

관리전략평가(Management Strategy Evaluation) 방법에 의한 현행 TAC (Total Allowable Catch) 의사결정 검토: 고등어(*Scomber japonicus*) 어업의 경우

김도율 · 서영일¹ · 현상윤*

부경대학교 수산과학대 자원생물학과, ¹국립수산과학원 연근해자원과

A Management Strategy Evaluation of the Current TAC (Total Allowable Catch) Regulation in Korea: The Case of Chub Mackerel *Scomber japonicus* Fisheries

Doyul Kim, Young Il Seo¹ and Saang-Yoon Hyun*

College of Fisheries Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

¹Coastal Water Fisheries Resources Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

Using the management strategy evaluation methods and data on the Korea chub mackerel *Scomber japonicus* where the state-space logistic production model is used as the operation and the estimation model respectively, we examined the effects of both Dorn's rule, α and the buffer value for ABC (allowable biological catch), which are used by the Korea fishery managers for decision rules. We set scenarios that have different pairs of buffer and α values, which include those currently used in the management in Korea. Under each scenario, we projected the fish population biomass until year 2050, during which ABC is determined in each year with the decision rule. We used three kinds of performance measures: (i) whether the biomass in 2050 is overfished; (ii) the average of annual yields over the simulation period; and (iii) the variability of annual yields over the period. We found that the current practice (buffer=0.9, and $\alpha = 0.05$) resulted in the best performance in terms of avoiding the "overfished" status. However, the current practice failed to reach the maximum average of the annual yields and led to larger uncertainty in the annual yields.

Keywords: Allowable biological catch, Buffer, Dorn's rule, Korea chub mackerel, MSE

서 론

과학연구에서 '실험'을 통해 새로운 가설검증을 하거나 혹은 새로운 개발품(예, 약, 사료, 등)의 효과를 검증하지만, 연구대상의 규모가 크거나 복잡한 경우 실험이 불가능하다. 후자의 경우 보통 시뮬레이션(모의실험)을 통해 해결한다. 1970년대 중반에 국제포경위원회(International Whaling Commission)는 관리전략평가(management strategy evaluation, MSE)란 시뮬레이션 방법으로 포경어업관리를 소개하였고(Punt and Donovan, 2007), 최근들어 국제 어리기관들도 MSE 방법을 통해 어업관리를 하고 있다. 예로, 알래스카만(Gulf of Alaska)의 명태

(walleye pollock *Theragra chalcogramma*) 개체군을 대상으로 하여 MSE 연구가 진행된 바 있다. A'mar et al. (2008)는 Gulf of Alaska 명태의 산란-가입 관계를 시나리오(a, 산란-가입이 독립적인 경우; b, Beverton-Holt model; c, Ricker model)로 하여 의사결정 규칙(decision rule)인 Dorn's decision rule을 평가하였다. 이후, A'mar et al. (2009a, 2009b)에서는 환경 변화(climate change) 및 체제 변환(regime shift)이 Gulf of Alaska 명태의 관리전략에 미치는 영향을 MSE로 평가하였다. 후속 연구로 A'mar et al. (2010)에서는 Gulf of Alaska 명태의 피식-포식 관계를 고려한 생태계 기반의 MSE 연구를 수행하였다. Punt and Ralton (2007)은 MSE를 이용하여 미국의 남획된 볼락(bo-

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5929 Fax: +82. 51. 629. 5931

E-mail address: shyun@pknu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2022.0946>

Korean J Fish Aquat Sci 55(6), 946-953, December 2022

Received 6 September 2022; Revised 26 October 2022; Accepted 18 November 2022

저자 직위: 김도율(대학원생), 서영일(연구관), 현상윤(교수)

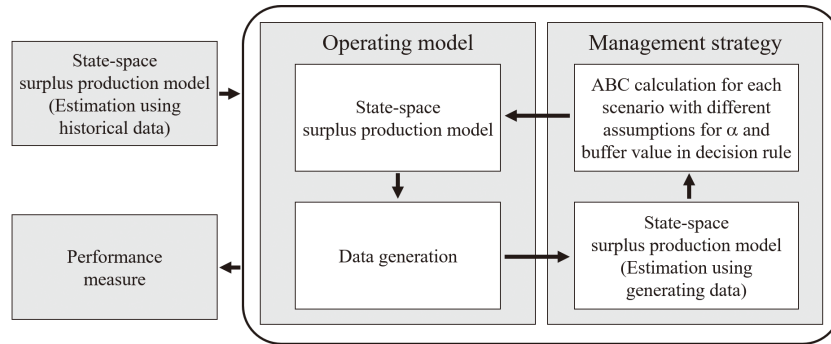


Fig. 1. Management strategy evaluation framework.

caccio *Sebastes paucispinis*, cowcod *S. levis*, canary rockfish *S. pinniger*, darkblotched rockfish *S. crameri*, Pacific ocean perch *S. alutus*, widow rockfish *S. entomelas*, and yelloweye rockfish *S. ruberrimus*) 개체군에 대한 수산자원 재건 계획 규칙(rebuilding revision rule)을 평가하였다. 뿐만 아니라, Punt et al. (2016)에서는 태평양 정어리(Pacific sardine)의 북쪽 계군에 대한 어획 통제 규칙(harvest control rule) 및 Bering-Chukchi-Beaufort의 수염고래(bowhead whale *Balaena mysticetus*)에 대한 적절한 어획강도를 점검하기 위한 MSE 연구를 소개하고 있다. 이처럼 MSE 연구는 수많은 개체군에 적용되고 있는 다양한 관리전략을 평가하고 있다. 최근에는 미국 해양대기국 수산청(NOAA Fisheries Service)이 '표준' 자원평가소프트웨어로 정한 stock synthesis (SS)에서도, MSE 연구를 위한 모듈 개발연구가 활발히 이루어지고 있다. 반면 국내에서 MSE를 어업관리에 적용한 연구가 공식 보고서나 학술지에 게재된 경우를 아직 발견하지 못하였다. 이 논문의 배경동기는 MSE 연구 방법을 사례로서 국내에 소개하고자 하였고, 구체적인 목적은 두가지로 요약된다. 현재 국내에서 시행하고 있는 TAC (total allowable catch) 어업관리의 지침 4단계에 적용된 Dorn's rule의 α 값과 추정치의 불확실성을 고려하여 자원보존에 치우친 의사결정을 하려는 완충값(buffer)의 적정여부를 MSE 방법을 통해 점검한다.

자료 및 방법

자료

고등어(*Scomber japonicus*) 어획량(MT) 자료는 통계청에서 제공하는 1975년부터 2019년까지 연도별 총 어획량 자료를 이용하였으며, 고등어 단위노력당 어획량(catch per unit effort, CPUE) (MT/haul) 자료는 국립수산과학원에서 동기간에 대형선망어업으로부터 수집한 자료를 본 연구에 이용하였다. 국립수산과학원 자료에 따르면 대형선망어업은 우리나라 고등어 어획량의 약 90%를 차지하고 있다.

MSE

MSE framework의 추정모델(estimation model) 및 작동모델(operating model)은 상태공간 잉여생산모델(state-space production model; SSPM)을 이용했다(Fig. 1). 의사결정 규칙(decision rule)은 실제 국내에서 TAC를 산정하는데 이용되는 생물학적 허용어획량(allowable biological catch, ABC) 추정 기본 지침에서 정보수준을 고려하여 4단계에 근거하였다. 본 연구에서는 추정되는 ABC를 다음해의 TAC라고 가정하며, TAC는 매년 100% 소진되는 것으로 가정하였다. 본 연구는 현행 TAC 관리전략의 의사결정 규칙을 중점으로 하여 관리전략을 평가하였다. 이에 따라, 의사결정 규칙에서 자원상태 및 생물학적 허용어획량을 결정할 때 사용되는 몇몇 고정값에 대한 적정성을 검토하고자 하였다. 이를 위해, 현행 의사결정 규칙에서 사용되고 있는 고정값보다 크고 작은 값들을 시나리오로 구성하였다. 예보기간은 31년으로 2020년부터 2050년까지이며, 추정된 관측오차(observation error)와 과정오차(process error) 분산 값의 크기를 고려하여 각 시나리오 당 1,000번의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 이용하여, 고등어 자원의 보존과 동시에 어민들의 경제적 이익을 위한 높은 생산량을 조화롭게 만족할 수 있는 최적의 의사결정을 찾고자 하였다. 이를 위해 수행척도(performance measure)는 보존적 측면을 평가하는 척도와, 경제적 이익을 위한 척도로 구성하였다.

모수추정

1975년부터 2019년까지의 고등어 어획량(Y_t) 및 단위노력당 어획량(CPUE) 자료를 이용하여, SSPM (Eqs. (1)-(2))에 수반된 자유모수($K, b, r, q, \sigma_p^2, \sigma_o^2$)를 추정하였다.

$$\begin{cases} B_1 = b \cdot K \cdot \exp(\varepsilon_1^p) \\ B_{t+1} = [B_t + r \cdot B_t (1 - \frac{B_t}{K}) - Y_t] \cdot \exp(\varepsilon_{t+1}^p), \text{ where } \varepsilon_{t+1}^p \sim N(0, \sigma_p^2) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$CPUE_t = q \cdot B_t \cdot \exp(\varepsilon_t^o), \text{ where } \varepsilon_t^o \sim N(0, \sigma_o^2) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, B_t 는 시간 t 에서의 자원량(biomass), K 는 최대 환경 수용력(carrying capacity), b 는 초기 자원량을 추정하기 위해 최대 환경수용력에 곱해지는 계수, r 은 개체군의 성장계수(intrinsic growth rate), q 는 자원량 상대지표 계수(constant coefficient for biomass index), σ_p^2 은 과정오차(process error)의 분산, σ_o^2 은 관측오차(observation error)의 분산이다. 자유모수의 추정치를 이용하여 1975년부터 2020년까지의 자원량($\hat{B}_{1975} - \hat{B}_{2020}$), 최대지속생산량($\widehat{MSY} = \frac{rK}{4}$), 최대지속생산량에서의 자원량($\hat{B}_{MSY} = \frac{K}{4}$), 최대지속생산량에서의 어획률($\hat{H}_{MSY} = \frac{r}{4}$), 의사결정 규칙에서 자원상태를 결정하는 기준으로 이용되는 최대지속생산량에서의 CPUE ($CPUE_{MSY} = \hat{q} \cdot \hat{B}_{MSY}$)를 구하였다. 자유모수를 추정하는 방법은 Hyun and Kim (2022)에 자세히 소개되어있다.

시뮬레이션 자료생성, 추정, 및 의사결정

앞서 언급한 1975–2019년도의 자료를 이용하여 SSPM (Eqs. (1)과 (2))내 모수추정의 결과로 2020년의 생체량(\hat{B}_{2020})이 예보된다. 이 예보치를 이용하여 앞서 추정된 모수 추정치들을 이용하여 동년도의 CPUE자료가 만들어진다: 예,

$$CPUE_{2020} = \hat{q} \cdot \hat{B}_{2020} \cdot \exp(\varepsilon_{2020}^o), \text{ where } \varepsilon_{2020}^o \sim \mathcal{N}(0, \hat{\sigma}_o^2) \dots \dots (3)$$

2020년의 어획량(Y_{2020})를 생성하기 위해서, 국내 TAC 관리 메뉴얼하의 ABC 추정 기본 지침 4단계 정보수준에 따른 의사결정 규칙을 이용하여 2020년의 ABC를 계산한다. 4단계 정보수준에서의 의사결정 규칙은 다음과 같다:

4단계a) 자원상태: $CPUE/CPUE_{MSY} > 1$
 $ABC \leq 0.9 \times MSY$

4단계b) 자원상태: $\alpha < CPUE/CPUE_{MSY} \leq 1$
 $ABC \leq 0.9 \times MSY \times (CPUE/CPUE_{MSY} - \alpha) / (1 - \alpha)$

4단계c) 자원상태: $CPUE/CPUE_{MSY} \leq \alpha$
 $ABC = 0$

위의 4단계 a-c의 의사결정에 따라 결정된 2020년의 ABC값이 Y_{2020} 이 된다. 즉, $CPUE_{2020}$ 와 Y_{2020} 값들을 1975–2019년도 자료에 추가한 후, SSPM (Eqs. (1)과 (2))내의 모수추정을 갱신한다. 그 결과, 2021년 생체량 예보치(\hat{B}_{2021})가 추정되고, 이 예보치와 갱신된 모수 추정치들을 이용하여 $CPUE_{2021}$ 이 생산되며, 더 나아가 위의 4단계 a-c의 의사결정규칙에 따라 Y_{2021} 값이 결정된다. 이러한 같은 과정을 반복하여 2050년까지 어획량 및 CPUE 자료를 생성하고, 생성된 자료를 이용하여 생체량을 예보하였다. 이와 같은 과정은 자료를 생성할 때마다 과정오차와 관측오차가 계속해서 고려되기 때문에 실험을 반복할 때마다 그 결과가 달라지므로, 가능한 모든 불확실성을 포함할 수 있도록 총 1,000번의 반복 실험을 수행하였다. 즉 1,000 셋(set)의

생체량 예보치, 모수들의 추정치, 시뮬레이션 자료(Y_t , CPUE)가 만들어진다.

시나리오

시나리오는 4단계 정보수준에서의 의사결정 규칙에서 자원상태 및 생물학적 허용어획량을 결정할 때 사용되는 고정값인 Dorn's rule의 α 값(0.05) (NPFMC, 2014)과 MSY의 완충(buffer)값 (0.9)을 달리하여 구성하였다. 이를 위해, 현행 의사결정 규칙에서 사용되고 있는 고정값보다 크고 작은 값들을 시나리오로 구성하였다. 이에 따라, 시나리오는 $\alpha = 0.01, 0.05, 0.3$ 과 $buffer = 0.7, 0.9, 1.0$ 의 값들을 후보로 하여, 총 9개의 시나리오를 구성하였다. 추가적으로, 극단적인 관리전략의 결과를 확인하기 위해 MSY의 완충값을 0.1과 1.5로 설정하여 기본 시나리오 외에 2가지 변의 시나리오를 구성하였다(Table 1). 자원의 보존과 동시에 어민들의 경제적 이익을 위한 높은 생산량을 조화롭게 만족할 수 있는 최적의 의사결정을 찾기 위한 수행척도는 남획의 정도, 어획량의 평균 및 변동계수를 이용하였다. 다만, 남획의 정도를 판단하는 수행척도의 경우, 예보기간의 마지막 해에 남획이 일어나는 경우만을 고려하였다.

수행척도(performance measure)

고등어 자원의 보존과 동시에 어민들의 경제적 이익을 위한 높은 생산량을 조화롭게 만족할 수 있는 최적의 의사결정을 찾고자 하였다. 보존적 측면을 평가하는 수행척도(performance measure)는 고등어 자원이 남획(overfished) 되었음을 나타내는 참조점(reference point)인 $B_{msy}/2$ 보다 낮아지는 시뮬레이션의 수를 이용하여, 예보기간의 마지막 해에 남획이 발생하는 횟수를 수행척도로 정의하였다:

$$n(B_{last}^{(k)} < \frac{B_{MSY}}{2}) \dots \dots \dots (4)$$

Table 1. The convergence rate (%) of the numerical optimization under each scenario

Scenario	Convergence (%)
1	66.3
2	66.7
3	67.3
4	69.4
5	72.0
6	71.6
7	90.5
8	89.4
9	89.7
10	55.0
11	85.4

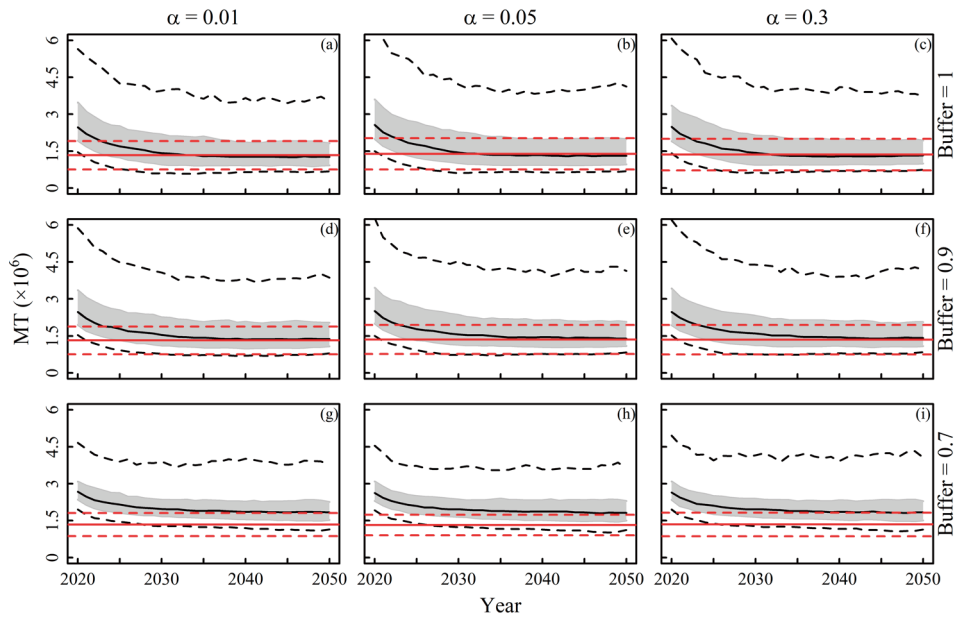


Fig. 2. Simulated biomass over years by scenario, 1-9. The black solide=median; the grey band=50% projection interval; the black broken lines=90% projection interval; the red solid line=the average of the projected biomass values in 2050; the red broken lines=the average of the projected biomass values in 2050±one standard deviation.

$B_{last}^{(k)}$ 는 k 번째 시물레이션의 예보기간의 마지막 해 자원량을 의미한다. (4)에서 나온 결과값은 시물레이션 총 반복 횟수인 1,000으로 나누어, 다음과 같은 확률값으로 나타냈다.

$$Pr(B_{last}^{(k)} < \frac{B_{MSY}}{2}) \dots\dots\dots(5)$$

경제적 이익을 위해 어획량 측면을 평가하는 수행척도로는 다음과 같은 어획량의 평균 및 변동계수(CV)를 이용하였다:

$$E[E(\underline{Y}^{(1)}), E(\underline{Y}^{(2)}), \dots, E(\underline{Y}^{(1000)})] \dots\dots\dots(6)$$

$$E[CV(\underline{Y}^{(1)}), CV(\underline{Y}^{(2)}), \dots, CV(\underline{Y}^{(1000)})] \dots\dots\dots(7)$$

$\underline{Y}^{(1)}$ 은 첫번째 시물레이션에서의 예보기간 내 모든 연도별 어획량을 의미한다. $E(\underline{Y}^{(1)})$ 는 첫번째 시물레이션에서 예보기간 내 연도별 어획량의 평균을 의미하고, $CV(\underline{Y}^{(1)})$ 은 첫번째 시물레이션에서 예보기간 내 연도별 어획량의 변동계수를 의미한다. 각 시나리오의 결과를 효과적으로 표현하기 위해, 총 3개의 수행척도에서 방사형 그래프를 이용하여 9개의 시나리오를 비교하였다.

결 과

이 연구는 MSE에서 가짜자료를 생성하여 모의실험을 한 것 이기에 수행척도(남획확률, 어획량 평균, 어획량 변이성)의 값

자체에 의미를 부여하는대신, 그 값들 간의 상대적으로 비교로 시나리오를 평가해야한다.

1,000번의 반복실험 중 모수 추정과정에서 수렴(convergence)이 되지 않는 경우가 발생하였으며, 이에 따라 convergence rate 결과를 Table 1에 나타냈다. 가장 낮은 convergence rate를 나타낸 시나리오는 변의 10번 시나리오로 55.0%를 나타냈으며, 나머지 시나리오들은 60%를 상회하면서 최대 90.5%까지 대체적으로 높은 convergence rate를 나타냈다. 각 시나리오별로 모수 추정이 성공한 경우의 시물레이션을 통해 나온 예보기간 내 자원량은 Fig. 2 (기본 시나리오) 및 Fig. 3 (변의 시나리오)에 나타냈다. 모든 시나리오에서 자원량이 점차 줄어드는 추세를 공통적으로 보였으며, 예보기간의 끝으로 갈수록 자원량의 중앙값이 일정 수준으로 수렴하는 모습을 보였다. 2050년의 Bmsy 평균값을 붉은색 선으로 나타냈으며, 이에 대한 표준편차를 고려한 수준도 붉은색 점선으로 나타냈다. Dorn's rule의 α 값에 의해서는 시나리오별로 유의미한 차이를 보이지 않았으나, MSY의 완충값에 따른 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준 및 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준과 2050년의 Bmsy 평균값과의 상대적 차이는 시나리오별로 확연한 차이를 나타냈다. 완충값이 1인 경우(Fig. 3a, 3b, 3c), 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준이 약 1.3×10^6 MT로 가장 낮았으며, 2050년의 Bmsy 평균값보다 항상 아래에 위치한다. 완충값이 0.9인 경우(Fig. 3d, 3e, 3f), 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준이 약 1.4×10^6 MT로 나타났고, 2050년의 Bmsy 평균값

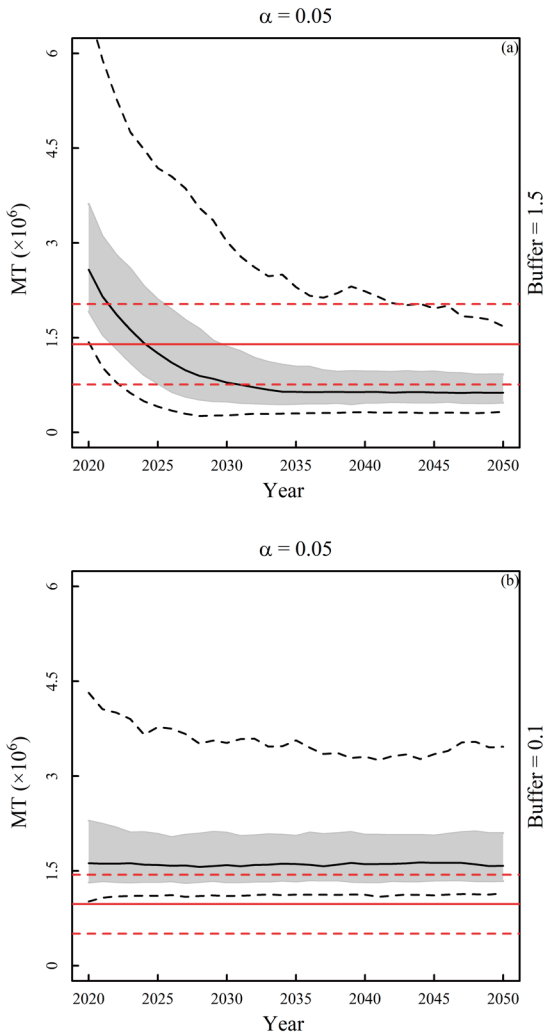


Fig. 3. Simulated biomass over years by scenario, 10 - 11. The black solid line=median; the grey band=50% projection interval; the black broken lines=90% projection interval; the red solid line=the average of the projected biomass values in 2050; the red broken lines=the average of the projected biomass values in 2050±one standard deviation.

보다 약간 상회한다. 마지막으로, 완충값이 0.7인 경우(Fig. 3g, 3h, 3i), 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준이 약 1.8×10^6 MT로 가장 크게 나타났으며, 2050년의 Bmsy 평균값보다 훨씬 위쪽으로 나타나면서 1표준편차를 더했을 때의 값보다도 높은 수준에 위치했다. 이러한 경향은 변외 시나리오에서 더욱 두드러지게 나타난다. 완충값이 1.5인 경우를 나타낸 Fig.3a 패널을 살펴보면, 자원량의 중앙값은 급격하게 감소하는 모습을 보여주고 약 0.6×10^6 MT로 매우 낮은 수준에서 수렴하면서 2050년의 Bmsy 평균값보다 훨씬 낮게 나타난 반면, 완충값이 0.1인 경우를 나타낸 Fig. 3b 패널에서 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준

은 약 1.6×10^6 MT로 나타나면서 2050년의 Bmsy 평균값보다 훨씬 높은 모습을 보였다. 또 다른 특이한 점은 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준은 시나리오별로 확연한 차이를 보였으나, 2050년의 Bmsy 평균값은 시나리오별로 차이가 미미하다는 것이다. 완충값이 0.1인 경우의 시나리오를 제외한 나머지 시나리오에서 2050년의 Bmsy 평균값은 약 1.4×10^6 MT 주변에서 나타났다. 마지막으로, 완충값이 0.1인 경우의 시나리오에서, 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준에 주목할 필요가 있다. 완충값을 0.1로 설정하여 어획량을 극도로 제한하는 시나리오의 자원량 중앙값이 수렴하는 수준이, 완충값이 0.7인 시나리오의 자원량 중앙값이 수렴하는 수준보다 더욱 낮게 나타나고 있다. 이는 예상했던 일반적인 결과와 다른 모습을 나타내고 있다.

각 시나리오별 수행척도 계산값은 Table 2에 나타냈으며, 각 시나리오별 수행척도 결과를 가시적으로 비교하기 위한 방사형 그래프는 Fig. 4에 나타냈다. 남획과 관련된 수행척도의 경우, 완충값이 1.5인 10번 시나리오에서 39.27%로 굉장히 높게 나왔으며, 나머지 시나리오는 모두 0%대를 나타냈다. Dorn's rule의 α 값이 커질때 어획량의 변동계수가 증가하는 모습을 보였으나, 그 정도가 유의미하지는 않았다. 반면, 완충값의 절댓값이 커질수록 어획량의 평균과 변동계수가 모두 확연히 증가하는 모습을 나타냈다. 수행척도 결과를 가시적으로 비교하는 방사형 그래프를 살펴보면, 특정 시나리오가 모든 수행척도에서 좋은 결과를 보이는 것이 아니라, 모든 시나리오가 수행척도 간 trade-off 관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

고 찰

본 연구에서는 의사결정 규칙을 시뮬레이션 함에 있어 몇몇 가정을 포함한다. 대표적인 가정으로, 추정되는 ABC를 다음 해의 TAC라고 가정하고, TAC는 매년 100% 소진되는 것으로 가정하였다. 추정된 ABC를 이용하여 TAC를 결정하는 것은 이해당사자 및 정부기관의 정책 등과 관련되어 있기 때문에, MSE 연구에서는 해당 부분을 반영할 수 없었다. 또한, TAC가 매년 100% 소진되는 것은 실제 어민들이 이익을 위해 총 허용 어획량을 모두 소진하면서도 자원의 관리를 위해 초과하여 잡지 못하도록 TAC에 대한 관리가 잘 이루어질 것이라 가정하였기 때문이다. 더욱 정확한 MSE 연구를 위해서는 TAC의 소진율이 100%보다 적은 경우, 혹은 더욱 많은 경우도 고려하는 것이 합당하며, 레저용 낚시 등에 의한 어획량, 바다에서 폐기되어 버려지는 어획량 등이 고려될 필요가 있다. 그러나, 본 연구에서는 시뮬레이션 과정에서 자원량에 대한 과정오차를 고려하기 때문에, 자원량에서 TAC에 해당하는 어획량만큼만 감소하는 것은 아니다. 즉, 위에서 언급한 TAC의 소진율이 100%보다 적은 경우, 혹은 더욱 많은 경우, 레저용 낚시 등에 의한 어획량, 바다에서 폐기되어 버려지는 어획량 등이 난수로서 모두 합쳐져 고려된다고 할 수 있다. 뿐만 아니라, 의사결정 규칙에서 사용되는 자료의 수집 과정에서 발생할 수 있는 관측오차도 함

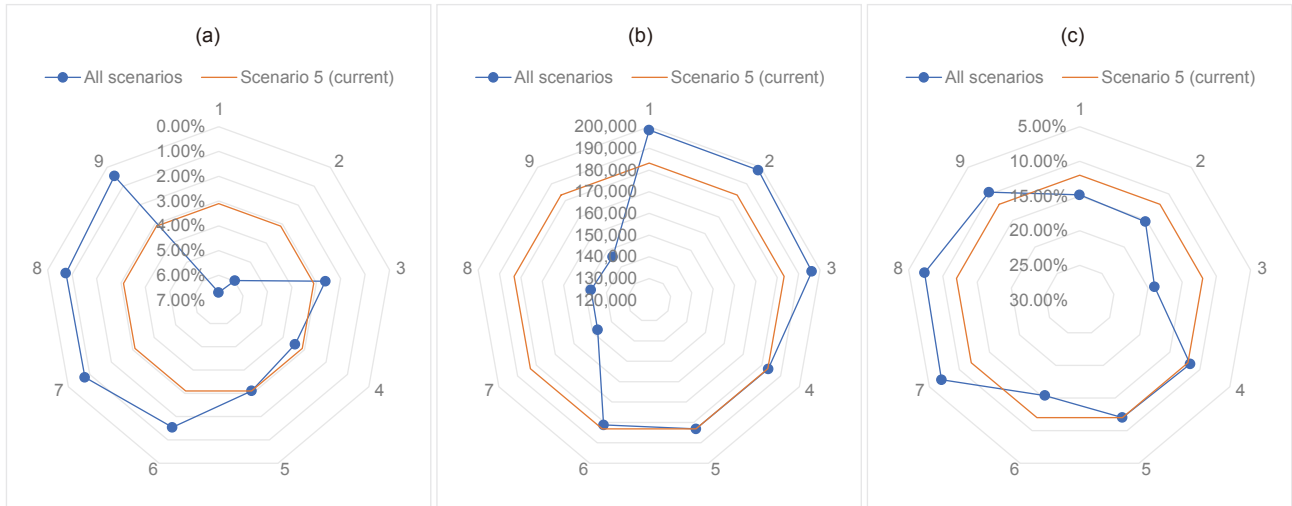


Fig. 4. Web diagrams to compare performance metrics by scenario in the probability that a fish population is overfished (panel a), the average of the annual yields (MT) (panel b), and the coefficient of variation of the annual yields (panel c). The nine vertices and blue lines indicate scenarios. The orange lines represent the current practice, i.e., scenario 5 ($\alpha=0.05$, $buffer=0.9$).

계 고려하였기 때문에, 본 MSE 연구는 수산자원관리에 수반되는 넓은 범위의 불확실성을 포함한다고 할 수 있다. MSE 연구에서 모든 불확실성을 포함할 수는 없으며, 어느 경우에도 항상 중요한 불확실성을 특정지을 수 없기 때문에 가장 중요한 불확실성은 각 어업에 따라 다르다(Butterworth and Punt, 1999; Punt et al., 2016). 그 예로, A'mar et al. (2008)는 알래스카만(Gulf of Alaska)의 명태 어업과 관련된 주요 불확실성으로 생태계 변화, 다중 상호작용, 기후변화 및 체제 변화(regime shift) 등을 들고 있다.

예보기간 내 시나리오별 자원량 변화 그래프(Fig. 2)를 살펴보

면, 완충값이 1.0인 경우와 0.9인 경우에 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준이 B_{msy} 평균값과 비슷한 수준에서 유지되는 모습을 보인다. B_{msy} 의 의미가 MSY를 생산하는 자원량이므로, 잉여생산량 모델의 이론상 가장 좋은 결과를 보인다고 할 수 있다. 하지만, 수산자원을 관리함에 있어서 현실에서는 더욱 다양한 불확실성을 고려해야 하기 때문에, 지속적인 어업이 가능하기 위해서는 다소 보존적인 측면의 관리전략을 채택할 필요가 있다. 이러한 측면에서, 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준이 B_{msy} 평균값보다 다소 높게 유지되는 0.9의 완충값을 채택하는 것이 합리적이라 판단된다. 또한, 자원량의 중앙값이 수

Table 2. The performance metrics by scenario. Pr below denotes the probability

Scenario	buffer	α	Performance metrics		
			Pr (overfished in the last year) (%)	The average of annual fishery yields (MT)	CV (%) of the annual fishery yield
1		0.01	0.15	225,932	19.21
2	1.0	0.05	0.15	228,387	19.57
3		0.3	0	224,712	21.64
4		0.01	0	206,433	16.90
5 (present)	0.9	0.05	0	209,036	17.16
6		0.3	0	208,438	17.76
7		0.01	0	162,093	9.11
8	0.7	0.05	0	162,560	9.77
9		0.3	0	162,625	9.69
10	1.5	0.05	39.72	245,515	41.35
11	0.1	0.05	0	21,925	8.97

렵하는 수준은 시나리오별로 확연한 차이를 보였으나, 2050년의 Bmsy 평균값의 시나리오별 차이가 미미하다는 것은 우리나라의 고등어 개체군이 안정되어 있다는 것을 시사한다. Bmsy는 $\frac{K}{2}$ 로 계산되므로, Bmsy의 값이 시나리오에 따라 큰 변화가 없다는 것은 환경수용력을 나타내는 K의 추정치 값이 크게 변화하지 않는다는 것이다. 즉, 이러한 점을 통해, 우리나라 고등어 개체군은 TAC 관리전략에 따라 자원량의 변동은 있을 수 있으나, 개체군 자체가 가진 환경수용력은 안정되어 있다고 할 수 있다.

변의 시나리오의 수행척도 결과에서 주목할만한 점은, 완충값이 1.5인 10번 시나리오에서 어획량의 평균값이 예상만큼 크지 않다는 것이다(Fig. 3, Table 2). 남획의 확률이 39.27%, 어획량의 변동계수가 41.35%로 굉장히 높은 값을 가지는데 비해, 어획량의 평균은 완충값이 1.0일 때에 비해 약 2만톤 정도밖에 높지 않다. 이는, TAC로 설정된 어획량을 초과하여 어획하는 것은 종합적인 측면에서 득보다 실이 더욱 크다는 것을 시사한다. 즉, 이러한 결과는 자원관리의 필요성을 보여주는 좋은 예가 될 수 있다.

또한, 변의 시나리오의 수행척도 결과에서 완충값이 0.1인 시나리오는 예상에서 벗어난 결과를 보여주고 있다(Fig. 3, Table 2). 2050년의 Bmsy의 평균값이 다른 시나리오보다 훨씬 작은 수준으로 나타나고 있으며, 자원량의 중앙값이 수렴하는 수준 역시 다소 낮게 나타나고 있다. 어획 압력을 극도로 낮게 설정했기 때문에, 고등어 개체군의 자원 상태가 증가하면서 회복되거나, 회복되지 않더라도 다른 시나리오에 비해 자원량 및 2050년 Bmsy 평균값의 수준이 높을 것으로 예상됐다. 하지만, 완충값이 0.7인 경우보다 자원량의 중앙값 수렴 수준이 낮게 나타나고 있으며, 2050년의 Bmsy 평균값 수준 역시 다른 모든 시나리오에 비해 낮게 나타났다. 이러한 결과는 고등어를 적정 수준으로 어획하는 것이 오히려 고등어 자원 및 환경수용력을 높게 유지하는 데에 도움을 준다는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 예상치 못한 결과에 대해 정확한 시사점을 찾기 위해서는 추후 연구가 필요할 것으로 보인다.

기본 시나리오 내에서, 남획과 관련된 수행척도 계산값은 모두 굉장히 좋은 값을 나타내고 있기 때문에 모든 시나리오가 합당하다는 것을 의미하기는 하지만, 최적의 의사결정을 선별하기 위한 척도로 이용되기는 어려운 것으로 보인다. 하지만, 아주 작은 확률(0.15%)이라도 남획 발생을 방지하고자 한다면, 시나리오 1, 2번을 최적의 시나리오에서 제외할 수 있을 것이다. 다른 수행척도인 어획량 평균은 값이 높을수록 어민들의 이익이 늘어나는 것을 의미하며, 어획량 변동계수는 값이 낮을수록 어민들이 매년 잡을 수 있는 어획량의 변화가 크지 않은 것을 의미한다. 즉, 어획량 평균은 값이 높을수록, 어획량 변동계수는 값이 낮을수록 좋은 시나리오라고 할 수 있다. 어획량의 평균과 변동계수는 서로 상충하는 관계(trade-off)에 있으므로, 두 수행척도의 결과가 동시에 좋은 경우는 없다. 즉, 높은 어획량을 매

년 안정적으로 유지할 수 있는 시나리오는 없다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에, 단 하나의 최적의 시나리오를 제시하는 것은 불가능하며, 이를 위해서는 이해당사자(수산자원 관리자, 어민 등) 간의 이해관계가 반드시 반영되어야 한다.

이해당사자 간의 이해관계가 고려되지 않은 채 앞서 살펴본 시나리오별 자원량 및 수행척도 결과만을 가지고 단 하나의 최적의 시나리오를 제시하기란 굉장히 어려운 것이 사실이다. MSE는 최적의 의사결정을 식별하기 보다는 의사 결정자의 요구에 맞춰 여러 관리전략들 사이에서 선택의 기초정보를 제공한다(Smith, 1994). 그럼에도, 본 연구의 객관적인 결과만을 이용하여 비교, 분석한 본 연구팀의 몇 가지 결론은 다음과 같다. 첫째로, 자원량의 중간값이 2050년의 Bmsy 평균값 보다 다소 낮다는 점 및 남획의 수행척도 값이 0%가 아닌 값을 가진다는 점에서, 완충값이 1.0인 시나리오 1, 2, 3을 최적의 의사결정에서 제외한다. 둘째로, 어획량의 변동계수 값이 가장 낮지만, 자원량의 중앙값이 2050년의 Bmsy 평균값 수준과 비슷하게 유지되지 않고 다소 높게 유지된다는 점 및 어획량의 평균값이 다소 낮다는 점에서, 시나리오 7, 8, 9를 최적의 의사결정에서 제외한다. 남아있는 시나리오 4, 5 (현행관리), 6은 자원량의 중간값이 2050년의 Bmsy 평균값 수준보다 약간 더 높은 수준에서 안정적으로 유지된다는 점, 그리고 어획량 변동계수가 높지 않다는 점에선 만족스럽지만, 어획량 평균의 수준이 높지 않아서 경제적 손실을 초래한다(Fig. 4).

사 사

한국연구재단 이공분야 보호연구(NRF-2019R1I1A2A01052106)와 국립수산물과학원(과제번호, R2022031)의 재정지원하에 연구를 수행하였다. 어획량 및 CPUE 자료는 국립수산물과학원과 통계청에서 제공받았다.

References

- A'mar ZT, Punt A and Dorn M. 2008. The management strategy evaluation approach and the fishery for walleye pollock in the gulf of Alaska. In: Resiliency of Gadid Stocks to Fishing and Climate Change. University of Alaska Fairbanks, Anchorage, Alaska, U.S.A., 317-346. <https://doi.org/10.4027/rgsfcc.2008.18>.
- A'mar ZT, Punt AE and Dorn MW. 2009a. The evaluation of two management strategies for the gulf of Alaska walleye pollock fishery under climate change. ICES J Mar Sci 66, 1614-1632. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp044>.
- A'mar ZT, Punt AE and Dorn MW. 2009b. The impact of regime shifts on the performance of management strategies for the gulf of Alaska walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) fishery. Can J Fish Aquat Sci 66, 2222-2242. <https://doi.org/10.1139/F09-142>.
- A'mar ZT, Punt AE and Dorn MW. 2010. Incorporating ecosys-

- tem forcing through predation into a management strategy evaluation for the Gulf of Alaska walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) fishery. *Fish Res* 102, 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.10.014>.
- Butterworth DS and Punt AE. 1999. Experiences in the evaluation and implementation of management procedures. *ICES J Mar Sci* 56, 985-998. <https://doi.org/10.1006/jmsc.1999.0532>.
- Hyun S-Y and Kim K. 2022. An evaluation of estimability of parameters in the state-space non-linear logistic production model. *Fish Res* 245, 106135. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.106135>.
- NPFMC (North Pacific Fishery Management Council). 2014. Stock Assessment and Fishery Evaluation Report for the Groundfish Resources of the Gulf of Alaska. Retrieved from <https://apps-afsc.fisheries.noaa.gov/REFM/Docs/2014/GOAintro.pdf> on Sep 5, 2022.
- Smith A. 1994. Management strategy evaluation: the light on the hill. In: Population Dynamics for Fisheries Management, Australian Society for Fish Biology Workshop Proceedings. Hancock DA, ed. Perth, WA, U.S.A., 249-253.
- Punt AE, Butterworth DS, de Moor CL, De Oliveira JAA and Haddon M. 2016. Management strategy evaluation: Best practices. *Fish Fish* 17, 303-334. <https://doi.org/10.1111/faf.12104>.
- Punt AE and Donovan GP. 2007. Developing management procedures that are robust to uncertainty: Lessons from the International Whaling Commission. *ICES J Mar Sci* 64, 603-612. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsm035>.
- Punt AE and Ralston S. 2007. A management strategy evaluation of rebuilding revision rules for overfished rockfish stocks. In: Proceedings of the 2005 Lowell Wakefield Symposium-biology, Assessment, and Management of North Pacific Rockfishes. Anonymous. University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK, U.S.A., 329-352.