

## 부트스트랩과 베이지안 방법으로 추정된 수산자원관리에서의 생물학적 기준점의 신뢰구간

정석근\* · 최일수<sup>1</sup> · 장대수<sup>2</sup>

국립수산과학원 자원연구과, <sup>1</sup>전남대학교 응용수학과, <sup>2</sup>국립수산과학원 동해수산연구소

## Application of Bootstrap and Bayesian Methods for Estimating Confidence Intervals on Biological Reference Points in Fisheries Management

Sukgeun JUNG\*, Ilsu CHOI<sup>1</sup> and Dae-soo CHANG<sup>2</sup>

National Fisheries Research & Development Institute, Gijang-gun, Busan 619-902, Korea

<sup>1</sup>Department of Applied Mathematics, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea

<sup>2</sup>National Fisheries Research & Development Institute East Sea Fisheries Research Institute, Gangneung, Gangwondo 210-861, Korea

To evaluate uncertainty and risk in biological reference points, we applied a bootstrapping method and a Bayesian procedure to estimate the related confidence intervals. Here we provide an example of the maximum sustainable yield (MSY) of turban shell, *Batillus cornutus*, estimated by the Schaefer and Fox models. Fitting the time series of catch and effort from 1968 to 2006 showed that the Fox model performs better than the Schaefer model. The estimated MSY and its bootstrap percentile confidence interval (CI) at  $\alpha=0.05$  were 1,680 (1,420-1,950) tons for the Fox model and 2,170 (1,860-2,500) tons for the Schaefer model. The CIs estimated by the Bayesian approach gave similar ranges: 1,710 (1,450-2,000) tons for the Fox model and 2,230 (1,760-2,930) tons for the Schaefer model. Because uncertainty in effort and catch data is believed to be greater for earlier years, we evaluated the influence of sequentially excluding old data points by varying the first year of the time series from 1968 to 1992 to run 'backward' bootstrap resampling. The results showed that the means and upper 2.5% confidence limit (CL) of MSY varied greatly depending on the first year chosen whereas the lower 2.5% CL was robust against the arbitrary selection of data, especially for the Schaefer model. We demonstrated that the bootstrap and Bayesian approach could be useful in precautionary fisheries management, and we advise that the lower 2.5% CL derived by the Fox model is robust and a better biological reference point for the turban shells of Jeju Island.

Key words: Biological reference point, Total allowable catch, Maximum sustainable yield, Bootstrap, Bayesian approach, Markov chain Monte Carlo

### 서 론

우리나라뿐만 아니라 전 세계 바다에서 수산자원이 고갈되고 있다는 보고들이 나오면서 (FAO, 2007) 우리나라 해양수산부에서는 수산자원 보호와 회복을 위해 1999년부터 총허용어획량 (TAC: total allowable catch) 제도를 실시해오고 있다 (Kim, 2003; Zhang, 2000). 우리나라 총허용어획량 제도에서는 국립수산과학원이 개별 어종에 대한 수산자원 평가를 통해 적정어획량 (allowable biological catch)을 제시하면 정부와 어업, 그리고 학계로 이루어진 TAC 심의위원회에서 서로 의견을 조율하여 생물학적 기준점 (biological reference point)으로 한 해에 어업인들이 어획할 수 있는 어획량을 정하여 할당한다 (Zhang, 2000). 수산자원관리와 평가에서 가장 큰 특징중 하나는 불확실성이다 (Fogarty et al., 1992). 이런 불확실성의

원인으로는 자연 변동 (process stochasticity), 관측 오류, 모델 오류, 정책 실행 오류를 들 수 있다 (Harwood and Stokes, 2003). 1990년대 들어서 컴퓨터 기술이 발전함에 따라 수산자원관리에서 이런 불확실성과 위에 따른 위험도를 어떻게 평가하고 처리할 것인가 방법론이 개발되기 시작했는데 대표적으로 많이 쓰이고 있는 방법은 무작위 함수에 바탕한 부트스트랩 (bootstrap)과 베이지안 (Bayesian) 방법이다 (Manly, 2006). 부트스트랩은 이미 있는 표본 자료를 무작위로 다시 추출하여 새로운 표본을 만드는 과정을 반복하여 (resampling with replication) 모델 모수에 대한 신뢰구간을 추정하는 방법이다 (Hoyle and Cameron, 2003). 베이지안 방법에 비교하면 부트스트랩 방법은 모수보다는 자료를 강조하고 있다고 말할 수 있다 (Manly, 2006). 베이지안 방법은 모델링을 보다 쉽게 하고 모수의 신뢰구간에 대한 해석을 용이하게 하는 동시에 모수의 사후분포를 제시할 수 있어서 실제 활용에서 연구자가 원하는

\*Corresponding author: sukgeun.jung@gmail.com

분석도구를 제공한다 (Congdon, 2003). 이 방법은 자료보다는 모수를 강조한다. 우리나라에서는 수산자원평가에서 이런 불확실성을 어떻게 정량화시킬 것이고 또 수산관리와 정책에 반영할 것인지 아직 구체적인 연구가 없는 실정이다. 특히 어업인들이 제공하는 어획고나 노력량 자료는 큰 '관측 오류'를 내포하게 마련이고 또 생물학적 기준점을 추정하는데 적용되는 모델들도 장기적인 평형상태와 같은 가정이 위배될 경우 '모델 오류'를 범할 수도 있다 (Harwood and Stokes, 2003). 이런 불확실성을 줄이기 위해서는 궁극적으로 과학자들이 직접 조사 수집한 생물 생태학적 자료를 더 축적하여 어업인 통계에 덜 의존하는 수산자원평가가 바람직하지만 인력이나 예산 문제등으로 단기간에 개선되기 어려우며 이런 사정은 선진국도 다르지 않다. 소라는 연체동물문 복족강 원시복족목 소라과 (Family Turbinidae)에 속하는 종으로서, 대마난류의 영향을 받는 우리나라, 일본, 중국, 대만, 홍콩 등의 연안해역에 분포하며 조간대로부터 수심 20 m 사이에 암초역에 서식하고, 우리나라의 경우는 남해안과 울릉도 등에서도 부분적으로 분포하나 제주도에 주로 분포한다 (NFRDI, 2007). 특히, 제주도산 소라는 1970년대 초반부터 일본으로 수출하면서 지역 특산 전략상품으로 중요한 위치를 차지하여왔으나 과도한 어획 영향으로 어획량이 급감함에 따라 1991년 10월부터 수산관련 연구 지도기관과 수협 공동으로 자원량 회복을 위한 자율적 TAC제도를 시작하여 우리나라 자원관리의 성공적 사례를 보여준 종이다. 제주도 소라는 1990년까지 잠수기 어업과 해녀들의 나잠어업으로 어획되었다. 잠수기 어업 연간 어획량은 1972년대 최고 940 톤에 이르렀으나 점차 줄어 1979년 이후 연 500톤 이하로 감소하였고 1987년 이후는 연 100톤 이하로 더 줄었다. 1990년말 계속되는 어획량 감소로 자율적 TAC를 적용하기 위하여 잠수기선을 매입 폐기함으로써 1991년부터 소라어획량은 전량이 나잠어업으로만 어획되었다. 어업인 통계에 대부분 의존하는 지금 수산자원평가에서 이런 불확실성을 어떻게 정량화하여 그 위험성을 평가하고 수산정책에 반영하는 일은 효율적인 수산자원관리에 필수적이다 (Fogarty et al., 1992; Harwood and Stokes, 2003). 이 연구에서는 불확실성을 정량화하는 첫 단계로서 1990년대 초부터 자율적으로 TAC를 실시하여 왔던 우리나라 제주도 연안역에 분포하고 어획되는 제주소라 (*Batillus cornutus*)를 대상으로 그 동안 생물학적 기준점으로 쓰여왔던 최대 지속 어획량 (maximum sustainable yield, MSY)에 대하여 그 신뢰구간을 부트스트랩과 베이지안 방법 (Punt and Hilborn, 1997)으로 각각 진단하여 비교하고 나가서는 이런 기법들이 앞으로 어떻게 수산자원평가와 관리를 개선시키는데 쓰일 수 있는지 그 방향을 제시하려고 한다.

### 재료와 방법

1968년부터 2006년까지 제주도 연안에서 어획된 소라 어획량과 노력량 (해녀수) 자료 (MOMAF, 2007; NFRDI, 2007)를

바탕으로 최대 지속 어획량 (MSY)과 이에 해당하는 어획노력량 (FMSY)을 구하였다. MSY는 다음 Schaefer와 Fox 모델로 각각 추정하였다 (King, 1995).

#### 1. Schaefer 모델

$$\begin{aligned} \text{CPUE} &= Y/f \\ \text{CPUE} &= (a + b f) + \epsilon \\ \text{MSY} &= -a^2/(4b) \\ \text{FMSY} &= -a/(2b) \end{aligned}$$

#### 2. Fox 모델

$$\begin{aligned} \text{CPUE} &= Y/f \\ \text{Log (CPUE)} &= a + b f + \epsilon \\ \text{MSY} &= (-1/b) \exp(a-1) \\ \text{FMSY} &= -1/b \end{aligned}$$

여기서 Y는 어획량 (톤), f는 노력량 (해녀수), a와 b는 상수,  $\epsilon$ 은 잔차이다. 여기서  $\epsilon$ 은 무작위분포를 따르며 그 평균은 0이라고 가정한다. 일반적으로 이 두 모델은 단위노력당어획량 (CPUE)를 가지고  $\epsilon$ 의 제곱합을 최소화시키는 최소자승법에 의한 직선회귀식을 통해서 피팅하여 a와 b, 그리고 MSY와 FMSY를 계산한다. 이 연구에서도 동일한 방법을 따랐다.

#### 부트스트랩

1968년부터 2006년까지 어획량과 노력량 자료 (N=39)를 무작위로 다시 39개를 뽑아 새로운 표본을 만드는 과정을 1,000번 반복하였다. 이 1,000개 가상의 표본에서 각각 구한 1,000개의 MSY 추정치에 대해 그 분포를 살펴보고 95% 신뢰도에서 표준 부트스트랩 신뢰구간 (즉, MSY의 SE)과 퍼센트 신뢰구간을 추정했다 (Hoyle and Cameron, 2003; Manly, 2006). 표준 부트스트랩 신뢰구간은 이 1,000개 MSY가 정규분포를 따를 때 유효한 것이며, 퍼센트 신뢰구간은 2.5%와 97.5% 누적빈도에 해당하는 MSY를 구하는 것이기 때문에 정규분포라는 조건을 만족하지 않아도 유효하다. 국립수산과학원 서버에 설치된 SAS Enterprise Guide 4.1 (<http://support.sas.com/documentation/onlinedoc/guide>)에서 프로그램을 작성 실행했다. 이 1,000번의 부트스트랩 표본 재추출 과정은 Schaefer와 Fox 모델에 대해 같이 적용했으며, 구해진 1,000개 MSY 추정치가 정규분포를 따르는지 Shapiro-Wilk 테스트로 검정하였다 (SAS, 1989).

#### 베이지안 방법

모형의 모수에 대한 사전분포는 공액사전분포 (conjugate prior)인 정규분포를 사용하였으며 오차의 분산에 대한 사전분포는 감마 ( $\gamma$ ) 분포를 사용하였다. Markov chain Monte Carlo (MCMC) 방법에서 Burn-in 기간은 50,000이고 그 다음부터 50,000개의 표본을 사용하여 분석하였다. 중간값으로 대표값을 구하고 사후분포의 2.5%와 97.5%에 해당하는 값을 구하였다. 프로그램은 MCMC를 이용한 베이지안 분석 공개 소프트웨어

웨어인 영국 캠브리지 대학에서 개발한 WinBugs 버전 1.4.3 (<http://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/bugs/winbugs/contents.shtml>)에서 작성 실행했다.

### 역행 부트스트랩 (backward bootstrap)

Schaefer나 Fox 모델은 모두 장기적인 평형상태를 가정하나 실제 어종 증감은 평형상태라는 조건을 만족하지 않는 경우가 많다. 이 때문에 어떤 연도를 포함하고 안하고에 따라서 MSY 추정치는 차이에 나게 마련이다. 또 오래된 연도의 자료보다는 최근의 어획량 자료가 신뢰성이 더 높은 경우가 많기 때문에 어떤 연도를 시작점으로 시계열 자료를 취사선택하느냐에 따라서 MSY 추정치와 그 신뢰도는 달라질 수 밖에 없다. 이렇게 자료를 임의로 취사선택할 때 그 시작 연도에 따라서 MSY 추정치가 어떻게 바뀌는지 검토해보았다. 1968년부터 2006년까지 어획량과 노력량 자료 (표본 크기  $N=39$ )에서 그 첫 시작 연도를 1968년부터 1992년까지 달리하면서 자료를 선택한 다음 (표본 크기  $N=39, 38, 37, \dots, 15$ ) 여기서 무작위로 100개를 뽑아 새로운 표본 (재표본 크기  $N=100$ )을 만들어 커버 피팅을 하여 MSY를 구하는 과정을 1,000번 반복하여 (표본 개수=1,000) 도출된 1,000개 MSY 추정치들의 평균과 그 퍼센트 신뢰구간이 시작 연도에 따라 어떻게 바뀌는지 Schaefer와 Fox 모델에 대해서 각각 진단 검토했다. 표본 크기를 39로 하지 않고 100으로 한 이유는 표본크기가 시작 연도에 따라 일정하지 않기 때문에 임의로 일정한 값 100을 택한 것이다. 또 마지막 시작연도를 1992년으로만 잡은 이유는 시작연도가 1993년을 넘어가면 원래 표본크기가 15 미만이 되어 커버 피팅이 제대로 안되는 경우가 많았기 때문이다.

## 결 과

제주도산 소라의 연어획량과 노력량 (해녀수) 시계열을 Fig. 1에 나타내었다. 노력량은 1968년 이후 꾸준히 줄어들고 있으나 어획량은 1980년대초와 1990년도 중반에 피크를 보였다. 노력량과 단위노력당 어획량 관계는 Fig. 2에 나타내었으며, 여기에서 구한 MSY는 Schaefer 모델의 경우 2,167톤, Fox

모델의 경우 1,681톤으로 나타났으며, 여기에 해당하는 노력량은 각각 10,600명과 7,720명으로 Fox 모델이 Schaefer 모델에 비교해서 적정어획량이나 노력량 모두 더 작게 평가를 했다. 95% 예측구간 (Fig. 2)을 보면 Schaefer 모델에서는 노력량이 증가할수록 예측구간이 점점 넓어지는 경향이 있었으나 Fox 모델에서는 반대로 노력량이 증가할수록 예측구간은 점점 좁아졌다. 또 Schaefer 모델의 경우 아래 예측구간이 0 이하로 떨어지는 경우가 발생했으나 Fox 모델에서는 로그 함수를 썼기 때문에 그런 경우가 없었다. 부트스트랩과 베이지안 방법으로 추정된 MSY와 FMSY 그리고 이들의 95% 퍼센트 신뢰구간은 서로 비슷하였다 (Table 1). Schaefer와 Fox 모델을 비교해보면 Fox 모델은 MSY 추정치 분포가 안정되어 있으나 Schaefer 모델은 부트스트랩과 베이지안 방법 모두에서 특출 튀는 추정치 (outlier)들이 가끔 나와서 불안정하였다. 이런 두 모델 차이는 부트스트랩보다는 베이지안 방법에서 두드러졌고 Schaefer 모델에 따른 FMSY의 표준오차는 무려 6,187로 나와서 이런 outlier에 민감함을 알 수 있었다. 1천개 부트스트랩 표본으로부터 구한 MSY는 Schaefer나 Fox 모델 모두 정규분포를 따랐다 (Fig. 3; Shapiro-Wilk test,  $p=0.45$  for the Schaefer model, and  $p=0.06$  for the Fox model). 신뢰구간 범위는 Fox 모델이 더 좁아 정규분포를 가정하고 추정된 MSY의 표준오차 (standard error: SE)는 Schaefer 모델의 경우 161, Fox 모델의 경우 137이었다 (Table 1). MSY의 95% 부트스트랩 신뢰구간은 Schaefer 모델의 경우 1,847-2,495톤이었으며 Fox 모델에서는 1,435-1,969톤으로 추정되었다. 한편 베이지안 방법에서는 50,000개의 표본으로 구한 MSY의 추정치는 Fox 모델에서 중간값 1,701톤과 95% 신뢰구간은 1,454-1,999톤이고 Schaefer 모델에서 중간값 2,192톤과 95% 신뢰구간은 1,754-2,932톤으로 추정되었다. 추정치의 신뢰구간과 베이지안 표본추출과정에서 Schaefer 모델의 추정치는 불안정적으로 수렴의 형태를 잘 보이지 않았으나 상대적으로 Fox 모델의 추정치는 안정적으로 수렴하는 형태를 보였다. 역행 부트스트랩에서는 시계열자료의 시작연도를 임의로 선택할 때 추정되는 MSY의 평균과 그 95% 신뢰구간이 어떻게 달라지는지

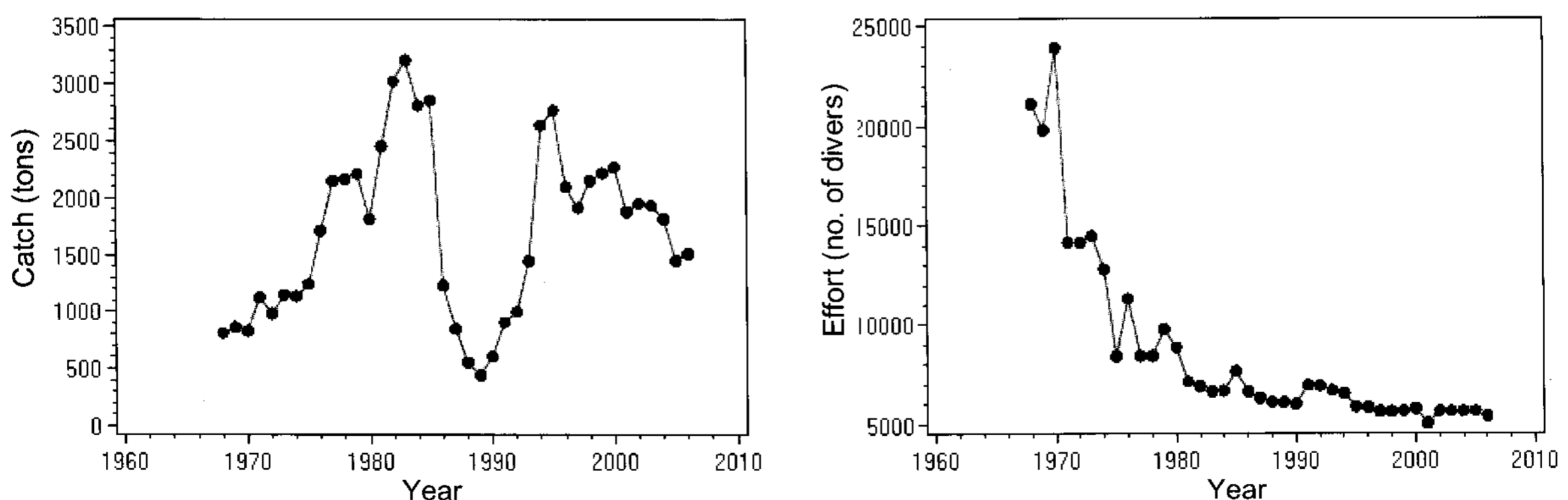


Fig. 1. Annual catch and fishing effort of turban shells (*Batillus cornutus*) off Jeju Island from 1968 to 2006.

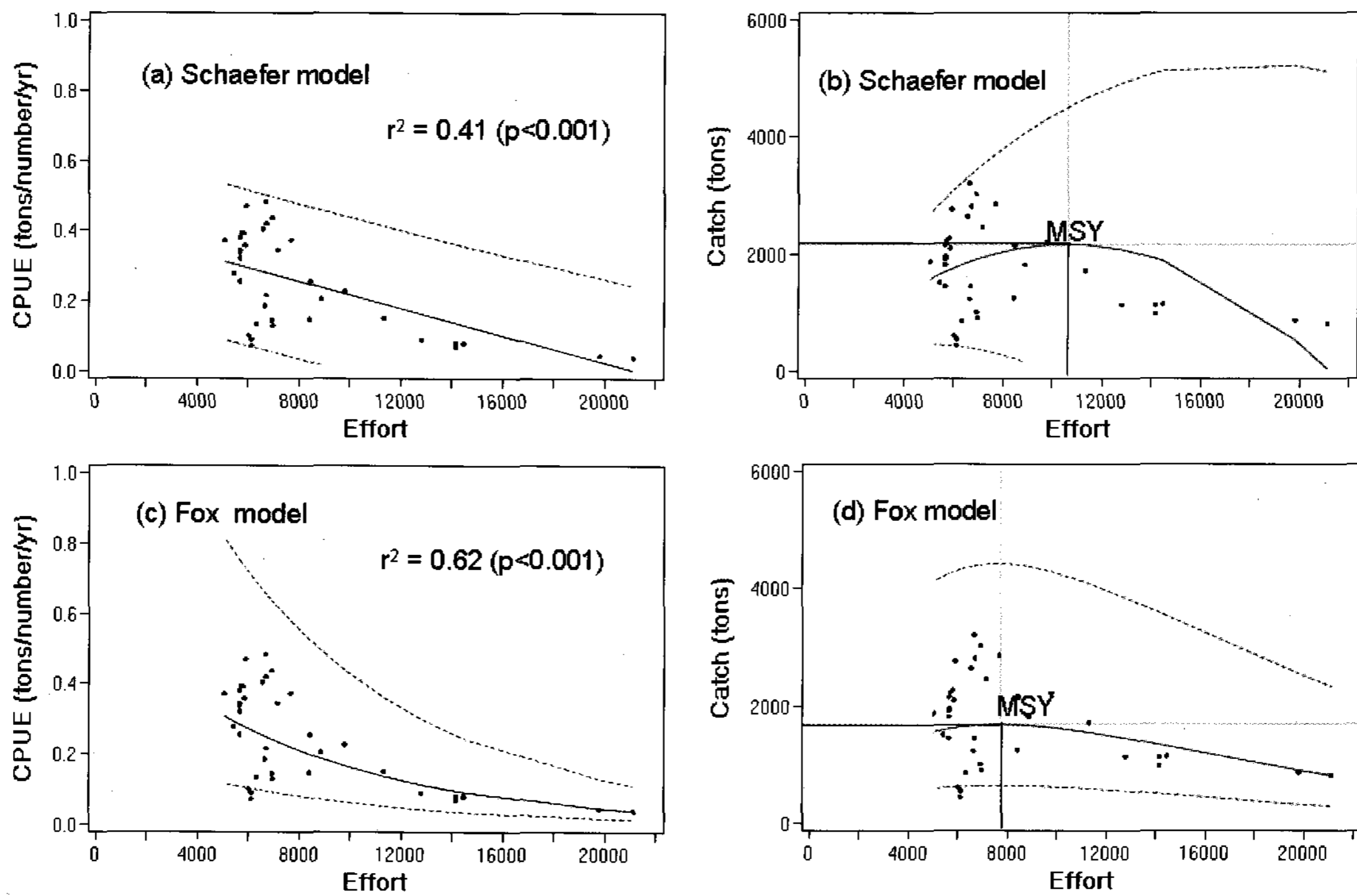


Fig. 2. Comparison of the Schaefer (a, b) and Fox models (c, d) with respect to fitting annual catch per unit effort (CPUE) and annual catch (metric tons) with fishing effort (number of divers) for turban shell, *Batillus cornutus* off Jeju Island from 1968 to 2006. The derived curves (solid line), their 95% prediction bands (dotted line) and the estimates of maximum sustainable yield (MSY) are also illustrated.

Table 1. Comparison of the bootstrap and Bayesian methods with respect to the maximum sustainable yield (MSY) of turban shells in Jeju Island and the corresponding fishing effort at MSY (FMSY) estimated by the Schaefer and Fox models, and their standard error (SE), lower (2.5%) and upper (97.5%) percentile confidence limit (CL). The unit of MSY is metric ton and the unit of FMSY is the number of divers

Model	Parameter	Method	Estimate	SE	Lower CL	Upper CL
Schaefer	MSY	Bootstrap	2,167	161	1,856	2,499
		Bayesian	2,233	770	1,754	2,932
	FMSY	Bootstrap	10,600	789	8,690	11,783
		Bayesian	11,110	6,187	8,363	16,650
Fox	MSY	Bootstrap	1,681	137	1,421	1,946
		Bayesian	1,707	138	1,454	1,999
	FMSY	Bootstrap	7,720	621	6,571	9,053
		Bayesian	7,778	1,077	6,071	10,270

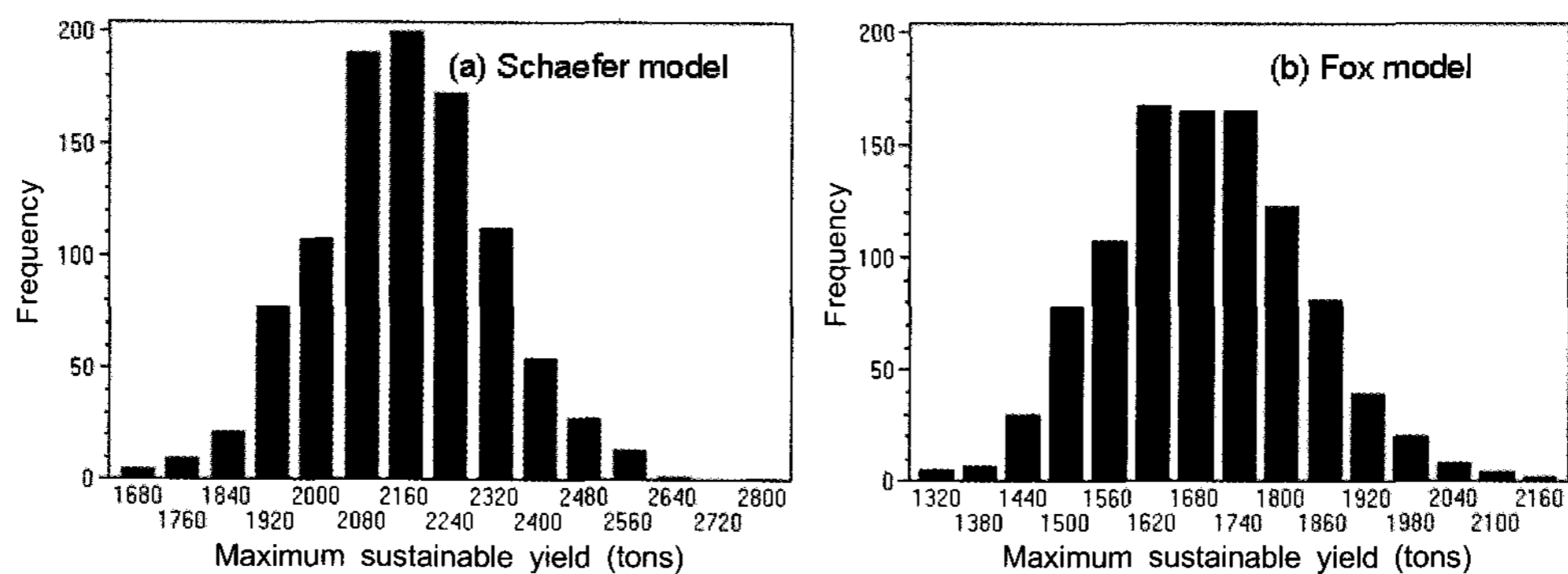


Fig. 3. Frequencies of estimates of the maximum sustainable yield derived from 1,000 bootstrap samples (N=39) based on (a) the Schaefer model and (b) the Fox model.

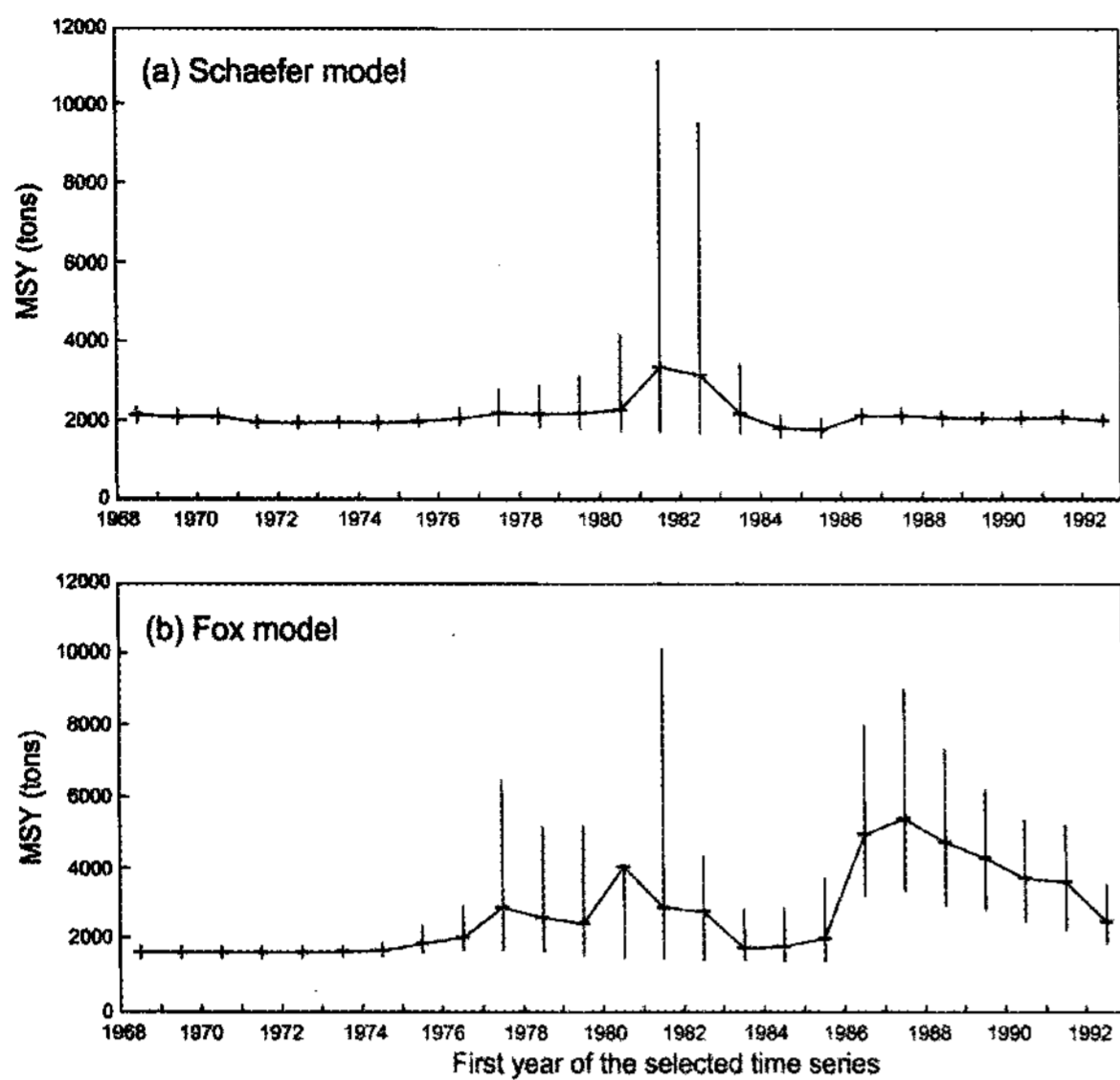


Fig. 4. Mean (line and horizontal bar) and 95% bootstrap percent ile confidence interval (vertical line) for estimates of the maximum sustainable yield for turban shells derived from 1,000 bootstrap samples ( $N=100$ ) with varying the first year from 1968 to 1992 in sequentially selecting data from the original (1968-2006) series. (a) Schaefer model, (b) Fox model.

시작년도를 1968년부터 1992년까지 순차적으로 달리하면서 살펴본 결과는 Fig. 4에 나타내었다. Schaefer 모델의 경우 대체로 2,000톤 내외에서 MSY가 추정되었으나 1981년 또는 1982년 이후의 자료만을 선택할 경우 추정되는 MSY는 유달리 높아져 3,000톤 이상으로 추정되어졌다 (Fig. 4a). Fox 모델의 경우는 시작 년도가 1968-1976년까지는 원래 MSY추정치 약 1,700톤에 머물렀으나 1977-1992년을 시작년도로 해서 시계열 자료를 부분선택했을 경우는 추정되는 MSY가 크게 요동쳐서 최대 5,400톤까지 나타났었다 (Fig. 4b). 한편 시작년도를 달리했을 때 95% 신뢰구간 변동을 보면 두 모델 모두에서 그 상한 2.5% 구간은 MSY 추정치와 같은 패턴으로 변동했으나 그 하한 2.5% 구간은 비교적 견고하여 Schaefer 모델의 경우 약 2,000톤 부근에서, Fox 모델의 경우 약 1,800톤에 머물렀다. 그러나 Fox 모델의 경우 1986년 이후를 시작년도로 했을 경우 그 하한 2.5% 구간은 3,000톤이 넘어가기도 했다.

## 고 찰

시작 년도를 달리하면서 시계열 자료를 부분 선택했을 때 Schaefer와 Fox 모델 모두 MSY의 평균과 상한 2.5% 신뢰구간은 크게 변동했으나 그 하한 2.5% 신뢰구간은 비교적 견고하였으며 Schaefer 모델에서 더욱더 견고하여 안정된 경향을 보여주었다 (Fig. 4). 기존 방법처럼 MSY 추정치를 생물학적 허용량으로 쓸 경우 Schaefer 모델의 경우 1981-1982년부터 시작하는 시계열 자료를 쓸 경우 MSY가 과대평가되어 자원 고갈 위험도가 높아짐을 알 수 있으며, Fox 모델의 경우 1977

년 이후자료를 쓸 경우 역시 과대평가하여 소라 자원 고갈 위험도가 높아짐을 알 수 있다. 따라서 제주도산 소라 자원관리를 위해서는 시계열 자료를 어떻게 일부 선택하느냐에 따라 추정치가 크게 변동하는 MSY의 평균이나 상한 신뢰구간을 쓰기보다는 견고한 95% 신뢰도 하한점을 생물학적 기준점으로 쓰는 것이 더 바람직한 것으로 생각한다. 또 신중한 수산자원관리 측면에서 보아도 MSY 보다는 95% 신뢰도 하한점이 생물학적 기준점으로 더 바람직하다고 본다. CPUE와 노력량 관계와 95% 예측구간을 보았을 경우 (Fig. 2a, c), Fox 모델이 Schaefer 모델보다 자료를 더 잘 피팅했다. 또 부트스트랩이나 베이지안 방법에서 반복과정을 수행했을 때 터무니없이 높은 값 (outliers)이 Fox 모델에서는 거의 나타나지 않았으나 Schaefer 모델에는 나타났다. 따라서 제주소라 자원관리를 위한 MSY 추정에는 Fox 모델이 더 적합하다고 생각한다. 제주도산 소라에 대한 생물학적 기준점으로 Fox 모델로 추정된 MSY의 95% 신뢰구간 하한선을 삼는다면 부트스트랩의 경우는 1,421톤, 베이지안 방법의 경우는 1,454톤으로 나타나 둘 방법에서 유의한 차이가 없었다. 따라서 제주도산 소라 관리를 위한 생물학적 허용량 (allowable biological catch)으로 MSY 추정치보다는 95% 신뢰구간의 하한점으로 잡는 것이 위험도를 더 줄여줄 것으로 보며, 이 경우 노력량은 6,000-6,500명에 해당한다. 한편 노력량은 꾸준히 줄어들어 1995년 이후에는 6,000명 이하로 이미 내려갔기 때문에 노력량보다는 어획량을 규제하는 것이 바람직하다고 본다. 그러나 우리가 제시하는 생물학적 허용량으로서 95% 신뢰도 하한점은 10년 이상 장기적인 관점에서 제시하는 것이며 단기적인 소라 자원 변동에 따라서 다른 관리 방안이나 생물학적 기준점이 나올 수 있을 것으로 본다. 이런 신뢰도 95% 하한선이 소라뿐만 아니라 다른 TAC 대상어종이나 다른 생물학적 기준점에서도 안정되고 견고한지 여부는 추가적인 분석과 검토가 필요하다. 수산자원관리에서 불확실성을 어떻게 정량화하고 관리 정책에 반영할 것인가는 미국이나 유럽에서는 1990년대부터 활발히 연구되어 많은 성과들이 나오고 있으며 이런 성과들은 생태학이나 환경 분야로 그 적용 범위를 넓혀갈 것으로 보인다 (Harwood and Stokes, 2003). 우리나라 수산자원관리에서는 아직 이런 시도가 없었으며 이 연구는 가장 초보적인 단계로서 불확실성을 정량화해보고 여러가지 생물학적 기준점들이 어떻게 변동할 수 있는가 간단히 고찰해보았다. 그 결과 제주 소라 MSY의 경우 평균보다는 신뢰도 95%에서 하한점을 쓰는 것이 더 견고한 것으로 나타났는데 다른 어종이나 다른 생물학적 기준점에 대해서도 같은 현상이 나타나지는 더 진단하고 검토한 뒤 위험도를 효율적으로 줄일 수 있는 생물학적 기준점을 개발해야할 것으로 본다. 앞으로 여러가지 수산관리 정책들이나 평가모델들을 서로 결합하여 그 불확실성과 위험도를 정량화해서 연구자들이 정책입안자들에게 더 나은 도움 말을 줄 수 있도록 해야 할 것이다. 이를 위해서는 우선 다양한 수산자원 평가모델들이 개발되어야 하며 어업생산통계의 정

확성을 높이고 직접 자원조사의 디자인이나 질도 개선해야 한다. 그러나 이러한 노력으로도 불확실성을 모두 줄일 수는 없으며 이와 병행하여 어떻게 불확실성을 정량화하여 정책에 반영하여 수산자원이나 환경에서 큰 피해를 줄일 수 있는지 관련 수산 해양학자들이 앞으로 더 연구 검토해보아야 할 것이다. 마지막으로 우리나라에서 수산자원관리 방법으로 주로 쓰고 있는 총허용어획량 제도와 병행하여 불확실성을 더 효율적으로 처리할 수 있는 해양보호구역(marine protected area) 네트워크 디자인과 운영도 적극 검토해야 할 것으로 본다 (Houde and Roberts, 2004; Pitchford et al., 2007).

## 사 사

이 연구는 국립수산과학원 경상과제 연근해 주요 어업자원 평가 관리(세부과제명, RP-2008-FR-007)의 지원에 의해 운영되었다.

## 참 고 문 헌

- Congdon, P. 2003. Applied Bayesian Modelling. Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1-478.
- FAO. 2007. The State of World Fisheries and Aquaculture 2006. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Rome, Italy, 1-162.
- Fogarty, M.J., A.A. Rosenberg and M.P. Sissenwine. 1992. Fisheries risk assessment: sources of uncertainty. Environ. Sci. Technol., 26, 440-447.
- Harwood, J. and K. Stokes. 2003. Coping with uncertainty in ecological advice: lessons from fisheries. Trend. Ecol. Evol., 18, 617-622.
- Houde, E.D. and S.J. Roberts. 2004. Marine protected areas: an old tool for new circumstances. Am. Fish. Soc. Symp., 42, 23-35.
- Hoyle, S.D. and D.S. Cameron. 2003. Confidence intervals on catch estimates from a recreational fishing survey: a comparison of bootstrap methods. Fish. Manage. Ecol., 10, 97-108.
- Kim, D. 2003. An economic analysis of the quota allocation strategies in the total allowable catch fisheries policy. Kor. J. Agric. Econ., 44, 165-182.
- King, M. 1995. Fisheries Biology, Assessment and Management. Fishing News Books, Oxford, UK, 1-341.
- Manly, B.F.J. 2006. Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology. CRC, Boca Raton, FL, USA, 1-455.
- MOMAF. 2007. Statistic Database for Fisheries Production. Retrieved from <http://fs.fips.go.kr/main.jsp> on March 14, 2007.
- NFRDI. 2007. Stock assessment and fishery evaluation report of year 2008. TAC-based fisheries management in the adjacent Korean waters. Report of Stock Assessment. National Fisheries Research and Development Institute, Busan, Korea.
- Pitchford, J.W., E.A. Codling and D. Psarra. 2007. Uncertainty and sustainability in fisheries and the benefit of marine protected areas. Ecol. Model., 207, 286-292.
- Punt, A.E. and R.A.Y. Hilborn. 1997. Fisheries stock assessment and decision analysis: the Bayesian approach. Rev. Fish. Biol., 7, 35-63.
- SAS. 1989. SAS/STAT User's Guide. Version 6. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Zhang, C.I. 2000. New Approaches in Fisheries Assessment and Management under the EEZ Regime. Proceedings on Prospects of Marine Environments and Marine Bioresources in the 21st Century, Yeungnam University, Korea.

---

2008년 1월 2일 접수

2008년 3월 31일 수리