

Article

기후변화가 대형선망 고등어 어업의 최적탄소배출량에 미치는 영향분석

최종두*

고려사이버대학교 경영학과
(03051) 서울시 종로구 북촌로 106

A Study on the Optimal Emission of CO₂ due to Climate Change :
An Application for Large Purse Seine

Jong Du Choi*

Department of Business Administration, The Cyber University of Korea
Seoul 03051, Korea

Abstract : The purpose of this paper is to estimate the optimal CO₂ emission in the maximum economic yield (MEY), maximum sustainable yield (MSY), and open access (OA) using a bioeconomic model. The results are as follows; in the case of E_{MEY}, E_{MSY}, and E_{OA} levels, CO₂ emissions are estimated at 150,704,746CO₂/kg, 352,211,193CO₂/kg, and 301,409,492CO₂/kg respectively. We show that the E_{MEY} is more efficient than the other levels. That is, the level of E_{MEY} signifies the optimal economic fishing usage as the most economically efficient usage for large purse seine fishery catching mackerel species. The emission of CO₂ in E_{MEY} is the lowest level. Also, the impacts of climate changes such as ocean temperature increase, ocean acidification, and the combined impact thereof show that the biomass of mackerel decreases.

Key words : optimal emission of CO₂, bioeconomic model, Maximum Economic Yield (MEY), Large Purse Seine, climate change

1. 서론

온실가스 배출로 인한 지구의 기후변화는 환경적인 문제뿐만 아니라 경제적인 부문에서도 다양한 영향을 미치고 있다. 온실가스종합정보센터 (2017)에 의하면 온실가스를 감소시키면서 지속가능한 성장을 달성하기 위한 과정에서 한국 온실가스 배출량 증가속도는 1990년 대비 2010년에는 2.3배로 OECD 회원국 중 가장 빠르다. 특히, 한국의 국민 1인당 이산화탄소(CO₂) 배출량은 2010년 12.3톤으로 미국(16.9톤)과 캐나다(15.8톤)에 이어 3위이며, 이러한 증가추세가 지속되면 2020년에는 미국의 1인

당 배출량을 추월할 가능성도 존재한다(강 등 2013).

국내 수산업 분야의 이산화탄소 배출량은 약 411만 톤으로 추정되며, 국내 온실가스 배출량의 약 0.7%를 차지한다(이 등 2010). 수산업 중 근해어업은 연료 사용 비중이 매우 높아 어선에서 발생하는 이산화탄소가 많고, 노후화된 어선의 비중이 많아 온실가스 배출문제가 심각하다. 무엇보다도 연안어업과 비교해 볼 때 근해어업은 대형화 및 규모화 되어 있으며, 기업적인 특성을 갖추고 있어서 산업별 이산화탄소 감축이 본격화될 경우 영향을 크게 받게 될 것으로 예상된다.

현재 수산부문의 이산화탄소 감축에 관한 논의가 미비하긴 하지만 유류소비가 많은 근해어업에 대한 이산화탄소 배출실태와 향후 감축방안에 대한 연구가 필요한 시점

*Corresponding author. E-mail : gatorchoi@cyberkorea.ac.kr

이라고 할 수 있다. 일반적으로 탄소감축에 따른 영향분석은 포스트코토체제이후 신기후협약체제의 이행수단으로 근해어업 부문에 탄소배출권 도입을 가정하고, 바이오경제모형(bio-economic model)을 이용하여 이론적으로 접근할 수 있다.

바이오경제모형은 국내외적으로 수산자원관리 분야에 널리 이용되는 분석기법으로 어자원(stock)의 생물학적 자료와 경제학적 이론들을 접목하여 적정 어획량과 어획노력을 추정하는 최적어획전략을 도출할 수 있는 방법이다. 대표적으로 Kim et al. (2008)은 한국의 문어통발어업에 대한 최적 경제적 어획노력수준을 분석하였으며, 남 등 (2010)은 국내 고등어와 전갱이 어종에 대한 최적 생산수준을 평가하였다. 또한, 자유입어(OA, open access)하에서의 총허용어획량(TAC, total allowable catch)과 출어당 어획량 통제 수단과의 관계를 분석한 연구(Anderson 1986) 등이 있다. 그러나 바이오경제모형을 이용하여 국내 고등어자원에 대한 최적생산수준에서의 탄소배출량을 분석하고 기후변화가 미치는 영향을 분석한 연구는 전무한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 향후 탄소 감축의무 압력이 가시화된 상황을 고려하여 대형선망어업의 고등어자원을 대상으로 최대경제적생산(MEY, maximum economic yield) 수준, 최대지속적생산(MSY, maximum sustainable yield) 수준, 자유입어(OA) 수준에서의 적정 어획량, 어획노력, 탄소배출량을 비교 분석하여, 해당 결과를 바탕으로 기후변화(수온상승, 해양산성화, 복합효과)에 따른 파급효과를 도출하였다. 구체적인 논문구성은 다음과 같다.

첫째, 이론적 접근을 시도하였으며, 바이오경제모형을 구축한 후 생산함수, 비용함수, 수요함수 등을 추정하였다. 둘째, MEY, MSY, OA 수준에서의 적정 어획량, 어획노력을 도출하였으며, 추정된 어획노력량을 유류 사용량으로 환산하고, 사용한 유류사용량을 이산화탄소 배출량으로 분석하였다. 셋째, 기후변화(수온상승, 해양산성화, 복합효과)가 MEY, MSY, OA 수준에 미치는 영향을 분석하였다. 분석을 위하여 이용된 다양한 이론적 모형은 다음과 같다.

2. 이론적 접근과 분석모형

생산함수

' t ' 시점에서의 어군을 ' X_t '라 하고, 어군의 자연성장률을 ' $F(X_t)$ '라고 하면, 어군과 어군의 성장 사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다(Clark 1990).

$$F(X_t) = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) \quad (1)$$

위 식에서 ' K '는 해당 수산자원 스톡(stock)의 크기가 최대로 될 수 있는 수용능력(carrying capacity)의 한계점에서의 최대 자원량을 뜻하며, ' r '은 자원량 X_t 가 '0'에 가까울 때의 고유 성장률(intrinsic growth rate)을 의미한다. 어군은 어부의 어로활동에 의해 시간이 지남에 따라 자원 스톡이 변화되므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = F(X_t) - Y_t \quad (2)$$

위 식에서 Y_t 는 특정 수산자원의 생산함수(어획함수)를 의미한다. 수산자원의 생산함수는 투입물인 생산요소와 그 결과로 만들어지는 어획량간의 투입, 산출관계를 의미한다. 수산물을 어획하기 위해서는 생산요소의 투입이 요구되며, 일반적으로 자본과 노동을 뜻한다. 수산업에서는 수산물을 어획하는 과정에 이용되는 그물, 기타 어구 등의 도구들을 자본이라고 한다면 어업인들은 노동이라고 할 수 있다. 수산업에서는 일반적으로 자본과 노동의 생산요소를 일괄적으로 어획노력(fishing effort)로 나타내고 있으며, 어획노력의 단위는 어선의 척수, 톤수 또는 마력수, 1인당 어로일수, 어선 적당 출어일수 등 다양하게 나타낼 수 있다(Anderson 1986).

어획량은 어획노력 외에도 해당 수산자원의 어군(자원스톡)의 규모에 의해서도 영향을 받는 데, 동일한 어획노력을 투입하더라도 어군의 규모가 크면 많이 잡을 수 있으며, 적은 경우에는 어획량이 감소할 수 있다. 따라서 수산자원의 t 시점에서의 어획량 Y_t 는 다음과 같이 구체적으로 표현할 수 있다(Conrad 2010).

$$Y_t = qE_t X_t \quad (3)$$

즉, 위 식에서 살펴보는 바와 같이 어획량은 해당 시점에서의 어획노력(E_t)과 자원스톡의 크기(X_t), 자원의 밀도를 의미하는 어획능력계수(q)에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 어획능력계수는 어획량의 많고 적음에 상관없이 상수로 가정하기 때문에 실질자원스톡성장률을 구하기 위해서는 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = F(X_t) - qE_t X_t \quad (4)$$

또한, 스톡의 성장률 함수형은 포물선 모양이므로 $F(X_t)$ 대신에 식 (1)을 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dX}{dt} = rX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) - qE_t X_t \quad (5)$$

식 (5)에서 어획노력량(E_t)을 일정한 수준에 두고 자연 성장률 $F(X_t)$ 와 어획량 Y_t 가 일치하는 균형스톡을 도출하기 위해서는 식 (5)를 ' $dX/dt = 0$ '으로 놓고 계산하면 되며, 지속적 안정균형자원스톡수준 X_t 는 다음과 같이 된다.

$$X_t = K \left(1 - \frac{qE_t}{r}\right) \quad \text{단, } E_t > r \quad (6)$$

식 (6)의 자원스톡수준에 대응한 어획물 혹은 어획량 Y_t 는 식 (6)을 식 (3)에 대입하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Y_t = qE_t X_t = qE_t K \left(1 - \frac{qE_t}{r}\right) = qKE_t - \frac{q^2 KE_t^2}{r} \quad (7)$$

식 (7)에서 ' $qK = a$ '라고 하고, ' $q^2 K/r = b$ '라고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_t = qE_t X_t = aE_t - bE_t^2 \quad (8)$$

식 (8)은 수산자원의 생산함수(어획함수)를 의미하며, 어획량을 어획노력의 함수관계로 나타낸 형태로 쉐퍼(Schaefer)의 어획노력곡선(yield effort curve)이라고도 한다(Schaefer 1957). Fig. 1에서 볼 수 있듯이 수산자원의 자연성장률까지만 어획하면 자원스톡은 일정한 수준을 유지하게 된다. 즉, 어획노력의 크기마다 스톡이 줄어들지 않은 채 잡을 수 있는 지속적 생산량이 어느 수준까지 인가를 보여주는 균형모델이라고도 할 수 있다. 따라서 쉐퍼곡선에서 q , K , r 이 상수이고, t 시점에서의 어획량 Y_t 는 어획노력의 함수이므로 어획량 Y_t 는 다음과 같이 표현할 수 있다(Yew and Heaps 1996).

$$Y_t = Y(E_t) = aE_t - bE_t^2 \quad (9)$$

MEY의 도출

최대경제적생산(MEY)은 경제적 이익이 최대가 되는 지점에서의 산출량을 의미하며, 경제적 최대이윤에서의 어획노력(E)은 MEY에 기반을 둔 경제적 최적어구사용을 뜻한다. 대형선망어업의 MEY에 근거한 경제적 최적어구사용을 분석하기 위해서는 양망횟수에 따른 생산함수(yield function), 비용함수(cost function), 가격함수(price function)를 도출해야 한다. 또한, MEY는 어획노력수준에 따른 한계비용곡선(MC)과 한계수입곡선(MR)이 만나는 점을 뜻하며, MEY의 어획량은 Y_{MEY} , 어획노력은 E_{MEY} 로 나타낼 수 있다.

편의상 t 시점을 생략하면, 어획노력(E) 수준에 따른 수산자원의 지속가능산출함수(sustainable yield function) Y 는 공식 (10)과 같이 쉐퍼모델의 산출-어획노력 함수로 표현할 수 있다.

$$Y = aE - bE^2 \quad (10)$$

공식 (10)을 어획노력(E)에 대해 1차 미분함으로써 MSY에서의 어획노력(E_{MSY})을 도출할 수 있고, 해당 결과를 이용하여 MSY에서의 어획량(Y_{MSY})을 분석할 수 있다. 또한, 산출량과 출어당 어획양망횟수를 적용할 때, 공식 (10)에서 a 와 b 값은 최소자승법(ordinary least-squares regression)으로 구할 수 있다.

본 분석에 이용된 어획비용함수(TC)는 자원량과 어획량과 연계되어 있으며, 어획노력량은 대형선망어업의 양망횟수를 사용하고 공식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$TC = cE \quad (11)$$

위 식에서 단위비용(c)은 고등어를 어획하는 대형선망의 양망당 비용을 뜻한다. 분석을 위해서는 대형선망 중 고등어가 어획량에서 차지하는 비중을 감안하여야 한다. 즉, 고등어의 양망당 비용은 특정 기간 동안의 대형선망의 총어획비용을 해당 기간 동안의 대형선망 총 양망횟수로 나누고, 그 결과에 대형선망 중 고등어가 차지하는 비중을 곱하여 도출한다. 또한 특정 기간 동안의 대형선망 총양망횟수는 대형선망의 총어선척수를 특정기간 출어일수에 곱한 후 그 값을 대형선망의 1일 평균 양망횟수에 곱하여 계산한다.

산출에 대한 출어평균비용(AC)은 총어획비용을 산출량으로 나누어줌으로써 구할 수 있는 데, 공식 (10)과 (11)를 이용하여 계산하면, 구체적으로 공식 (12)과 같이 표현된다.

$$AC = \frac{TC}{Y} = \frac{cE}{aE - bE^2} = \frac{c}{a - bE} \quad (12)$$

또한, 공식 (10)을 어획노력(E , 어획양망횟수)에 대해 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4bY}}{2b} \quad (13)$$

공식 (13)의 결과를 공식 (12)의 어획노력에 대입하여 다시 계산하면 출어평균비용(AC)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} AC &= \frac{c}{a - bE} = \frac{c}{a - b(a \pm \sqrt{a^2 - 4bY})/2b} \\ &= \frac{c}{\{(a \pm \sqrt{a^2 - 4bY})\}/2} \end{aligned} \quad (14)$$

한계비용(MC)은 총어획비용(TC)을 산출량(Y)에 대해 미분하여 계산하는 데, 공식 (11)에 공식 (13)의 어획노력

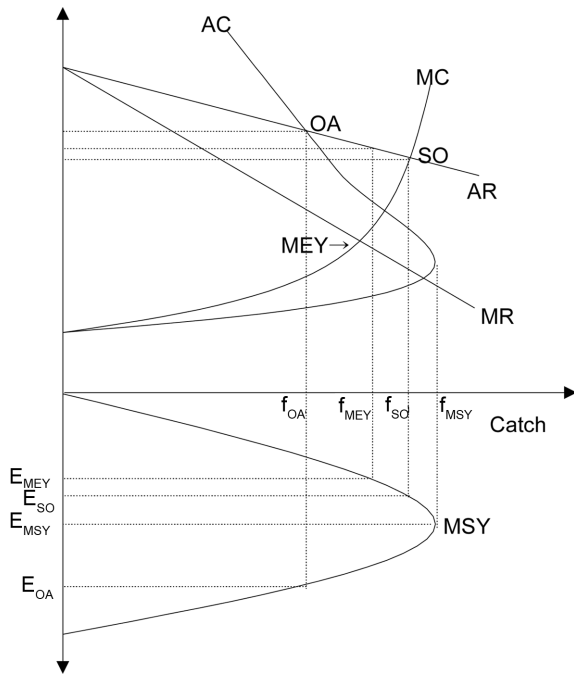


Fig. 1. Catch and fishing effort in MEY, MSY, and OA

(E)을 대입하여 결과를 도출한 후 산출량에 대해 미분한다. 즉 공식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$MC = \frac{dTC}{dY} = \frac{d\left(c \cdot \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4bY}}{2b}\right)}{dY} = \frac{c}{\sqrt{a^2 - 4bY}} \quad (15)$$

수요함수는 에드워즈(Edwards) 등이 사용한 선형함수를 이용할 수 있는데 공식 (16)과 같이 가격을 종속변수로 하고, 산출량(Y)을 독립변수로 하는 형태이다(Edwards et al. 1995).

$$P = \alpha_0 - \alpha_1 Y \quad (16)$$

공식 (12), (15), (16)에서 도출한 평균비용함수, 한계비용함수, 수요함수는 MEY, MSY, OA에서의 어획량과 어획노력을 비교분석하는 데, 유용하게 사용된다(Fig. 1 참조).

구체적으로 살펴보면, MSY하에서 Y_{MSY} 와 E_{MSY} 는 공식 (10)을 어획노력(E)에 대해 미분하면 각각 공식 (17)과 (18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{MSY} = \frac{a^2}{4b} \quad (17)$$

$$E_{MSY} = \frac{a}{2b} \quad (18)$$

MEY하에서 Y_{MEY} 와 E_{MEY} 는 한계비용과 수요곡선이 만나는 점(MR=MC)에서 도출되는 데, 공식 (19)와 같이

표현할 수 있다.

$$MR = \frac{dTR}{dE} = \frac{d[p(aE - bE^2)]}{dE}$$

$$MC = \frac{dTC}{dE} = \frac{d(cE)}{dE}$$

$$\therefore MR = MC \quad (19)$$

OA하에서의 산출량(Y_{OA})과 어획노력(E_{OA})은 평균비용곡선과 수요곡선이 만나는 점($TR=TC$)에서 결정되며, 공식 (20)과 같이 정리할 수 있다.

$$TR = pY = p(aE - bE^2)$$

$$TC = cE$$

$$\therefore TR = TC \quad (20)$$

3. 분석자료

분석대상산업 및 어종

2016년 기준 우리나라 일반해면어업의 어획량은 929,814톤이며, 멸치(148,036톤) 다음으로 고등어(133,217톤)가 많이 어획되고 있다. 또한 대형선망어업의 어류 어획량 중 고등어 어획량은 많은 비중을 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 일반해면어업의 주요 어획 어종인 고등어와 해당 어종을 어획하는 주요 산업인 대형선망어업을 중심으로 분석하였다.

고등어의 어획실적은 1990년 92,775톤으로 10만 톤도 되지 않았지만, 지속적으로 증가하여 386,877톤(1996년)으로 최고 어획량을 달성한 후 급속히 감소하는 현상을 보여주고 있다. 2000년 이후로는 매년 15만톤 내외의 어획을 보여주고 있으며, 최근 3년(2014~2016년) 동안은 적지만 소폭 증가하는 경향이 있다. 그러나 고등어의 절대적인 어획량은 2016년 기준 127,089톤으로 2000년 전과 비교해서 감소한 상태이다(Fig. 2 참조).

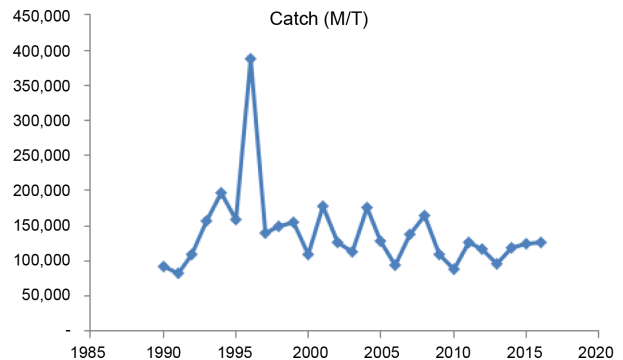


Fig. 2. Catch of mackerel by year (1990–2016)

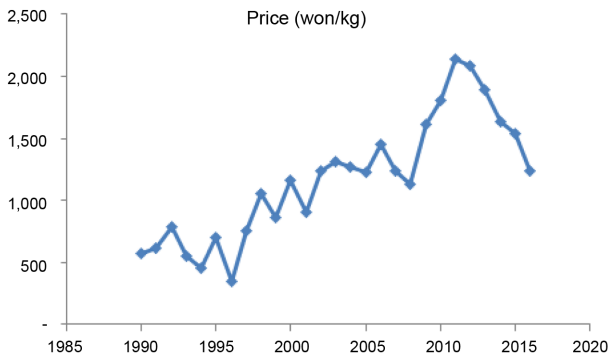


Fig. 3. Price of mackerel by year (1990–2016)

대형선망어업의 고등어 판매가격은 1990년대 이후로 점진적으로 증가하다가 2011년 2,143원/kg을 정점으로 최근에는 하락세를 보이고 있다. 2016년 현재 1,236원/kg으로 분석되었다(Fig. 3 참조).

파라미터 추정

대형선망어업의 고등어 어획 자료를 토대로 이론적 모델을 적용하여 분석한 결과 다양한 파라미터들이 추정되었다(Table 1 참조). 어획비용과 양망횟수의 경우 최근 자료의 부재로 1990~2007년까지 대형선망에 의해 어획된 고등어 생산관련 자료들을 이용하였으며, 고등어의 단위 노력당 비용(c)은 대형선망의 총어업비용을 총양망횟수로 나눈 후 대형선망 중 고등어가 차지하는 비중을 곱하여 도출하였다.

또한 대형선망 총양망횟수는 국립수산물과학원에서 제공한 자료를 토대로 분석에 이용하였다. 양망당비용은 어구비, 연료비, 수리비, 인건비 등으로 구성되어 있으며, 식 (11)을 이용하여 분석한 고등어의 양망당 비용(c)은 약 21,686천원으로 나타났으며, $TC = 21,686E$ 으로 표현할 수 있다.

Table 1. Estimation of parameter for analysis in large purse seine

| Parameter | Coefficient |
|------------|--------------------------|
| <i>a</i> | 21.813074** (12.6136) |
| <i>b</i> | -0.000487 (0.0011) |
| <i>c</i> | 21,686 |
| α_0 | 1,737.7* (226.8371) |
| α_1 | -0.004068* (0.0015) |

Note. Numbers in parentheses are standard errors, and *(**) indicates significance at the 5%(10%) level

자료의 제약으로 인하여 단일변수를 이용한 수요함수는 수산정보포탈 (2017) 자료를 이용하고 식 (16)을 적용하여 분석하였으며, α_0 값(1,737.7)과 α_1 값(-0.004068)을 각각 도출하였고, 관련 식은 $P = 1,737.7 - 0.004068Y$ 로 나타낼 수 있다. 또한, 식 (10)을 이용하여 어획함수모형의 *a* 값(21.813074)과 *b* 값(-0.000487)을 각각 도출하였으며, $Y = 21.813074E - 0.000487E^2$ 로 표현할 수 있다.

4. 분석결과

MEY, MSY, OA에서의 생산량과 어획노력

대형선망어업에서 어획하는 고등어에 대한 MEY, OA, MSY에서의 어획량(Y)과 어획노력(E)을 각각 분석하여 보면 가장 경제적인 결과를 보여주는 MEY에서의 어획량과 어획노력은 각각 164,244톤과 9,579양망수로 분석되었다(Table 2 참조). 그 외 OA에서의 어획량과 어획노력은 239,084톤과 19,158양망수로 나타났으며, MSY에서의 어획량과 어획노력은 244,164톤과 22,387양망수로 분석되었다.

MEY, MSY, OA에서의 탄소배출량

고등어를 어획하는 데 주로 이용되는 대형선망어업의 CO₂배출량은 자료의 제약으로 2005년과 2008년 사이의 수산업협동조합의 내부자료를 이용하여 분석하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 대형선망어업의 CO₂배출량은 어획량(생산량)당 0.91~1.76CO₂/kg으로 나타났으며, 4년 평균 1.41CO₂/kg으로 분석되었다.

고등어의 양망당 어획량을 15,920 kg(2001~2005년 평균)으로 볼 때, 평균 양망당 어획량에 2005년부터 2008년까지의 평균 생산량당 CO₂배출량 1.41을 곱하면

Table 2. Estimate of yield and effort in E_{MEY}, E_{OA}, and E_{MSY}

| Item | E _{MEY} | E _{OA} | E _{MSY} |
|-----------|------------------|-----------------|------------------|
| Y (M/T) | 164,244 | 239,084 | 244,164 |
| E (traps) | 9,579 | 19,158 | 22,387 |

Table 3. Emission of CO₂ per kg in large purse seine (Unit : kg, CO₂/kg)

| Year | Emission CO ₂ per vessel | Emission CO ₂ per kg |
|---------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 2005 | 273,778 | 1.58 |
| 2006 | 258,921 | 1.76 |
| 2007 | 269,283 | 1.39 |
| 2008 | 214,516 | 0.91 |
| Average | 254,125 | 1.41 |

Table 4. Emission of CO₂ per net in large purse seine
(Unit : kg, CO₂/kg)

| Emission of CO ₂ per kg | Emission of CO ₂ per net |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.41 | 22,447 |

Table 5. Volume and value of CO₂ emission in E_{MEY}, E_{MSY}, and E_{OA}
(Unit : CO₂/kg, won)

| Items | E _{MEY} | E _{MSY} | E _{OA} |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Volume (CO ₂ /kg) | 150,704,746 | 352,211,193 | 301,409,492 |
| Value (won) | 3,608,832,363 | 8,434,181,306 | 7,217,664,726 |

평균 양망당 CO₂배출량을 도출할 수 있으며, 구체적으로 22,447CO₂/net으로 분석되었다(Table 4 참조).

Table 4의 결과에 대형선망에서의 고등어 어획률인 70%를 곱하면 E_{MEY}, E_{MSY}, E_{OA}에서의 CO₂배출량을 분석할 수 있다(Table 5 참조). CO₂배출량이 제일 많은 것은 MSY에서 352,211,193 CO₂/kg을 나타냈으며, 다음으로 OA에서 301,409,492 CO₂/kg이 배출되었고, MEY에서는 150,704,746 CO₂/kg으로 가장 적게 CO₂를 배출하는 것으로 분석되었다. 즉, MSY와 OA에서의 CO₂배출량은 MEY보다 CO₂배출량이 각각 2.34배, 2배 가량 많이 배출되고 있는 것으로 분석되었다(Table 5 참조).

또한, 국내 할당배출권(KAU16) 거래가격은 23,800~24,000원/톤(2017년 2월 20일~3월 2일 기준)으로 평균 23,946원/톤으로 나타났다(Fig. 4 참조).

평균배출권가격을 CO₂배출량에 곱하여 탄소배출권 가

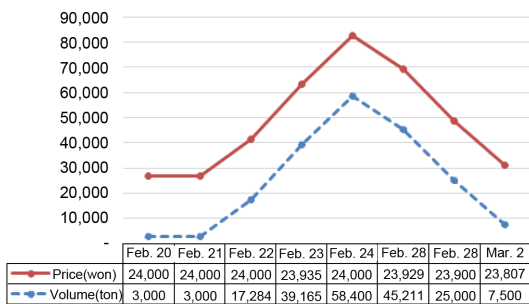


Fig. 4. Trend of price and volume in carbon markets

치로 환산하면, E_{MEY}에서는 36.09억원, E_{MSY}에서는 84.34억원, E_{OA}에서는 72.18억원으로 분석되었다(Table 5 참조).

기후변화가 MEY, MSY, OA에 미치는 영향

강 등 (2012)에 의하면 기후변화에 따른 생물적 모델은 해양생태계에서 기후로 인한 생산량 변화 효과 측정에 영양흐름모형(EwE; Ecopath, Ecosim, Ecospace 모형)을 이용할 수 있다. 해당 모형은 수생 생태계 구조를 구축하고 계수화하여 해당 생태계에 외부충격을 주었을 경우, 생물 군집이 받는 영향을 평가하는 방법이다.

IPCC가 제출한 특별보고서의 A1B안을 기준으로 추정할 경우, 기후변화는 해양생물(어류)에 실질적인 영향을 미친다(강 등 2012). 즉, Table 6을 살펴보면 평균적으로 수온상승의 경우 약 6%의 생체량 감소가 발생하였으며, 해양산성화로 인한 생체량 감소는 산성화 영향 강도에 따라 약(conservative), 중(moderate), 강(substantial)으로 구분할 경우 각각 35.8%, 58.1%, 65.8%로 나타났고, 복합효과도 약(conservative), 중(moderate), 강(substantial)로 구분할 경우 각각 33.3%, 58.0%, 66.9%로 생체량 감소가 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 6의 결과를 Table 2의 결과(기준년도 이후는 일정하다고 가정함)에 반영하여 MEY, OA, MSY에서의 어획량(Y)과 어획노력(E)을 분석하면 각각 Table 7과 Table 8의 결과를 도출할 수 있다.

Table 7를 살펴보면, 수온상승(PP)으로 인하여 MSY, MEY, OA에서 어획량은 각각 229,514톤, 154,390톤, 224,739톤으로 감소하였다. 해양산성화(OA)는 산성화 강도(약, 중, 강)에 따라 MSY(156,753~83,506톤), MEY (105,445~56,172톤), OA(153,492~81,767톤)의 어획량 감소를 유도하였다. 또한 수온상승과 해양산성화의 복합효과(CI)로 인한 어획량 축소는 MSY에서 162,857~80,818톤, MEY에서 109,551~54,365톤, OA에서 159,469~79,137톤으로 나타났다.

Table 8의 경우, 수온상승(PP)으로 인하여 MSY, MEY, OA에서의 어획노력(E)은 각각 21,044양망수, 9,004양망수, 18,008양망수로 감소하였다. 해양산성화(OA)는 산성

Table 6. Biomass changes due to climate change effects of PP, OA and CI

| Items | PP | OA | | | CI | | |
|----------------|-------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
| | | Conservative | Moderate | Substantial | Conservative | Moderate | Substantial |
| Biomass change | -6.0% | -35.8% | -58.1% | -65.8% | -33.3% | -58% | -66.9% |

Source. Kang et al. (2012)

- Note. 1. PP = primary production which means temperature increase
- 2. OA = ocean acidification
- 3. CI = combined impact

Table 7. Yield due to climate change effects in E_{MEY}, E_{OA}, and E_{MSY}

| Items | Yield (M/T) | PP | OA | | | CI | | |
|------------------|-------------|---------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
| | | | Conservative | Moderate | Substantial | Conservative | Moderate | Substantial |
| | | | -6% | -35.80% | -58.10% | -65.80% | -33.30% | -58% |
| Y _{MSY} | 244,164 | 229,514 | 156,753 | 102,305 | 83,504 | 162,857 | 102,549 | 80,818 |
| Y _{MEY} | 164,244 | 154,390 | 105,445 | 68,818 | 56,172 | 109,551 | 68,983 | 54,365 |
| Y _{OA} | 239,084 | 224,739 | 153,492 | 100,176 | 81,767 | 159,469 | 100,415 | 79,137 |

Note. 1. PP = primary production which means temperature increase
 2. OA = ocean acidification
 3. CI = combined impact

Table 8. Effort due to climate change effects in E_{MEY}, E_{OA}, and E_{MSY}

| Items | Effort (net) | PP | OA | | | CI | | |
|------------------|--------------|--------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
| | | | Conservative | Moderate | Substantial | Conservative | Moderate | Substantial |
| | | | -6% | -35.80% | -58.10% | -65.80% | -33.30% | -58% |
| E _{MSY} | 22,387 | 21,044 | 14,372 | 9,380 | 7,656 | 14,932 | 9,403 | 7,410 |
| E _{MEY} | 9,579 | 9,004 | 6,150 | 4,014 | 3,276 | 6,389 | 4,023 | 3,171 |
| E _{OA} | 19,158 | 18,008 | 12,299 | 8,027 | 6,552 | 12,778 | 8,046 | 6,341 |

Note. 1. PP = primary production which means temperature increase
 2. OA = ocean acidification
 3. CI = combined impact

화 강도(약, 중, 강)에 따라 MSY(14,372~7,656양망수), MEY(6,150~3,276양망수), OA(12,299~6,552양망수)의 어획노력 감소를 유도하였다. 또한 수온상승과 해양산성화의 복합효과(CI)로 인한 어획노력 축소는 MSY에서 14,932~7,410양망수, MEY에서 6,389~3,171양망수, OA에서 12,778~6,341양망수로 나타났다.

또한 Table 8의 결과에 대형선망에서의 고등어 어획률인 70%를 곱하면 기후변화에 의한 고등어 어획과 관련된 E_{MEY}, E_{MSY}, E_{OA}에서의 CO₂배출량을 분석할 수 있다 (Table 9 참조). 수온상승(PP)으로 인한 이산화탄소배출량은 MSY, MEY, OA에서 각각 331.08천톤, 141.66천톤, 283.32천톤으로 감소하였다. 해양산성화(OA)는 산성화 강도(약, 중, 강)에 따라 MSY(226.12~120.46천톤), MEY(96.75~51.54천톤), OA(193.5~103.08천톤)의 이산화탄소

배출량 감소가 발생하였다. 또한 수온상승과 해양산성화의 복합효과(CI)로 인한 이산화탄소배출량은 MSY에서 234.92~116.58천톤, MEY에서 100.52~49.88천톤, OA에서 201.04~99.77천톤으로 나타났다.

특히, Table 9의 CO₂배출량을 국내 할당배출권(KAU16) 평균 거래가격인 23,946원/톤과 곱하여 탄소배출권 가치로 환산하면, 수온상승(PP)으로 인한 이산화탄소배출권 가치는 MSY, MEY, OA에서 각각 7,928백만원, 3,392백만원, 6,785백만원으로 감소하였다. 해양산성화(OA)는 산성화 강도(약, 중, 강)에 따라 MSY(5,415~2,884백만원), MEY(2,317~1,234백만원), OA(4,634~3,024백만원)에서 이산화탄소배출권 가치가 감소하는 현상이 발생하였다. 또한 수온상승과 해양산성화의 복합효과(CI)로 인한 이산화탄소배출권 가치는 MSY에서 5,626~2,792백만원,

Table 9. Volume of CO₂ emission due to climate change effects considering mackerel catch

| Items | Volume (thousand ton) | PP | OA | | | CI | | |
|------------------|-----------------------|--------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
| | | | Conservative | Moderate | Substantial | Conservative | Moderate | Substantial |
| | | | -6% | -35.80% | -58.10% | -65.80% | -33.30% | -58% |
| E _{MSY} | 352.21 | 331.08 | 226.12 | 147.58 | 120.46 | 234.92 | 147.93 | 116.58 |
| E _{MEY} | 150.70 | 141.66 | 96.75 | 63.15 | 51.54 | 100.52 | 63.30 | 49.88 |
| E _{OA} | 301.41 | 283.32 | 193.50 | 126.29 | 103.08 | 201.04 | 126.59 | 99.77 |

Note. 1. PP = primary production which means temperature increase
 2. OA = ocean acidification
 3. CI = combined impact

Table 10. Value of CO₂ emission due to climate change effects considering mackerel catch

| Items | Value (million won) | PP | OA | | | CI | | |
|------------------|---------------------------|-------|--------------|----------|-------------|--------------|----------|-------------|
| | | | Conservative | Moderate | Substantial | Conservative | Moderate | Substantial |
| | | | -6% | -35.80% | -58.10% | -65.80% | -33.30% | -58% |
| E _{MSY} | 8,434 | 7,928 | 5,415 | 3,534 | 2,884 | 5,626 | 3,542 | 2,792 |
| E _{MEY} | 3,609 | 3,392 | 2,317 | 1,512 | 1,234 | 2,407 | 1,516 | 1,195 |
| E _{OA} | 7,218 | 6,785 | 4,634 | 3,024 | 2,468 | 4,814 | 3,031 | 2,389 |

Note. 1. PP = primary production which means temperature increase
 2. OA = ocean acidification
 3. CI = combined impact

MEY에서 2,407~1,195백만원, OA에서 4,814~2,389백만원으로 나타났다(Table 10 참조).

5. 결 론

현재 우리나라 근해어업은 여전히 고탄소 및 고비용 어업구조를 벗어나지 못하고 있으므로, 지속가능한 수산업이 되기 위해서는 저탄소 및 저비용 어업구조로 변화가 필요하다. 게다가 포스트 교토체제와 신기후협약하에서는 어업활동으로 인한 이산화탄소 배출을 저감하는 방안을 생각할 수밖에 없다. 따라서 국내수산업의 탄소배출과 관련된 이론적 접근이나 사례분석이 현실적으로 필요한 실정이다.

본 연구에서는 수산업 중 고등어를 어획하는 대형선망 어업을 대상으로 바이오경제모형(bio-economic model)을 이용하여 MSY, MEY, OA 수준에서의 어획량, 어획노력, 탄소배출량을 비교분석하였다. 또한 기후변화(수온상승, 해양산성화, 복합효과)가 어자원에 미치는 영향을 고등어 자원을 대상으로 정량적으로 분석해봄으로써 해당 조건하에서의 어획량, 어획노력, 이산화탄소배출량의 적정 규모를 도출하였다.

분석결과 대형선망 고등어 어업에 대한 MEY, OA, MSY에서의 어획량(Y)과 어획노력(E)들을 각각 도출하였으며, MEY에서의 어획량(164,244톤)과 어획노력(9,579양망수)에서 가장 경제적인 것으로 분석되었다.

또한, CO₂배출량이 제일 많은 순서로는 E_{MSY}, E_{OA}, E_{MEY} 수준으로 나타났다. MEY에서는 경제적인 어로활동을 함으로써 이익극대화 뿐만 아니라 불필요한 에너지 사용을 제약하게 되어 CO₂배출량도 감소시키는 시너지 효과가 발생됨을 알 수 있다. 따라서 국가적으로는 대형선망 어업을 비롯한 수산업에 대해 전략적으로 MEY에서 어획하는 정책을 유도하고 실천하도록 관리할 필요가 있을 것이다.

또한, 기후변화에 따른 수온상승, 해양산성화도 개별적으로 수산자원의 생체량에 영향을 미칠 뿐만 아니라 두

가지 현상이 복합적으로 발생함으로써 더욱 광범위하게 어자원의 감소를 초래하는 부정적인 영향을 미치고 있으므로 국가 및 지자체, 관련 기업차원에서의 다양하고 적극적인 이산화탄소배출량의 감소 노력이 요구된다. 다만, 본 연구는 자료의 제약이 많아 대형선망의 주요 어획장소 대신 신지도 근해 해양먹이망 변동예측자료를 이용하였으며, 고등어의 최근 양망당 어획량을 활용하지 못한 연구의 한계가 있음을 밝혀둔다.

사 사

본 연구를 위해 귀중한 의견을 주신 심사위원들과 논문 게재과정에서 도움을 주신 편집위원회에 감사드리며, 본 논문은 한국연구재단(NRF-2016S1A5B6925462)과 한국 수산자원관리공단의 연구지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강운호, 주세종, 박영규 (2012) 기후변화로 인한 신지도 근해 해양먹이망 변동예측. *Ocean Polar Res* **34**(2):239-251
- 강의찬, 김용건, 강만옥, 강성원 (2013) 온실가스 감축정책 현황 및 개선방안 연구(I). 한국환경정책·평가연구원, 세종, 206 p
- 남종오, 최중두, 조정희, 이정삼 (2010) 바이오경제모형을 이용한 최적생산량분석- 수산업을 중심으로. *자원·환경경제 연구* **19**(4):771-804
- 이동우, 이재봉, 김영혜, 정석근, 이해원, 홍병규, 손명호 (2010) 한국 수산업분야 어업용 연소연료의 사용실태와 CO₂배출량 산정. *한국수산과학회지* **43**(1):78-82
- 수산정보포털 (2017) 수산통계. <http://www.fips.go.kr/> Accessed 15 April 2017
- 한국환경공단 (2017) 탄소시장정보. <http://www.keco.or.kr/> Accessed 10 April 2017
- Anderson L (1986) *The economic of fisheries management*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 244 p
- Clark C (1990) *Mathematical bioeconomics: the optimal*

- management of renewable resources. John Wiley & Sons, New Jersey, 230 p
- Conrad J (2010) Resource economics. Cambridge University Press, Cambridge, 213 p
- Edwards S, Overholtz W, Brodziak J (1995) Effort control in the new England groundfish fishery: a bioeconomic perspective. *Can J Fish Aquat Sci* **52**:1944–1957
- Kim DH, An HC, Lee KH, Hwang JW (2008) Optimal economic fishing efforts in Korean common octopus *Octopus minor* trap fishery. *Fisheries Sci* **74**:1215–1221
- Schaefer MB (1957) A study of the dynamics of the fishery for yellow fin tuna in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Inter-Amer Trop T* **2**:247–285
- Yew T, Heaps T (1996) Effort dynamics and alternative management policies for the small pelagic fisheries of Northwest Peninsular Malaysia. *Mar Resour Econ* **11**:85–103
- Res **34**(2):239–251
- Kang EC, Kim YG, Kang MO, Kang SW (2013) Current status of climate change policy mix and measures for its improvement (I). Korea Environment Institute, Sejong, 206 p
- Nam JO, Choi JD, Cho JH, Lee JS (2010) A study on the optimal production using discrete time bio-economic model : considering large purse seine fisheries in Korea. *Environ Resour Econ Rev* **19**(4):771–804
- Lee DW, Lee JB, Kim YH, Jung SG, Lee HW, Hong BK, Son MH (2010) Calculation of carbon dioxide emissions by South Korea's fishery industry. *Fish Aquat Sci* **43**(1):78–82
- Fisheries information service (2017) fishery statistics. <http://www.fips.go.kr/> Accessed 15 April 2017
- Korea environment corporation (2017) carbon market information. <http://www.keco.or.kr/> Accessed 10 April 2017

국문 참고자료의 영문 표기

English translation / Romanization of references originally written in Korean

- Kang YH, Ju SJ, Park YG (2012) Predicting impacts of climate change on sinjido marine food web. *Ocean Polar*

Received May 22, 2017

Revised Sep. 1, 2017

Accepted Sep. 5, 2017