

## 전복양식장 저서생태계의 훼손으로 인한 어업자원의 생산감소량 추정 모델

강용주\* · 장창익<sup>1</sup>

부경대학교 자원생물학과, <sup>1</sup>부경대학교 해양생산관리학과

### A Quantative Population Dynamic Model for Estimating Damages in Fishery Production in the Benthic Ecosystem of Abalone Culture Grounds

Yong Joo KANG\* and Chang Ik ZHANG<sup>1</sup>

Department of Marine Biology, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>1</sup>Department of Marine Production Management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Marine populations are maintained through the processes of spawning, growth, recruitment, natural death and fishing in a marine ecosystem. Based upon each of these processes, a quantitative population dynamic model was developed to estimate damages in fishery production due to accidents in a fishing ground. This model was applied for the abalone culture grounds in Korean waters. Three components of damages were identified in the ecosystem of the abalone culture grounds, namely, physical damages in the substratum of the fishing ground, biological damages in the structure and function of the ecosystem, and damages in fishery production. Considering these three components, the processes and durations of damages in fishery production were determined. Because the abalone population is composed of multiple year classes, damages influence all the year classes in the population, when they occur. The model developed in this study is:

$$y = (n_s + 1) \times Y_E - \sum_{t=0}^n y_{n,t} i$$

where,  $y$  is the expected damages in fishery production during the period of restoration of the damaged abalony population,  $Y_E$  is the annual equilibrium yield,  $n_s$  is the maximum age in the population,  $t_s$  is the year of damage occurrence,  $n_r$  is the age at recruitment, and  $\sum_{t=0}^n y_{n,t} i$  is total expected lifetime catch of year classes which were recruited during the restoration period.

Key words: Marine benthic ecosystem, Quantitative model, Abalone (*Haliotis discus hannai*), Fishery production, Damages, Expected lifetime catch

#### 서 론

해양생태계에서는 선박이 항해 중 화재를 일으켜 침몰하거나 유조선이 각종 유류를 유출하는 등의 사고가 종종 발생하고 있으며, 또한 각종 공사로 인해 토사가 해저에 침적되는 등 여러 가지 형태의 변형이나 훼손이 발생하고 있다. 이러한 훼손은 생태계를 파괴하고 궁극적으로 수산자원의 어업생산량을 감소시키게 된다. 현재 간척사업과 같은 환경변화가 해양생태계에 미치는 영향에 관한 연구로는 해양물리학적 연구로 Choi (2002), Hwang (2000) 등이 있으며, Choung and Kim (1989; 1991), Kim et al. (2001)의 해조류에 대한 영향 연구, Jung et al. (1997)의 다모류군집의 변화에 대한 연구, Kang et al. (1997)의 수산경영학적 연구, Lee et al. (1999)의 해양조류(海洋鳥類)에 대한 연구, Min and Kim (2000)의 해산식물에 대한 연구, Yoo and Kim (1998)의 동불성 부유생물에 대한 영향 연구, Chang and Chin (1978)의 패류에 대한 부지의 생리학적 연구가 있다. 그러나 수산자원에 미치는 피해에 대한

연구로는 Yoo and Shin (1996)의 연구만이 있을 뿐, 개체군 역학적 접근 방법에 관한 연구가 많지 않은 실정이다. 최근 다년간의 공사에 따르는 부지에 의한 천해어장의 어업생산감소량을 추정하는 정량적인 모델이 보고된 바 있다 (Park et al., 2003). 그러나, 일반적인 어장훼손으로 인한 생태계 피해와 어장의 피해에 대한 정량적 연구는 거의 전무한 실정이다.

전복과 같은 저서생물들은 매년 산란기가 되면 다량의 신생 개체를 산출하는데, 매년 산출된 신생 개체를 출생년도로 구분하여 연급군이라 한다 (Zhang 1991). 한 연급군은 출생 후 어장에 분포하여 나이를 먹음에 따라 질병, 피식, 해양악화 등의 자연요인에 의해 사망함으로써 생존 개체수가 감소한다. 한편, 살아남는 개체는 성장을 계속하여 어민에 의해 어획되기 시작한다. 이와 같이 성장하여 어민이 어획하는 크기가 됨으로써 자원이 되는 가입과정을 가진다. 가입 후에는 연급군은 자연사망과정에 더하여 어획사망과정을 겪으므로 생존수는 가입하기 전에 비해 급격하게 감소하고, 최고연령에 달하면서 사망함으로써 어장에서 사라진다.

전복 양식 어장에 있어서 저질은 압박이다. 침몰 선체가

\*Corresponding author: yjkang@pknu.ac.kr

인양 과정에서 기계적으로 파괴되거나 해체된다면, 침몰 선체의 파편과 잔해들이 암반을 덮게 되고, 전복의 착생 기질로서의 암반의 기능은 거의 상실된다. 암반은 전복의 착생 기질로서 뿐만이 아니라 먹이가 되는 대형 해조류의 부착 기질로서도 중요하다. 따라서, 전복 어장의 해체에 덮인 침몰 선체의 파편과 잔해는 전복의 착생을 방해할 뿐만 아니라 전복의 먹이가 되는 대형 해조류의 착생도 방해함으로써 전복 어장 생태계의 기능을 마비시킨다. 대형 해조류가 착생하고 있다 하더라도 유리 섬유로 구성된 선체 잔해가 해조류의 엽상체를 덮어 전복의 섭이를 불가능하게 할 뿐 아니라 광선을 차단함으로써 해조류의 광합성을 저해한다 (Kang and Go, 1977). 따라서, 침몰 선체의 파편과 잔해는 생산자로서 대형 해조류와 이를 먹는 소비자로서의 전복을 이어주는 먹이망을 차단하여 전복 어장 생태계의 기능을 근본적으로 손상시키며 어업생산의 감소를 유발한다.

선박의 화재 및 침몰 사고가 전복양식 어장의 생태계에 미치는 피해는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 어장 시설의 훼손이고, 둘째는 어장 생태계의 손상이며, 셋째는 어업 생산의 감소이다. 전복양식어장 시설이란 조성되어 있던 자연 암반과 어초시설을 가리킨다. 선박이 침몰하면 전복이 착생하는 암반 시설이 침몰 선체의 파편 잔해로 뒤덮혀 전복 어장으로서의 생산 기능이 훼손된다. 또한 전복자원 조성을 위해 설치한 어초시설도 선박침몰로 손상을 입을 수 있다. 어장 생태계란 전복의 생산성을 가능하게 하고 유지하게 하는 생태계의 구조와 기능을 가리키는데 물·빛·염분·수온·영양염류·용존 산소·현탁물·수소 이온 농도·저질·해수 유동·간출 등의 무생물적 요소와, 분해자·생산자·소비자로 구성되는 생물적 요소가 있다. 이들 생태계 구성 요소 중에서 선박의 침몰 사고로 인해 손상을 입는 것은 무생물적 요소에 속하는 저질과 생물적 요소에 속하는 생산자이다. 선박의 화재 및 침몰 사고로 인한 어업 생산 감소에는 피해 시점에 어장에 분포하고 있는 생물이 채취되기 전에 사망하거나 성장이 저해되어 감소되는 생산 피해와 사고 당시에는 생물이 어장에 존재하지 않았지만 어장 생태계의 손상으로 어장에 착생하지 못함으로 인한 생산 피해가 있다.

본 연구의 목적은 해양저서생태계의 훼손으로 인한 수산자원의 생산감소량을 정량적으로 추정하는 개체군 역학 모델을 개발하는 것이며, 이 모델을 전복양식장에서 선박의 침몰과 인양과정이 해양생태계에 미치는 피해의 종류와 규모, 그리고 이에 따르는 수산자원의 생산감소량을 추정하는데 적용하는 것이다.

**재료 및 방법**

**어업생산감소량 추정 모델**

수산자원의 개체군 변동을 고려한 어업생산량은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (Zhang 1991).

$$\frac{dY_x}{dx} = F \cdot W_x \cdot N_x \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $Y_x$ 는  $x$ 세의 생산량,  $F$ 는 순간어획사망계수,  $W_x$ 는 연령  $x$ 세의 평균중량,  $N_x$ 는 연령  $x$ 세의 개체수이다. 식 (1)에서  $x_c$ 세에서  $x_i$ 세까지의 연령을 갖는 개체들로 구성되는 자원으로부터 1년간 올리는 연평형어획량 ( $Y_E$ )은 Beverton and Holt (1957)에 의하면

$$Y_E = F R' e^{-M(x_c - x_r)} W_\infty \sum_{n=0}^3 \frac{\Omega_n e^{-nk(x_c - x_0)}}{F + M + nk} \dots\dots\dots (2)$$

$$(1 - e^{-(F + M + nk)(x_c - x_r)})$$

이 된다. 여기서,  $\Omega_0=+1$ ,  $\Omega_1=-3$ ,  $\Omega_2=+3$ ,  $\Omega_3=-1$ 이다.  $R'$ 는 어장가입미수,  $M$ 은 순간자연사망계수,  $k \cdot W_\infty$  및  $x_0$ 는 성장 특성치이다.

어장에 방양하는 종묘를 일정 기간 동안 양성하여 어업 생산을 한다면 식 (2)는 수산동물의 양식어업생산량을 추정하는 데도 적용할 수 있다. 수산동식물을 양식하는 경우 양성기간이 끝나면서 일시에 양성생물을 전량수확하므로, 양식어업생산과정은 식 (2)에서

- $R' = N_r$  = 종묘방류미수 (또는 부착종묘미수)
- $x_r$  = 방류종묘연령 (또는 부착종묘연령)
- $x_c$  = 수확연령
- $x_c - x_r$  = 양성기간
- $F = +\infty$

의 특수한 경우에 해당한다. 따라서, 이러한 특수조건을 식 (2)에 적용하여, 수산동물의 평균연간어업생산량을 평가하는 생산방정식을 구하면,

$$Y_E = \frac{1}{x_c - x_r} N_r e^{-M(x_c - x_r)} W_\infty \sum_{n=0}^3 \Omega_n e^{-nk(x_c - x_0)} \dots (3)$$

이 된다. 식 (3)은 7개의 특성치를 가지고 있다. 즉,  $N_r$ ,  $W_\infty$ ,  $M$ ,  $x$ ,  $x_c$ ,  $x_0$ ,  $x_r$ 인데 그 중에서  $W_\infty$ ,  $k$  및  $x_0$ 는 생물체의 성장에 관한 것이고,  $M$ 는 양성기간 동안의 생존율에 관한 것이고,  $N_r$ ,  $x_r$  및  $x_c$ 는 어업경영방식에 관련된다.

어장에는 선박 사고가 일어난 해에 출생한 0세군에서 사고가 일어나기 수 년 전에 출생한 최고 연령군에 이르기까지 출생 연도가 다른 여러 연급군이 혼재하고 있다. 어장에 분포하는 전복 자원의 연급군에는 나이가 어리고 어체가 작아 아직 어획대상이 되지 않는 연급군과 어체가 자라서 어획대상이 되는 연급군이 있다. 전자를 가입전연급군 (pre-exploited cohorts)이라 하고, 후자를 가입후연급군 (exploited cohorts)이라 정의한다. 사고로 어장생태계가 교란되면 모든 연급군이 동시에 피해를 입게 된다. 그러므로, 피해에 노출된 모든 연급군으로부터 기대되는 어업생산의 총합을 사고로 인한 사망 전복의 어업생산감소량으로 간주한다.

여기서, 선박의 사고에 노출됨으로써 피해를 입는 연급군을 피해연급군이라 정의하고 피해연급군 중에서 가입전연급군

과 가입후연급군을 각각 가입전피해연급군과 가입후피해연급군이라 정의한다.

사고 당시에 어장에 분포하는 연급군은 서로 출생 연도가 다른 만큼 나이를 달리한다. 연급군을 출생한 연도를 기준하지 않고 출생후 경과 년수를 기준하여 연령군으로 지칭할 수가 있다. 이 경우 출생후 1년 미만의 개체들은 0세군, 출생후 1년 이상 2년 미만의 개체들은 1세군, 출생후 n년 이상 n+1년 미만의 개체들은 n세군이라 부르기로 한다. 따라서,  $x_c$ 세의 개체는 소수점 이상의 수치에 의거해 연령군을 확인하여  $n_c$ 세군이라 정의한다.

전복의 가입연령, 최고연령, 사고연도를 각각  $x_c$ 세,  $x_\lambda$ 세,  $t_s$ 년도라 하면, 사고에 노출된 피해 연급군은 0세군에서  $n_\lambda$ 세군까지  $n_\lambda+1$ 개의 연급군이 존재하며, 그 중에서 0세군은  $t_s$ 년도에 출생한  $t_s$  연급군이고, 1세군은  $t_s-1$ 년도에 출생한  $t_s-1$  연급군이며, 가장 나이 많은  $n_\lambda$ 세군은  $t_s-n_\lambda$ 년도에 출생한  $t_s-n_\lambda$  연급군이다. 따라서, 사고에 노출된 연급군 중에서 가장 나이 많은  $t_s-n_\lambda$  연급군은  $t_s$ 년도에만 존재하고  $t_s+1$ 년도에는 어장에 존재하지 않는다. 그러나, 가장 나이 어린  $t_s$  연급군은  $t_s+n_\lambda$ 년도까지 잔존하고,  $t_s+n_\lambda+1$ 년도에는 어장에 존재하지 않는다 (Table 1). 그러므로, 사고에 노출된 피해연급군이 사고가 없었다 한다면 어장에 존속하는 기간은 최대  $n_\lambda+1$ 년이 된다.

Table 1. Damaged year classes of fishery populations due to vessel accidents.  $t_s$  is year of accident.  $n_\lambda$  is oldest age class.  $B_{x,y}$  indicates a population in the year class x at age y. Year classes in italic type denote damaged ones due to vessel accidents.

Age	Year				
	$t_s$	$t_s+1$	$t_s+2$	...	$t_s+n_\lambda$
0	$B_{t_s,0}$	$B_{t_s+1,0}$	$B_{t_s+2,0}$	...	$B_{t_s+n_\lambda,0}$
1	$B_{t_s-1,1}$	$B_{t_s,1}$	$B_{t_s+1,1}$	...	$B_{t_s+n_\lambda-1,1}$
2	$B_{t_s-2,2}$	$B_{t_s-1,2}$	$B_{t_s,2}$	...	$B_{t_s+n_\lambda-2,2}$
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
$n_\lambda$	$B_{t_s-n_\lambda,n_\lambda}$	$B_{t_s+1-n_\lambda,n_\lambda}$	$B_{t_s+2-n_\lambda,n_\lambda}$	...	$B_{t_s,n_\lambda}$

가입전피해연급군은 사고 년도에 출생하는 연급군 ( $B_{t_s,0}$ )은 물론이고 사고 발생 이전의 해에 출생하여 어장에 분포하는 가입전연급군 ( $B_{t_s-1,1} \sim B_{t_s-n_\lambda-1,n_\lambda-1}$ )도 포함한다. 따라서, 사고 시점에 있어서의 가입전연급군의 총수는  $n_c$ 개가 있다.

가입후피해연급군은 사고가 발생한 년도와 그 이전의 각 년도에 가입하여 사고 당시의 어장에 분포하는 가입후연급군 ( $B_{t_s-n_\lambda,n_\lambda} \sim B_{t_s-n_c,n_c}$ )을 포함한다. 따라서, 가입후피해연급군은  $n_\lambda-n_c+1$ 개 있다.

사고가 발생하지 않았을 경우, 어장에 분포하는  $x$ 세군으로부터 여생동안 올리는 어획량을 여생어획량 ( $Y_x$ )이라 하면,  $Y_x$ 는 식 (1)에 의해

$$Y_x = \int_{n_x}^{n_\lambda} FN_x W_x dx \approx \int_{n_c}^{\infty} FN_x W_x dx \dots\dots\dots (1)$$

이다. 여기서,  $x < x_c$ 이면 가입전연급군의 여생어획량이고,  $x_c \leq x$ 이면 가입후연급군의 여생어획량에 해당한다. 여기서,  $n_\lambda$ 는 어민의 전복 어획물 중에서 가장 나이가 많은 연령군의 연령이지만, 최고연령군은 생존수가 매우 적으므로 최고연령을  $\infty$ 로 간주한다 (Zhang 1991).

수산생물이  $x_c$ 세군이 되면서 가입하여 여생동안 올리는 어획량은 식 (2)에 정의된 연평균어획량 ( $Y_E$ )이다.

$$Y_E = Y_{x_c} = \int_{n_c}^{n_\lambda} FN_x W_x dx = \int_{n_c}^{\infty} FN_x W_x dx \dots\dots\dots (2)$$

따라서, 사고로 피해에 노출된 모든 연급군으로부터의 총여생어획량 ( $Y_\phi$ )은

$$Y_\phi = (n_c + 1) \cdot \int_{n_c}^{\infty} FN_x W_x dx + \sum_{i=n_c+1}^{n_\lambda} \int_{i}^{\infty} FN_x W_x dx \dots\dots\dots (3)$$

이다.

$x_c$ 세군의 여생어획량이  $Y_E$ 로서 매년 일정하다면, 사고 당시에 어장에 분포하여 피해에 노출된 전복의 총여생어획량은

$$Y_\phi = (n_c + 1) \cdot Y_E + \sum_{i=n_c+1}^{n_\lambda} \sum_{j=i}^{\infty} Y_j \dots\dots\dots (4)$$

이다.

식 (7)에 의해 추정되는 총여생어획량이 사고 당시에 어장에 생존하고 있어 사고로 인해 사망한 전복으로부터 기대되는 어업생산량이며, 사망 전복의 어업생산감소량에 상당한다. 전복 자원 복원 기간에 어장에 착생한 연급군을 복원연급군이라 정의하고, 복원연급군 중에서 가입전연급군과 가입후연급군을 각각 가입전복원연급군과 가입후복원연급군이라 정의한다.

사고시점 ( $t_s$ ) 부터 해조군락 복원 개시 시점 ( $t_a$ ) 간의 기간을 우선협의기간 ( $r_s$ )이라 정의하면,

$$r_s = t_a - t_s \dots\dots\dots (5)$$

가 성립한다.

해조군락이 조성되면 전복의 먹이가 확보되므로 매년 전복의 치패를 이식 방류한다. 전복의 치패를 이식 방류하기 시작하는 시점에서 전복의 착생이 시작된다고 보면 전복 어장 생태계 복원의 2단계 과정인 전복 자원의 복원이 시작된다. 해조군락 복원 개시 시점 ( $t_a$ )과 전복자원 복원 개시 시점 ( $t_\beta$ ) 간의 기간을 해조군락 복원기간 ( $r_a$ )이라 정의하면,  $r_a$ 는

$$r_a = t_\beta - t_a \dots\dots\dots (6)$$

가 된다.

전복자원의 복원이 시작되면 Table 2와 같이 전복자원 복원

Table 2 Processes of restoration of a damaged population due to vessel accidents.  $t_s$  is year of accident.  $t_a$  is starting year for algae restoration.  $t_\beta$  is starting year for abalone restoration.  $n_\lambda$  is oldest age class.  $B_{x,y}$  indicates a population in the year class  $x$  at age  $y$ . Year classes in italic type denote damaged ones due to vessel accidents.

Age	Year												
	$t_s$	$t_s+1$	$t_s+2$	...	$t_a$	$t_a+1$	$t_a+2$	...	$t_\beta$	$t_\beta+1$	$t_\beta+2$	...	$t_\beta+n_\lambda$
0									$B_{t_\beta,0}$	$B_{t_\beta+1,0}$	$B_{t_\beta+2,0}$	...	$B_{t_\beta+n_\lambda,0}$
1										$B_{t_\beta,1}$	$B_{t_\beta+1,1}$	...	$B_{t_\beta+n_\lambda-1,1}$
2											$B_{t_\beta,2}$	...	$B_{t_\beta+n_\lambda-2,2}$
...												...	...
...												...	...
...												...	...
$n_\lambda$												...	$B_{t_\beta,n_\lambda}$

개시 년도 ( $t_\beta$ )에는 어장에 전복 0세군 (즉,  $B_{t_\beta,0}$ )이 분포하게 된다. 이듬해 (즉,  $t_\beta+1$ )에 어장에 전복 치패를 이식 방류하면 전년도에 이식 방류된 1세군 (즉,  $B_{t_\beta,1}$ )과 당해 연도 (즉,  $t_\beta+1$ )에 이식 방류된 0세군 (즉,  $B_{t_\beta+1,0}$ )이 존재한다. 이와 같은 방법으로 전복 치패를 매년 이식 방류하게 되면 최종 년도 (즉,  $t_\beta+n_\lambda$ )에는 어장에는 가장 나이 어린 0세군 (즉,  $B_{t_\beta+n_\lambda,0}$ )에서 가장 나이 많은 최고령군 (즉,  $B_{t_\beta,n_\lambda}$ )에 이르는 모든 연령군이 존재하게 되어, 전복자원은 구조적으로 사고 이전의 상태를 회복하게 된다. 따라서, 전복자원 복원 기간 ( $r_\beta$ )은

$$r_\beta = t_\beta + n_\lambda - t_\beta = n_\lambda \dots\dots\dots (10)$$

이 된다. Table 2와 같이 전복 자원이 사고 이전의 상태로 복원하는 데는  $n_\lambda$ 년이 걸린다.

선박의 침몰사고로 어장이 훼손된 이후 어업이 정상 수준을 회복하기까지는 우선협약기간, 해조군락 복원기간 및 전복 자원 복원기간 등 3개의 연속 기간이 존재한다. 생태계 복원기간의 어업생산 감소란 침몰 사고가 없었다고 가정할 경우에 있어서 생태계 복원 기간 동안에 올리는 어업생산을 가리킨다. 우선협약기간에는 사고 선박의 선체의 잔해 파편이 어장의 해저에 방치된 채로 어업활동이 완전히 중단된 상태가 계속되므로, 우선협약기간의 어업생산감소량을  $y_s$ 라 하면,

$$y_s = Y_E \times r_s \dots\dots\dots (11)$$

가 성립한다.

해조군락 복원기간에는 사고 선박의 선체 잔해 파편이 어장의 해저로부터 수거되고 훼손된 어장 시설이 복구되었지만 전복의 먹이가 되는 대형 해조류가 착생되지 않아 어장에 전복자원이 분포하지 않은 채로 어업활동이 완전히 중단된 상태이다. 따라서, 해조군락 복원기간의 어업생산감소량을  $y_a$ 라 하면,

$$y_a = Y_E \times r_a \dots\dots\dots (12)$$

가 성립한다.

전복자원 복원기간의 어업생산감소는 다음과 같이 구할 수 있다. 전복자원 복원기간의 최초년도 ( $t_\beta$ 년도)에 이식 방류한 전복 치패가 가입하는 년도 (즉,  $t_\beta+n_c$ 년도)가 되기까지의 기간 ( $n_c$ 년) 동안에는 휴업을 하므로 이 기간 동안의 어업생산 감소량 ( $y_r$ )은

$$y_r = n_c \times Y_E \dots\dots\dots (13)$$

이 된다.

전복자원 복원기간의 최초년도 ( $t_\beta$ 년도)에 이식 방류한 전복 치패가 가입하는 년도 (즉,  $t_\beta+n_c$ 년도)에 어장에 분포하는 유일한 가입후연급군  $B_{t_\beta,n_c}$ 로부터 1년간 어획되는 어업생산량 ( $y_{n_c/n_c}$ )은

$$y_{n_c/n_c} = \int_{n_c}^{n_c+1} F N_x W_x dx = \sum_{i=n_c}^{n_c+1} \int_i^{i+1} F N_x W_x dx \dots\dots (14)$$

이 된다.

전복자원 복원기간의 최종년도 (즉,  $t_\beta+n_\lambda$ 년도)에 어장에 분포하는 가입후연급군은  $B_{t_\beta+n_\lambda-n_c, n_c}$ ,  $B_{t_\beta+n_\lambda-n_c-1, n_c+1}$ , ...,  $B_{t_\beta, n_\lambda}$ 의  $n_\lambda-n_c+1$ 개의 연급군이 존재하며, 이들 연급군으로부터 1년간 어획되는 어업생산량 ( $y_{n_c/n_\lambda}$ )은

$$y_{n_c/n_\lambda} = \sum_{i=n_c}^{n_\lambda} \int_i^{i+1} F N_x W_x dx \dots\dots\dots (15)$$

이 된다.

따라서, 전복자원의 복원사업이 시작된 후에도 휴업을 계속하다가 전복자원 복원기간의 최초년도 ( $t_\beta$ 년도)에 이식 방류한 전복 치패가 가입하는 년도 (즉,  $t_\beta+n_c$ 년도)에 당해연도의 전복 치패를 이식 방류한 직후에 조업을 재개할 경우의 전복자원 복원기간의 어업생산감소량 ( $y_\beta$ )은

$$y_\beta = (n_\lambda + 1) \times Y_E - \sum_{i=0}^{n_\lambda-n_c} y_{n_c/i} \dots\dots\dots (16)$$

이 된다. 여기서,

$$\sum_{i=0}^n y_{n/i} = \sum_{i=0}^n Y_E \frac{(n_\lambda - n_c + 1 - i)}{(n_\lambda - n_c + 1)} \dots\dots\dots (17)$$

로서 전복자원 복원기간의 모든 년도에 가입한 가입후복원연급군의 총여생어업생산량이다.

이상과 같이 선박의 침몰사고시점에서 어업이 재개되기까지의 기간을 우선협의기간, 해조근막 복원기간 및 전복자원 복원기간으로 나누고 식 (11), 식 (12) 및 식 (16)의 어업생산감소량을 합하여 사고로 인한 어업생산피해량 ( $D_Y$ )을 구하면 다음의 식과 같다.

$$D_Y = [r_s \times Y_E] + [r_a \times Y_E] + [(n_\lambda + 1) \times Y_E] - \sum_{i=0}^n y_{n/i}$$

$$= [r_s + r_a + (n_\lambda + 1)] \times Y_E - \sum_{i=0}^n y_{n/i} \dots\dots\dots (18)$$

식 (18)의 우변의 각 항을 모식도로 설명하면 Table 3과 같다.

식 (18)에 의해 선박의 침몰사고로 인해 입은 어업생산피해량 ( $D_Y$ )을 구하기 위해서는 평균연간어획량 ( $Y_E$ )과 전복자원 복원기간 가입후복원연급군 총여생어업생산량 ( $\sum_{i=0}^n y_{n/i}$ )을 구하여야 한다. 이 값들을 계산하기 위해서는 이들 식에 나오는 특성치 ( $F, M, k, R', W_\infty, x_c, x_0, x_\lambda$ )를 알아야 하는데, 대개 피해조사 시점에서 어장은 침몰사고로 환경이 변하여 어장 생태계가 훼손되어 있었기 때문에 이들 특성치를 구할 수가 없다.

식 (17)과 식 (18)에서  $Y_E$ 는 어장의 최근 3년 간 (즉, 1998-2000) 연간생산량의 산술평균에 의해 추정 가능하다. 또한, 가입연령군의 연령 ( $n$ )과 최고연령군의 연령 ( $n_\lambda$ )은 조사 대상 어장의 인근에 위치하는 어장에서 채포한 전복의 어획물에서 가장 어린 전복의 연령과 가장 나이 많은 전복의 연령에 의거하여 추정 가능하다.

결 과

모델 적용어장

위에서 개발된 모델을 적용한 어장은 인천광역시 옹진군 대청면에 소재하는 2개소의 옥죽어촌계의 전복 투석식 양식장이다. 어장에 피해를 끼친 사고는 2001년 1월 17일 쾌속여객선인 데모크라시 2호 (396톤)가 항행중 화재가 발생하여 기관이 멎은 상태에서 표류하다가 선체가 전소하면서 사고어장에서 침몰한데서 비롯되었다. 선박침몰시 선체의 철제골격과 기관은 침몰현장의 해저에 침강하였으며, 유리섬유 강화플라스틱 재료로 만들어진 선체벽면의 파편잔해는 사고어장 뿐 아니라 주변해역에 분산침적하였다. 또한 인양과정에서 사고어장의 어업시설이 파괴되고 훼손되었다.

어장시설의 피해규모

옹진군 대청면 옥죽어촌계 전복 투석식 어장시설의 피해규모를 알아보기 위해서 2001년 10월 3일간에 걸쳐 침몰 선체 파편과 잔해의 분포량을 조사하였다. 즉, 침몰 선체 파편과 잔해의 분포 범위 내의 통계학적으로 유의한 수준의 조사 정점을 설정하고 각 정점에 1m×1m 정방형의 방형구를 정하여 방형구 내에 분포하는 침몰 선체의 파편과 잔해로 보이는 물체를 모두 채집하였다. 채집한 침몰 선체의 파편과 잔해는 하선한 즉시 무게를 측정하였다. 어초시설의 훼손여부는 현장 조사시 어장 내에 설치된 어초시설의 상태를 관찰함으로써 훼손여부와 정도를 파악하였다.

어장 시설의 훼손은 어장 시설을 복구하는 비용으로 환산되며 어장 시설 복구 비용은 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는, 어장의 해저에 침적하여 있는 침몰 선체의 잔해와 파편을 제거하는 어장 청소 비용이며 다른 하나는 원형이 훼손된 자연 암반 및 어초시설을 새로운 암반 및 어초시설로 대체하는 비용이다. 어장 청소 비용은 사고 해역에 분포하는 침몰 선체의 파편 및 잔해의 물량 및 범위를 고려하여 어장 청소 작업에 필요한

Table 3. Schematic diagram of damages in fishery production due to vessel accidents.  $t_s$  is year of accident.  $t_a$  is starting year for algae restoration.  $t_\beta$  is abalone restoration.  $n_\lambda$  is oldest age class.  $B_{x,y}$  indicates a population in the year class x at age y. Year classes in italic type denote damaged ones due to vessel accidents In equation (18),  $[r_s \times Y_E] = \text{□}$ ,  $[r_a \times Y_E] = \text{⊘}$ ,  $[(n_\lambda + 1) \times Y_E] = \text{■}$ ,  $\sum_{i=0}^n y_{n/i} = \text{⊗}$

Age	Year															
	$t_s$	$t_s+1$	$t_s+2$	...	$t_a$	$t_a+1$	$t_a+2$	...	$t_\beta$	$t_\beta+1$	$t_\beta+2$	...	$t_\beta+n_c$	...	$t_\beta+n_\lambda$	
0									$B_{t_s,0}$	$B_{t_s+1,0}$	$B_{t_s+2,0}$	...	$B_{t_s+n_c,0}$	...	$B_{t_s+n_\lambda,0}$	
1										$B_{t_s,1}$	$B_{t_s+1,1}$	...	$B_{t_s+n_c-1,1}$	...	$B_{t_s+n_\lambda-1,1}$	
2											$B_{t_s,2}$	...	$B_{t_s+n_c-2,2}$	...	$B_{t_s+n_\lambda-2,2}$	
...												...	...	...	...	
$n_c$													$B_{t_s, n_c}$		$B_{t_s+n_\lambda, n_c}$	
...																
$n_\lambda$															$B_{t_s, n_\lambda}$	

인력과 기간을 산출하여 산정하되 객관성을 위해 인양업체와 잠수부를 대상으로 청소비용 견적을 제출케 하여 적정수준으로 정하도록 하였다. 침몰 선체의 파편 및 잔해의 분포범위는 방형구법으로 조사하여 계산하였다.

### 어장 생태계의 복원

어장 생태계의 복원은 어장 시설 훼손에 대해 어장 청소 및 대체 시설 투석에 의한 어장 시설 복구를 완료한 시점을 기산점으로 하였다. 복원기간은 두 가지의 기준에 의해 산정하였다. 즉 해조군락의 복원기간과 전복자원 복원기간이다.

해조군락은 단년생 해조와 다년생 해조로 구성된다. 그리고, 전복은 수년간 생존하므로 전복자원은 여러 연급군으로 구성된다. 해조군락의 복원은 훼손된 어장 시설이 복구된 직후부터 시작되고, 전복자원의 복원은 해조군락이 복원되면서 시작된다 (Yoo 2000). 해조군락과 전복자원의 복원은 복원이 시작되는 시점에 출생한 신생군이 최고 연령에 도달할 때에 완결된다. 따라서, 해조군락의 복원기간은 해조군락에서 다년생 해조의 연령 구조를 조사하여 최고 연령군의 나이에 의해 정한다. 한편, 전복자원의 복원기간은 전복 개체군에서 최고 연령군의 나이에 의해 정한다. 해조군락이 완전히 복원되어야 전복의 먹이가 되는 생산자의 영양 단계가 완성되고, 생산자의 영양단계가 어느 정도 복원되어야 전복의 복원을 위한 시도를 실시할 수 있을 것이므로 어장 생태계의 복원기간은 해조군락의 복원기간과 전복자원의 복원기간을 합산하여 구했다.

따라서, 다년생 해조군락의 연령 구조와 전복 개체군의 연령 구조는 사고 해역의 인근 전복 어장에서 조사하였다. 인근 정상적인 전복 어장을 대조군으로 선정하여 사용하였다. 인근 전복 어장에서의 생물 조사도 방형구법을 적용하였다.

### 어업생산 피해량 추정

선박 침몰 및 인양 작업으로 인해 어장시설, 즉 암반 및 어초시설의 훼손이 있었다. 즉, 침몰선박의 선체와 기관들이 어장시설에 침강함으로써 훼손을 가져왔고, 인양 작업을 하는 과정에서도 어장시설을 훼손시켰으며, 선체 벽체 잔해물이 어장에 산재해 있었다.

선박의 침몰 및 인양으로 인한 어장생태계의 파괴로 전복성 패뿐 아니라 치패까지 전부 사망한 것이 인정되었다. 따라서, 사고 이전의 수준까지 자원수준을 회복시키기 위한 자원조성이 필요한 것으로 간주하였다.

식 (18)에 의해 선박의 침몰사고로 인한 어업생산피해량을 산출하기 위해서 평균연간어획량 ( $Y_E$ ), 우선협의기간 ( $r_s$ ), 해조군락 복원기간 ( $r_a$ ), 전복자원 복원기간 ( $r_b$ )을 결정하는 전복자원의 가입연령군의 연령 ( $n_c$ )과 최고연령군의 연령 ( $n_\lambda$ ), 가입후복원연급군별 여생어업생산량 ( $y_{n,i}$ )을 파악하였다.

먼저, 피해를 입은 어업권의 평균연간어획량 ( $Y_E$ )은 침몰사고로 어장이 피해를 입은 직전년도를 기준으로 하여 소급

기산한 최근 3년간의 연간어획량을 산술평균하여 산출하였다. 피해를 입은 어업권의 어업실적 자료에 의해 평균어획량을 산출한 결과는 Table 4와 같이 두 어장의 평균어획량은 각각 406 kg과 203 kg으로 아주 적은 생산량을 나타내었다.

Table 4. Annual catch of abalone in the damaged fishing grounds

Fishing ground	Area (ha)	Annual catch (kg) of recent three years			Mean (kg)
		Year t	Year t+1	Year t+2	
A	5	403	416	400	406
B	2	202	208	200	203

현장에서 잠수 조사 과정에서 어민이 제시하는 전복 종패의 패각 6개의 각장은 2.6-3.2 cm이었다. 그리고, 피해 어장에서 채포된 전복은 세 마리이었으며 각장은 5.1-6.5 cm이었다. 그리고 무피해 어장에서는 두 마리의 전복이 채포되었는데 각장은 4.6-5.7 cm이었다. 이들은 모두가 양성 중에 있는 것으로 채포의 대상이 되기에는 아직 어린 것이라 한다. 그래서, 어민에게 수확을 목적으로 채포한 전복의 표본을 요청하였다. 총 15마리의 전복이 제시되었는데, 이들의 각장은 8.3-12.7 cm이었다. 이들을 실험실로 가져와 나이를 사정한 결과 종패는 1세이고, 피해 어장의 전복은 2-3세이고, 무피해 어장의 전복은 2세임이 밝혀졌다. 그리고, 수확 성패의 전복은 4-7세이었다. 이상의 연령 사정의 결과에 의해 가입연령군의 연령과 최고연령군의 연령은 각각 4세와 7세인 것으로 가정하였다.

가입연령군의 연령과 최고연령군의 연령은 각각 4세와 7세이므로 가입후복원연급군은 4세군, 5세군, 6세군 및 7세군의 4개 연령군이 존재한다. 평균연간어획량 ( $Y_E$ ), 가입연령군의 연령 ( $n_c$ ) 4세, 최고연령군의 연령 ( $n_\lambda$ ) 7세를 식 (17)에 적용하여 전복자원 복원기간 가입후복원연급군 총여생어업생산량 ( $\sum_{i=n_c}^{n_\lambda} y_{n,i}$ )을 산출한 결과는 Table 5와 같다. 두 어장에서 평균연간어획량은 각각 406.0 kg과 203.0 kg이었으며, 총여생어업생산량은 각각 1,015.0 kg과 507.6 kg이었다. 이상의 과정을 거쳐 추정된 평균연간어획량 ( $Y_E$ ), 우선협의기간 ( $r_s$ ), 해조군락 복원기간 ( $r_a$ ), 전복자원 복원기간 ( $r_b$ )을 결정하는 전복자원의 가입연령군의 연령 ( $n_c$ )과 최고연령군의 연령 ( $n_\lambda$ ), 가입후연급군  $n_c+i$ 세군의 여생어업생산량 ( $Y_{n_c+i}$ )을 식 (18)에 적용하여 선박의 침몰사고로 인한 전체 어업생산피해량 ( $Y_D$ )을 산출하면 Table 6과 같다. 어장별 전체 어업생산피해량은 각각 4,669.0 kg과 2,334.4 kg으로 추정되었다.

## 고찰

본 연구에서는 해양저서생태계의 훼손으로 인한 수산자원의 생산감소량을 정량적으로 추정하는 일반적인 개체군 역학 모델을 개발하였다. 이 모델은 복수의 연급군을 가진 개체군에

Table 5. Annual catch and lifetime catch of abalone in the damaged fishing grounds

Fishing ground	Area (ha)	Annual mean catch (kg)	Lifetime catch (kg) by age				Total lifetime catch (kg)
			Age 4	Age 5	Age 6	Age 7	
A	5	406.0	406.0	304.5	203.0	101.5	1,015.0
B	2	203.0	203.0	152.3	101.5	50.8	507.6

Table 6. Total damages in fishery production of abalone in the damaged fishing grounds

Fishing ground	Area (ha)	Annual mean catch (kg)	Total damages (kg) of abalone due to vessel accident
A	5	406	4,669.0
B	2	203	2,334.4

보편적으로 적용이 가능한 모델이다. 이 모델을 본 연구에서는 전북양식장에서 선박의 침몰과 인양과정이 해양생태계에 미치는 피해의 종류와 규모, 그리고 이에 따르는 수산자원의 생산감소량을 추정하는데 적용하였다. 본 연구에서는 해상에서 선박의 침몰 및 인양 작업으로 인한 전북 양식어장의 피해를 어장 시설의 훼손, 어장 생태계의 손상, 그리고 어업 생산의 감소의 세 가지로 구분하여 피해 규모를 설정하였다. 대상어장에서 어장 시설의 훼손 여부는 간단한 현장조사에 의해서 파악할 수 있는 사항이다. 즉, 현장조사 결과 피해어장은 시설을 완전 대체할 정도의 피해를 입지 않은 것으로 나타나 시설교체를 위한 복구비용은 불필요하나 다만 피해범위에 걸쳐 산재해 있는 잔해물의 수거가 필요하다. 따라서 어장 청소 비용은 인양업체 또는 잠수부 어민들이 피해범위에 산재해 있는 선체 잔해물을 수거하는 데 소요되는 비용이 될 것이다.

일반적으로 어장 생태계 손상에 따른 피해는 어장 생태계의 복원과 관련된다. 복원기간은 두 가지의 기준에 의해 산정하였는데 하나는 해조군락의 조성이 완성되는 데 소요되는 기간, 즉 해조군락의 복원기간이며 또 하나는 전북자원이 회복되는 데 걸리는 기간, 즉 전북자원 복원기간이다. 전북 치패의 이식 방류는 전북자원의 복원기간 동안에 계속 실시되어야 하겠지만 전북자원이 전적으로 치패 이식 방류에 의해서만 회복된다고 할 수는 없다. 인근 해역에 분포하는 전북 또는 이식 방류한 치패로부터 비롯되는 전북의 자연 번식에 의해서 회복되는 자원 부분이 오히려 대부분의 비중을 차지한다. 전북자원의 복원기간은 종묘 살포 실적자료를 사용해서 간단히 파악할 수 있다. 즉, 이 자료를 고려할 때 상당부분 자연 치패에 의존하지만 부수적으로 대략 10년의 주기로 종묘를 살포하고 있었으므로 선박의 침몰 및 인양으로 인한 어장생태계의 파괴로 성패뿐 아니라 치패까지 전부 사망한 것으로 인정하여 사고 이전의 수준까지 자원수준을 회복시키기 위해 소요되는 수산자원조성에 따르는 비용을 피해범주에 추가하였다.

사실상 가장 중요하면서도 파악하기 어려운 사항이 어업생산감소량이다. 어업 생산의 감소량을 추정하는 데는 자원역학적 모델을 개발하여 평균연간어획량 ( $Y_E$ ), 우선협의기간 ( $r_s$ ),

해조군락 복원기간 ( $r_a$ ), 전북자원 복원기간 ( $r_b$ )을 결정하는 전북자원의 가입연령군의 연령 ( $n_c$ )과 최고연령군의 연령 ( $n_s$ ), 가입후복원연급군별 여생어업생산량 ( $y_{n,ji}$ )을 추정하여 전북의 어업생산피해량을 산출하였다.

어업생산피해량을 산출하는 데는 식 (2)와 같이 연평형어획량을 추정하거나, 식 (16)과 같이 복원기간의 어업생산감소량을 추정해야 하는 복잡한 수식들이 관여되며 또한 많은 자원생태학적 특성치에 대한 정보가 요구된다. 즉, 성장계수, 번식과정 및 가입, 순간자연사망계수와 순간어획사망계수 등에 대한 정량적인 특성치를 구해야 하는데, 실제 상황에서 이러한 특성치들은 단 기간의 피해조사에 의해서 추정할 수 없다. 따라서, 본 논문에서 제시하는 바와 같이 평형상태의 개체군 역학이론에 입각한 수리 모델을 이용하여 간단한 자료만을 사용해서도 어업생산피해량을 산출할 수 있는 방법이 개발되었다.

본 연구에서 제시하는 모델은 전북양식어장을 예로 해서 개발되었지만 이 모델은 기타의 다년생 어업자원인 바지락, 굴, 피조개, 우렁쟁이 등의 생물들에게도 공통적으로 적용이 가능하다.

### 참 고 문 헌

Beverton, R.J.H. and S.J. Holt. 1957. On the dynamics of exploited fish populations. Fishery investigations, Series II, Marine Fisheries, Great Britain Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 19, 533 pp.

Chang S.D. and P. Chin. 1978. Effect of suspended silt and clay on the mortality of some species of bivalives. Bull. Kor. Fish. Soc., 11, 227-231. (in Korean)

Choi, M.H. 2002. Integration of the feasibility assessment procedure and EIA of the big public investment project: in the case of the Saemangeum reclamation project. J. Kor. Soc. Environ. Impact, 11, 93-107. (in Korean)

Choung, Y.S. and J.H. Kim. 1989. Clonal growth and shoot modules dynamics of *Phragmites longivalvis* in a reclaimed land. Kor. J. Ecol., 12, 171-182. (in Korean)

Choung, Y.S. and J.H. Kim. 1991. Studies on the population biology of some clonal plants in a coastal reclaimed land I. Rhizome architecture, patch formation and growth of *Calamagrostis epigeios* plants. Kor. J. Ecol.,

- 14, 327-343. (in Korean)
- Hwang, M.I. 2000. Reclamation of tidal flats and environmental issues along western coast of Korea. *J. Geo. Edu.*, 43, 61-67.
- Jung, R.H., J.S. Hong and J.H. Lee. 1997. Spatial and seasonal patterns of polychaete community during the reclamation and dredging activities for the construction of the Pohang Steel Mill Company in Kwangyang Bay, Korea. *J. Kor. Fish. Soc.*, 30, 730-743.
- Kang, J.W. and N.P. Go. 1977. *Marine Algae Culture*. Taehwa Publishing Co. Busan, 294 pp. (in Korean)
- Kang, Y.J., K.S. Kim and K.L. Ha. 1997. A study on the estimation method of compensation for restriction in licensed fisheries caused by a large scale coastal reclamation. *J. Fish. Busin. Admin.*, 27, 71-83. (in Korean)
- Kim, J.A., K.H. Cho and H.H.M. Lee. 2001. Vegetation structure of the Kungae reclaimed wetland in a coastal lagoon of East Sea, Korea. *J. Kor. Ecol.*, 24, 27-34. (in Korean)
- Lee, K.S. J.Y. Park, J.B. Lee and J.C. Yoo. 1999. Wintering status of waterbirds in three reclaimed areas of the west coast of Korea. *Bull. Kor. Inst. Ornithol.*, 7, 1-11.
- Min, B.M. and J.H. Kim. 2000. Plant succession and interaction between soil and plants after land reclamation on the west coast of Korea. *J. Plant Biol.*, 43, 41-47.
- Park, J.S., Y.J. Kang and C.I. Zhang. A quantitative method for estimating damages in fishery production due to silt and clay in the tidal flat fishing grounds. *J. Kor. Fish. Soc.*, 36(4), 402-408. (in Korean)
- Yoo S.J. and K.S. Shin. 1996. Oilspill damage assessment of natural fisheries resources by ecological models. *J. Kor. Fish. Soc.*, 29, 174-190. (in Korean)
- Yoo, S.K. 2000. *Shallow Water Aquaculture*. 2nd Edition. Guduk Publishing Co. Busan. 639 pp. (in Korean)
- Yoo, H.B. and K.S. Kim. 1998. A comparative study of zooplankton communities in the inling reservoir groups. *Wonkwang J. Environ. Sci.*, 7, 49-64. (in Korean)
- Zhang, C.I. 1991. *Fisheries Resource Ecology*. Woosung Publishing Co., Seoul, 399 pp. (in Korean)

---

2003년 3월 10일 접수

2003년 7월 28일 수리