정규성 조건에 포함되기도 한다.

2) 생산함수와 비용함수의 쌍대성

어느 함수에 포함되어 있는 모든 정보가 다른 함수에도 포함되어 있을 때 두 함수 간에 쌍대성이 존재한다고 한다. 생산함수와 비용함수가 정규성을 만족할 때 비용함수와 생산함수의 구성은 동일하게 이루어지며, 생산구조의 분석은 생산함수나 비용함수 어느 쪽에서 시작하든 이론적으로 일치하게 된다. 생산함수가 생산요소 X 에 대한 함수 $Q(X)$ 로 구성된다면, 쌍대관계에 있는 총비용함수는 요소가격 W 와 생산량 Q 의 함수 $C(W, Q)$ 로 나타낼 수 있다.

생산기술에 대한 충분통계량(sufficient statistic)²⁾으로서 Shephard(1953)는 비용함

수만으로 생산기술의 설명이 가능하다고 보았다. 비용함수접근이 생산함수접근에 비해 유리한 것은 첫째로 생산함수에서 설명변수로 사용되는 요소투입량이 요소가격을 외생 변수로 하여 결정되는 내생변수라는 것이다. 생산요소 투입량을 외생변수로 취급하는 생산함수보다 생산요소 가격을 외생변수로 취급하는 비용함수의 추정이 모형을 구성하기에 적합하다. 둘째로 생산요소투입량을 설명변수로 사용할 경우 공선성이 발생할 여지가 다분하나, 비용함수와 비용몫함수(cost-share equations)를 연립방정식 체계로 구성하여 이를 피할 수 있다. 마지막으로, 생산구조 분석을 위해서 비용함수를 간단히 편미분하면 요소수요함수를 쉽게 도출할 수 있어 생산함수를 이용해 비용최소화를 위한 선형계획법을 도입하는 것에 비해 효율적이다.

3) 분석모형

초월대수비용함수는 콥-더글라스 생산함수에서 발전된 Translog(transcendental logarithmic) 형태로 구성된 것으로 선형회귀방정식으로 표현할 수 있어 분석이 용이하다. 또한 생산구조의 다양한 특성을 설명변수에 포함하고 있어 분석결과를 바탕으로 보다 풍부한 해석이 가능한 것이 장점이다. Christensen, Jorgenson, and Lau(1971)에서 제안된 초월대수비용함수는 로그형태의 2차 테일러전개를 통해 근사적으로 표현된 것으로 아래와 같다.

$$\ln C = \ln \alpha_0 + \ln Q + \sum_{i=1} \alpha_i \ln w_i + 0.5 \sum_{i=1} \gamma_{ii} (\ln w_i)^2 + 0.5 \sum_{i=1} \sum_{j=1} \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j \quad (6)$$

위 식에서 산출량이 우변에 포함되어 있지만 Q 에 대한 계수를 추정하지 않고 있다. 한편, Berndt and Christensen(1973)은 비용함수와 생산함수간의 쌍대성에서 착안하여 설명변수로 투입요소 5가지 외에 산출량(Q) 변수를 추가하였다. 산출량에 대한 계수값을 추정해내면 생산함수의 비동조성을 검정할 수 있으며, 나아가 기술계수를 추가하여 살펴볼 수도 있다.

2) McFadden(1978)은 생산기술에 관한 모든 정보들이 비용함수 안에 포함되어 있다고 보고 비용함수가 생산기술의 충분통계량이라고 칭함.

본 분석에서는 근해어업 14개 업종을 대상으로 하는 비용함수를 추정하기 위해 패널 데이터를 구축하고, 근해어선의 어업활동을 통해 어획물과 오염물질이 동시에 산출된다는 가정 하에서 이들을 모두 포함한 비용함수를 구성하여 추정한다. 이때 Fare 등 (1986)에 따라서 어획생산물과 CO₂ 배출량은 서로 약처분성(weak disposability)이 존재함을 가정하고 어획생산물은 강처분성(strong disposability)을 가정한다. 강처분성은 생산활동에서 무제약 하에 생산자가 요소의 투입과 산출의 수준을 자유롭게 결정할 수 있는 기술 상태를 말하는 반면, 약처분성은 생산자가 환경규제와 같은 제약조건을 준수하고자 할 때의 생산 기술 상태를 말한다. 생산기술의 약처분성을 τ 로 표기할 때, 생산가능집합 $f(x)$ 에 대하여 τ 가 0보다 크고 1보다 작으면, $(\tau Q, \tau EM) \in f(x)$ 로 즉, 오염물의 산출을 줄이고자 하면 산출물도 동시에 감소할 수밖에 없음을 의미한다. 본 분석에서는 아래와 같이 수정된 형태의 비용방정식과 비용뭉방정식을 하나의 방정식체계로 구성하고 반복 Zellner 방식으로 분석한 후, Wald 검정을 통해 두 가지 생산물 간에 약처분성이 성립하는지 확인한다.

$$\begin{aligned} \ln C = & \alpha_0 + \alpha_t t + \alpha_Q \ln Q + \alpha_E \ln E + \sum_{i=1} \beta_i \ln w_i + 0.5 \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 \\ & + 0.5 \gamma_{EE} (\ln E)^2 + 0.5 \sum_{i=1} \sum_{j=1} \gamma_{ij} \ln w_i \ln w_j + \sum_{i=1} \gamma_{Qi} \ln Q \ln w_i \\ & + \sum_{i=1} \gamma_{Ei} \ln E \ln w_i + \gamma_{QE} \ln Q \ln E + \gamma_{Qt} \ln Q \cdot t + \gamma_{Et} \ln E \cdot t \end{aligned} \quad (7)$$

단, 추정할 모형이 비용함수이므로 함수형태의 선형동차성을 충족시키기 위해서 $\sum_i \beta_i = 1$ 및 대칭성($\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$)을 포함한 $\sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ji} = \sum_i \sum_j \gamma_{ij} = \sum_i \gamma_{iQ} = \sum_i \gamma_{iE} = 0$ 의 제약조건을 부여한다. 위의 식에서 Shephard's Lemma를 적용하면 아래와 같은 비용뭉함수를 유도할 수 있다. 이때 노동비, 연료비, 자본비에 대한 비용뭉의 합이 1이 되므로 연료비의 비용뭉방정식은 추정에서 제외한다.

$$S_L = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln w_L} = \beta_L + \sum \gamma_{Lj} \ln w_j + \gamma_{QL} \ln Q + \gamma_{EL} \ln E \quad (8)$$

$$S_K = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln w_K} = \beta_K + \sum \gamma_{Kj} \ln w_j + \gamma_{QK} \ln Q + \gamma_{EK} \ln E \quad (9)$$

비용뭉방정식의 추정을 위하여 SUR모형(Seemingly Unrelated Regression Model)을 이용하며, 비용방정식을 아래와 같이 미분하여 한계저감비용을 유도할 수 있다.

$$MAC = \frac{\partial C}{\partial E} = (\alpha_E + \gamma_{EE} \ln E + \sum_i \gamma_{Ei} \ln w_i + \gamma_{QE} \ln Q) \cdot \frac{C}{E} \quad (10)$$

III. 기초자료 분석 및 저감비용함수의 추정

1. 근해어업의 CO₂ 배출량 추정

환경정책적 제약에 따른 어업비용을 추정하기 위하여 오염물질 배출량 추정이 우선 되어야 한다. 이를 위해 본 분석에서는 어선에서 소비되는 연료의 유종별 데이터에 IPCC 기준 기본 배출계수를 적용하는 Tier1 산정법을 이용하였다.

근해어업의 탄소배출량 E 는 업종별 유류사용량에 대한 발열량을 산출한 후 탄소 배출계수를 곱하여 도출한다. 여기에 탄소원자량에 대한 이산화탄소분자량의 비율 (44/12)을 적용하여 CO₂ 배출량을 산정하며, 식은 아래와 같다.

$$E(tCO_2) = \text{유류사용량} \times \text{발열량} \times \text{탄소배출계수} \times (44/12) \quad (11)$$

근해어업 업종별 유류사용량은 수협이 면세유 공급량 자료(2003~2016)를 이용하였으며, 이때 수협중앙회의 어업경영조사에 포함되지 않은 5개 업종³⁾은 본 추정에서도 제외하였다. 에너지 열량 환산기준⁴⁾ 및 IPCC(2006)의 배출계수를 적용하여 근해어업의

3) 해양수산부장관 허가어업 중 서남해구쌍끌이중형저인망어업, 소형선망어업, 근해붕수망어업, 근해자리 돛대망어업, 근해형망어업은 어업경영조사 대상에 포함되어 있지 않음.

4) 에너지법 시행규칙 제5조제1항.

업종별·연도별 마력당 CO₂ 배출량을 산정하였다. 마력수는 통계청에서 제공하는 어선 세력(2003~2016) 자료를 이용하였다.

<표 1>에 제시한 바와 같이, 근해어업 14개 업종은 마력당 연평균 0.92tCO₂를 배출하는 것으로 추정되었으며, 표준편차는 0.58tCO₂로 나타났다. 업종별로 살펴보면, 쌍끌이 대형저인망, 대형트롤, 서남해구외끌이중형저인망, 외끌이대형저인망, 대형선망이 각각 연평균 1.97ton, 1.48ton, 1.45ton, 1.34ton, 1.12ton의 CO₂를 배출하여 기타 업종에 비해 마력당 배출량이 약 2.4배 높은 것으로 나타났다. 마력당 평균 배출량이 낮은 업종으로는 잠수기(0.13ton), 근해자망(0.38ton), 근해연승(0.54ton) 등으로 나타났다.

<표 1> 근해어업 업종별 마력당 CO₂ 배출량의 기초통계량

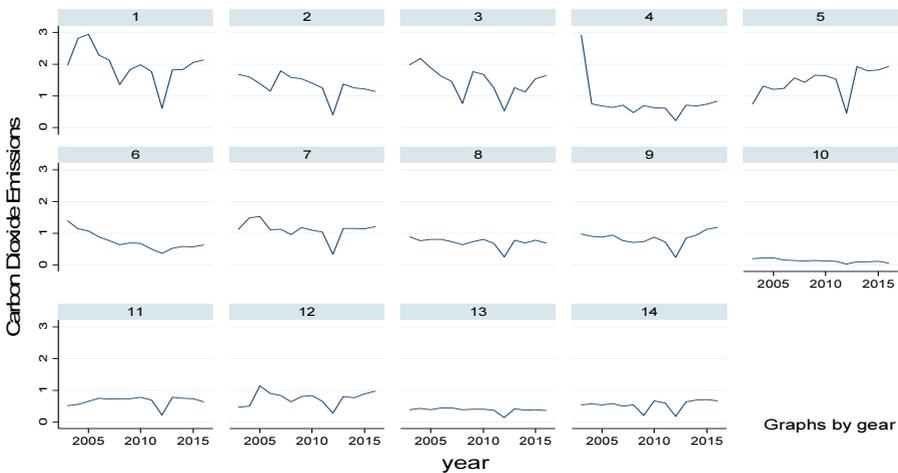
(단위: tCO₂/마력)

업종	평균	중앙값	최댓값	최솟값	표준편차
쌍끌이 대형저인망	1.970	1.981	2.948	0.612	0.566
외끌이 대형저인망	1.341	1.382	1.792	0.398	0.338
대형트롤	1.478	1.581	2.190	0.524	0.459
동해구외끌이 중형저인망	0.804	0.687	2.915	0.226	0.625
서남해구외끌이 중형저인망	1.447	1.547	1.933	0.456	0.432
동해구 중형트롤	0.742	0.658	1.387	0.353	0.284
대형선망	1.116	1.135	1.523	0.323	0.275
기선권현망	0.713	0.747	0.881	0.241	0.151
근해통발	0.842	0.874	1.174	0.225	0.226
잠수기	0.125	0.124	0.216	0.024	0.055
근해안강망	0.659	0.722	0.775	0.221	0.149
근해채낚기	0.744	0.803	1.134	0.274	0.223
근해자망	0.378	0.386	0.440	0.134	0.075
근해연승	0.541	0.569	0.708	0.173	0.161
평균	0.921	0.760	2.948	0.024	0.576

업종별 CO₂ 배출량의 연도별 추이는 <그림 1>과 같다. 마력당 CO₂ 배출량 추이는 대부분 완만한 추세를 가지고 있으나, 전체적으로 2008년과 2012년에 움푹 꺼진 형태가 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이는 당시 고유가로 인해 어업인들이 출어를 포기하여 면세유 사용량이 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

실제로 2003~2016년 어업용 경유의 평균 명목가격은 전년 대비 -36%에서 64%의 등락을 보였다. 구체적으로 2008년에 전년 대비 약 64% 상승하였다가 2009년에는 전년 대비 약 30% 하락하여 조정세를 보였다. 이후 2012까지 연평균 약 21% 수준으로 꾸준히 상승하였다. 지난 14년간의 물가상승률을 고려하지 않은 면세유의 명목공급가격은 2012년에 가장 높았으며, 이는 2003년 대비 3.2배, 2008년 대비 1.1배 수준이었다.

<그림 1> 근해어업 업종별 CO₂ 배출량 추이(2003~2016)



주: 1~14는 근해어업 14개 업종을 표시하는 것으로 <표 2>에 나열된 순서와 같음.

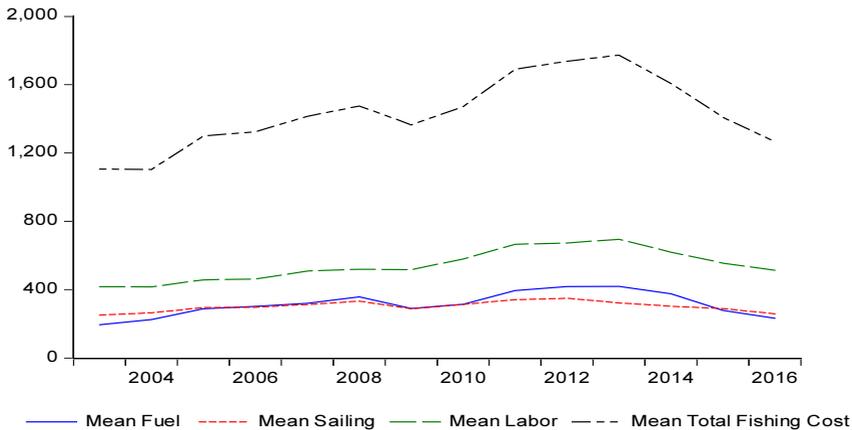
한편 같은 기간 내 근해어업은 마력당 0.30~1.12tCO₂를 배출하였는데, 2008년에는 0.78tCO₂, 2012년에는 0.30tCO₂로 각각 나타났다. 마력당 배출량의 시간에 따른 추세는 전체적으로 유의하지 않게 나타났으나, 2012년의 관측치를 제외한 선형추세는 기울기 계수가 -0.014이며, P값이 0.059로 나타나 10% 수준에서 유의하였다. 이는 매년 근해어업의 이산화탄소 배출량이 약 0.014tCO₂ 감소함을 의미하는 것이며, 이때 설명계수는

0.31로 나타났다. 따라서 2012년 가격변동과 함께 배출량이 추세를 벗어나 저조한 수준을 보인 것은 유류가격이 어업인의 의사결정에 영향을 미친 결과라고 해석할 수 있으며, 실증분석결과에서도 이러한 함의를 찾을 수 있을 것으로 보인다.

2. 근해어업의 총어업비용 추이 및 특징

근해어업 업종별 비용자료로는 수협중앙회의 어업경영조사(2004~2017)를 이용하였으며, 명목가격을 수산물생산자물가지수(2010=100)를 적용하여 실질가격화 하였다. 변환된 실질가격은 분석의 목적에 맞게 어선마력당 투입비용으로 환산하였다. 마력당 총어업비용의 추이는 <그림 2>와 같다. 앞서 지적한 바와 같이 마력당 연료비용이 2008년과 2012년 부근에서 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다.

<그림 2> 근해어업 마력당 평균 어업비용 추이(단위: 천 원)



분석에 이용한 근해어업의 마력당 총어업비용에 대한 기초통계량은 아래의 <표 2>에 제시하였다. 2003~2016년 근해어업의 마력당 평균 총어업비용은 약 143만 원으로 나타났다. 가장 높은 업종은 대형트롤어업으로 마력당 약 206만 원을 부담하였으며, 가장 낮은 잠수기어업은 약 43만 원을 부담하였다.

업종별 총어업비용 규모 상위 7개 업종은 대형트롤어업(206만 원), 동해구외끌이중형저인망어업(201만 원), 서남해구외끌이중형저인망어업(190만 원), 외끌이대형저인망어업(182만 원), 쌍끌이대형저인망어업(176만 원), 근해통발어업(153만 원)이 포함되었으며, 이들은 CO₂ 배출량 규모에서도 상위 7순위 내에 포함되고 있었다. 총어업비용 규모 하위 7개 업종은 잠수기어업(43만 원), 근해채낚기(82만 원), 기선권현망(100만 원), 근해안강망어업(113만 원), 근해자망(114만 원), 근해연승(134만 원), 동해구중형트롤(146만 원) 등이며, 이들 역시 CO₂ 배출량 규모 하위 7순위 내에 포함되었다.

〈표 2〉 근해어업 업종별 마력당 총어업비용의 기초통계량

(단위: 천 원/마력)

	평균	중앙값	최댓값	최솟값	표준편차
쌍끌이대형저인망	1,761.1	1,706.8	2,195.6	1,289.8	267.2
외끌이대형저인망	1,818.1	1,739.1	2,539.0	1,220.4	370.1
대형트롤	2,063.6	1,897.0	2,949.0	1,323.6	626.3
동해구외끌이중형저인망	2,013.2	2,118.8	2,704.5	975.2	629.0
서남해구외끌이중형저인망	1,899.7	1,960.4	2,569.8	1,097.4	449.6
동해구중형트롤	1,457.9	1,324.2	2,730.7	592.6	591.0
대형선망	1,630.9	1,592.6	2,148.0	1,224.5	296.1
기선권현망	1,002.0	1,027.7	1,157.2	785.3	107.8
근해통발	1,531.0	1,575.5	1,861.7	1,129.8	230.9
잠수기	430.8	418.5	636.3	281.5	73.8
근해안강망	1,128.2	1,144.4	1,401.9	830.5	181.0
근해채낚기	822.9	776.5	1,000.6	587.2	139.3
근해자망	1,138.1	994.0	1,668.8	831.2	277.7
근해연승	1,342.2	1,341.9	1,684.7	854.2	201.1
평균	1,431.4	1,369.1	2,949.0	281.5	583.9

근해어업의 비용함수 추정을 위해서 경영수지 현황, 조업 현황, 자산 현황 자료 등을 활용하였으며, 마찬가지로 수산물생산자물가지수(2010=100)를 적용하여 실질가격으로 변환하였다. 이때 어업경영조사의 마력수 자료를 활용하여 각 변수에 대한 마력당 실

질가격을 도출하였다. 비용함수를 구성하는 투입변수 L, E, K 는 <표 3>에서 보듯이 투입량 x_i 와 투입변수 w_i 의 곱으로 이루어지는데, i 는 변수 L, E, K 를 의미한다. 이때 모든 변수는 1마력을 기준으로 하는 것이다. 14개 업종에서 연평균 마력당 약 1.0ton을 어획하고 0.9ton의 CO₂를 배출하는 것으로 나타났다. 총어업비용의 구성은 인건비, 연료비, 출어비로 나누어 살펴보았는데, 각각 54만 원, 31만 원, 30만 원이 소요되는 것으로 나타났다. 인건비는 총어업비용의 약 39%를 차지하여 비중이 가장 높았으며, 연료비의 경우 평균 21%, 출어비는 평균 17%의 비중을 보였다. 요소가격 도출을 위해 선원임금과 후생비를 합한 것을 종사자수로 나누어 1인당 인건비를 노동가격으로 하였으며, 연료비와 출어비는 출어일수로 나누어 출어일당 가격으로 정의하였다. 여기서 출어비용은 어구비, 용기대, 저장대, 소모품비, 주부식비 등을 합한 것이다.

<표 3> 총어업비용과 설명변수의 개요

변수	정의	단위	평균	최댓값	최솟값	표준편차
TC	총어업비용	천 원/마력	1431.4	2949.0	281.5	583.9
E	CO ₂ 배출량	tCO ₂ /마력	0.9	2.9	0.0	0.6
Q	어획량	ton/마력	1.0	8.7	0.1	1.5
L	인건비	천 원/마력	542.2	2,061.9	186.6	250.4
F	연료비		314.7	1,036.9	18.4	186.7
K	출어비		252.8	710.0	26.3	142.3
w_L	L /종사자수	천 원/마력	60.9	187.4	20.4	26.6
w_F	F /출어일수		2.5	12.0	0.2	2.4
w_K	K /출어일수		1.8	7.5	0.2	1.4

3. 비용함수 추정결과

우선적으로 일반최소자승법을 적용하여 비용구조를 분석한 결과 1차의 자기상관이 확인되었으며, 따라서 최종적으로 최우추정의 일종인 실현가능한 일반선형회귀모형(FGLS)을 Zellner의 반복추정법으로 적용하였다.

〈표 4〉 비용함수 추정결과

계수	계수추정량	z-stat.	계수	계수추정량	z-stat.
α_Q	-0.221***	-3.13	γ_{LF}	-0.027***	-4.02
α_E	0.534***	8.24	γ_{LK}	-0.031***	-6.98
β_L	-0.067	-1.46	γ_{FK}	-0.064***	-17.20
β_F	0.433***	5.22	γ_{QQ}	-0.171***	-3.13
β_K	0.293***	16.51	γ_{EE}	-0.061*	-1.67
γ_{QE}	0.095*	1.75	γ_{LL}	0.120***	9.86
γ_{QL}	0.015**	2.47	γ_{FF}	-0.376***	-6.69
γ_{QF}	0.204***	3.86	γ_{KK}	0.094***	28.57
γ_{QK}	-0.025***	-8.11	γ_{Qt}	0.011**	2.48
γ_{EL}	-0.043***	-8.12	γ_{Et}	-0.012*	-1.74
γ_{EF}	-0.101**	-2.39	α_t	0.020***	4.96
γ_{EK}	0.017***	6.36	α_0	6.384***	60.42
Equations	Constant	Parms	RMSE	R_sq.	
$\ln C$	α_0	24	0.188	0.835	
S_L	β_L	6	0.056	0.730	
S_K	β_K	6	0.025	0.825	

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01.

추정결과는 <표 4>와 같으며, 24개의 추정계수 가운데 배출량의 로그값에 대한 계수 추정값을 제외한 23개의 추정량이 10% 이하 수준에서 유의하게 나타났다. 그 중 17개의 계수는 1% 이하 수준에서도 유의하였다. 모형의 설명력은 약 73%에서 84%의 범위에서 형성되었다.

추정계수를 바탕으로 비용함수가 정규성을 만족하는지 Wald test를 통해 검정하였다. <표 5>에 제시한 바와 같이 추정된 비용함수는 단조성과 오목성을 모두 충족하였다. 이와 더불어 근해어업의 비용함수 배출량과 어획량에 대한 약치분 생산기술의 성립여부를 확인하였다. $\alpha_E = \gamma_{EL} = \gamma_{EK} = \gamma_{EF} = \gamma_{EQ} = 0$ 에 대한 귀무가설은 1%의 유의수준에서 기각되었으며, 이는 근해어업에 CO₂ 배출규제가 가해질 경우 비용구조에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

<표 5> 비용함수의 정규성 및 약처분성에 대한 Wald 검정

H ₀	df	Chi-sq.	Prob.
$\sum_i \alpha_i = 1$	3	4552.44	0.000
$\sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ji} = \sum_i \sum_j \gamma_{ij} = 0$	6	1536.95	0.000
$\sum_i \gamma_{iQ} = \gamma_{QQ} = 0$	4	90.25	0.000
$\sum_i \gamma_{iE} = \gamma_{EE} = 0$	4	88.72	0.000
$\alpha_E = \gamma_{EL} = \gamma_{EK} = \gamma_{EF} = \gamma_{EQ} = 0$	5	111.30	0.000

식 (10)을 이용하여 2003~2016년 근해어업의 연도별 CO₂ 한계저감비용(MAC)을 도출하여 <표 6>에 제시하였다.

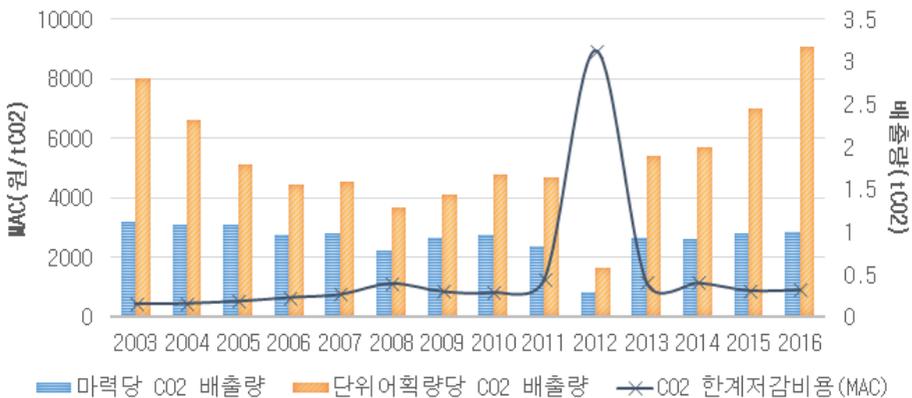
<표 6> 근해어업의 연도별 CO₂ MAC 추정결과

Year	CO ₂ 배출량 (tCO ₂ /마력)	단위어획량당 CO ₂ 배출량 (tCO ₂ /ton)	CO ₂ 한계저감비용(MAC) (원/tCO ₂)
2003	1.125	2.805	474
2004	1.087	2.308	490
2005	1.091	1.798	558
2006	0.965	1.554	688
2007	0.975	1.584	791
2008	0.783	1.289	1,155
2009	0.935	1.434	889
2010	0.968	1.671	855
2011	0.837	1.647	1,312
2012	0.299	0.586	8,966
2013	0.936	1.894	1,180
2014	0.908	1.999	1,178
2015	0.985	2.457	918
2016	1.004	3.180	938
평균	0.921	1.872	1,457

근해어업 어선은 지난 14년간 마력당 연평균 0.92ton의 CO₂를 배출하였으며, 어획량 1ton당 1.87ton의 CO₂를 배출한 것으로 나타났다. 어획량에 대한 연평균 배출량은 2003년 2.8ton이었으며, 5년에 걸쳐 연평균 약 6.5%씩 지속적으로 감소하여 2008년에는 1.29ton으로 14년 평균보다 약 0.6ton 낮았다. 이후 뚜렷한 추세를 보이지 않고 큰 폭으로 변동하였는데, 2012년에는 최저수준인 0.59ton, 2016년에 최고수준인 3.18ton으로 나타났다.

2003~2016년의 CO₂ 감축비용은 연간 474원에서 8,966원의 범위에서 형성되었으며, 평균적으로는 CO₂ 1ton당 1,457원의 감축비용이 소요되었을 것으로 추산되었다. 어업용 경유의 연도별 평균 공급가격⁵⁾은 -45%에서 +58%의 변동폭을 보인 반면, 연도별 MAC의 변동폭은 -30%에서 +660%로 나타나 유가변동에 비해 더욱 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 특히 유가 하락시보다 상승시의 MAC가 더욱 크게 변동하였다. <그림 3>은 이러한 분석결과를 직관적으로 보여준다.

〈그림 3〉 CO₂ 배출량 및 한계저감비용 추이



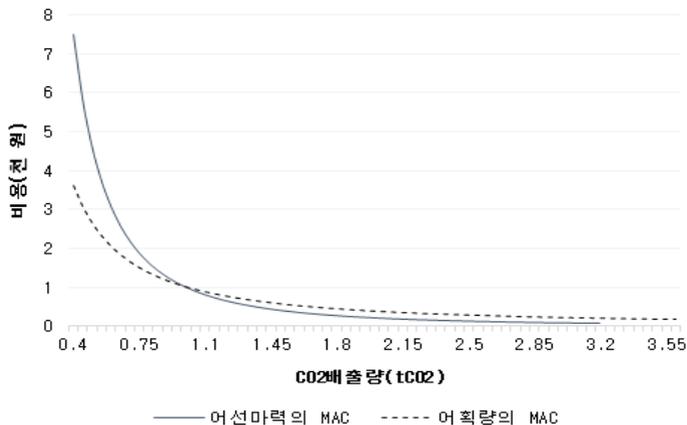
여기서 마력당 배출량과 MAC의 관계를 살펴보기 위하여 한계저감비용의 대수치에 대한 마력당 배출량의 대수치로 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 외부조건이 일정하다면 근해어업의 CO₂ 배출량 1% 저감시 MAC가 약 2.2% 상승하는 것으로 분석되었다. 이

5) 생산물물가지수(수산물, 2010=100)을 적용하여 실질가격으로 변환하여 분석에 이용함.

때 결정계수 값은 약 0.93으로 나타났다. MAC의 대수치에 대한 선형추세는 존재하지 않는 것으로 분석되어 기술구조의 변화는 어선마력의 저감비용 추이에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 2016년의 경우 근해어업 전체의 CO₂ 배출량은 약 1,525,990ton이었으며, 정부의 제1차 기후변화대응 기본계획에 따른 농림어업분야 5.2% 감축목표를 달성하려면, 근해어업은 약 8만 ton 이상을 감축하여야 한다. 이럴 경우 약 7억 5천만 원 이상의 비용이 소요될 것으로 보인다.

한편 어획량당 배출량의 대수치로 회귀분석한 결과, 다른 모든 조건이 일정할 때 CO₂ 배출량 1%를 저감하면 MAC는 약 1.4% 상승하는 것으로 나타났다. 여기에서는 선형의 시간추세가 존재하는 것으로 분석되었는데 계수값이 0.09로 나타나 약 1년 1개월마다 MAC가 1% 상승하는 것으로 해석된다. 이때 모형의 설명력은 85% 이상이었다. <그림 4>는 추정된 MAC를 마력당 배출량에 대한 탄력성과 어획량당 배출량에 대한 탄력성으로 구분하여 나타낸 것이다.

<그림 4> 어선마력(1마력)과 어획량(ton)에 대한 MAC 곡선



타 산업의 감축비용을 산정한 선행연구에 따르면, Kwon and Yun(1999)는 1tCO₂당 3,800원을 1990~1995년 우리나라 발전산업의 MAC로 제시하였으며, Park and Lim (2009)은 14유로를 2001~2004년의 국내 화력발전산업의 CO₂ 1톤에 대한 암묵가격으로 제시하였다. 이명현(2014)은 국내 철강업에서 1990~2010년의 암묵가격을 포함한

MAC가 평균 69,000원 수준이라고 하였다. 김영미(2015)는 1981~2009년 국내 제조업의 평균 MAC를 1tCO₂당 6.26달러, 중국 제조업의 MAC를 6.57달러로 추산하였으며, 이것이 생산기술의 비효율성에 의해 발생한 암묵가격을 합한 가격으로 실제 수준보다 두 배 이상 높게 나타나고 있다고 설명하였다.

이러한 선행연구 결과와 다르게 본 연구에서는 CO₂ 가격이 평균 1,457원으로 타 산업에 비해 낮은 수준인 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 에너지 소비가 많은 제조업, 철강업, 화력발전 등과 비교해 볼 때 상대적으로 어업분야의 에너지 소비가 적어 감축비용이 비교적 낮게 나타남을 의미한다고 할 수 있다. 특히 저렴한 면세유를 이용함으로써 에너지 비용이 배출량에 비해 현저히 낮다는 점을 감안하면 당연한 결과라고 할 수 있다.

V. 결론

기후변화 문제에 대한 국제적 규범이 다양화되고 이를 이행하기 위한 국내적 조치가 강화되고 있다. 대표적 기후변화물질로 분류되어 규제가 집중되고 있는 이산화탄소 배출에 대해서는 향후 강제성이 부여된 다양한 제약들을 피해가기 어려울 것으로 보인다. 우리나라 어업에서 에너지 소비량의 대부분은 어선에 투입되고 있다. 이런 점에서 머지않아 어선어업에 대한 이산화탄소 배출 규제가 가시화될 가능성을 배제할 수 없다. 그럼에도 아직 국내에서는 어업분야 이산화탄소 배출저감비용 산정에 대한 연구가 매우 부족하다. 이는 어업 자체가 조업패턴, 해황 등에 따라 에너지 소비량이 크게 달라질 수 있고, 그에 따른 비용의 추정이 매우 어렵기 때문이다. 이와 같이 우리나라 어업의 비용함수 추정에 대한 연구가 활발하지 못한 현실에서 본 연구는 타 산업을 대상으로 한 선행연구들을 토대로 우리나라 어업분야의 CO₂ 배출저감비용함수를 추정하고자 하였다.

분석결과를 정리하면 다음과 같다. 먼저 기초자료 분석에서 2012년의 배출량이 추세를 크게 벗어난 것으로 미루어 보아 유류가격의 변동이 어업인의 의사결정에 영향을 미칠 것이라고 판단하였다. 그리고 실증분석을 통해 이것이 타당함을 증명하고자 하였다. 비용구조에 대한 SUR 분석결과는 배출저감비용에 대한 일반적 경제이론을 만족하는 것으로 나타났으며, 생산량과 배출량 간의 약처분성 역시 존재하는 것으로 나타났다. 이는 근해어업에서 면세유 폐지나 탄소세 부과 등 CO₂ 저감을 위한 정책적 제약이 가해지

면 어업생산량이 줄어들 수밖에 없음을 의미하며, 이들 정책이 오염물질 저감은 물론 수산자원에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

2003~2016년의 표본기간 동안 CO₂ 1ton당 가격은 477~8,966원으로 나타났으며, 전년 대비 등락률은 -30%에서 660%로 나타났다. 그리고 다른 조건이 일정할 때 근해어선 1마력당 1%의 CO₂를 저감하면 한계저감비용이 2.2% 상승하고, 어획량 1ton당 CO₂ 1%를 저감하면 1.4%의 한계저감비용이 상승하는 것으로 나타났다. 기술변동은 CO₂ 배출량에서 유의한 영향을 미쳤지만, 어선마력의 한계저감비용에 대해서는 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면 어획량에 대한 한계저감비용은 13개월마다 1%씩 상승하는 것으로 분석되었다.

근해어업 전체의 CO₂ 배출량은 2016년을 기준으로 약 1,525,990ton이었으며, ‘제1차 기후변화대응 기본계획’에 따라 농림어업분야의 5.2% 감축목표를 달성하려면 근해어업은 약 8만 ton 이상을 감축하여야 한다. 이럴 경우 본 연구의 실증분석 결과를 바탕으로 추정하면 약 7억 5천만 원 이상의 비용이 소요될 것으로 보인다.

또한 불확실성이 큰 어업에서 경제학의 기본적 제약이 부여된 추정결과가 대다수 어업인의 의사결정구조를 잘 반영하는지를 판단하기 위해서는 다양한 표본에 의한 자료가 구성되어야 한다. 본 연구에서는 비용함수 추정을 위해 수협중앙회의 어업경영조사(2003~2016) 자료를 이용하였는데, 이는 적은 수의 패널을 대상으로 한 것으로 조사결과와의 일관성은 있다고 할 수는 있으나, 실제 근해어업 모집단의 대표값과 다소 차이가 나타날 가능성이 있다. 따라서 향후 연근해어업 실태조사와 같은 대표본에 대한 데이터가 축적되고, 이를 활용한다면 보다 개선된 CO₂ 저감비용 산정결과를 얻을 수 있을 것이라 기대된다.

[References]

- 국립환경과학원, “국내 연근해 선박에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출계수 개발과 배출량 산정(I)”, 2014.
- 강상목, “한국 도시의 지속가능한 성장: 대기오염물질에 대한 환경효율성과 그 결정 요인을 중심으로”, 「통계연구」, 제15권 제2호, 2010.

- 김기수·강용주, “Cobb-Douglas 생산기술특성하의 연안어선어업의 비용 및 이윤함수의 추정”, 「수산경영논집」, 제25권 제2호, 1994. 12.
- 김영미·조용성, “한국과 중국의 제조업종별 이산화탄소 배출에 대한 효율성과 한계저감 비용 비교 분석”, 「응용경제」, 제17권 제4호, 2015.
- 노동석·박광수, “화력발전소의 황산화물 배출저감비용 추정 연구.” 에너지경제연구원 연구보고서, 2003, pp. 1~90.
- 수협중앙회, “어업경영조사보고”, 각 년호.
- 신용민·심성현, “초월대수비용함수를 이용한 근해어업의 규모의 경제성 분석”, 「Ocean and Polar Research」, 제39권 제1호, 2017, pp. 61~71.
- 이동우·이재봉·김영혜·정석근·이해원·홍병규·손명호, “한국 수산업분야 어업용 연소연료의 사용실태와 CO₂ 배출량의 산정”, 「한국수산과학회지」, 제43권 제1호, 2010, pp. 78~82.
- 이명현, “한국 제조업의 用水에 대한 적정가격 설정 -수요관리정책을 중심으로”, 「자원경제학회지」, 제7권 제1호, 1997, pp.151~164.
- 이명현, “국내 철강업의 생산요소 간 비효율적 배분을 고려한 CO₂ 저감비용 산정 및 분석: 비용함수접근법”, 「자원환경경제연구」, 제23권 제3호, 2014, pp. 453~472.
- 통계청, “등록어선통계”, www.kosis.kr.
- Atkinson, S. E. and R. Halvorsen, “Parametric efficiency tests, economies of scale, and input demand in US electric power generation”, *International Economic Review*, 1984, pp. 647~662.
- Atkinson, S. E. and C. Cornwell, “Parametric estimation of technical and allocative inefficiency with panel data”, *International Economic Review*, 1994, pp. 231~243.
- Christensen, Laurits R. and William H. Greene, “Economies of scale in US electric power generation”, *Journal of political Economy*, Vol. 4.4, Part 1, 1976, pp. 655~676.
- European Environment Agency, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook”, 2006.
- Kwon, O. S. and W. C. Yun, “Estimation of the marginal abatement costs of airborne pollutants in Korea’s power generation sector. *Energy Economics*”, Vol. 21, 1999, pp. 547~560.
- Park, H. and J. Lim, “Valuation of Marginal CO₂ Abatement Options for Electric Power Plants”, *Energy policy*, Vol. 37, 2009, pp. 1834~1841.
- Shephard, R. W., “Theory of Cost and Production Functions, Princeton: Princeton University Press”, 1970.
- STATA Manuals, <http://www.stata-press.com/manuals/documentation-set/>
- UNFCCC, <https://unfccc.int/>