

선형계획법을 이용한 생태계 기반 TAC 어업관리에 관한 연구[†]

서영일¹ · 천성훈 · 김도훈*

¹국립수산과학원 기반연구부, 부경대학교 해양수산경영학과

A Study on Fisheries Management of Ecosystem-Based TAC using a Linear Programming

Young-Il Seo¹, Seong-Hoon Cheon and Do-Hoon Kim*

¹Fundamental Research Department, National Fisheries Research & Development Institute,
Busan, 619-705, Korea

Department of Marine and Fisheries Business and Economics, Pukyong National University,
Busan, 608-737, Korea

Abstract

This study aimed to empirically investigate the applicability of ecosystem-based TAC (Total Allowable Catch) fisheries management targeting the large purse seine fishery where multi-species are regulated by TAC. Using a linear programming, the optimal fishing effort and the catch amount by species which maximize fishing profits were analyzed under the constraint condition of catch limits by species.

Analytical results showed that an application of TAC on only chub mackerel would have negative impacts on fish stocks such as hairtail and jack mackerel by increasing the level of fishing effort to achieve its allocated catch limit. However, under the constraint condition of catch limits of all species, it was shown that optimal catches of all species were achieved within their catch limits. It implies the importance of ecosystem-based management considering biological and technical interactions of species those were excluded in the traditional single species fisheries management.

Keywords : TAC, Ecosystem-based fisheries management, Linear programming, Catch quota, Multi-species

접수 : 2014년 9월 1일 최종심사 : 2014년 9월 16일 게재확정 : 2014년 9월 19일

[†] 본 논문은 국립수산과학원 연구사업(연근해어업 평가 및 관리 연구, RP-2014-FR-032)의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding author : 051-629-5954, delaware310@pknu.ac.kr

I. 서 론

전 세계 해면어업 생산량은 2012년 현재 79.7백만 톤으로, 1996년 87.7백만 톤을 기록한 이후 약 80백만 톤 수준에서 연도별로 정체 혹은 감소 경향을 보이고 있다(FAO, 2014). 더욱이 전 세계적으로 과도하게 개발된 어업자원과 고갈된 어업자원의 비중이 증가하고 있는 것으로 평가됨에 따라(FAO, 2011), 적극적인 어업자원의 회복 및 관리 조치가 이루어지지 않을 경우 향후 생산량이 크게 감소할 것으로 우려되고 있다.

우리나라 일반해면어업 생산량 또한 1986년 1.73백만 톤으로 최고치를 기록한 이후 급격한 감소추세에 있다(MOF, 2014). 일반해면어업 생산량은 2013년 현재 약 1백만 톤 수준으로, 이는 최근 5년 전(2009년 1.23백만 톤) 대비 약 85% 그리고 지난 1986년 최고치 대비 약 60% 수준에 지나지 않는다. 이와 같이 우리나라를 포함하여 전세계적으로 어업자원의 감소경향이 심각해짐에 따라 국제수산물기구 등을 중심으로 어업자원의 회복 및 관리에 관한 중요성을 강조하고 있다. 그리고 수산선진국을 비롯한 각국들도 어업자원의 회복 및 관리를 위한 다양한 정책들을 수립하여 운용해 나가고 있다(OECD, 2010 and 2012).

어업자원의 회복 및 관리를 위한 수단으로는 최근 생태계 기반 어업관리(ecosystem-based fisheries management) 기법의 적용이 널리 권고되고 있다. 이는 어업자원 관리의 실효성을 보다 증대시키기 위한 방안으로, 전통적인 단일어종 중심의 자원관리로는 어종간의 생물학적 상호작용이나 어구어법에 의한 복수어종의 기술적 상호작용 등을 고려하지 않아 실질적인 어업자원의 회복과 관리에 한계가 크기 때문이다(FAO, 2003; Kim and Kim, 2011; NMFS, 1998; Pikitch et al., 2004; Sanchirico et al., 2006). 생태계 기반 어업관리는 어업자원이 서식하는 해양 생태계 내 어종간의 상호연관성과 어종들의 지속성 그리고 생물다양성을 고려하면서 어업자

원의 회복 및 관리를 도모하는 것이다(Arnason, 1998; Hanna, 1998). 특히 생태계 기반 어업관리에 있어서는 무엇보다 해양생태계 내 어종간의 상호 영향관계를 고려하는 것이 필수적이다. 즉 생태계 내 한 어종의 어획이 다른 어종에 대해 미치는 영향관계를 고려해 나가는 것이 출발점이라 할 수 있다(NMFS, 1998).

대부분의 해면어업이 복수어종(multispecies)을 어획하고 있고, 특정 대상어종에 대한 선별적 어획이 사실상 거의 불가능함에 따라 단일어업의 특정 어종에 대한 어획은 기술적 상호관계(technical interactions)에 있는 다른 어종의 어획에 영향을 미치게 된다. 즉 특정 어종의 어획이 증가하게 되면 양(+)의 기술적 상호관계에 있는 다른 어종의 어획량은 증가하게 될 것이다. 그리고 특정 어종에 대한 어업규제는 다른 어종에 대해서도 영향을 미치게 된다. 예를 들어, 특정 어종 관리를 위한 당해어업의 어선척수 규제 등은 특정 어종에 대한 어획 제한뿐만 아니라 기술적 상호관계에 있는 다른 어종의 어획 제한에도 효과가 있을 수 있다. 하지만 특정 어종에 대한 금어기 혹은 금어구역 규제 등은 해당어업이 규제를 피해 다른 어종에 대한 어획을 증가시킴으로써 다른 어종의 자원량에 부정적인 영향을 끼칠 수 있을 것이다. 따라서 어업관리수단의 효과를 극대화하기 위해서는 생태계 기반 어업관리로, 특정 어종뿐만 아니라 관련된 다른 어종에 대한 영향을 함께 고려하여 최적의 어업관리수단을 선정하고 적용해 가는 것이 필요하다.

어획량 규제(output control) 중 총허용어획량(Total Allowable Catch, TAC) 제도는 대부분의 국가에서 널리 활용되고 있다. 선별적 어획이 불가능한 단일어업이 복수어종을 어획할 경우 특정 어종에 대한 TAC 적용은 다른 어종에 대한 과잉어획을 초래하여 자원량에 부정적인 피해를 끼칠 수 있다. 특히 2개 이상의 복수어종에 대해 TAC가 적용될 경우 특정 어종의 TAC 어획 달성을 위해 다른 어종의 TAC가 초과하게 되면

자원관리의 효과가 크게 저감될 수도 있다. 따라서 생태계 기반 TAC 어업관리를 위해서는 특정 어종에 대한 TAC 설정만이 아니라 어획대상과 관련된 어종들에 대한 관리방안도 함께 고려되어야 한다.

우리나라에서도 TAC 제도는 이미 1999년부터 시행되어 현재까지 추진 중이다. 최초 시행 당시 고등어, 전갱이, 정어리, 붉은대게의 4개 어종에서 시작하여, 2014년 현재 총 11개 어종으로 확대되어 시행 중에 있다. 향후 어업자원의 회복 및 관리의 필요성이 증대됨에 따라 TAC 제도의 적용은 더욱 증가할 것으로 예상된다. TAC 제도의 실효성 향상을 위해서는 생태계 기반 TAC 어업관리의 실질적 적용을 위한 유용한 방안을 시급히 마련해 나가야 한다.

이러한 배경 하에서 본 연구는 생태계 기반 TAC 어업관리 기법을 마련하기 위한 기초적 연구로, 현재 2개 이상의 복수어종에 대해 TAC가 적용되고 있는 대형선망어업을 대상으로 최적의 TAC 어업관리방안을 실증적으로 분석해 보고자 한다. 실증분석에 있어서는 TAC 대상어종(고등어, 전갱이)의 어획량 제한 하에서의 최적 어획노력량 수준을 분석하고, TAC 비대상어종의 어획량 변화를 검토하였다. 그리고 TAC 비대상어종의 자원관리를 위해 어획량 제한을 TAC 대상어종과 함께 추가하여 최적 어획노력량 수준과 어업이익의 변화를 비교·검토하였다.

분석방법으로는 어종별 어획량 제한 등과 같이 다양한 제약조건 하에서 목적 값을 추정하기 위한 방안으로 선형계획법(linear programming)이 가장 유용하므로 본 연구에서는 이를 활용하였다. 본 연구의 구성으로 다음 제Ⅱ장에서는 분석방법인 선형계획법과 분석에서 사용된 자료를 설명하였다. 다음 제Ⅲ장에서는 분석결과를 설명하였고, 제Ⅳ장에서는 연구결과의 요약과 함께 연구의 한계점을 제시하였으며, 아울러 향후 연구 과제를 제안하였다.

Ⅱ. 분석 방법 및 자료

1. 선형계획법

선형계획법은 Dantzig(1947)의 심플렉스해법 개발 이후 여러 분야에서 최적화 문제를 해결하기 위해 사용되어 왔으며, 몇 가지 가정을 전제로 한 일반적인 수리모형의 한 종류이다. 선형계획법(linear programming)은 최대화 또는 최소화를 위한 선형의 목적함수식과 목적함수와 관련된 제약조건을 설정하여 최적의 의사결정 방안을 도출하기 위한 기법이다(Dantzig and Thapa, 1997; Rodrigues, 1990)

선형계획법에서의 목적함수는 다수의 의사결정변수의 합으로 표현되는데, 예를 들어 목적함수 값의 최대화를 목표로 하는 n개의 의사결정변수를 가진 목적함수와 그에 따르는 m개의 제약조건식은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & f(X_1, X_2, \dots, X_n) = Z & (1) \\ \text{s.t. } & g_1(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq c_1 \\ & g_2(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq c_2 \\ & g_3(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq c_3 \\ & \vdots \\ & g_m(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq c_m \end{aligned}$$

여기서 목적함수는 다시 각각의 계수에 곱해진 n개의 의사결정변수의 합으로 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Maximize } & Z = a_1X_1 + a_2X_2, \dots, a_nX_n & (2) \\ & = \sum_{i=1}^n a_iX_i \end{aligned}$$

여기서 X_i 는 의사결정변수, a_i 는 개별 의사결정변수의 계수를 의미한다. 그리고 목적함수의 최대화(maximization) 조건은 목적에 따라 최소화(minimization) 조건으로 변경할 수 있다. 그리고 제약조건식은 일반적으로 다음의 식 (4)에서와 같이 부등식으로 설정된다.

$$\text{s.t. } b_{11}X_1 + b_{12}X_2 + \dots, b_{1n}X_n \leq c_1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 b_{21}X_1 + b_{22}X_2 + \dots + b_{2n}X_n &\leq c_2 \\
 &\vdots \\
 b_{m1}X_1 + b_{m2}X_2 + \dots + b_{mn}X_n &\leq c_m \\
 X_1 &\geq 0 \\
 X_2 &\geq 0 \\
 &\vdots \\
 X_n &\geq 0
 \end{aligned}$$

여기서 $b_{ji}(j=1,2,\dots,m, i=1,2,\dots,n)$ 는 대응하는 계수, 그리고 $c_j(j=1,2,\dots,m)$ 는 상수이다. 각각의 의사결정변수 X_i 에 대해서는 주로 식 (3)과 같이 비음수의 제약조건이 추가된다. 하지만 경우에 따라서 비양수(nonpositive)의 제약조건을 가지거나, 부호에 제약을 가지지 않을 수도 있다. 이러한 경우에는 비양수의 제약조건을 가진 변수를 반대의 부호를 갖는 변수로, 부호 제약이 없는 변수는 두 비음수 변수의 차로 치환함으로써 쉽게 비음수 제약조건으로 변환할 수 있다 (Rodrigues, 1990).

본 연구의 분석대상인 대형선망어업의 경우 주어진 제약조건들 하에서 어업이익을 최대화하는 것으로 가정하면, 우선 어업이익(FP)은 어획된 어종별($i=1,2,\dots,n$) 어획량(H_i)과 어종별 단위당 시장가격(p_i) 그리고 어종별 단위당 생산원가(c_i) 등에 의해 결정된다. 따라서 어종별 어획량(H_i)은 의사결정변수로, 그리고 어종별 단위당 시장가격(p_i)과 생산원가(c_i)는 각각의 계수로 나타낼 수 있다. 다음으로 어종별 어획량에 제한이 취해질 경우(예를 들어 TAC 대상어종의 경우 TAC 이하로 어획량이 제한) 어종별 어획량(H_i)은 제한량(T_i) 이하로 제약조건이 설정된다. 또한 어종별 어획량(H_i)은 음(-)이 될 수 없으므로 제약조건에 비음수 조건($H_i \geq 0$)을 추가함으로써 다음의 식 (4)와 같이 대형선망어업의 어업이익(FP) 최대화를 위한 선형계획모형을 수립할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Maximize } FP &= \sum_{i=1}^n (p_i - c_i) H_i & (4) \\
 \text{s.t. } H_i &\leq T_i \\
 H_i &\geq 0
 \end{aligned}$$

여기서 FP는 대형선망어업의 어업이익, p_i 와 c_i 는 각각 어종별 단위당 시장가격과 생산원가, H_i 는 어종별 어획량, 그리고 T_i 는 어종별 제한 어획량(TAC 대상어종의 경우 TAC 물량) 수준을 의미한다. 어종별 어획량(H_i)은 어업자원량(X_i), 어획능력계수(q_i), 그리고 어획노력량(E_i)의 함수로 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다(Clark, 1990; Conrad, 1999; Haddon, 2001).

$$H_i = q_i E_i X_i \quad (5)$$

식 (5)의 어종별 어획량(H_i) 함수에서 어업이익에 영향을 미치는 조절 가능한 변수는 어획노력량(E_i)이다. 따라서 대형선망어업의 어업이익 최대화를 위한 선형계획모형에서 어획량 제한 등의 제약조건에 따라 대형선망어업의 어획노력량 수준이 변하게 되며, 그 결과 어종별 어획량과 목적 값인 어업이익이 다르게 분석된다.

2. 분석자료

1) TAC 현황

우리나라 TAC 제도는 UN 해양법 발효와 함께 신헌양질서의 수용, 전통적 어업관리제도의 보완, 그리고 한·중·일 어업협정 및 우리나라 주변수역 수산자원의 합리적인 관리체제 구축 등의 필요성에 따라 도입되었다. TAC 제도를 처음 도입했던 1999년 당시에는 어획량이 많고, 산업적 비중이 크거나, 자원감소가 현저하여 보호가 필요한 어종인 고등어, 전갱이, 정어리 및 붉은 대게 등 4개 어종을 대상으로 하였다. 이후 정어리는 TAC 대상어종에서 제외되었고(2009년), 개조개, 키조개, 소라, 대게, 꽃게, 오징어, 도루묵, 참홍어 등의 어종으로 확대 적용되어 2014년 현재 총 11개 어종을 대상으로 시행 중이다 (Table 1).

TAC 대상어종 중 고등어와 전갱이는 대형선망어업에만 TAC가 할당되어 있다. Table 2에서 정리된 바와 같이, 고등어 TAC 할당량은 2005년부터 2011년까지는 154,000~160,000톤에서 결

Table 1. The Status of TAC in 2014

Target Species	Target Fishery	Target Fishing Grounds	2014 TAC (ton)
			Total 415,217
Chub mackerel	Large Purse seine fishery	Offshore	135,000
Jack mackerel	Large Purse seine fishery	Offshore	18,000
Red crab	Offshore trap fishery	East sea offshore	38,000
Snow crab	Offshore gillnet, Offshore trap fishery	East sea coastal	1,570
Butter clam	Diving Apparatus Fishery	Busan, Jeonnam, Gyeongnam coastal and offshore	2,100
Comb pen shell	Diving Apparatus Fishery	Incheon, Gyeonggi, Chungnam, Jeonbuk/Gyeongnam	8,455
Swimming crab	Coastal and offshore gillnet and trap	West sea and Yeonpyungdo region	14,600
Squid	Offshore angling, Large Purse seine, Large trawl and Eastern trawl	Coastal and offshore	191,000
Sandfish	Eastern trawl, Danish seine fishery	East sea coastal and offshore	4,880
Skate ray	Offshore longline fishery, Coastal dual purpose fishery	West sea and Heuksando region	197
Jeju conch	Community fishery	Jeju coastal	1,415

Source : FIRA(2014)

Table 2. Change of TACs for Chub mackerel and Jack mackerel

Year		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Chub mackerel	TAC(A)	160,000	155,000	154,000	159,000	159,000	169,000	160,000	135,000	135,000
	Catch(B)	127,983	93,787	138,086	164,375	109,459	87,796	126,301	117,486	96,020
	B/A	80.0	60.5	89.7	103.4	68.8	52.0	78.9	87.0	71.1
Jack mackerel	TAC(A)	12,000	19,000	19,000	21,000	18,000	20,000	21,000	21,000	14,700
	Catch(B)	20,831	17,815	9,566	11,533	11,395	10,422	37,320	25,819	7,833
	B/A	173.6	93.8	50.3	54.9	63.3	52.1	177.7	122.9	53.3

Sources : MOF, Fisheries Information Portal(www.fips.go.kr)

정되었으나, 2012년 이후에는 135,000톤으로 감소하였다. 동 기간(2005~2013년) 동안 대형선망어업에 의한 고등어 어획량은 최고 164,375톤(TAC 할당량 대비 103.4%), 최저 87,796톤(TAC 할당량 대비 52%)을 기록하는 등 어획량 변화가 크고 매우 불규칙적으로 나타났다.

전갱이의 TAC 할당량은 2005년 12,000톤이었지만, 이후 크게 증가하여 2006년부터 2012년까지 18,000~21,000톤 수준에서 결정되었다. 하지만 2013년에는 14,700톤 수준으로 크게 감소하였다. 같은 기간 동안 대형선망어업에 의한 전갱이 어획량은 최고 37,320톤(TAC 할당량 대비 177.7%), 최저 7,833톤(TAC 할당량 대비 53.3%)

으로 고등어 어획량 변화와 마찬가지로 연도별 어획량 변화가 크고 불규칙적인 것으로 분석되었다.

2) 분석자료

실증분석의 대상어업인 대형선망어업은 우리나라의 일반해면어업 중 어획량이 가장 많은 어업 중의 하나이다. 대형선망어업의 지난 10년간(2004~2013년) 연간 어획량은 평균 19만 톤으로, 우리나라 전체 일반해면어업 어획량의 17% 정도를 차지하고 있다. 지난 10년간의 어획량 변화를 구체적으로 살펴보면, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 2004년 22만 톤에서 2006년 약 15만 톤 수준으로 감소하였지만, 이후 다시 증가해 2009년

약 24만 톤 수준을 기록하였다. 하지만 2010년에는 16만 톤으로 급감하였으며, 이후 2011년 약 22만 톤으로 증가한 후 계속 감소추세에 있다. 2013년 현재 어획량은 약 16만 톤 수준으로 2009년 24만 톤에 비해 약 70% 수준에 머무르고 있다(MOF, 2014).

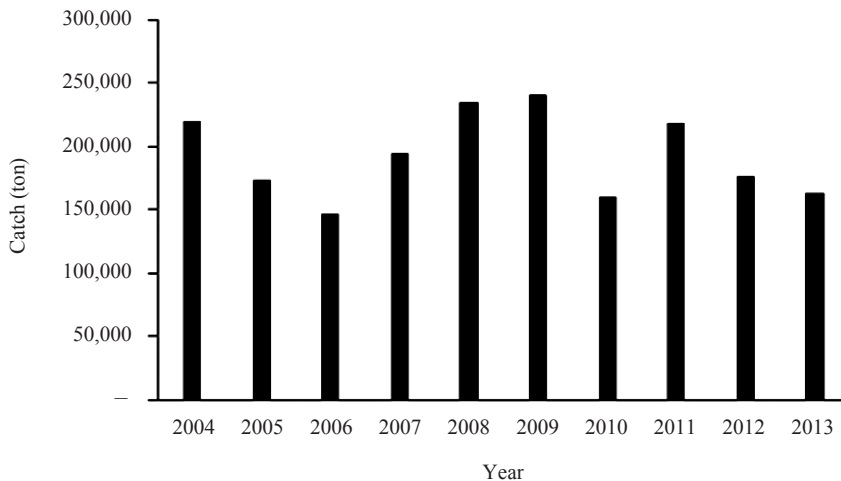
대형선망어업은 고등어, 전갱이, 갈치, 삼치, 방어, 청어, 참다랑어 등 다양한 어종을 어획하고 있는데, 이는 밀집된 어군을 그물(두릿그물)로 둘러싼 후 그 범위를 조금씩 좁혀 가면서 어획하는 어구어법의 특성 때문이다(NFRDI, 2008). 지난 10년 기간 동안 대형선망어업에 의해 어획된 어종별 어획비중을 살펴보면, 고등어가 대형선망어업 전체 어획량 가운데 약 61%로 가장 큰 비중을 차지하고 있고, 다음으로 전갱이 8.6%, 갈치 5.3%, 그리고 삼치 4.6% 등이다. 특히 이들 4개 어종의 어획비중이 대형선망어업 전체 어획량의 약 80%를 차지하고 있다.

이들 주요 어종들의 자원상태를 국립수산물학원 조사결과(NFRDI, 2012)를 바탕으로 살펴보면, 우선 고등어의 경우 자원량은 중위 수준에 머물러 있으며, 자원동향은 증가추세인 것으로 평가되었다. 전갱이의 자원량은 TAC 대상종임

도 불구하고 낮은 수준에 머물러 있고, 자원량 또한 계속 감소추세인 것으로 나타나 향후 보다 효과적인 관리가 요구되고 있다. 갈치의 경우 어획량이 지난 2009년 약 28천 톤을 기록한 이후 2012년 2,800톤, 그리고 2013년 약 5,200톤으로 급격히 감소하였다. 자원평가 결과, 전갱이와 마찬가지로 자원량이 낮은 수준에 있고, 계속 감소추세인 것으로 추정되었다. 마지막으로 삼치의 자원량은 중위 수준에 있고, 자원동향은 평형상태인 것으로 평가되었다. 삼치의 지난 5년(2009~2013년)간 어획량 또한 2008년 약 10만 톤에서 감소한 이후 연간 7천 톤 내외에서 유지되고 있다.

대형선망어업을 대상으로 선형계획법을 이용한 생태계 기반 TAC 어업관리의 효과적인 적용 방안을 분석하기 위해서는 식 (4)의 선형계획모형 수립을 위한 자료들이 필요하다. 우선 실증분석에 있어서는 대형선망어업의 전체 어종을 대상으로 하지 않고, 앞서 살펴본 바와 같이, 전체 어획량 중 80% 이상에 해당되는 대형선망어업의 주요 어획대상종인 고등어, 전갱이, 갈치, 그리고 삼치의 4개 어종을 대상으로 하였다.

식 (4)의 목적함수에 있어서는 가장 먼저 어종



Source : MOF, Fisheries Information Portal (www.fips.go.kr)

Fig. 1. Changes in Annual Catch of Large Purse Seine Fishery.

별 어획량(H_i) 함수를 추정해야 한다. 어획량 함수는 식 (5)에서와 같이, 어업자원량(X_i), 어획능력계수(q_i), 그리고 어획노력량(E_i)의 곱이다. 고등어와 전갱이의 자원량은 국립수산물연구원 내부자료를 활용하였는데, 최근 5년간 고등어의 자원량은 평균 약 100만 톤 수준에서 소폭의 증감을 보이고 있다. 전갱이의 자원량은 2009년 60만 톤을 상회하였으나 이후 지속적 하락세를 보이며, 2013년에는 40만 톤 이하로 감소한 것으로 추정되었다. 어획노력량은 대형선망어업의 출어일수를 사용하였다. 어획능력계수는 다음의 식 (6)에서와 같이, 어획량(H_i)을 어획노력량(E_i)과 어업자원량(X_i)으로 나누어 계산하였다.

$$q_i = H_i / (EX_i) \quad (6)$$

이때 어획노력량(E)은 대형선망어업의 선별적 어획이 불가능하므로 출어일수는 어종별로 할당하지 않고 연간 출어일수를 공통적으로 사용하는 것으로 가정하였다. 한편 자원량 추정값을 알 수 없는 갈치와 삼치에 대해서는 임의의 어획능력계수(q_i) 값을 설정하고, 이를 바탕으로 식 (6)을 이용해 어업자원량을 추정하였다. 분석에 있어서 어종별 어획량(H_i), 어업자원량(X_i), 그리고 어획능력계수(q_i) 등은 최근 1년간 자료를 활용하기에는 변수별로 불확실성이 커서 지난 3년 기간(2011~2013년) 동안의 평균 자료를 분석에 이용하였다.

다음으로 목적함수에서 어종별 단위당 시장가격(p_i)과 생산원가(c_i)는 수협중앙회 어업경영조사보고서(NFFC, 2013)로부터 활용하였다. 대형선망어업의 어종별 단위(톤)당 시장가격(p_i)은

어종별 연간 총수익(어획금액)을 총어획량으로 나누어 구할 수 있다. 그리고 어종별 단위당 생산원가(c_i)는 연간 총비용을 어획금액을 기준으로 한 어종별 원가배부율을 곱하고, 어종별 어획량을 나누어 구할 수 있다. 어종별 단위당 시장가격과 생산원가 역시 분석에서 사용된 어획량 등의 변수와 같이 지난 3년 기간(2011~2013년) 동안의 평균 자료를 분석에 이용하였다. 이상 분석에서 사용된 어종별 변수들의 값은 Table 3에서 정리된 바와 같다.

식 (4)의 제약조건식에서 어종별 어획제한량(T_i)은 TAC 대상어종인 고등어와 전갱이의 경우 TAC 할당량으로 설정하면 된다. 그리고 갈치와 삼치의 경우에는 분석의 필요성에 따라 어획제한량을 설정하여 제약조건식에 추가하면 된다. 그리고 어종별 어획량은 비음수 제약조건을 설정하면 된다. 이 외에도 어획노력량(E_i) 변수로 작업일수를 분석에서 사용했기 때문에 다음의 식 (7)의 제약조건을 선형계획모형에 추가하였다.

$$E \leq 365 \quad (7)$$

III. 분석 결과

1. 분석결과(1) : 고등어, 전갱이에 대한 TAC 설정

대형선망어업의 고등어와 전갱이는 현재 TAC 대상어종으로, 이들 두 어종에 대한 TAC 어획할당량 제약조건을 설정하여 어획노력량(작업일수) 변화에 따른 목적함수(어업이익) 값을 최대로 하는 어종별 최적 어획량을 도출하면

Table 3. Data by species utilized in the analysis

Target Species	Catch (H)	Catchability coefficient (q)	Stock biomass (X)	Unit price (p)	Unit cost (c)
Chub mackerel	113,269	0.00043	998,178	2,040	280
Jack mackerel	23,657	0.00017	485,021	1,052	128
Spanish mackerel	7,152	0.00010	266,593	3,934	536
Hairtail	4,193	0.00010	193,519	2,704	341

(unit : tons, thousand won)

Table 4. Result of Analysis (1)

Target Species	Actual catch		Optimal catch (TAC for 2 Species)	
	Amount (ton)	profit (million won)	Amount (ton)	profit (million won)
Chub Mackerel	113,269	199,364	96,496	169,843
Jack Mackerel	23,657	21,838	18,900	17,447
Spanish Mackerel	7,152	24,298	6,018	20,443
Hairtail	4,193	9,906	4,068	9,612
Total	148,271	255,407	125,482	217,344
Fishing Days	265		226	

Table 4에서 보는 바와 같다. 구체적으로 고등어와 전갱이에 대한 지난 3년간 평균 TAC 물량(고등어 143,333톤, 전갱이 18,900톤)을 제약조건으로 설정하여 조업일수 변화에 따른 어종별 최적 어획량을 추정하면 조업일수 증가에 따라 어종별 어획량이 증가하여 목적함수인 대형선망어업의 어업이익은 증가하게 된다. 하지만 제약조건에 있는 어종들 중 한 어종의 어획량이 TAC 할당량과 같아지게 되면 더 이상 조업일수를 증가시킬 수 없게 된다.

분석결과를 살펴보면, Table 4에서 보는 바와 같이 전갱이 어획량이 제약조건의 TAC 할당량과 같아지게 됨으로써 대형선망어업의 조업은 중단되게 된다. 고등어 어획량은 96,496톤으로, 전갱이 TAC의 조기 달성에 따라 고등어 TAC 할당량보다 낮은 수준에서 머무르게 되었다. 그리고 삼치와 갈치의 어획량은 각각 6,018톤과 4,068톤으로 추정되었다. 또한 전갱이 TAC의 조기 달성에 따라 조업일수는 총 226일, 그리고 대형선망어업의 어업이익은 총 217,344백만 원으로 분석되었다.

이러한 결과를 실제 어업상황과 비교해 보면, 실제 어업에 있어서는 전갱이의 TAC 할당량이 초과되었음에도 불구하고 대형선망어업의 조업이 계속 진행되어 고등어 어획량은 113,269톤을 기록하였다. 하지만 고등어 TAC 할당량보다는 여전히 낮은 수준에서 어획량이 달성되었다. 전갱이 어획량은 23,657톤으로, TAC 할당량에 비

해 무려 25%나 초과되었고, 삼치와 갈치의 어획량은 각각 7,152톤과 4,193톤으로 전갱이 TAC 조기 달성에 따른 최적 어획량보다는 높은 수준을 기록하였다.

이와 같이 단일어업에 있어 2개 어종 이상에 대한 TAC가 운용될 경우, 하나의 어종에 대한 TAC가 초과하게 되면 해당어종에 대한 남획이 발생하여 자원관리의 효과가 크게 감소될 수밖에 없다. 뿐만 아니라 TAC 비대상어종이라 하더라도 함께 어획되는 어종들의 경우 어획압력이 크게 증가할 수 있게 된다. 앞의 어종별 자원평가 결과에서도 살펴본 바와 같이, 전갱이와 갈치의 경우 자원량 수준이 낮고 또한 자원이 계속 감소하고 있는 것으로 평가되고 있다. 따라서 전갱이에 대해서는 보다 철저한 TAC 할당량 준수가 필요하고, 갈치에 대해서는 어획량 등을 제한하여 자원회복을 도모할 필요가 있다.

이러한 생물학적 효과 외에 어업경영적 측면에서는 전갱이 TAC의 조기 달성에 따른 조업일수 감소로 대형선망어업의 어업이익은 크게 감소할 수밖에 없다. 구체적으로 고등어의 어업이익은 15%, 전갱이 20%, 삼치 16%, 그리고 갈치의 어업이익이 3% 정도 감소하는 것으로 분석되었고, 대형선망어업 전체적으로 어업이익은 총 15% 정도 감소하는 것으로 추정되었다.

2. 분석결과(2) : 모든 어종에 대한 TAC 설정

분석결과(1)에서 복수어종을 어획하는 단일어

Table 5. Result of Analysis (2)

Target Species	Actual catch		Optimal catch (TAC for 4 Species)	
	Amount (ton)	profit (million won)	Amount (ton)	profit (million won)
Chub Mackerel	113,269	199,364	88,365	155,530
Jack Mackerel	23,657	21,838	17,307	15,976
Spanish Mackerel	7,152	24,298	5,510	18,720
Hairtail	4,193	9,906	4,000	9,451
Total	148,271	255,407	115,183	199,678
Fishing Days	265		207	

업에서 특정 어종에 대한 TAC 운용으로 인해 함께 어획되는 다른 어종들에 대한 어획압력이 증대될 수 있고, 이는 결국 해당어종들의 자원량 감소를 초래할 수 있다. 따라서 생태계 기반 TAC 어업관리를 위해서는 TAC 적용에 따른 관련된 다른 어종에 대한 영향도 함께 고려해야 한다.

분석결과(1)을 확장하여 생태계 기반 TAC 어업관리의 중요성을 더욱 분석하기 위해 모든 어종에 대한 어획할당량이 설정된 경우를 가정하여 어종별 최적 어획 분석을 실시하였다. 대형선망어업의 고등어와 전갱이는 이미 TAC 대상종이지만, 삼치와 갈치는 현재 TAC 대상종이 아니기 때문에 어획할당량을 설정할 수 있는 근거자료가 부족한 실정이다. 이에 따라 과거 어획량을 기준으로 삼치와 갈치에 대한 어획할당량을 가정하였다. 우선 삼치의 경우, 2009년 이후 어획량이 크게 감소하였고, 최근 3년 기간 동안 약 7,000톤 수준을 유지하고 있다. 이에 따라 삼치의 어획할당량은 7,000톤으로 설정하였다. 갈치의 생산량은 2010년 약 13,000톤에서 2011년 4,522톤으로 크게 감소하였고, 2012년도에는 2,831톤으로 더욱 감소하였으며, 2013년에는 5,225톤을 기록하였다. 따라서 최근 감소한 어획량 수준을 감안하여 갈치의 어획할당량은 최근 3년간 어획량 평균인 4,000톤으로 가정하였다.

분석결과를 살펴보면, Table 5에서 보는 바와 같이 갈치의 어획량이 제약조건의 어획할당량과 같아지게 됨으로써 대형선망어업의 조업은

중단되게 된다. 고등어의 최적 어획량은 88,365톤으로, 갈치 어획할당량의 조기 달성에 따라 고등어 TAC 할당량보다 낮은 수준에서 머무르게 된다. 전갱이 어획량 역시 17,307톤으로 TAC 할당량보다 낮은 수준에서 달성되었다. 삼치와 갈치의 최적 어획량은 각각 5,510톤과 4,000톤으로 추정되어 분석결과(1)의 고등어와 전갱이 2개 어종에 대한 TAC 운용과 실제 어업상황과 비교해서 어획량이 크게 감소하였다. 갈치 어획할당량의 조기 달성에 따라 조업일수는 총 207일, 그리고 어업이익은 총 199,678백만 원으로 분석되었다.

이러한 결과를 실제 어업상황과 고등어와 전갱이에 대한 TAC 설정만을 가정한 분석결과(1)과 비교해 보면, 어획할당량이 없는 어종에 대한 어획압력을 줄일 수 있고, 모든 어종이 어획할당량 이내에서 생산되므로 생태계 기반 어업관리를 통한 효과적인 어업자원의 회복 및 관리가 가능해질 수 있게 된다.

3. 분석결과(3) : TAC 설정에 따른 잠재가격 분석

앞의 분석결과 (1)과 (2)에서 전갱이와 갈치의 어획할당량이 조기에 달성됨으로써 대형선망어업의 출어일수가 제한되고, 그 결과 어업이익도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 복수어종 어획에 있어 한 어종의 어획할당량 조기 달성으로 인한 어업이익의 감소는 해당어종의 어획량이 감소한 만큼의 어업자원 보호에 따른

Table 6. Shadow prices of Jack mackerel and Hairtail

Species	Catch reduction (ton)	Fishing profit reduction (million won)	Unit shadow price (million won)
Jack mackerel	4,757	38,062	8.0
Hairtail	193	55,729	289.2

잠재가격(shadow price)으로 볼 수 있다. 그리고 이러한 잠재가격은 구체적으로 어획할당량이 설정된 경우와 설정되지 않았을 경우의 어업이익과 어획량으로 단위(톤)당 잠재가격을 산출할 수 있다.

Table 6에서 보는 바와 같이 분석결과(1)에서 전갱이의 어획할당량 조기 감소에 따라 실제 어업상황(전갱이 TAC가 초과한 경우)과 비교해 대형선망어업의 어업이익은 총 38,062백만 원 감소하는 것으로 추정되었다. 이러한 어업이익 감소에 대한 전갱이의 어획량 감소분은 총 4,757톤이었으므로, 전갱이의 단위(톤)당 잠재가격은 8백만 원으로 분석되었다. 그리고 분석결과(2)에서 갈치의 어획할당량 조기 감소에 따라 실제 어업상황(갈치의 어획할당량이 설정되지 않은 경우)과 비교해 대형선망어업의 어업이익은 총 55,729백만 원 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 어업이익 감소에 대한 갈치의 어획량은 193톤 감소하였으므로 갈치의 단위(톤)당 잠재가격은 289.2백만 원으로 추정되었다.

이상과 같이 잠재가격 추정 결과, 갈치의 잠재가격이 전갱이의 잠재가격에 비해 상당히 높은 것으로 나타나 갈치의 어획할당량 제한이 대형선망어업의 어업이익 변화에 아주 민감함을 알 수 있다. 따라서 생태계 기반 TAC 어업관리에 있어서는 개별 어종들의 어업경영 안정을 도모하기 위해 어종별 잠재가격을 추정하여 민감한 어종을 도출하는 것이 필요하다. 특히 민감어종에 대해서는 어획할당량의 급격한 감소를 지양하거나 혹은 할당량 외에 다른 어업관리수단의 적용 등을 고려해야 할 것이다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 생태계 기반 TAC 어업관리 기법의 실질적인 적용을 위한 방안으로, 2개 이상의 복수어종에 대해 TAC가 적용되고 있는 대형선망어업을 대상으로 최적의 TAC 어업관리 방안을 실증적으로 분석해 보았다. 분석에 있어서는 선형계획법(linear programming)을 이용하여 어종별 어획량 제약하에 목적함수(어업이익) 값을 최대로 하는 최적 어획노력량(조업일수)과 어종별 어획량 수준을 추정하였다. 구체적으로 실증분석에 있어서는 TAC 대상어종(고등어, 전갱이)의 어획량 제한 하에서의 최적 어획노력량(조업일수) 수준을 분석하고, TAC 비대상어종(삼치, 갈치)의 어획량 변화를 검토하였다. 그리고 TAC 비대상어종의 자원관리를 위해 어획량 제한을 TAC 대상어종과 함께 추가하여 최적 어획노력량(조업일수) 수준과 어업이익의 변화를 비교 검토하였다.

현재 대형선망어업에 있어서는 고등어와 전갱이가 TAC 대상종으로, TAC 할당량이 많은 고등어 어획으로 인해 전갱이의 TAC가 초과함에도 불구하고 조업이 계속 이루어지고 있는 상황이다. 그리고 이러한 고등어 TAC 운용에 따라 함께 어획되는 다른 어종들에게도 어획압력이 가중되고 있는 실정이다. 자원상태 평가결과, 전갱이와 갈치의 자원수준이 낮고, 남획이 계속 진행 중인 것으로 나타난 것은 이러한 결과를 반영하고 있다.

고등어와 전갱이에 대한 TAC를 제약조건으로 설정하여 개별어종별 최적 어획량을 분석한 결과, 전갱이 TAC의 조기 달성에 따라 고등어 어획량은 TAC 할당량보다 낮은 수준에서 머무

르게 되었다. 그리고 삼치와 갈치의 어획량은 각각 6,018톤과 4,068톤으로 실제 어업상황과 비교해 어획량 수준이 감소하였다. 그리고 단일어업 복수어종 어획에 있어 특정 어종의 TAC 운용에 따른 TAC 비대상종의 관리방안 모색을 위해 분석대상 모든 어종에 대한 어획할당량 제약조건을 설정한 결과에서는 갈치의 어획할당량이 조기에 달성되는 것으로 추정되었다. 고등어의 최적 어획량은 88,365톤으로, TAC 할당량보다 낮은 수준에서 머무르게 되었고, 전갱이 어획량 역시 17,307톤으로 TAC 할당량보다 낮은 수준에서 달성되었다. 삼치와 갈치의 최적 어획량 또한 어획할당량 이내에서 달성되어 생태계 기반 어업관리를 통한 효과적인 어업자원의 회복 및 관리가 가능해질 수 있음을 알 수 있었다.

하지만 어종들에 대한 어획할당량 제약으로 인해 대형선망어업의 어업이익은 감소하는 것으로 추정되었다. 특히 전갱이와 갈치의 어획할당량이 조기에 달성됨으로써 대형선망어업의 출어일수가 제한되고, 그 결과 어업이익이 감소하는 것으로 분석되었다. 전갱이와 갈치에 대한 잠재가격 추정 결과, 갈치의 잠재가격이 전갱이의 잠재가격에 비해 상당히 높은 것으로 나타나 대형선망어업의 어업이익 변화는 갈치의 어획할당량 제한에 아주 민감한 것으로 분석되었다. 따라서 생태계 기반 TAC 어업관리에 있어서는 어업이익 변화에 민감한 어종을 고려하여 어획할당량의 제한 폭을 줄이거나 혹은 다른 관리수단을 적용하는 방안을 모색하는 것이 필요할 것이다. 이를 통해 생물학적 지속성을 유지하면서 어업경영의 안정을 도모할 수 있는 생태계 기반 TAC 어업관리가 가능해질 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 생태계 기반 어업관리의 실질적 적용을 위한 하나의 방안으로 TAC 제도 운용에 있어 TAC 어종 외에 관련된 어종에 대한 영향분석을 함께 고려했다는 점에서 연구의 의의가 있다고 판단된다. 하지만 본 연구의 한계점으로는 우

선 고등어를 포함한 우리나라 TAC 어종의 경우, 연간 할당되는 어획량이 실제 어획량 수준보다 높은 것이 대부분이다. 따라서 어종별 TAC 할당량의 정확한 설정에 따른 분석결과로 제시하기에는 미흡한 부분이 많다. 둘째, 분석에 있어 TAC 비대상종(삼치와 갈치)에 대해서는 자원평가 결과를 바탕으로 한 어획할당량 설정이 불가능하여 과거 어획량을 기준으로 임의로 어획할당량을 가정하였다. 따라서 본 연구의 분석결과를 일반화하기에는 많은 한계점이 있을 것이다.

향후 추가적으로 행해져야 할 연구로는 첫째, 본 연구에서는 어종간의 영향관계만 고려했지만 향후에는 생태계 기반 TAC 어업관리의 범위를 보다 확대하여 서식처(habitat), 생물다양성(biodiversity) 등을 포함한 분석이 이루어져야 할 것이다. 둘째, 본 연구에서는 단일어업에 의한 복수어종에 있어서의 영향관계를 고려했지만, 복수어업에 의한 단일 및 다수어종의 영향관계도 분석되어야 할 것이다. 그리고 셋째, 분석결과에서 살펴본 바와 같이, 생태계 기반 어업관리를 통해 생물학적 지속성은 효과적으로 유지되지만 어업경영이 악화될 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 생태계 기반 어업관리에 있어 어업경영의 비효율성을 줄이고, 안정적인 어업경영을 유지할 수 있는 다양한 방안들이 모색되어야 할 것이다.

REFERENCES

- Arnason, R. (1998), "Ecological Fisheries Management Using Individual Transferable Share Quotas," *Ecological Applications*, 8, 151 – 159.
- Clark, C. (1990), *Mathematical Bioeconomics*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Conrad, J. (1999), *Resource Economics*, Cambridge University Press.
- Dantzig, G. and Thapa, M. (1997), *Linear Programming*, Springer.
- FAO (2003), *Fisheries management: The ecosystem*

- approach to fisheries*, FAO technical guidelines for Responsible Fisheries, 4, Suppl.2, p.112.
- FAO (2011), *Review of the state of world marine fishery resources*, FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 569, p.334.
- FAO (2014), *The state of world fisheries and aquaculture*, FAO.
- FIRA (2014), *TAC Introduction*, Korea Fisheries Resources Agency.
- Haddon, M. (2001), *Modelling and Quantitative Methods in Fisheries*, Chapman & Hall/CRC.
- Hanna, S. (1998), "Institutions for Marine Ecosystems: Economic Incentives and Fishery Management," *Ecological Applications*, 8, 170 – 174.
- Kim, W. S. and Kim, D. H. (2011), "Development and Application of Socioeconomic Assessment Indicators for an Ecosystem-Based Fisheries Management: An Application of Traffic Light System Method," *The Journal of Fisheries Business Administration*, 42, 71 – 83.
- MOF (2014), *Fisheries Production Statistics*, Ministry of Oceans and Fisheries.
- MOF, *Fisheries Information Portal* (www.fips.go.kr)
- NFFC (2013), *Report of Fishing Business Survey*, National Federation of Fisheries Cooperatives.
- NFRDI (2008), *Fishing Gear of Korea*, ED-2008-FE-001, National Fisheries Research & Development Institute.
- NFRDI (2012), *Stock Assessment of major coastal and offshore fish species in Korea*, SP-2012-FR-002, National Fisheries Research & Development Institute.
- NMFS (1998), *Ecosystem-based fishery management*, A report to Congress, NOAA, USA.
- OECD (2010), *The Economics of Adapting fisheries to Climate Change*, OECD Publishing.
- OECD (2012), *Rebuilding Fisheries : The Way Forward*, OECD Publishing.
- Pikitch, E. K., Santora, C., Babcock, E. A., Bakun, A., Bonfil, R., Conover, D. O., Dayton, P., Doukakis, P., Fluharty, D., Heneman, B., Houde, E. D., Link, J., Livingston, P. A., Mangel, M., McAllister, M. K., Pope, J. and Sainsbury, K. J. (2004), "Ecology: Ecosystem-Based Fishery Management," *Science*, 305, 346 – 347.
- Rodrigues, A. (1990), *Operations Research and Management in Fishing*, Kluwer Academic Publishers.
- Sanchirico, J., Smith, M. and Lipton, D. (2006), *An Approach to Ecosystem-Based Fishery Management*, Discussion Paper DP 06-40, Resources for the Future.