

## 잉여생산량을 추정하는 모델과 파라미터 추정방법의 비교

권유정 · 장창익<sup>1\*</sup> · 표희동<sup>2</sup> · 서영일

국립수산과학원 자원관리과, <sup>1</sup>부경대학교 해양생산시스템관리학부,  
<sup>2</sup>부경대학교 해양산업경영학과

### Comparison of models for estimating surplus productions and methods for estimating their parameters

Youjung KWON, Chang Ik ZHANG<sup>1\*</sup>, Hee Dong PYO<sup>2</sup> and Young Il SEO

*Fisheries Resources Management Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea*

<sup>1</sup>*Division of Marine Production System, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea*

<sup>2</sup>*Department of Marine Business & Economics, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea*

It was compared the estimated parameters by the surplus production from three different models, i.e., three types (Schaefer, Gulland, and Schnute) of the traditional surplus production models, a stock production model incorporating covariates (ASPIC) model and a maximum entropy (ME) model. We also evaluated the performance of models in the estimation of their parameters. The maximum sustainable yield (MSY) of small yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis*) in Korean waters ranged from 35,061 metric tons (mt) by Gulland model to 44,844mt by ME model, and fishing effort at MSY ( $f_{MSY}$ ) ranged from 262,188hauls by Schnute model to 355,200hauls by ME model. The lowest root mean square error (RMSE) for small yellow croaker was obtained from the Gulland surplus production model, while the highest RMSE was from Schnute model. However, the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) was from the ME model, but the ASPIC model yielded the lowest coefficient. On the other hand, the MSY of Kapenta (*Limnothrissa miodon*) ranged from 16,880 mt by ASPIC model to 25,373mt by ME model, and  $f_{MSY}$ , from 94,580hauls by ASPIC model to 225,490hauls by Schnute model. In this case, both the lowest root mean square error (RMSE) and the highest coefficient of determination ( $R^2$ ) were obtained from the ME model, which showed relatively better fits of data to the model, indicating that the ME model is statistically more stable and robust than other models. Moreover, the ME model could provide additional ecologically useful parameters such as, biomass at MSY ( $B_{MSY}$ ), carrying capacity of the population ( $K$ ), catchability coefficient ( $q$ ) and the intrinsic rate of population growth ( $r$ ).

Keywords: Surplus production, Maximum entropy, ASPIC, Maximum sustainable yield, Fishing effort at MSY

\*Corresponding author: [cizhang@pknu.ac.kr](mailto:cizhang@pknu.ac.kr), Tel: 82-51-629-5892, Fax: 82-51-629-5886

## 서 론

잉여생산량모델은 자원생물의 연령조성이나 체장조성 자료를 이용할 수 없거나 생태학적 파라미터를 추정할 수 없을 때 어획자료를 기반으로 최대지속적생산량 (maximum sustainable yield, MSY)과 이에 해당하는 어획노력량을 추정하여 자원관리에 사용할 수 있는 유용한 모델이다 (Zhang et al., 1991).

잉여생산량은 자원의 성장률 및 환경수용력과 관계되며, 잉여생산량은 어획이 없을 때의 평형 상태에서 얻어지는 잉여량을 생산량, 즉 어획량으로 계산하기 때문에 전통적인 잉여생산량모델들은 대상자원이 평형상태임을 가정한다 (Zhang, 2010). 대부분의 전통적인 잉여생산량모델들은 잉여생산량을 추정하는데 있어서 연간 어획량과 어획노력량 자료가 사용된다 (Schaefer, 1954, 1957; Pella and Tomlinson, 1969; Fox, 1974). 연간 어획량과 어획노력량만을 사용하여 잉여생산량을 추정하는 모델들은 현실적으로 모순된 가정들이 많으나, 필요한 자료의 수가 적고 모델의 개념이 간단하여 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있다. Csirke and Caddy (1983)는 어획노력량이 어획사망계수에 직접 비례한다는 가정에 모순이 있음을 지적하고 어획노력량을 사용하는 대신 전사망계수나 어획사망계수를 사용하는 모델을 개발하였다. 그리고 Zhang (1987)은 단위노력당어획량 (CPUE)은 적합한 자원량 지수가 될 수 없다는 인식하에 생체량과 어획량을 사용하는 모델을 개발하였다.

또한, 자원평가를 위한 대부분의 대상자원은 현재 어획되고 있는 자원들이기 때문에 이러한 자원을 대상으로 잉여생산량모델을 적용할 경우 평형상태에 대한 가정은 현실적으로 맞지 않다. 이 문제를 해결하기 위해 ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariates)모델이 개발되었다 (Prager, 1992a, 1992b). ASPIC모델은 평형상태에 대한 가정이 없이 관측오차를 사용하여 자원의 어획자료를 잉여생산량모델에

적합시켜 합리적인 파라미터의 추정이 가능하도록 하는 모델이다 (Prager, 2005). ASPIC모델은 전통적인 잉여생산량모델에 파라미터들을 추정하는 값에 대한 초기가정을 설정하여 편차수정을 위해 붓스트랩과 비모수 신뢰구간을 사용한다. 전통적인 잉여생산량모델과는 다르게 ASPIC모델에서는 매년의 어획량이 어획노력량 (혹은 CPUE) 보다 정확하게 추정되었다는 가정하에서 모델을 적합시킨다. ASPIC에서 사용하는 비선형회귀방법은 상대적으로 시작년도 자료에 민감하지 않으며, 가정을 많이 필요로 하지 않기 때문에 합리적인 파라미터의 추정이 가능하다. ASPIC모델은 현재 대서양다랑어보존위원회 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, ICCAT)에서 다랑어류 및 새치류의 자원량 추정 및 평가에 사용되고 있다 (ICCAT, 2008, 2009).

전통적인 잉여생산량모델과 ASPIC모델은 Schaefer (1954, 1957)모델식을 근간으로 하고 있기 때문에, MSY를 추정하는데 필요한 자료의 수보다 추정하는 파라미터의 수가 더 많은 문제 (ill-posed)가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 제시된 방법이 최대엔트로피모델 (maximum entropy model)이다. 최대엔트로피모델은 Shannon (1948)에 의해 제안되었고, Jaynes (1957a, 1957b), Levine (1980)에 의해 일반화되었으며, Golan et al. (1996)에 의해 어업에 적용되었다. 이 모델은 추정하고자 하는 파라미터를 주어진 제약조건 내에서 파라미터가 가질 수 있는 확률분포를 추정하여 파라미터가 자료를 가장 잘 설명할 수 있는 이상적인 값을 추정하는 모델이다. 전통적인 잉여생산량모델과 ASPIC 모델은 필요한 자료의 수보다 추정하는 파라미터의 수가 더 많은 문제로 인하여 파라미터를 추정할 때 사용되는 자료에 의해 파라미터들의 추정치가 민감하게 영향을 받는 대신, 최대엔트로피모델은 파라미터를 추정함에 있어서 초기조건을 두어 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않

는다는 장점이 있다.

이러한 모델들의 파라미터를 추정하는 방법에는 선형회귀, 중회귀 등의 방법들이 있다. 선형회귀방법에 의해 파라미터를 추정하는 방법은 연도별 어획량과 어획노력량에 대한 일차식의 형태로 파라미터들을 추정하여 MSY와 fMSY를 계산하는 방법이다. 중회귀방법은 세계 이상의 파라미터를 중회귀분석에 의해 추정하는 방법이다. 파라미터 추정에는 자료의 형태 역시 중요하다. 동일한 연간 어획량과 어획노력량 자료를 사용할 때도, Gulland (1961)는 인위적인 평형상태를 가정하기 위해 각 자료를 2년에서 3년 단위의 평균값을 사용하여 2개의 파라미터를 추정하며, Schnute (1977)는 중회귀식을 사용하여 내적증가율 ( $r$ )과 최대자원량 ( $B_{\infty}$ ) 및 어획능률 ( $q$ )을 추정한다.

본 연구는 1) MSY를 추정하는 모델들을 실제 어업자료를 적용하여 분석 비교하고, 2) 모델의 파라미터를 추정하는 방법을 비교하여, 3) 자원 평가에 사용되는 자료가 부족한 자원에 대해 정확한 평가를 할 수 있는 방법을 분석 비교하는데 목적이 있다.

### 자료 및 방법

Zhang et al. (1992)에서 제시된 1970년부터

**Table 1. Annual catch, effort and CPUE of *Pseudosciaena polyactis* by large bottom pair trawl in Korean waters (Zhang et al., 1992)**

Year	Catch (mt)	Effort (haul)	CPUE (kg/haul)
1970	31,765	308,998	102.8
1971	24,554	293,007	83.8
1972	25,352	304,712	83.2
1973	24,947	198,939	125.4
1974	54,130	220,849	245.1
1975	40,056	229,022	174.9
1976	45,456	200,335	226.9
1977	26,216	250,631	104.6
1978	25,048	448,889	55.8
1979	34,754	520,269	66.8
1980	48,843	453,089	107.8
1981	34,477	270,196	127.6
1982	18,330	297,083	61.7

1982년까지 한국 근해에서 대형기선저인망쌍끌이 어업에 의해 어획된 참조기 (*Pseudosciaena polyactis*) 어획량 및 CPUE자료와 Tendaupenyu (2012)에서 제시된 남아프리카 잠비아와 잠바브웨 사이에 있는 Kariba호수에서 어획되는 Kapenta (*Limnothrissa miodon*)의 연간 어획량과 노력량 자료를 사용하여 잉여생산량 추정모델과 파라미터 추정방법의 비교연구를 수행하였다 (Tables 1 and 2).

**Table 2. Annual catch, effort and CPUE of *Limnothrissa miodon* (Tendaupenyu, 2012)**

Year	Catch (mt)	Effort (haul)	CPUE (mt/haul)
1974	487	615	0.792
1975	654	1,294	0.505
1976	1,050	1,833	0.573
1977	1,171	3,111	0.376
1978	2,772	5,903	0.470
1979	4,874	12,847	0.379
1980	8,395	33,516	0.250
1981	12,006	40,935	0.293
1982	10,989	49,462	0.222
1983	14,830	60,948	0.243
1984	18,106	76,470	0.237
1985	24,179	78,781	0.307
1986	26,543	86,310	0.308
1987	24,818	96,347	0.258
1988	27,272	95,699	0.285
1989	30,521	98,359	0.310
1990	30,942	104,131	0.297
1991	28,564	109,027	0.262
1992	27,599	120,325	0.229
1993	29,680	119,386	0.249
1994	28,142	114,711	0.245
1995	23,954	130,824	0.183
1996	23,016	119,217	0.193
1997	24,847	122,069	0.204
1998	25,110	128,245	0.196
1999	20,163	124,051	0.163
2000	19,363	121,019	0.160
2001	18,000	112,500	0.160
2002	15,150	116,538	0.130
2003	14,981	136,191	0.110
2004	15,309	127,576	0.120
2005	16,409	124,394	0.132
2006	20,162	123,070	0.164
2007	20,416	109,565	0.186
2008	20,017	130,306	0.154
2009	19,721	150,332	0.131

전통적 잉여생산량모델 (traditional surplus production models)

본 연구에서 전통적 잉여생산량모델은 사용되는 자료의 형태 및 파라미터를 추정하는 방법에 따라 세 가지로 나누었다. 첫 번째 전통적 잉여생산량모델은 매년간의 어획량 및 단위노력당 어획량 (CPUE) 자료를 사용하는 Schaefer (1954, 1957) 모델로 그 모델식은 식 (1)과 같다.

$$Y^* = U_\infty f - [U_\infty (q/r)] f^2 \quad (1)$$

여기서  $Y^*$ 는 연간평형생산량,  $U_\infty$ 는 최대단위노력당어획량을 나타내는 파라미터이며,  $q$ 는 어획능력,  $r$ 는 자원의 내적자연증가율,  $f$ 는 어획노력량이다. 위 식을 미분해서 최대치를 구하기 위하여 0으로 놓고 그 때의 연간평형생산량 ( $Y^*$ )을 구하면,  $Y^* = U_\infty/4q$ 가 되며, 이때의  $Y^*$ 가 최대지속적생산량 (MSY)이다.

두 번째 전통적 잉여생산량모델은 인위적인 평형상태를 만들어 자료를 사용하는 Gulland 모델이다. 어업이 되고 있는 자원에 대해 평형상태를 가정하여 전통적 잉여생산량모델에 적용하기에는 자료가 적합하지 않기 때문에, Gulland (1961)는 이러한 자료에 대해 연간 어획량 및 CPUE 자료 대신 2년 단위로 자료를 평균하여 이 평균값을 인위적인 평형상태라고 가정하여 잉여생산량모델에 적용시켰다.

세 번째 전통적 잉여생산량모델은 근사치 추정을 통해 중회귀분석으로 잉여생산량모델의 파라미터들을 추정하는 Schnute 모델이다. 세 번째 방법의 모델식 (Schnute, 1977)은 식 (3)과 같다.

$$\ln\left(\frac{\bar{U}_{t+1}}{\bar{U}_t}\right) = r - \frac{r}{qB_\infty} \left(\frac{\bar{U}_t + \bar{U}_{t+1}}{2}\right) - q \left(\frac{\bar{f}_t + \bar{f}_{t+1}}{2}\right) \quad (3)$$

여기서  $\bar{U}_t$ 는  $t$ 년의 평균 CPUE,  $r$ 는 내적자연증가율,  $q$ 는 어획능력,  $B_\infty$ 는 최대자원량,  $\bar{f}_t$ 는  $t$ 년의 어획노력량을 나타낸다. 여기서  $r, B_\infty, q$ 는 어획량과 노력량 자료를 사용하여 중회귀분석으로

추정한다.

ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariates) 모델

ASPIC 모델에서 어획량 및 상대적 풍도 (또는 노력량) 자료를 이용하여 잉여생산량모델에 의해 MSY, MSY시의 자원량 ( $B_{MSY}$ ) 및 어획강도 ( $f_{MSY}$ ) 등을 추정하는 모델이다. 생산량에 기인하여 자원량의 변화율을 설명하는 미분방정식은 Graham-Schaefer (Graham, 1935; Schaefer 1954, 1957) 모델이며 식 (4)와 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = rB_t - \frac{r}{K} B_t^2 \quad (4)$$

여기서  $B_t$ 는 시간  $t$ 에서의 자원량,  $r$ 는 내적자연증가율,  $K$ 는 환경수용력이다. 식 (4)에 어획사망  $F_t$ 를 추가하면, 식 (5)와 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = (r - F_t)B_t - \frac{r}{K} B_t^2 \quad (5)$$

식 (5)에서  $\alpha_t = r - F_t, \beta = r/K$ 로 두면 식 (6)과 같다.

$$\frac{dB_t}{dt} = \alpha_t B_t - \beta B_t^2 \quad (6)$$

식 (6)은 시간에 대한 자원량에 대한 식이며, 여기서  $F_t$ 가 일정하다고 가정하고, 초기시간을  $t = \tau$ , 마지막 시간을  $t = \tau + 1$ 로 두면 식 (7)과 같다.

$$\hat{B}_{t+1} = \frac{\alpha_t B_t e^{\alpha_t}}{\alpha_t + \beta B_t (e^{\alpha_t} - 1)} \quad (7)$$

같은 시간에 대해 생산량에 대한 식은 식 (8)과 같다.

$$\hat{Y}_\tau = \int_{t=\tau}^{\tau+1} F_t \hat{B}_t dt \quad (8)$$

식 (8)을 적분하면 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{Y}_\tau = \frac{F_\tau}{\beta} \ln \left[ 1 - \frac{\beta \hat{B}_\tau (1 - e^{\alpha_\tau})}{\alpha_\tau} \right] \quad (9)$$

이 모델의 파라미터 추정에 필요한 기본 자료

는 어획량과 어획노력량 혹은 CPUE 자료이다. ASPIC모델에서 MSY를 추정을 위해서 몇 가지의 초기값이 사용된다. 초기값으로는 MSY, MSY시의 자원량에 대한 분석 시작 시점의 자원량의 비 ( $B_i/B_{MSY}$ ), 환경수용력 ( $K$ ), 어획능률 ( $q$ )이다. 초기값을 설정하는 기준은  $B_i/B_{MSY}$ 는 0.5를 기본값 (default value)으로 두고, MSY는 사용된 자료에서 어획량이 가장 많은 값의 절반으로 설정하였으며,  $K$ 는 가장 많은 어획량의 20배로 설정하였다 (Prager, 2005, 2011).  $q$ 는 최고 CPUE의 20배와 최고 어획량의 20배 값을 나눈 값으로 설정하였다.

#### 최대엔트로피모델 (maximum entropy model)

Shannon (1948)은 확률분포에서 불확실성이 최대가 되는 것으로 정의된 엔트로피 방법에서 시작되며 기본식은 식 (10)과 같다.

$$H(p) = -\sum_i p_i \ln p_i = -p \ln p \quad (10)$$

여기서  $p_i$ 는 파라미터  $i$ 에 대한 확률을 나타낸다.  $\sum_i p_i = 1$ 일때 최대엔트로피를 추정할 수 있다. 잉여생산량을 추정하기 위하여 Cobb-Douglas의 생산량모델을 사용하였으며, 그 식은 식 (11)과 같다.

$$C_t = qE_t^\alpha B_t^\beta \exp(\varepsilon_t); B_{t+1} = \left[ B_t + rB_t \left( 1 - \frac{B_t}{K} \right) - C_t \right] \exp(\mu_t) \quad (11)$$

여기서  $C$ 는 어획량,  $q$ 는 어획능률,  $E_t$ 는  $t$ 년의 어획노력량,  $B_t$ 는  $t$ 년의 자원량,  $r$ 은 내적증가율,  $K$ 는 환경수용력,  $\varepsilon_t, \mu_t$ 는  $t$ 년의 어획량과 자원량에 대한 오차,  $\alpha, \beta$ 는 어획노력량과 자원량에 대한 상수이다.

최대엔트로피모델을 이용하여 식 (11)의 파라미터인  $q, \alpha, \beta, r, K, B, \varepsilon, \mu$ 를 추정하는 식은 식 (12)와 같다.

$$q = p_1^q \cdot 0 + p_2^q \cdot 0.5 + p_3^q \cdot 1; \alpha = p_1^\alpha \cdot 0 + p_2^\alpha \cdot 0.5 + p_3^\alpha \cdot 1; \\ \beta = p_1^\beta \cdot 0 + p_2^\beta \cdot 0.5 + p_3^\beta \cdot 1;$$

$$r = p_1^r \cdot 0 + p_2^r \cdot \frac{m}{2} + p_3^r \cdot m; K = p_1^K \cdot 0 + p_2^K \cdot \frac{n}{2} + p_3^K \cdot n; \\ B_t = p_1^B \cdot 0 + p_2^B \cdot \frac{h}{2} + p_3^B \cdot h; \varepsilon_t = p_1^\varepsilon \cdot (-e) + p_2^\varepsilon \cdot 0 + p_3^\varepsilon \cdot (+e); \\ \mu_t = p_1^\mu \cdot (-e) + p_2^\mu \cdot 0 + p_3^\mu \cdot (+e) \quad (12)$$

여기서  $q, \alpha, \beta$ 의 범위는 0에서 1사이에 있다고 가정하였으며,  $m=2, n=K/2, h=K/4, e=0.1$ 로 가정하였다 (Pyo, 2006). 식 (12)를 제약조건으로 하고 확률조건을 만족하는 식 (13)을 GAMS (general algebraic modeling system)를 이용하여 파라미터를 추정하였다.

$$\text{Max} \left[ -\sum_g \sum_j p_j^g \ln p_j^g - \sum_t \sum_i \sum_j p_i^t \ln p_i^t \right] \quad (13)$$

여기서  $\sum_j p_j^g = 1; \sum_j p_j^t = 1$ 이며,  $g=q, \alpha, \beta, r, K$ 이며,  $t=B, \varepsilon, \mu, t=1, 2, 3, \dots, n-1$ 이다 (Golan et al., 1996).

#### 모델검정

각 모델들에 의한 추정치와 실제 자료의 정확도를 평가하기 위해 오차의 제곱 평균 제곱근 (root mean square error, RMSE)을 계산하였으며, 식 (14)와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y(x_i) - \hat{y}(x_i)]^2} \quad (14)$$

여기서  $y(x_i)$ 는  $x_i$ 에서의 실제 CPUE,  $\hat{y}(x_i)$ 는  $x_i$ 에서의 예측 CPUE,  $n$ 은 근사모델 평가 (validation)를 위한 자료의 수를 나타낸다.

또한, 모델에 대한 자료의 적합도를 평가하기 위해 결정계수 (coefficient of determination,  $R^2$ )를 계산했으며, 식 (15)와 같다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i \quad (15)$$

여기서  $y_i$ 는 실제 CPUE,  $\hat{y}_i$ 는 모델에 의해 계산된 CPUE이다.

결 과

전통적 잉어생산량모델 (traditional surplus production models)

한국 대형기선저인망 쌍끌이어업에 의해 어획된 참조기의 어업자료를 1970년부터 1982년까지의 연간 노력량 및 CPUE자료를 사용하여 전통적 잉어생산량모델에 적용하였다 (Table 1). 첫 번째 전통적 잉어생산량모델인 Schaefer모델은 매년간의 어획량 및 CPUE자료를 사용한 방법으로서 추정된 최대지속적생산량 (maximum sustainable yield, MSY)는 37,067mt이었으며, MSY시의 어획노력량 ( $f_{MSY}$ )는 316,272haul이었다. 여기서 오차의 제곱 평균 제곱근 (root mean square error, RMSE)는 44.934, 결정계수 (coefficient of determination,  $R^2$ )는 0.402로 계산되었다. 인위적으로 평형상태를 가정한 두 번째 전통적 잉어생산량모델인 Gulland모델에서는 추정된 MSY는 35,061mt이었으며,  $f_{MSY}$ 는 304,710haul, RMSE는 37.641,  $R^2$ 는 0.423으로 계산되었다. 중회귀분석에 의한 전통적 잉어생산량모델인 Schnute모델에서 추정된 MSY는 42,488mt,  $B_{MSY}$ 는 64,230mt였으며,  $f_{MSY}$ 는 262,188haul로 추정되었다. 여기서는 MSY와  $f_{MSY}$  추정치와 더불어 생태학적으로 중요한 파라미터인 환경수용력 ( $K$ )과 어획능률 ( $q$ ), 내적증가율 ( $r$ )도 중회귀분석에 의해 추정되었는데,  $K=128,460mt$ ,  $q=2.52E-06$ ,  $r=1.323$ 이었다. RMSE는 53.005,  $R^2$ 는 0.402로 계산되었다 (Fig. 1과 Table 3). 식 (1)과 식 (3)에 의해 추정된 생산

량을 어획노력량의 관계를 나타내는 Fig. 1a와 Fig. 1b에서 보여주는 바와 같이 Gulland모델의 추정치가 3 가지의 모델가운데서는 가장 실측치에 근접함을 알 수 있다.

Kapenta (*Limnothrissa miodon*)의 어업자료인 1974년부터 2009년까지의 연간 노력량 및 CPUE자료를 사용하여 전통적 잉어생산량모델에 적용하였다 (Table 2). 첫 번째 전통적 잉어생산량모델인 Schaefer모델에서 추정된 MSY는 23,474mt이었으며,  $f_{MSY}$ 는 96,945haul로 추정되었다. RMSE는 0.078이었으며,  $R^2$ 는 0.681로 계산되었다. Gulland모델에서 추정된 MSY는

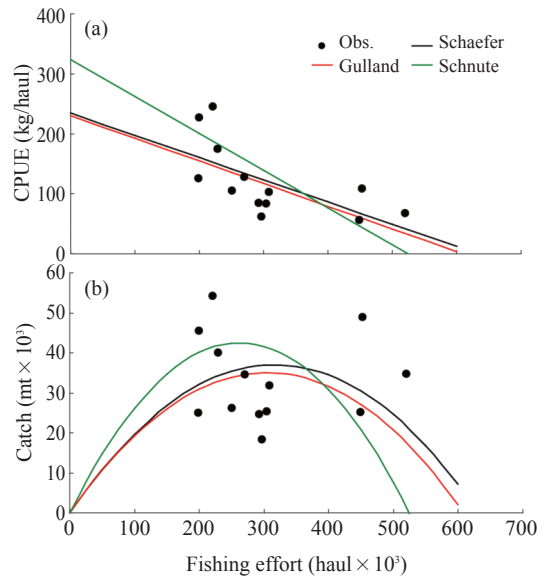


Fig. 1. The estimated CPUE (a) and catch (b) of *P. polyactis* by three models.

Table 3. Summary of the estimated results for *P. polyactis* by each model

Parameters	Traditional SP			ASPIC	ME
	Schaefer	Gulland	Schnute		
MSY (mt)	37,067	35,061	42,488	35,420	44,844
$B_{MSY}$ (mt)	—	—	64,230	54,130	202,000
$f_{MSY}$ (haul)	316,272	304,710	262,188	333,800	355,200
K (mt)	—	—	128,460	108,300	404,000
q	—	—	2.52E-06	1.96E-06	1.25E-06
r	—	—	1.323	0.390	0.444
$R^2$	0.402	0.423	0.402	0.344	0.775
RMSE	44.934	37.641	53.005	49.479	39.117

23,149mt이었으며,  $f_{MSY}$ 는 100,306haul, RMSE는 0.058,  $R^2$ 는 0.768로 계산되었다. 중회귀분석에

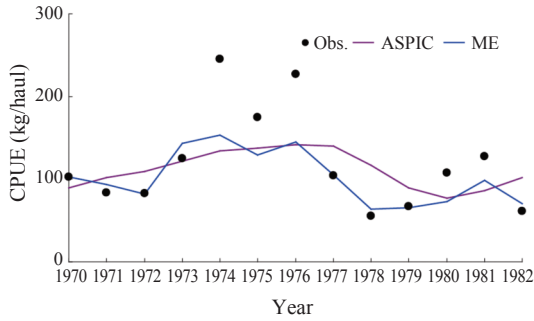


Fig. 2. The estimated annual CPUE of *P. polyactis* by ASPIC and ME models.

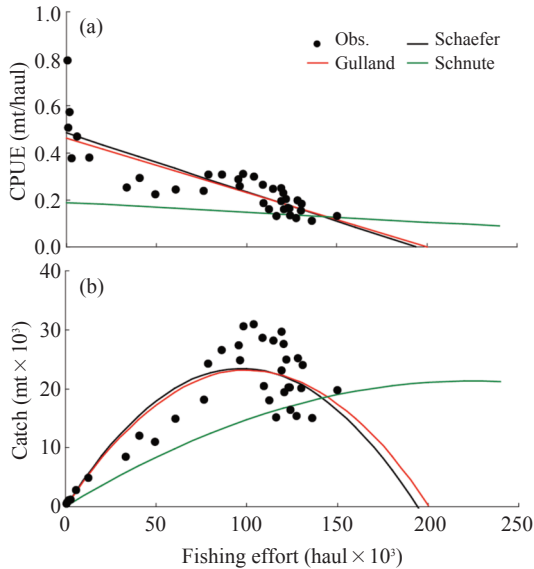


Fig. 3. The estimated CPUE (a) and catch (b) of *L. miodon* by three models.

의한 Schnute모델에서 추정된 MSY는 21,343mt이었으며,  $B_{MSY}$ 는 463,972mt,  $f_{MSY}$ 는 225,490haul로 추정되었다. 여기서,  $K=927,943mt$ ,  $q=2.04E-07$ ,  $r=0.092$ 로 추정되었다. RMSE는 0.166,  $R^2$ 는 0.681로 계산되었다 (Fig. 3과 Table 4). Gulland모델의  $R^2$ 가 가장 낮았으며, Fig. 3a와 b에서와 같이 추정치가 3 가지의 모델가운데서는 가장 실측치에 근접하였다.

ASPIC (A Stock-Production Model Incorporating Covariates)모델

ASPIC모델에서 추정된 참조기의 MSY는 35,420mt,  $B_{MSY}$ 는 54,130mt,  $f_{MSY}$ 는 333,800haul이었다.  $K=108,300mt$ ,  $q=1.96E-06$ ,  $r=0.390$ 로 추정되었으며, RMSE는 49.479,  $R^2$ 는 0.344로 계산되었다 (Fig. 2와 Table 3).

Kapenta의 MSY는 16,880mt,  $B_{MSY}$ 는 169,000mt,  $f_{MSY}$ 는 94,580haul로 추정되었으며,  $K=$

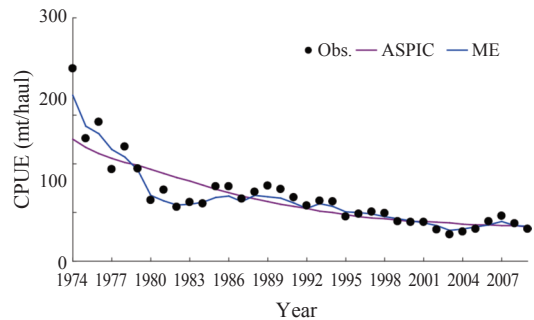


Fig. 4. The estimated annual CPUE of *L. miodon* by ASPIC and ME models.

Table 4. Summary of the estimated results for *L. miodon* by each model

Parameters	Traditional SP			ASPIC	ME
	Schaefer	Gulland	Schnute		
MSY (mt)	23,474	23,149	21,343	16,880	25,373
$B_{MSY}$ (mt)	—	—	463,972	169,000	120,250
$f_{MSY}$ (haul)	96,945	100,306	225,490	94,580	109,731
K (mt)	—	—	927,943	338,100	240,500
q	—	—	2.04E-07	1.06E-06	1.75E-06
r	—	—	0.092	1.465	0.422
$R^2$	0.681	0.768	0.681	0.752	0.951
RMSE	0.078	0.058	0.166	0.071	0.033

338,100mt,  $q=1.06E-06$ ,  $r=1.465$ 로 추정되었다. RMSE는 0.071,  $R^2$ 는 0.0752로 계산되었다 (Fig. 4와 Table 4).

#### 최대엔트로피모델 (maximum entropy model)

최대엔트로피모델에 의해 추정된 참조기의 MSY는 44,844mt이었으며,  $B_{MSY}$ 는 202,000mt,  $f_{MSY}$ 는 355,200haul로 추정되었다. 이 모델에서  $K=404,000$ mt,  $q=1.25E-06$ ,  $r=0.444$ 로 추정되었고, 이때 RMSE는 39.117였으며,  $R^2$ 는 0.775로 상당히 높은 값을 보였다 (Fig. 2와 Table 3). Fig. 2에서는 ASPIC모델보다 ME모델이 실측치의 변화를 가장 잘 설명하였다.

Kapenta의 추정된 MSY는 25,373mt이었으며,  $B_{MSY}$ 는 120,250mt,  $f_{MSY}$ 는 109,731 haul이었다. 이때  $K=240,500$ mt,  $q=1.75E-06$ ,  $r=0.422$ 로 추정되었으며, 이때 RMSE는 0.033으로 매우 낮았으며,  $R^2$ 는 0.951로 아주 높았다 (Fig. 4와 Table 4). Fig. 4에서는 ASPIC모델보다 ME모델이 실측치의 변화를 가장 잘 설명하였다.

### 고 찰

전통적 잉여생산량모델의 경우 일반적으로 평형상태를 가정하며, 단위노력당 어획량 (CPUE)와 어획노력량간의 직선관계를 가정한다 (Zhang, 2010). MSY와  $f_{MSY}$ 를 추정하는데 사용되는 어업자료는 추정된 결과에 매우 민감하게 반응하기 때문에 수집된 자료에 오류 등이 있을 시 결과에 큰 영향을 초래하여 비현실적인 값이 추정될 가능성이 크다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 ASPIC모델이나 최대엔트로피 (ME)모델과 같은 새로운 모델들이 개발되었다. 앞 부분에서 설명된 바와 같이 본 연구에서는 이 모델들을 두 개 어업자료에 적용하여 모델의 성취도와 적합도를 비교 분석하였다.

한국 대형기선저인망 쌍끌이어업에 의해 어획된 참조기의 어업자료를 사용하여 5가지 방법에 의해 추정된 참조기의 최대지속적생산량

(MSY)는 Gulland모델에 의한 35,061mt에서 최대엔트로피모델에 의한 44,844mt의 범위였다. MSY시의 어획노력량 ( $f_{MSY}$ )는 Schnute모델에 의한 262,188haul에서 최대엔트로피모델에 의한 355,200haul의 범위로 추정되었다. 오차의 제공 평균 제공근 (RMSE)은 전통적 잉여생산량 모델 중 두 번째인 인위적으로 평형상태를 계산하여 MSY를 추정한 Gulland모델의 RMSE가 가장 낮았으며 Schnute모델이 가장 높았다. 결정계수 ( $R^2$ )는 최대엔트로피모델이 가장 높았으며 ASPIC모델이 가장 낮았다. Kapenta의 경우 추정된 MSY는 ASPIC모델의 16,880mt에서 최대엔트로피모델의 25,373mt의 범위였으며,  $f_{MSY}$ 는 ASPIC모델의 94,580haul에서 Schnute모델의 225,490haul로 상대적으로 넓은 범위로 추정되었다. 참조기와 Kapenta에 대한 자료 중  $R^2$ 와 RMSE를 고려할 때 참조기보다 Kapenta의 자료가 모델들에 더 적합하였다. 일반적으로 잉여생산량모델에 사용되는 자료는 최소 10개년 이상의 자료를 사용하여야 하는데 (Fox, 1974), 참조기는 13개년의 자료만을 사용한 것에 반해 Kapenta는 35개년간의 자료를 사용하여 사용된 자료의 수에 대한 문제에 기인할 수 있다. 또한, 노력량에 대한 표준화 문제 등에 기인한 모델의 적합성에 대한 문제도 추후 연구되어야 할 것으로 생각된다.

전통적인 잉여생산량모델에서 수집된 자료를 그대로 사용하는 Schaefer모델과 인위적으로 평형상태를 가정한 방법의 경우인 Gulland모델은 MSY와  $f_{MSY}$ 의 추정은 가능하지만 기타 중요한 생태학적 파라미터들, 즉, MSY시의 자원량 ( $B_{MSY}$ )과 환경수용력 ( $K$ ), 내적자원증가율 ( $r$ )을 추정할 수 없기 때문에, 기타 생물학적 파라미터를 사용할 수 없다는 한계가 있다. 그러나 인위적으로 평형상태를 설정하는 Gulland모델이 RMSE와  $R^2$ 를 비교해 볼 때 연간 자료를 그대로 사용하는 Schaefer모델에 비해서는 상대적으로 양호한 추정방법으로 보인다. 또한, 전통적인 잉



여생산량모델 중 중회귀를 사용하는 방법인 Schnute모델은 자료에 대해 아주 민감한 것으로 알려져 있으며 (Zhang, 1991), 비평형상태를 가정하는 ASPIC모델은 모든 파라미터를 추정할 수는 있으나, 파라미터 추정치들이 자료에 대해 민감해서 이상적인 값을 추정하기에는 무리가 따른다. 예로, 내적증가율 ( $r$ )은 일반적으로 0과 1사이의 값이 이상적인 값으로 알려져 있으나, 두 어종에서 각각 1이상의 값으로 추정되었다. 반면에 최대엔트로피모델은 각 파라미터에 이론적으로 가능한 범위를 설정해서 확률치로 파라미터를 추정하여 MSY가 계산되기 때문에 추정되는 파라미터들에 대한 신뢰성이 높으며, 두 어업자원에 대해 모델검정에 사용된 RMSE와  $R^2$ 를 고려해 볼 때 MSY를 추정하는 가장 이상적인 모델이라 판단된다.

ASPIC모델은 기존의 전통적인 잉여생산량모델에서의 가정과는 달리 평형상태를 가정하지 않는다. 그러나 환경수용력 ( $K$ )을 추정할 때 초기값 (default value)을 설정한다. 이 경우 사용되는 어업자료의 특성에 맞추어 관측오차에 의해 환경수용력과 내적증가율 ( $r$ )을 추정하기 때문에 전통적인 잉여생산량모델과 마찬가지로 사용되어지는 어업자료에 민감하다. 또한,  $K$ 를 설정할 때 초기값이 사용되는 자료의 어획량 중 가장 큰 값의 2배에서 20배의 범위 내에서 설정되므로 (Prager, 2005, 2011), 그 값에 따라 추정되는 MSY의 결과가 큰 차이를 보이게 된다.

최대엔트로피모델은 각 파라미터들이 주어진 상수의 범위 내에서 확률론적으로 계산이 되기 때문에 추정된 파라미터들이 사용되는 자료에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 최대엔트로피모델은 비평형 상태를 고려하며, 관측된 자료에 오차가 있는 상태에서 최소한의 사전정보를 이용하여 자원평가에 필요한 파라미터들을 추정할 수 있는 방법이다 (Pyo, 2006). 이는 전통적인 잉여생산량모델에서와 같이 평형상태 및 어획노력량과 CPUE의 특정된 형태를 가정

할 필요가 없으며, ASPIC모델에서와 같이 추정된 파라미터들이 비현실적인 결과를 나타내지 않는 장점이 있다.

본 연구에서 분석된 참조기와 Kapenta 결과를 통해 전통적인 잉여생산량모델의 경우 MSY와  $f_{MSY}$ 를 추정하는 모든 파라미터들을 추정할 수 없었기 때문에 기인되는 결과의 신뢰성의 문제 및 비현실적인 가정에서 기인되는 문제들로 인하여 결과에서도 보여지는 것과 같이 다른모델에 비해 적합성이 낮은 문제를 야기하였다. ASPIC모델에서는 모델의 적합성 때문에 Kapenta의 내적증가율이 일반적인 값보다 크게 추정이 되었다. 그러나 최대엔트로피모델은 두 어종에 적용시켜본 결과  $R^2$ 가 다른 모델에 비해 가장 높았으며, RMSE도 가장 낮았기 때문에 이 두 어종에 가장 적합한 모델로 생각된다.

## 결론

Schaefer모델, Gulland모델, Schnute모델과 같은 전통적인 모델들과, 비평형상태를 가정하는 ASPIC모델, 파라미터들의 확률을 이용하는 최대엔트로피 (maximum entropy, ME)모델을 이용하여 MSY와  $f_{MSY}$  추정방법을 비교하였다. 한국 근해 참조기 (*Pseudosciaena polyactis*)의 MSY는 Gulland모델에서 추정된 35,061mt부터 ME모델에서 추정된 44,844mt의 범위로 추정되었으며,  $f_{MSY}$ 는 Schnute모델에서 262,188haul부터 ME모델에서의 355,200haul까지의 범위로 추정되었다. 가장 낮은 오차의 제곱평균 제곱근 (root mean square error, RMSE)는 Gulland모델이었으며, 반면에 가장 높은 RMSE는 Schnute모델이었다. 가장 높은 결정계수 (coefficient of determination,  $R^2$ )는 ME모델이었으나, ASPIC모델은 가장 낮은  $R^2$ 를 나타냈다. 반면에, Kapenta (*Limnothrissa miodon*)의 MSY는 ASPIC모델에서 16,880mt부터 ME모델의 25,373mt의 범위로 추정되었으며,  $f_{MSY}$ 는 ASPIC모델에서 94,580haul부터 Schnute 모델에서 225,490haul의 범위로 추정되었다. 이

어종에서는 가장 낮은 RMSE와 가장 높은  $R^2$ 가 모두 ME모델이었으며, 이는 모델과 자료의 적합도가 높다고 볼 수 있다. 또한, ME모델은 MSY시의 자원량 (BMSY), 환경수용력 ( $K$ ), 어획 능력 ( $q$ ) 및 자원의 내적증가율 ( $r$ )을 추정할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 국립수산과학원 (원양어업 자원평가 및 관리연구, RP-2013-FR-005)의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Csirke J and Caddy JF. 1983. Production modeling using mortality estimates. *Can J Fish Aquat Sci* 40, 43 – 51.
- Fox WW Jr. 1974. An overview of production modelling. Working document submitted to the workshop on population dynamics of Tuna, sponsored by the International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas, and held at Nantes, France, on September 2 – 7, 1974. WTPD – Nantes/74/13, 143 – 156.
- Golan A, Judge G and Karp L. 1996. A maximum entropy approach to estimation and inference in dynamic models or counting fish in the sea using maximum entropy. *Journal of Economic Dynamics and Control* 20, 559 – 582.
- Graham M. 1935. Modern theory of exploiting a fishery, an application to North Sea trawling. *J Cons int Explor Mer* 10, 264 – 274.
- Gulland JA. 1961. Fishing and the stocks of fish at Iceland. *Fish Invest minist Agric Fish Food GB (2 Sea Fish.)* 23, 1 – 32.
- ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2008. Report of the 2007 ICCAT Bigeye tuna stock assessment session. *Collect Vol Sci Pap ICCAT* 62, p. 143.
- ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2009. Report of the 2009 Atlantic swordfish stock assessment session. SCRS/2009/016 – SWO ATL Stock Assessment, p. 78.
- Jaynes ET. 1957a. Information theory and statistical mechanics. *Physics Review* 106, 620 – 630.
- Jaynes ET. 1957b. Information theory and statistical mechanics II. *Physics Review* 108, 171 – 190.
- Levine RD. 1980. An information theoretical approach to inversion problems. *Journal of Physics* 13, 91 – 108.
- Pella JJ and Tomlinson PK. 1969. A generalized stock production model. *Inter Am Trop Tuna Comm Bull* 13, 419 – 496.
- Prager MH. 1992a. ASPIC: A surplus-production model incorporating covariates. *ICCAT Collected Volume of Scientific Papers* 28, 218 – 229.
- Prager MH. 1992b. Recent Developments in Extending the ASPIC Production Model. *ICCAT Working Document SCRS/92/127*, p. 10.
- Prager MH. 2011. User's Manual for ASPIC: A Stock-Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program, p. 26.
- Prager MH. 2005. User's Manual for ASPIC: A Stock-Production Model Incorporating Covariates (ver. 5) and Auxiliary Program. *National Marine Fisheries Service Beaufort Laboratory Document BL – 2004 – 01*, p. 27.
- Pyo HD. 2006. A comparative analysis of surplus production models and a maximum entropy model for estimating the anchovy's stock in Korea. *J Fish Mar Sci Edu* 18, 19 – 30.
- Schaefer MB. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. *Inter. Am. Trop Tuna Comm Bull* 1, 25 – 56.
- Schaefer MB. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean. *Inter Am Trop Tuna Comm Bull* 2, 245 – 285.
- Schnute J. 1977. Improved estimates from the Schaefer production model: theoretical considerations. *J Fish Res Bd Can* 34, 583 – 603.

- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication. Bell System Technical Journal 27, 379–423.
- Tendaupenyu IH. 2012. A comparative analysis of surplus production models and maximum entropy model for estimating *Limnothrissa miodon* (Kapenta) stock in Lake Kariba. Master dissertation. Pukyong National University. p. 75.
- Zhang CI. 1987. Biology and population dynamics of Alaska plaice, *Pleuronectes quadrituberculatus*, in the eastern Bering Sea. Doctoral dissertation. University of Washington Seattle, p. 225.
- Zhang CI. 1991. Fisheries Resource Ecology. Usung Publ Co Seoul Korea, p. 399.
- Zhang CI. 2010. Marine Fisheries Resource Ecology. Sejong Publ Co Busan Korea, p. 561.
- Zhang CI, Gunderson DR and Sullivan PJ. 1991. Using data on biomass and fishing mortality in stock production modelling of flatfish. Neth J Sea Res 27, 459–467.
- Zhang CI, Kim S and Yoon SB. 1992. Stock assessment and management implications of small yellow croaker in Korean waters. Bull. Korean Fish Soc 25, 282–290.
- 
- 2012년 7월 26일 접수  
2012년 12월 16일 1차 수정  
2013년 2월 13일 2차 수정  
2013년 2월 15일 수리