



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

한국 남동해역 멸치 (*Engraulis japonicus*)

미성어 및 성어 자원평가



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 생 물 학 과

정 동 원

이 학 석 사 학 위 논 문

한국 남동해역 멸치 (*Engraulis japonicus*)

미성어 및 성어 자원평가

지도교수 현 상 윤

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.



2022년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 생 물 학 과

정 동 원

정동원의 이학석사 학위논문을 인준함.

2022년 2월 25일



위 원 장 이학박사 김 진 구



위 원 이학박사 김 진 영



위 원 이학박사 현 상 윤



목차

표 목차	iv
그림 목차.....	v
Abstract.....	ix
I. 서론	1
II. 재료 및 방법	7
II.1. 자료	7
II.1.1. 원자료	7
II.1.2. 자료 가정.....	15
II.1.3. 정리한 자료 값.....	16
II.2. 자원평가 방법 개발	20
II.2.1. 상태공간 잉여생산 모델.....	20
II.2.2. 우도함수	28
II.2.3. 사전분포	30
II.2.4. 모수 추정 및 상태변수 예측	34
II.3. 모델 검증	35

III. 결과	36
III.1. 한국 남동해역 멸치 자원 평가 및 미성어·성어 자원량 예측 결과	36
III.2. 모델 검증 결과	43
III.2.1. 자료 적합도	43
III.2.2. 모의실험	47
IV. 고찰	54
IV.1. 한국 남동해역 멸치 자원평가	54
IV.2. 모델 검증	56
IV.3. 멸치 미성어와 성어 자원량 예측	58
IV.3.1. 중멸을 성어로 가정한 경우	60
IV.3.2. Case 1 과 Case 2 에 따른 멸치 미성어와 성어 자원량	69
IV.4. 추정된 모수 간의 상관관계	72
IV.5. 어획물의 미성어와 성어 조성	73
IV.6. 수치최적화	74
IV.7. 상태공간 잉어생산 모델	77
V. 사사	79
VI. 참고문헌	81

VII. 부록	87
VII.1. TMB 코드	87



표 목차

표 1. 기호. 본 연구에서 사용되는 기호에 대한 설명이다.	9
표 2. 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게. 각 체장별로 100마리씩 무작위추출 (random sampling) 하여 평균무게와 표준편차를 구하였다.....	12
표 3. 우도함수.....	26
표 4. 모수의 사전분포. 각 모수의 사전분포에서 최빈값(Mode)과 변동계수 (CV)를 가정하였을 때, 해당 사전분포의 Hyperparameter를 계산하였다.	32
표 5. 수치최적화 결과 값.....	38
표 6. 모의실험에서 가정된 모수의 참값.....	48
표 7. Relative difference (RD) 결과. RD는 백분율(%)로서 나타냈다.....	49
표 8. Absolute bias (AB) 결과. AB는 모수 추정값에서 모수 참값을 빼준으 로서 구하였다($\hat{\theta}_i - \theta$).....	50
표 9. Case 2에서 수치최적화 결과 값.	62

그림 목차

그림 1. 남동해역(경상남도, 부산광역시 및 울산광역시)(NGII, 2021; Schlitzer and Reiner, 2021). A에서 B 사이 해역이 남동해역에 해당한다. 붉은선에서 내륙쪽 해역은 기선권현망 어업의 조업금지 구역이다(MOF, 2021).	5
그림 2. 2009년부터 2018년까지 반기별 남동해역 멸치 어획량의 어업조성(KOSTAT, 2021). 해당기간에 기선권현망, 정치망 등 22개 어업에 의해 멸치가 어획되었다. 대표적인 멸치 어업인 기선권현망 어업은 평균적으로 남동해역 총 멸치 어획량의 약 70 %를 차지하였다.	6
그림 3. 2009년부터 2018년까지 남동해역의 (a) 반기별 총 어획량(Y_t) 자료(KOSTAT, 2021), (b) 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료(NIFS, 2021). 반기별 총 어획량 자료의 단위는 MT이고, 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료의 단위는 MT/vessel이다.	13
그림 4. 2009년부터 2018년까지 남동해역의 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료(한국해양수산개발원 제공). 건멸치 체장 기준으로 세멸(1.5 cm 이하), 자멸(1.6 – 3.0 cm), 소멸(3.1 – 4.5 cm), 중멸(4.6 – 7.6 cm) 및 대멸(7.7 cm 이상)로 구분되어 어획량이 기록되었다.	14
그림 5. 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 어획비율(S_t).	18
그림 6. 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$). 삼각형(▲)은 반기별 미성어 한 마리의 평균무게 값을 나타내고, 원(●)은 반기별 성어 한 마리의 평균무게 값을 나타낸다.	19
그림 7. 우도함수에 대한 유향 비순환 그래프(directed acyclic graph; DAG). 정사각형은 자료를 의미하고, 원형과 타원형은 모수와 상태변수를 의미한다.	

다. (a) $L_1: \log P_1 \sim N(\log b, \sigma^2)$. (b) $L_2: \log P_{t+1} \sim N\left(\log\left(P_t + r \cdot (1 - P_t) \cdot P_t - \frac{Y_t}{K}\right), \sigma^2\right)$. (c) $L_3: \log I_t \sim N(\log(q \cdot K \cdot P_t), \sigma^2)$. (d) $L_4: (C_{t,im}, C_{t,ma}) \sim \text{Binomial}\left(ESS, (\hat{p}_{t,im}, \hat{p}_{t,ma})\right)$ 27

그림 8. 사전분포. (a) 개체군의 내재적 성장률(r). (b) 환경수용력(K). (c) 미성어에 대한 어획확률(u_{im}). (d) 성어에 대한 어획확률(u_{ma}). 각 사전 분포에서 수직선은 최빈값(Mode)이다..... 33

그림 9. 수치최적화 결과, 추정된 모수 간의 상관관계. 1.00(붉은색)에 가까울수록 양의 상관관계, -1.00(푸른색)에 가까울수록 음의 상관관계를 가진다. 0.00에 가까울수록 상관관계가 있지 않다..... 39

그림 10. (a) MSY 결과; (b) MSY일 때, 어획률(F_{MSY}) 결과. (a) 선은 MSY 결과값으로 255,898 MT이고, 점은 2009년부터 2018년까지 반기별 총 어획량(Y_t) 자료값이다. (b) 선은 MSY일 때, 어획률(F_{MSY}) 결과값으로 0.67이고, 점선은 2009년부터 2018년까지 반기별 어획률(harvest rate; F_t) 결과값이다..... 40

그림 11. 반기별 자원량(B_t) 예측 결과. 검은 선은 반기별 자원량 예측값(predicted value)이고, 검은 점선은 반기별 자원량 예측값에 표준오차값을 더한 값(위쪽)과 뺀 값(아래쪽)이다. 파란선은 환경수용력(K)을 나타내며 765,189 MT이고, 붉은선은 MSY일 때 자원량(B_{MSY})을 나타내며 382,595 MT이다..... 41

그림 12. 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과. 점선은 미성어 자원량 예측값, 선은 성어 자원량 예측값이다..... 42

그림 13. 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료 적합도 결과. 점은 2009년부터 2018년까지 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료값이고, 선은 예측값, 점선은 예측값에 표준오차값을 더한 값(위쪽)과

뺀 값(아래쪽)이다.....	44
그림 14. (a) 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과; (b) 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 점은 자료값을 나타내고, 선은 예측값을 나타낸다.	45
그림 15. 반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 검은색 막대 그래프는 자료값이고, 회색 막대그래프는 예측값이다.....	46
그림 16. 모의실험 결과($\sigma, b, r, K, q, u_{im}, u_{ma}$). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference (RD)를 상자그림으로 나타냈다. 점선은 RD의 기준값으로 0 %이다.....	51
그림 17 모의실험 결과(u_{im}, u_{ma}). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference를 상자그림으로 나타냈다.	52
그림 18. 모의실험 결과(R_t). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference (RD)를 상자그림으로 나타냈다. 점선은 RD의 기준값으로 0 %이다.....	53
그림 19. Case 2에서 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 어획비율(S_t). 여기서 미성어는 세멸, 자멸, 소멸에 해당한다.	63
그림 20. Case 2에서 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 한 마리의 평균 무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$). 여기서 미성어는 세멸, 자멸, 소멸에 해당하고, 성어는 중멸, 대멸에 해당한다. 삼각형(▲)은 반기별 미성어 한 마리의 평균무게 값을 나타내고, 원(●)은 반기별 성어 한 마리의 평균무게 값을 나타낸다.....	64
그림 21. Case 2에서 수치최적화 결과, 추정된 모수 간의 상관관계. 1.00(붉은색)에 가까울수록 양의 상관관계가 있으며, -1.00(푸른색)에 가까울수록	

록 음의 상관관계가 있다. 0.00에 가까울수록 상관관계가 있지 않다...	65
그림 22. Case 2에서 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과. 점선은 미성어 자원량 예측값(predicted value)을, 선은 성어 자원 량 예측값을 의미한다.....	66
그림 23. Case 2에서 (a) 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결 과 및 (b) 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 점은 자료 값을 나타내고, 선은 예측값을 나타낸다.	67
그림 24. Case 2에서 반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 검은 색 막대 그래프는 자료값이고, 회색 막대그래프는 예측값이다.....	68
그림 25. Case 1에서 결과와 Case 2에서 결과에 따른 멸치 미성어 자원량 ($B_{t,im}$) 예측 결과.....	70
그림 26. Case 1에서 결과와 Case 2에서 결과에 따른 멸치 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과.	71

Assessment of Pacific anchovy (*Engraulis japonicus*) stock in the southeastern coastal waters
of Korea, considering its immature and mature stages

Dongwon Jung

Department of Marine Biology, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Pacific anchovies (*Engraulis japonicus*) are small pelagic fish at the intermediate trophic level in the marine ecosystem and a commercially important target species in south Korea. A total fishery yield of the anchovy stock in 2020 was 216,748 MT, which was the largest yield over fishery yields of the other coastal species. About 67 % of the fishery yield of the anchovy stock was caught in the southeastern (SE) coastal waters of Korea. Anchovies are often sold as dried anchovies. Dried anchovies are classified, according to total length size: Se-myeol (minimum size anchovy; ≤ 1.5 cm); Ja-myeol (tiny anchovy; 1.6 – 3.0 cm); So-myeol (small anchovy; 3.1 – 4.5 cm); Joong-myeol (medium anchovy; 4.6 – 7.6 cm); Dae-myeol (large anchovy; ≥ 7.7 cm). Data about yields caught in the SE waters and length compositions in those yields by the anchovy drag net fishery were available from 2009 – 2018 (data source: Statistics Korea and Korea Maritime Institute). I made semiannual catch per unit effort (CPUE) data, using values of catch and efforts uploaded on the National Institute of Fisheries Science website (<https://www.nifs.go.kr/>), where semiannual yields (catch part) from the drag net fishery and the number of vessels (effort part) for the fishery from the corresponding time were available. The number of fishing vessels was used as the fishing effort data because the other information such as fishing hours was not available. I assumed that Se-myeol, Ja-myeol, So-myeol and Joong-myeol were reproductively immature, while assuming that Dae-myeol was mature. I applied a state-space surplus production model for the stock assessment in the SE coastal waters, treating timely biomass as random effects. A

new feature of my model lies in predicting each biomass of immature and mature fish by time as well as estimating the other parameters. I used R package, TMB for implementing the state-space model. The maximum sustainable yield was estimated as about 255,898 MT. The carrying capacity was estimated as about 765,189 MT. Predicted biomass of immature fish was larger than that of mature fish. I also performed model validation by simulation. The result of model validation was that bias of all parameters ranged from -23.5 to 42.8 %. Additionally, I applied a different assumption regarding immature and mature fish: immature fish (Se-myeol, Ja-myeol and So-myeol); mature fish (Joong-myeol and Dae-myeol). Under this new assumption, predicted biomass of immature fish was smaller than that of mature fish. Therefore, Joong-myeol is at a key stage, which determines immature vs. mature population sizes. If maturation information such as gonad weights were available, this confusion would be clarified. Results in my study should not be used for actual management because the CPUE data do not represent a relative population size. I would like the reader to pay attention to my methods per se, especially the new feature, which is different from the traditional surplus production model.

I. 서론

본 연구의 자원평가 대상종인 멸치(*Engraulis japonicus*)는 한국 연근해에 분포하고 회유하며(Moon et al, 2011), 해양생태계에서 갈치(*Trichiurus japonicus*)와 같은 상위 영양단계와 플랑크톤과 같은 하위 영양단계를 연결하는 중간 영양단계에 해당하는 소형어류이다(Pauly et al., 1998; Youn et al., 2013). 멸치의 체성장은 알에서 부화 후, 1개월에 3 cm, 3개월에 6 cm, 6개월에 8 cm로 성장하며(Kim, 1988), 이론적 최대체장은 13 cm이다(Lee et al., 2021). 멸치의 성숙체장은 9 cm이며(Choi and Kim, 1988), 연중산란하고 주산란기는 5 - 7월이다(Kim and Kang, 1992; Moon et al., 2011). 또한, 멸치는 한국에서 대표적인 상업 어종으로 한국 연근해에서 2020년 한 해 동안 216,748 MT이 어획되었다(KOSTAT, 2021). 이는 한국 연근해 어종 중에서 단일어종으로 가장 많은 어획량이며, 두번째로 많은 어획량을 기록한 고등어(*Scomber japonicus*) 어획량(77,401 MT)의 약 2.8배이다.

연구대상 해역인 한국 남동해역은 경상남도, 부산광역시 및 울산광역시에 해당하는 해역으로 2020년 멸치 총 어획량의 약 67 %인 145,682 MT이 어획된 중요한 멸치 어장이다(KOSTAT, 2021; 그림 1). 또한, 멸치 자원평가에 이용가능한 멸치 총 어획량 자료, 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료 및 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성자료가 수집되고 있는 해역이기 때문에 연구대상 해역으로 선정하였다. 한국 남동해역에서 2009년부터 2018년

까지 멸치를 어획한 어업은 총 22개 어업으로 멸치는 다양한 어업에서 어획되었다(KOSTAT, 2021; 그림 2). 특히, 기선권현망 어업은 2009년부터 2018년까지 반기별로 남동해역 멸치 어획량의 약 52 - 80 %를 차지하는 주요한 멸치 어업이다. 기선권현망 어업에서 어획된 멸치는 소금물에서 삶아지는 자숙 과정을 거친 후, 건조 과정을 거쳐 건멸치로서 위판(委販)된다. 건멸치는 크기별로 세멸(1.5 cm 이하), 자멸(1.6 - 3.0 cm), 소멸(3.1 - 4.5 cm), 중멸(4.6 - 7.6 cm) 및 대멸(7.7 cm 이상)로 구분되며, 크기별로 위판량이 기록되고 있다(멸치권현망수협, 2021). 크기별 위판량 자료는 체장별 어획물 조성 자료로 고려될 수 있다. 선행 연구에서는 2007년 한국 남해안에서 해역별로 크기별 위판량 자료를 이용하여 체장별 어획물 조성을 구하였으며, 이 조성 정보를 가지고 2007년 3 - 4월과 8 - 10월의 체장별 어획물 조성을 비교하였고 체장에 따른 해역분포에 대해 서술하였다(Cha et al., 2008).

어획대상 생물에 대한 지속가능한 어획을 위해서는 자원평가가 필요하며, 자원평가 방법은 이용가능한 자료에 따라 결정된다. 한국에서 멸치의 체장별 어획물 조성 자료를 가지고 멸치 자원평가를 한 선행연구는 전무하였다. 멸치 자원에 대한 선행연구로는 다음 연구들이 있었다. Kim et al. (2008)과 Oh et al. (2009)은 음향을 이용하여 2005년과 2006년에 통영 남해 연안의 멸치 자원 추정을 시도하였다. Jung (2008)은 모의실험을 통해 멸치 일급군에 대한 분석 연구를 하였고, Lee et al. (2017)은 모의실험을 이용하여 어획체장 조건에 따른 멸치 가입당 생산량 평가를 시도하였다. Kim et al. (2015)은 신경

망 모델을 이용하여 멸치 자원의 월별 변화를 예보하는 연구를 진행하였다.

본 연구의 목적은 한국 남동해역 멸치 자원 상태를 파악하기 위한 방법론을 제시하고, 멸치 자원을 미성어와 성어로 나누어 파악할 수 있는 점을 제시하는 것이다. 상태공간 잉여생산 모델은 시간별 어획량 자료와 시간별 단위노력당 어획량 자료를 이용하고 시간별 자원량을 상태변수(random effects; state variable; hidden variable)로 취급하여 시간에 따른 대상생물의 자원 변동에 대해 평가하는 모델이다(An, 2021; Jung et al., 2021; Hyun and Kim, 2022; Schaefer, 1954). 본 연구에서는 2009년부터 2018년까지 한국 남동해역에서 수집된 반기별 총 어획량 자료, 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료와 추가적으로 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료를 상태공간 잉여생산 모델에 적용하여 남동해역 멸치 자원에 대한 자원평가를 시도하였다. 선행연구에서 사용하지 않은 체장별 어획물 조성 자료를 멸치 체장에 대한 미성어(세멸, 자멸, 소멸, 중멸)와 성어(대멸) 가정을 하여 미성어·성어 어획물 조성 자료로 사용함으로써 목적함수에 이항분포 우도함수를 추가하였다. 목적함수를 최소로 하여 모수 추정(estimate)과 상태변수 예측(predict)을 하기 위한 수치최적화(numerical optimization)는 TMB package와 R 프로그램을 사용하여 이루어졌고, 수치최적화를 통해 모수 추정, 불확실성 계산, 반기별 멸치 자원량 예측과 미성어 및 성어 자원량 예측을 실시하였다. 본 연구의 모델(수정된 상태공간 잉여생산 모델)을 검증하기 위해 자료 적합도(goodness of fit)를 확인하였고, 모의실험(simulation)을 진행하

였다. 추가적으로 중멸을 성어로 가정한 경우에 대해 고찰에서 논의하였다. 본 연구에서 사용된 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료는 과학조사 (survey)가 아닌 어업에서 수집된 자료이므로 자원량의 상대적인 지표로서 의문이 든다. 따라서, 본 연구의 결과를 실질적인 남동해역 멸치 자원관리에 이용하기는 어려우며, 독자는 본 연구의 방법론과 기존의 상태공간 잉여생산 모델과의 차이점에 초점을 맞추어야 한다.



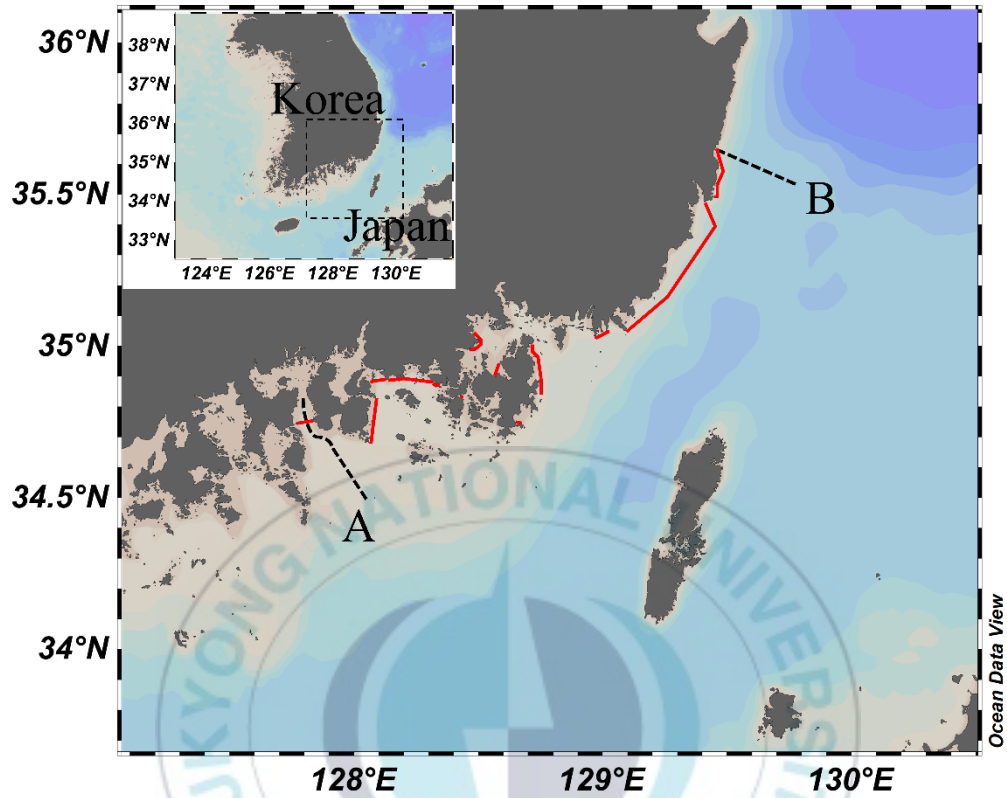


그림 1. 남동해역(경상남도, 부산광역시 및 울산광역시)(NGII, 2021; Schlitzer and Reiner, 2021). A에서 B 사이 해역이 남동해역에 해당한다. 붉은선에서 내륙쪽 해역은 기선권현망 어업의 조업금지 구역이다(MOF, 2021).

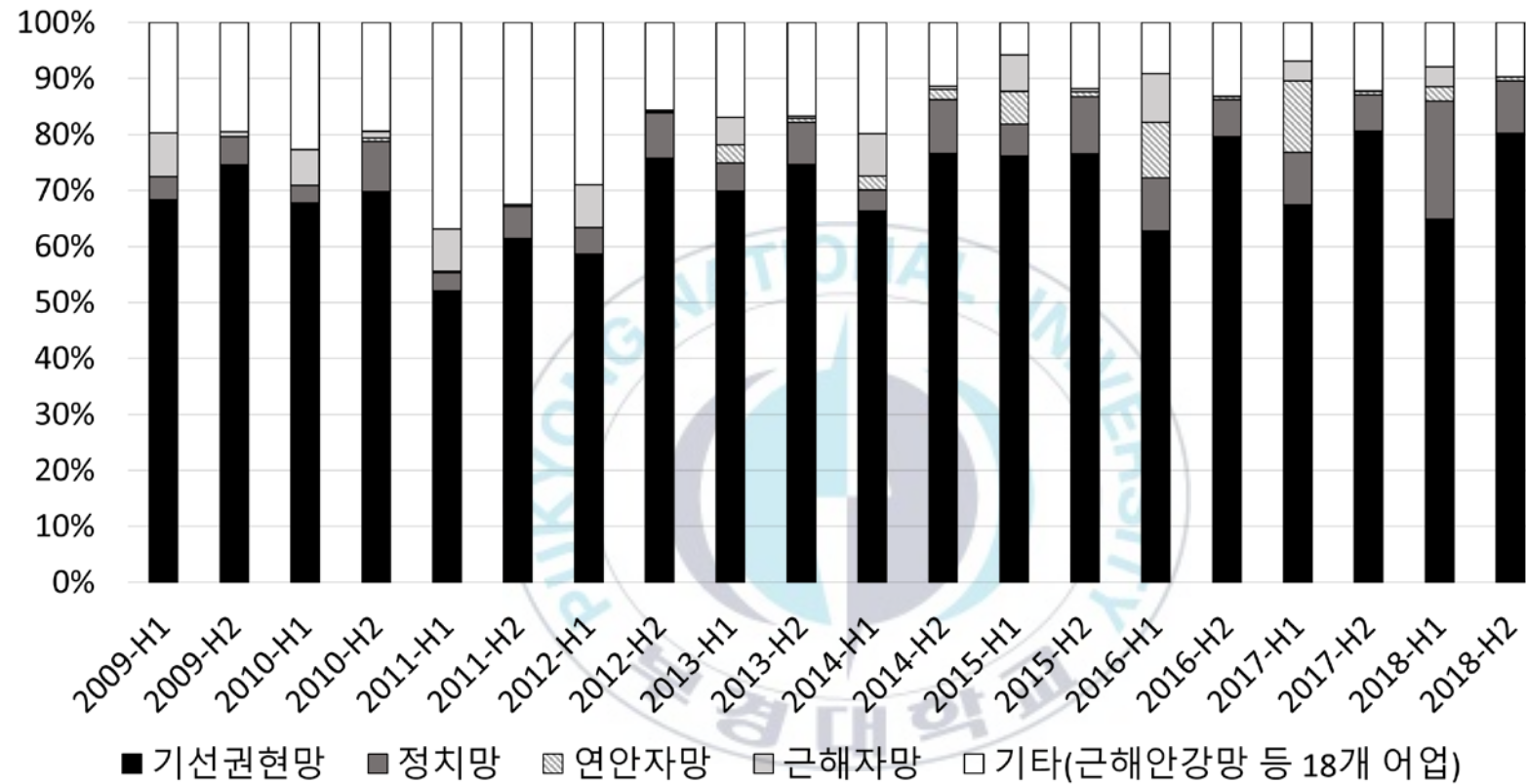


그림 2. 2009년부터 2018년까지 반기별 남동해역 멸치 어획량의 어업조성(KOSTAT, 2021). 해당기간에 기선권현망, 정치망 등 22개 어업에 의해 멸치가 어획되었다. 대표적인 멸치 어업인 기선권현망 어업은 평균적으로 남동해역 총 멸치 어획량의 약 70 %를 차지하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 기호는 표 1에 정리하였다.

II.1. 자료

II.1.1. 원자료

본 연구에서 사용된 원자료(raw data)는 2009년부터 2018년까지 연구대상해역인 남동해역(경상남도, 부산광역시 및 울산광역시)에서 수집된 반기별 총 어획량(Y_t) 자료(그림 3. (a)), 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료(그림 3. (b)), 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료(그림 4)이고, 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게(표 2)는 직접 구하였다. 반기별 총 어획량 자료는 남동해역에서 멸치를 어획하는 모든 어업에 대한 어획량이며 단위는 MT이고, 통계청(Statistics Korea; KOSTAT) 홈페이지에서 수집한 자료를 사용하였다(KOSTAT, 2021). 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료는 국립수산물과학원(National Institute of Fisheries Science; NIFS) 홈페이지에 게시된 주간어황정보에서 주별 어획량과 노력량을 반기별로 정리하여 반기별 어획량을 반기별 노력량으로 나누어 구하였으며, 이때 노력량의 단위는 척수(vessel)이다(NIFS, 2021). 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료는 반기별로 기선권현망 어업에서 어획된 세멸, 자멸,

소멸, 중멸 및 대멸의 어획량이 기록된 자료로, 한국해양수산개발원 (Korea Maritime Institute; KMI) 으로부터 제공받았다. 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게는 수협 (National Federation of Fisheries Cooperatives; Suhyup) 을 통하여 구입한 세멸, 자멸, 소멸, 중멸 및 대멸을 각각 100마리씩 무작위추출 (random sampling) 한 후, 전자저울을 이용하여 무게를 직접 측정하여 구하였다.



표 1. 기호. 본 연구에서 사용되는 기호에 대한 설명이다.

기호	설명
<i>im</i>	미성어 (immature fish; im).
<i>ma</i>	성어 (mature fish; ma).
<i>t</i>	반기 (2009년 상반기 – 2018년 하반기). $t = \{1, 2, \dots, 20\}$.
H1	상반기 (1 – 6월).
H2	하반기 (7 – 12월).
<i>ESS</i>	Effective sample size.
<i>obj</i>	목적함수 (objective function; obj).
<i>i</i>	모의실험 횟수. $i = \{1, 2, \dots, 500\}$.
<i>RD</i>	Relative difference.
<i>AB</i>	Absolute bias.
자료, 유도된 값	
Y_t	반기별 총 어획량.
I_t	반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량.
S_t	반기별 전체 어획량에 대한 미성어 어획비율.
$Y_{t,im}$	반기별 미성어 어획량.
$Y_{t,ma}$	반기별 성어 어획량.
$w_{t,im}$	반기별 미성어 한 마리의 평균무게.
$w_{t,ma}$	반기별 성어 한 마리의 평균무게.
$C_{t,im}$	반기별 미성어 어획마릿수.

$C_{t,ma}$	반기별 성어 어획마릿수.
C_t	반기별 총 어획마릿수.
$p_{t,im}$	반기별 미성어 어획마릿수의 비율.
$p_{t,ma}$	반기별 성어 어획마릿수의 비율.

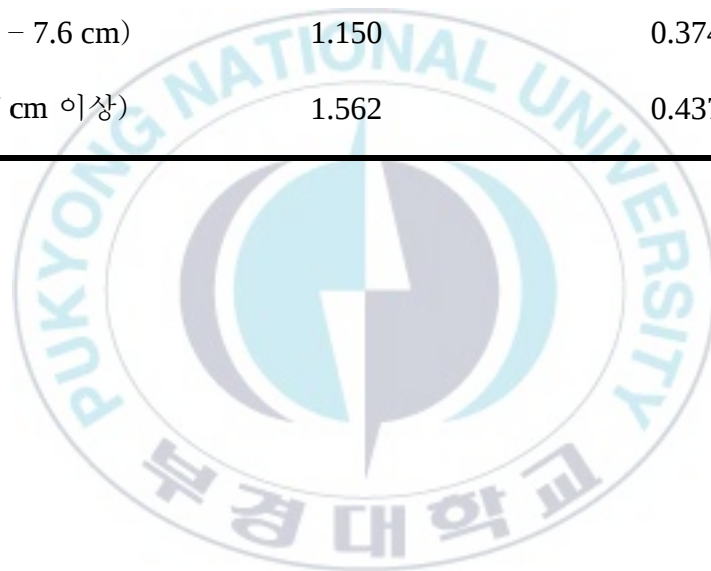
모수 및 상태변수,
유도된 값

B_t	반기별 자원량.
b	초기 자원량을 예측하기 위한 모수.
r	개체군의 내재적 성장률.
K	환경수용력.
$\varepsilon_{t,p}$	반기별 과정오차.
σ_p^2	과정오차의 분산.
q	어획능률계수.
$\varepsilon_{t,o}$	반기별 관측오차.
σ_o^2	관측오차의 분산.
σ^2	분산. $\sigma^2 = \sigma_p^2 = \sigma_o^2$ 으로 가정.
R_t	반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율.
$B_{t,im}$	반기별 미성어 자원량.
$B_{t,ma}$	반기별 성어 자원량.
$N_{t,im}$	반기별 미성어 개체수.
$N_{t,ma}$	반기별 성어 개체수.
N_t	반기별 총 개체수.
$\hat{C}_{t,im}$	반기별 미성어 어획마릿수 예측값.

$\hat{C}_{t,ma}$	반기별 성어 어획마릿수 예측값.
$\hat{C}_t$	반기별 총 어획마릿수 예측값.
P_t	반기별 환경수용력에 대한 자원량의 비율.
u_{im}	미성어에 대한 어획확률.
u_{ma}	성어에 대한 어획확률.
$\hat{p}_{t,im}$	반기별 미성어 어획마릿수 비율의 예측값.
$\hat{p}_{t,ma}$	반기별 성어 어획마릿수 비율의 예측값.
MSY	최대지속가능생산량(maximum sustainable yield; MSY). $MSY = \frac{r \cdot K}{4}$.
B_{MSY}	MSY일 때, 자원량. $B_{MSY} = \frac{K}{2}$.
F_t	반기별 어획률(harvest rate). $F_t = \frac{Y_t}{B_t}$.
F_{MSY}	MSY일 때, 어획률. $F_{MSY} = \frac{r}{2}$.

표 2. 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게. 각 체장별로 100마리씩 무작위추출(random sampling)하여 평균무게와 표준편차를 구하였다.

건멸치 체장	평균무게 (g)	표준편차 (g)
세멸 (1.5 cm 이하)	0.065	0.025
자멸 (1.6 – 3.0 cm)	0.127	0.045
소멸 (3.1 – 4.5 cm)	0.582	0.208
중멸 (4.6 – 7.6 cm)	1.150	0.374
대멸 (7.7 cm 이상)	1.562	0.437



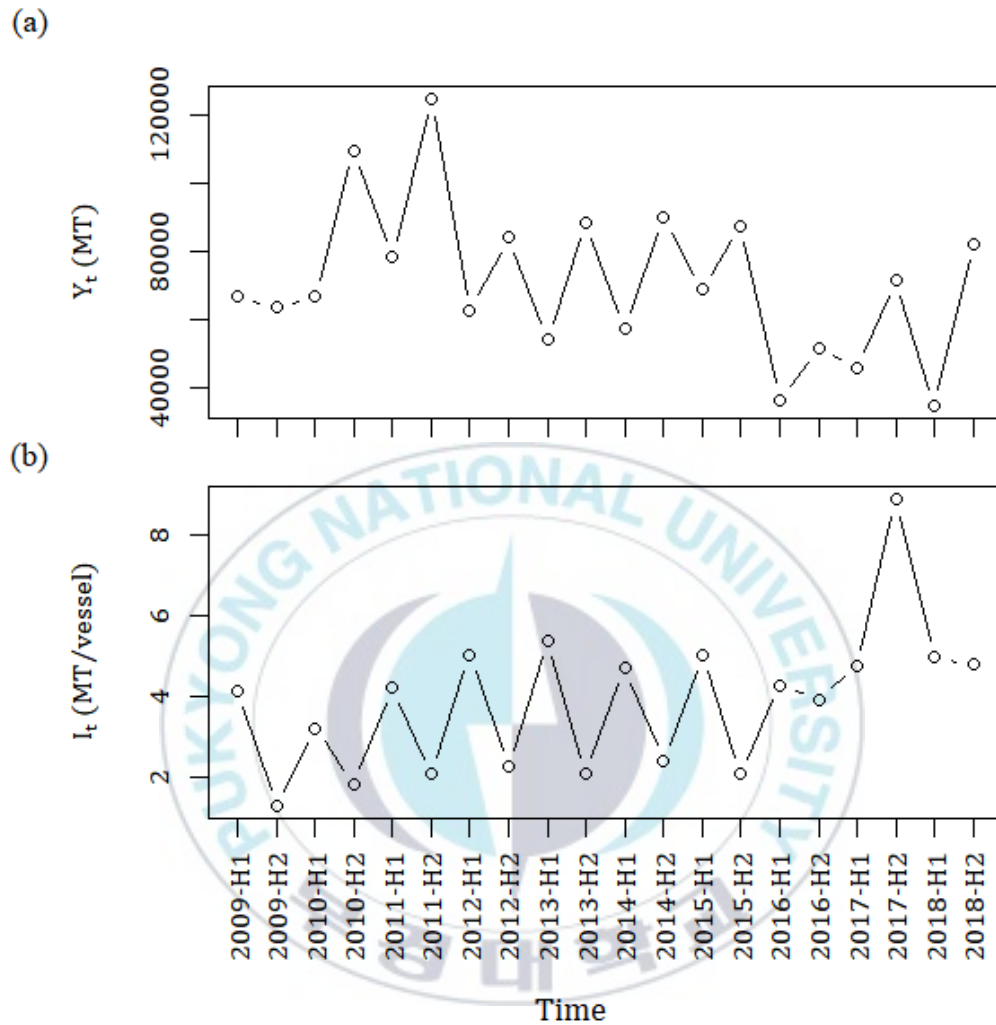


그림 3. 2009년부터 2018년까지 남동해역의 (a) 반기별 총 어획량(Y_t) 자료 (KOSTAT, 2021), (b) 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료 (NIFS, 2021). 반기별 총 어획량 자료의 단위는 MT이고, 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료의 단위는 MT/vessel이다.

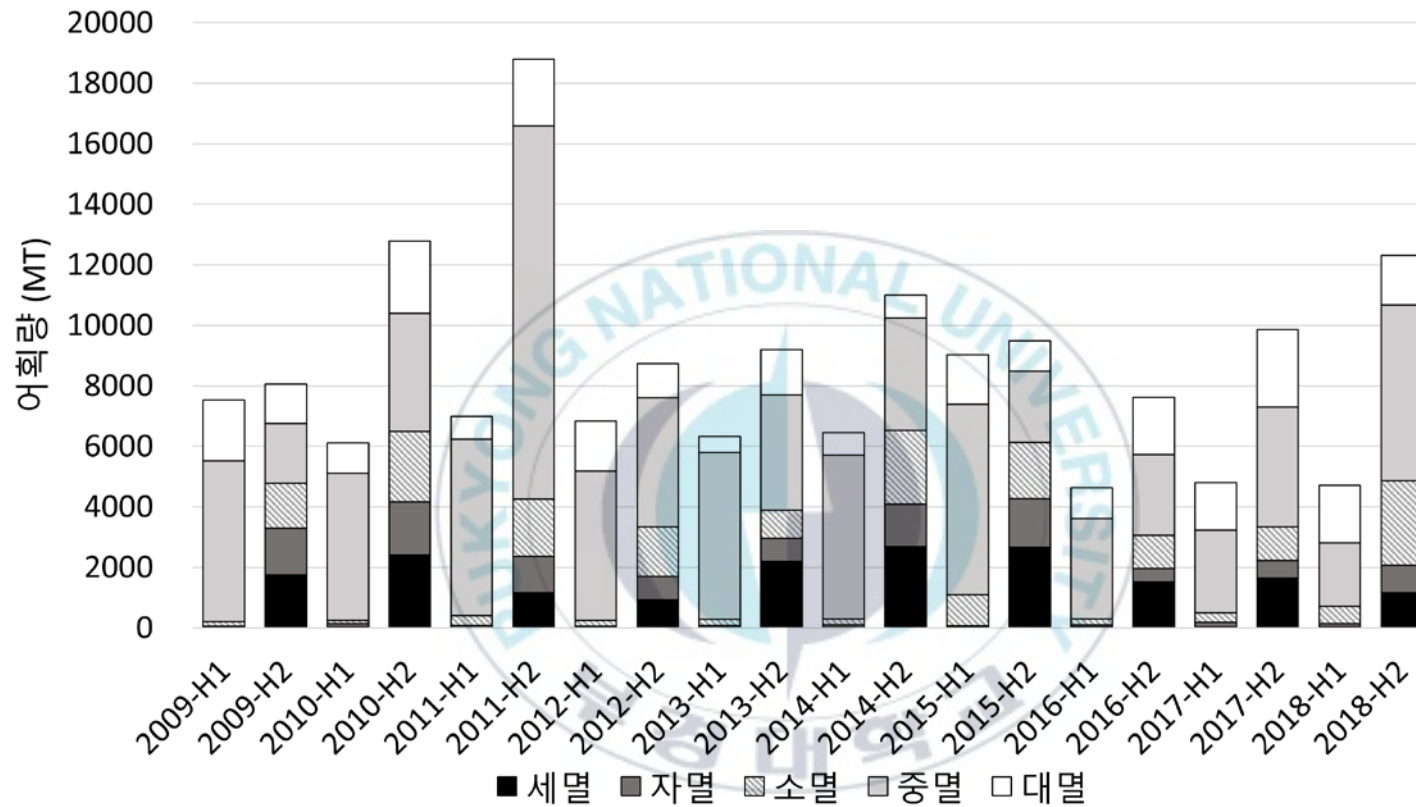


그림 4. 2009년부터 2018년까지 남동해역의 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료(한국해양수산개발원 제공). 건멸치 체장 기준으로 세멸(1.5 cm 이하), 자멸(1.6 – 3.0 cm), 소멸(3.1 – 4.5 cm), 중멸(4.6 – 7.6 cm) 및 대멸(7.7 cm 이상)로 구분되어 어획량이 기록되었다.

II.1.2. 자료 가정

2009년부터 2018년까지 기간에 남동해역에서 멸치어업은 기선권현망, 정
치망 등 22개 어업에 의해 어획이 일어났으며, 기선권현망 어업은 반기별로
남동해역 멸치 총 어획량의 약 52 - 80 %를 차지하였다(그림 2). 본 연구에
서는 반기별로 기선권현망 어업의 어획량이 총 어획량의 50 % 이상을 차지하
고 평균적으로 총 어획량의 약 70 %를 차지하므로, 기선권현망 어업의 단위
노력당 어획량 자료와 체장별 어획물 조성 자료가 남동해역 멸치 어업의 특성
을 대표한다고 가정하였다.

본 연구에서는 선행연구를 참고하여 멸치 체장을 기준으로 미성어
(immature fish; im)와 성어(mature fish; ma) 가정을 추가적으로 하였다. 본
연구에서 멸치 체장과 관련하여 이용가능한 자료는 반기별 기선권현망 어업
의 체장별 어획물 조성 자료인데, 이 자료는 생멸치가 아닌 건멸치에 대한 체
장 정보를 가지고 있다. 생멸치에서 건멸치로 변할 때, 체장이 어느 정도 감
소하는지는 현재로서 알려진 정보가 없기 때문에, 선행연구의 멸치 성숙체장
9 cm를 참고하여 세멸, 자멸, 소멸, 중멸은 미성어로 가정하였고, 대멸은 성어
로 가정하였다(Choi and Kim, 1988).

II.1.3. 정리한 자료 값

체장에 대한 미성어(세멸, 자멸, 소멸, 중멸)와 성어(대멸) 가정에 의해 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료(그림 4)를 반기별 미성어·성어 어획물 조성 자료로 정리하였고, 반기별로 미성어 어획량을 미성어와 성어 어획량의 합으로 나누어 반기별 미성어 어획비율(S_t)을 구하였다(그림 5).

체장별 멸치(생멸치) 한 마리의 평균무게는 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게(표 2)를 수율의 중앙값인 0.265로 나누어 구하였다(수산청, 1995): 세멸(0.246 g); 자멸(0.481 g); 소멸(2.196 g); 중멸(4.338 g); 대멸(5.894 g). 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)를 구하기 위해 다음 과정을 진행하였다. 먼저, 반기별 기선권현망 어업의 체장별 어획물 조성 자료에서 미성어에 해당하는 세멸, 자멸, 소멸, 중멸 각각의 어획량을 해당 체장별 건멸치 한 마리의 평균무게(표 2)로 각각 나누어 주어 각 체장별로 마릿수를 구하였다. 다음으로 세멸, 자멸, 소멸, 중멸 각각의 멸치 마릿수와 앞에서 구한 해당 체장별 생멸치 한 마리의 평균무게(세멸: 0.246 g; 자멸: 0.481 g; 소멸: 2.196 g; 중멸: 4.338 g)를 각각 곱해준 후 합하였다. 끝으로, 합한 값을 미성어 총 마릿수(세멸, 자멸, 소멸, 중멸 마릿수의 합)로 나누어 주어, 반기별 미성어 한 마리의 평균무게를 구하였다. 따라서, 반기별 미성어 한 마리의 평균무게는 반기별로 변동성을 가지도록 하였다(그림 6). 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)는 대멸의 생멸치 한 마리의 평균무게(5.89 g)를 이용하였다. 어획

물 자료로부터 구하여진 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)가 멸치 개체군의 미성어 한 마리의 평균무게를 대신하고, 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)가 멸치 개체군의 성어 한 마리의 평균무게를 대신한다고 가정하였다.



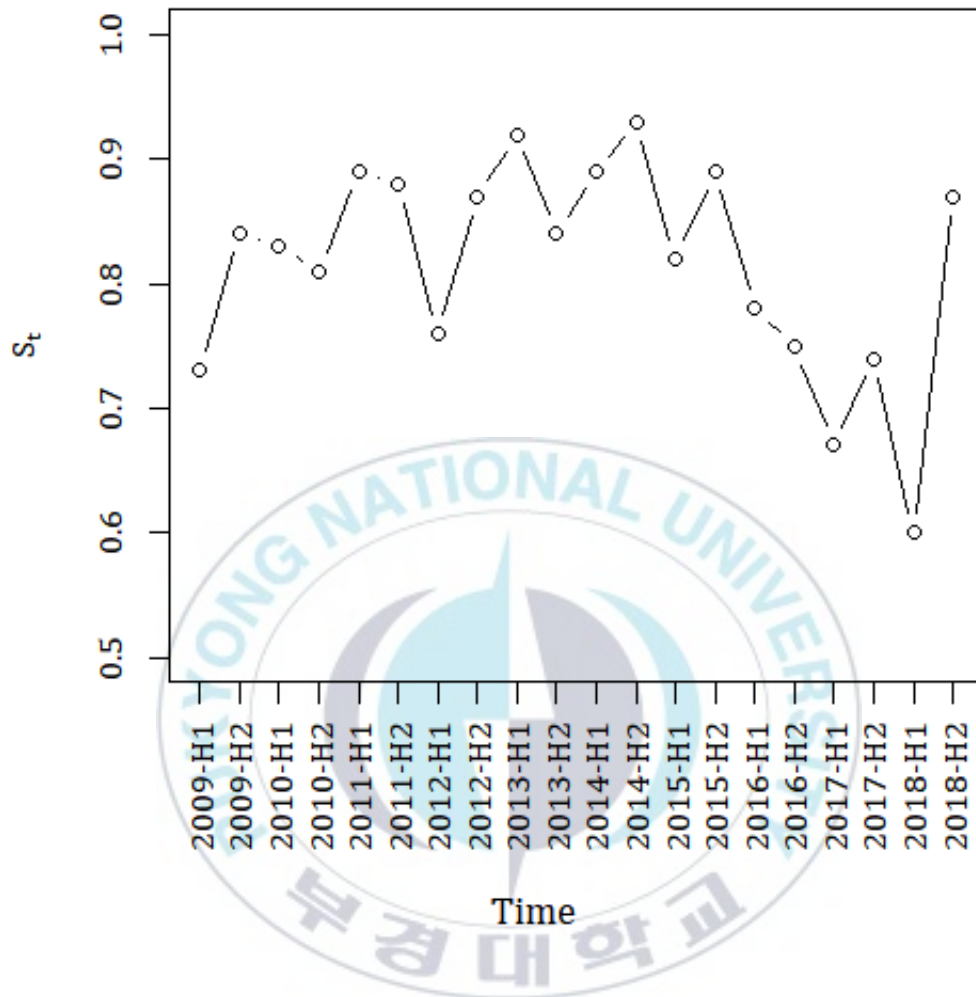


그림 5. 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 어획비율(S_t).

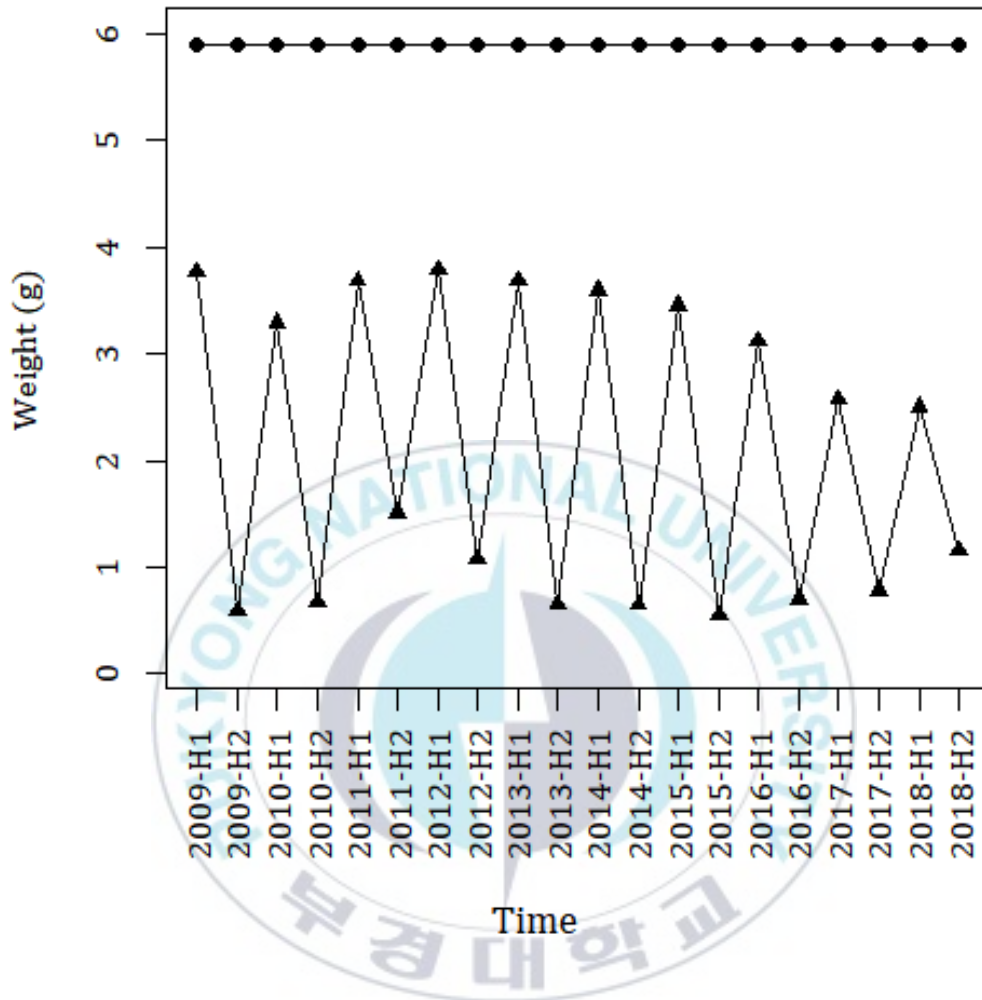


그림 6. 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 한 마리의 평균무게 ($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게 ($w_{t,ma}$). 삼각형(▲)은 반기별 미성어 한 마리의 평균무게 값을 나타내고, 원(●)은 반기별 성어 한 마리의 평균무게 값을 나타낸다.

II.2. 자원평가 방법 개발

II.2.1. 상태공간 잉여생산 모델

본 연구에서 멸치 자원평가를 위해 상태공간 잉여생산 모델(An, 2021; Jung et al., 2021; Hyun and Kim, 2022; Schaefer, 1954)에 반기별 총 어획량 (Y_t) 자료, 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료를 이용하였고, 미성어·성어 자원량 예측(predict)을 위해 추가적으로 반기별 미성어 어획비율(S_t), 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$), 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)를 자료로서 모델에 적용하였다(표 3; 그림 7).

$$B_1 = b \cdot K \cdot \exp(\varepsilon_{1,p}) \quad (1)$$

$$B_{t+1} = \left[B_t + r \cdot \left(1 - \frac{B_t}{K} \right) \cdot B_t - Y_t \right] \cdot \exp(\varepsilon_{t,p}), \text{ where } t \geq 1 \quad (2)$$

$$I_t = q \cdot B_t \cdot \exp(\varepsilon_{t,o}), \text{ where } t \geq 1 \quad (3)$$

상태공간 잉여생산 모델은 식 (1), 식 (2)에서 과정오차(process error; $\varepsilon_{t,p} \sim N(0, \sigma_p^2)$)를 고려하여 자원량(B_t)을 상태변수(random effects; state variable; hidden variable)로서 취급하고, 식 (3)에서 단위노력당 어획량(I_t) 자료에 대해 관측오차(observation error; $\varepsilon_{t,o} \sim N(0, \sigma_o^2)$)를 고려한다. 식 (1)

에서 초기 자원량(B_1)은 모수(b), 환경수용력(K)과 과정오차($\varepsilon_{1,p}$)를 통해 고려된다. 식 (2)에서 시점 t 의 자원량(B_t)에 성장, 생식 등에 의해 발생한 잉여생산량($r \cdot (1 - \frac{B_t}{K}) \cdot B_t$)을 더해주고 어획량(Y_t)을 뺀 후, 과정오차($\varepsilon_{t,p}$)를 고려하면 다음 시점의 자원량(B_{t+1})이 예측된다. 여기서, r 은 개체군의 내재적 성장률이다. 식 (3)에서 단위노력당 어획량(I_t) 자료는 자원량(B_t)의 상대적인 지표로서 어획능력계수(q)와 관측오차($\varepsilon_{t,o}$)를 통해 고려된다.

$$P_1 = b \cdot \exp(\varepsilon_1) \quad (4)$$

$$P_{t+1} = \left[P_t + r \cdot (1 - P_t) \cdot P_t - \frac{Y_t}{K} \right] \cdot \exp(\varepsilon_t), \quad \text{where } t \geq 1 \quad (5)$$

$$I_t = q \cdot P_t \cdot K \cdot \exp(\varepsilon_t), \quad \text{where } t \geq 1 \quad (6)$$

자원량(B_t)은 그 자체로 값이 크기 때문에 수치최적화의 안정성을 위해 자원량을 환경수용력(K)으로 나누어 주어 비율값인 P_t 를 상태변수로서 고려하였다($P_t = \frac{B_t}{K}$). 식 (1)과 식 (2)에서 양변을 K 로 나누어 주어 식 (4), 식 (5)로 전환하였고, 식 (3)의 우변항에서 $B_t = P_t \cdot K$ 로 전환하여 식 (6)으로 표현하였다. 또한, 식 (1), 식 (2)에서 과정오차(process error; $\varepsilon_{t,p} \sim N(0, \sigma_p^2)$)의 분산(σ_p^2)과 식 (3)에서 관측오차(observation error; $\varepsilon_{t,o} \sim N(0, \sigma_o^2)$)의 분산(σ_o^2)이 같다고 가정하여(즉, $\sigma^2 = \sigma_p^2 = \sigma_o^2$), 수치최적화의 안정성을 도모

하였다(식 (4) – 식 (6)).

다음은 본 연구에서 기존 상태공간 잉여생산모델(식 (1) – 식 (6))에 추가한 부분이다.

$$B_{t,im} = B_t \cdot R_t \quad (7)$$

$$B_{t,ma} = B_t \cdot (1 - R_t) \quad (8)$$

반기별 자원량(B_t)에서 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 반기별 성어 자원량($B_{t,ma}$)을 분리하기 위해 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)은 모수로서 고려되었다(식 (7), 식 (8)).

$$N_{t,im} = \frac{B_{t,im}}{w_{t,im}} \quad (9)$$

$$N_{t,ma} = \frac{B_{t,ma}}{w_{t,ma}} \quad (10)$$

$$N_t = N_{t,im} + N_{t,ma} \quad (11)$$

식 (7), 식 (8)에서 구한 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 반기별 성어 자

원량($B_{t,ma}$)을 자료값인 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)로 각각 나누어 줌으로써 반기별 미성어 개체수($N_{t,im}$)와 반기별 성어 개체수($N_{t,ma}$)를 구하였다(식 (9), 식 (10)). 반기별 총 개체수(N_t)는 반기별 미성어 개체수와 반기별 성어 개체수의 합으로 구하였다(식 (11)).

$$Y_{t,im} = Y_t \cdot S_t \quad (12)$$

$$Y_{t,ma} = Y_t \cdot (1 - S_t) \quad (13)$$

반기별 총 어획량(Y_t)과 반기별 미성어 어획비율(S_t)을 이용하여 반기별 미성어 어획량($Y_{t,im}$)과 반기별 성어 어획량($Y_{t,ma}$)을 구하였다(식 (12), 식 (13)).

$$C_{t,im} = \frac{Y_{t,im}}{w_{t,im}} \quad (14)$$

$$C_{t,ma} = \frac{Y_{t,ma}}{w_{t,ma}} \quad (15)$$

$$C_t = C_{t,im} + C_{t,ma} \quad (16)$$

반기별 미성어 개체수($N_{t,im}$)와 반기별 성어 개체수($N_{t,ma}$)를 구하는 방법처럼, 식 (12), 식 (13)에서 구한 반기별 미성어 어획량($Y_{t,im}$)과 반기별 성어 어획량($Y_{t,ma}$)을 자료값인 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)로 각각 나누어 줌으로써 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)와 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)를 구하였다(식 (14), 식 (15)). 반기별 총 어획마릿수(C_t)는 반기별 미성어 어획마릿수와 반기별 성어 어획마릿수의 합으로 구하였다(식 (16)).

$$\hat{C}_{t,im} = u_{im} \cdot N_{t,im} \quad (17)$$

$$\hat{C}_{t,ma} = u_{ma} \cdot N_{t,ma} \quad (18)$$

$$\hat{C}_t = \hat{C}_{t,im} + \hat{C}_{t,ma} \quad (19)$$

미성어에 대한 어획확률(u_{im})은 반기별로 같다고 가정된 모수로서 반기별 미성어 개체수($N_{t,im}$)와 곱을 통해 반기별 미성어 어획마릿수 예측값($\hat{C}_{t,im}$)을 구하였다(식 (17)). 성어에 대한 어획확률(u_{ma}) 또한 반기별로 같다고 가정된 모수로서 반기별 성어 개체수($N_{t,ma}$)와 곱을 통해 반기별 성어 어획마릿수 예측값($\hat{C}_{t,ma}$)을 구하였다(식 (18)). 반기별 총 어획마릿수 예측값($\hat{C}_t$)은 반기별 미성어 어획마릿수 예측값과 반기별 성어 어획마릿수 예측값의 합으로 구하였다(식 (19)).

$$p_{t,im} = \frac{C_{t,im}}{C_t} \quad (20)$$

$$p_{t,ma} = 1 - p_{t,im} \quad (21)$$

반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)은 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)를 반기별 총 어획마릿수(C_t)로 나눈 값으로 구하였다(식 (20)). 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)은 1에서 반기별 미성어 어획마릿수의 비율을 뺀 값으로 구하였다(식 (21)).

$$\hat{p}_{t,im} = \frac{\hat{C}_{t,im}}{\hat{C}_t} \quad (22)$$

$$\hat{p}_{t,ma} = 1 - \hat{p}_{t,im} \quad (23)$$

반기별 미성어 어획마릿수 비율의 예측값($\hat{p}_{t,im}$)은 반기별 미성어 어획마릿수 예측값($\hat{C}_{t,im}$)을 반기별 총 어획마릿수 예측값($\hat{C}_t$)으로 나눈 값으로 구하였다(식 (22)). 반기별 성어 어획마릿수 비율의 예측값($\hat{p}_{t,ma}$)은 1에서 반기별 미성어 어획마릿수 비율의 예측값을 뺀 값으로 구하였다(식 (23)).

표 3. 우도함수.

자료	우도함수	모수	상태변수
	L_1 : 로그정규분포	b, σ^2	P_1
Y_t	L_2 : 로그정규분포	r, K, σ^2	P_t
I_t	L_3 : 로그정규분포	q, K, σ^2	
$Y_t, S_t, w_{t,im}, w_{t,ma}$	L_4 : 이항분포	u_{im}, u_{ma}, R_t	

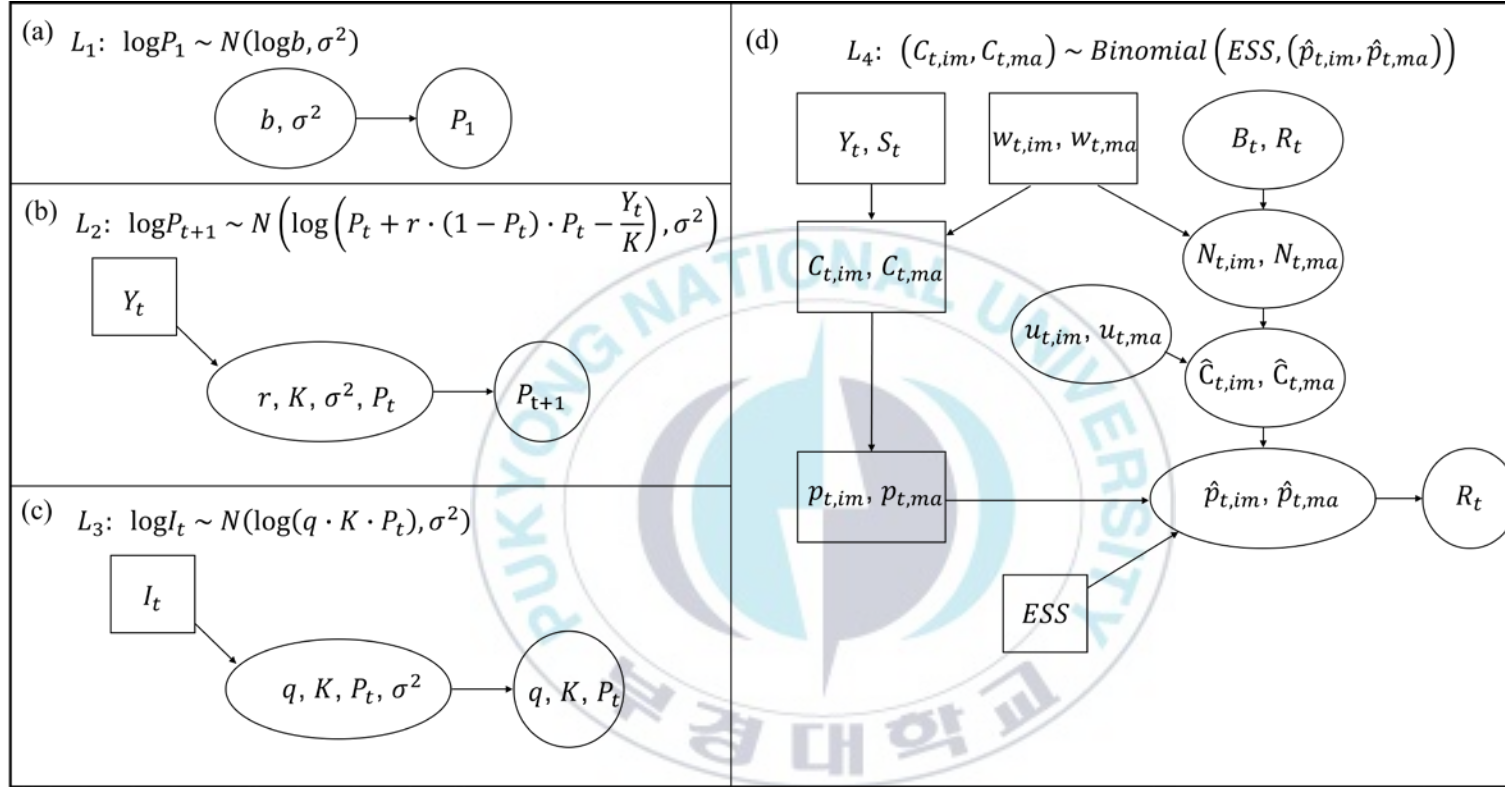


그림 7. 우도함수에 대한 유향 비순환 그래프 (directed acyclic graph; DAG). 정사각형은 자료를 의미하고, 원형과 타원형은 모수와 상태변수를 의미한다. (a) $L_1: \log P_1 \sim N(\log b, \sigma^2)$. (b) $L_2: \log P_{t+1} \sim N\left(\log\left(P_t + r \cdot (1 - P_t) \cdot P_t - \frac{Y_t}{K}\right), \sigma^2\right)$. (c) $L_3: \log I_t \sim N(\log(q \cdot K \cdot P_t), \sigma^2)$. (d) $L_4: (C_{t,im}, C_{t,ma}) \sim \text{Binomial}\left(ESS, (\hat{p}_{t,im}, \hat{p}_{t,ma})\right)$.

II.2.2. 우도함수

모델에서 우도함수 (likelihood function)는 총 4가지 (L_1, L_2, L_3, L_4)가 고려되었다(표 3; 그림 7).

$$L_1: \log P_1 \sim N(\log b, \sigma^2) \quad (24)$$

$$L_2: \log P_{t+1} \sim N\left(\log\left(P_t + r \cdot (1 - P_t) \cdot P_t - \frac{Y_t}{K}\right), \sigma^2\right) \quad (25)$$

$$L_3: \log I_t \sim N(\log(q \cdot K \cdot P_t), \sigma^2) \quad (26)$$

$$L_4: (C_{t,im}, C_{t,ma}) \sim \text{Binomial}\left(ESS, (\hat{p}_{t,im}, \hat{p}_{t,ma})\right) \quad (27)$$

L_1 과 L_2 에서 $\log P_t$ 와 L_3 에서 $\log I_t$ 는 정규분포를 가정하였고(식 (24) – 식 (26)), L_4 에서 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)와 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)가 이항분포를 따르는 것으로 가정하였다(식 (27)). L_4 에서 ESS 는 effective sample size로서 69를 입력값으로 주었다. 각각의 우도함수는 다음 식으로서 고려된다(식 (28) – 식 (31)).

$$L_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\log P_1 - \log b)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (28)$$

$$L_2 = \prod_{t=1}^{20} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left(- \frac{\left(\log P_{t+1} - \log \left(P_t + r \cdot (1 - P_t) \cdot P_t - \frac{Y_t}{K} \right) \right)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (29)$$

$$L_3 = \prod_{t=1}^{20} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp \left(- \frac{(\log I_t - \log(q \cdot K \cdot P_t))^2}{2\sigma^2} \right) \quad (30)$$

$$L_4 = \prod_{t=1}^{20} \frac{ESS!}{(ESS \cdot p_{t,im})! (ESS \cdot p_{t,ma})!} \cdot (\hat{p}_{t,im})^{ESS \cdot p_{t,im}} \cdot (\hat{p}_{t,ma})^{ESS \cdot p_{t,ma}} \quad (31)$$



II.2.3. 사전분포

수치최적화의 안정성을 위해 모수 추정에 어려움이 따르는 모수에 대해서 사전분포를 가정하였다(표 4). 개체군의 내재적 성장률(r)과 환경수용력(K)에는 사전분포로서 로그정규분포를 따른다고 가정하였고, 미성어에 대한 어획확률(u_{im})과 성어에 대한 어획확률(u_{ma})은 베타분포를 따른다고 가정하였다. 개체군의 내재적 성장률, 환경수용력, 미성어에 대한 어획확률, 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 최빈값(Mode)과 변동계수(CV)를 입력값으로 고려하였다. 개체군의 내재적 성장률과 환경수용력 각각의 사전분포에서 최빈값은 선행연구를 참고하였고(FishBase, 2021; Froese et al, 2017), 미성어에 대한 어획확률과 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 최빈값은 0.00에서 1.00 사이의 범위에서 임의의 값을 주었다. 개체군의 내재적 성장률, 환경수용력, 미성어에 대한 어획확률, 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 변동계수는 사전분포를 그래프로 확인하여 입력값을 결정하였다(그림 8).

로그정규분포($X \sim \log N(\mu_{\log X}, \sigma_{\log X}^2)$)에서 모수인 평균($\mu_{\log X}$)과 분산($\sigma_{\log X}^2$)은 최빈값(Mode)과 변동계수(CV)를 이용하여 구할 수 있다(식 (32), 식 (33)).

$$\mu_{\log X} = \log(\text{Mode}(X) \cdot (\text{CV}(X)^2 + 1)) \quad (32)$$

$$\sigma_{\log X}^2 = \log(\text{CV}(X)^2 + 1) \quad (33)$$

베타분포($X \sim \text{Beta}(\alpha, \beta)$)에서 모수인 α, β 또한 최빈값(Mode)과 변동 계수(CV)를 이용하여 구할 수 있다(식 (34) – 식(38)).

$$a = \text{CV}(X)^2 \quad (34)$$

$$b = \text{CV}(X)^2 \cdot (3 \cdot \text{Mode}(X) - 1) + \text{Mode}(X) - 1 \quad (35)$$

$$c = 1 - 2 \cdot \text{Mode}(X) \quad (36)$$

$$\alpha = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (37)$$

$$\beta = \frac{\alpha - 1 - (\alpha - 2) \cdot \text{Mode}(X)}{\text{Mode}(X)} \quad (38)$$

표 4. 모수의 사전분포. 각 모수의 사전분포에서 최빈값(Mode)과 변동계수(CV)를 가정하였을 때, 해당 사전분포의 Hyperparameter를 계산하였다.

모수	사전분포	최빈값	변동계수	Hyperparameter
r	$\log N(\mu_{\log r}, \sigma_{\log r}^2)$	1.05	1.00	$\mu_{\log r} = 0.74, \sigma_{\log r}^2 = 0.69$
K	$\log N(\mu_{\log K}, \sigma_{\log K}^2)$	456177.30 (MT)	1.00	$\mu_{\log K} = 13.72, \sigma_{\log K}^2 = 0.69$
u_{im}	$Beta(\alpha, \beta)$	0.21	0.60	$\alpha = 1.46, \beta = 2.74$
u_{ma}	$Beta(\alpha, \beta)$	0.21	0.60	$\alpha = 1.46, \beta = 2.74$

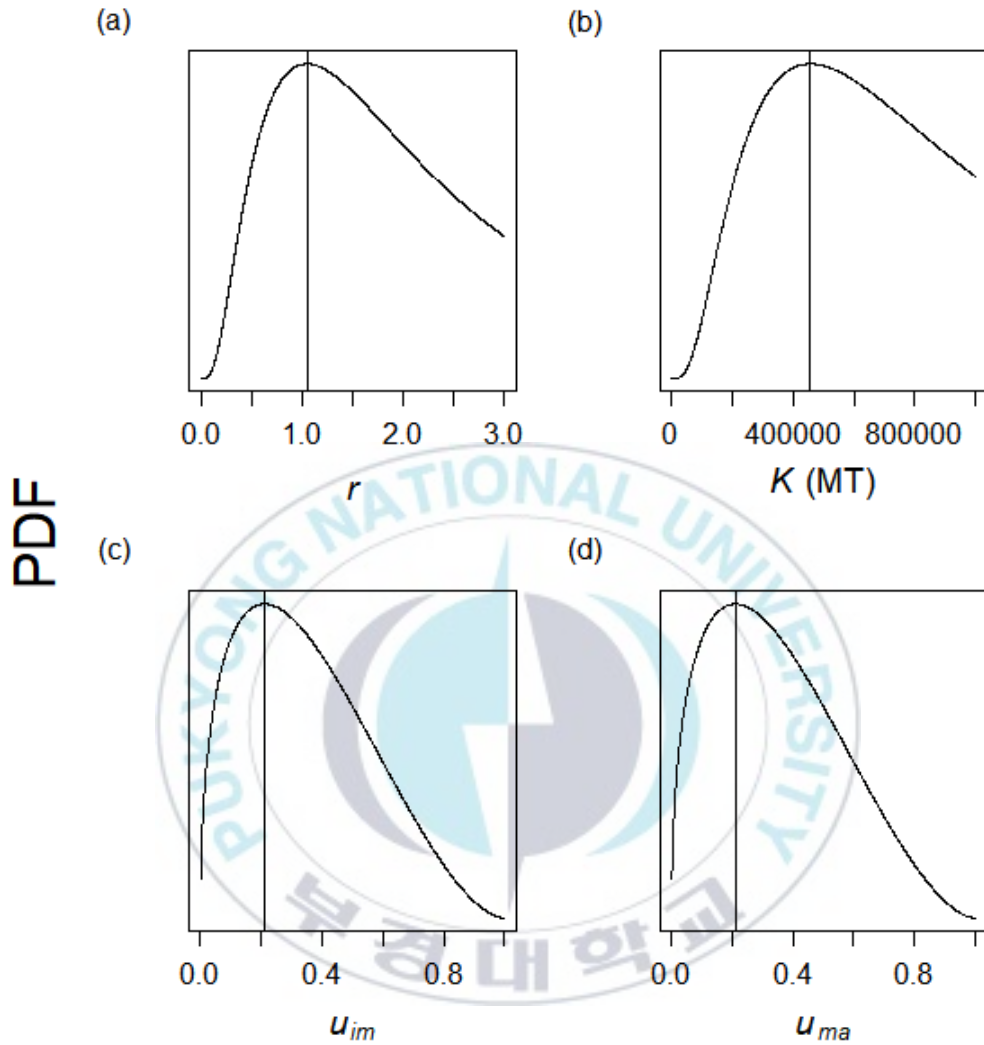


그림 8. 사전분포. (a) 개체군의 내재적 성장률(r). (b) 환경수용력(K). (c) 미성어에 대한 어획확률(u_{im}). (d) 성어에 대한 어획확률(u_{ma}). 각 사전분포에서 수직선은 최빈값(Mode)이다.

II.2.4. 모수 추정 및 상태변수 예측

목적함수 (objective function; obj)는 음의 로그함수로서 고려되었으며, 각각의 우도함수 (L_1, L_2, L_3, L_4)와 각각의 사전분포 ($Pr(r), Pr(K), Pr(u_{im}), Pr(u_{ma})$)가 상호독립인 것을 가정하였다(식 (39)).

$$obj = -1 \cdot \log(L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot Pr(r) \cdot Pr(K) \cdot Pr(u_{im}) \cdot Pr(u_{ma})) \quad (39)$$

모수 추정 (estimate)과 상태변수 예측(predict)에는 R 프로그램과 R 프로그램의 TMB package를 사용하였다. R 프로그램의 nlminb 명령어를 사용하여 수치최적화(numerical optimization)가 이루어지며, 목적함수 값을 최소화하는 모수들의 값과 모수들의 불확실성을 추정하고, 추정된 모수들의 값을 이용하여 상태변수들의 값을 예측하게 된다(Kristensen et al., 2016; Team RC, 2013). 본 연구에서 작성한 TMB 코드는 부록에 수록하였다.

II.3. 모델 검증

모델 검증은 자료 적합도(goodness of fit)와 모의실험(simulation)을 통하여 이루어졌다. 자료 적합도는 모델에서 결과값이 자료의 추세를 따르는 정도를 보아 자료에 대해 적합한 모델인지 판단한다. 모의실험은 추정된 모수 값 또는 근사값을 참값으로 이용하여 관측오차와 과정오차가 고려된 가짜 자료를 생성한 후, 이 가짜자료를 모델에 다시 넣어 추정된 모수 값을 참값인 모수 값과 비교하여 이루어 진다. 가짜자료 1세트는 관측오차와 과정오차가 고려되어 생성된 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료, 반기별 미성어 어획비율(S_t)과 기존 자료인 반기별 총 어획량(Y_t) 자료, 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$) 및 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)로 구성되어 있다. 모의실험은 가짜자료 500세트를 생성하여, 각 가짜자료 세트별로 수치최적화를 하여 모수 추정을 시도하였다. 즉, 수치최적화를 500번 하였다. 모수 추정에 성공한 모의실험 결과는 Relative difference (RD)로서 고려되었다(식 (40)).

$$RD = \frac{\hat{\theta}_t - \theta}{\theta} \times 100 (\%) \quad (40)$$

식 (40)에서 θ 는 참값으로 가정된 모수이고, $\hat{\theta}_t$ 는 추정된 모수이다.

III. 결과

III.1. 한국 남동해역 멸치 자원 평가 및 미성어·성어 자원량 예측 결과

모수 점추정치(point estimate)와 표준오차(standard error)는 표 5에 정리하였고, 추정된 모수 간의 상관관계는 그림 9에 정리하였다. 개체군의 내재적 성장률(r)은 1.338로 추정되었고, 환경수용력(K)은 765,200 MT으로 추정되었다(표 5). 한국 남동해역 멸치 자원의 최대지속가능생산량(maximum sustainable yield; MSY)은 개체군의 내재적 성장률과 환경수용력에 의해 계산되는 지표로서(즉, $MSY = \frac{rK}{4}$), 255,898 MT으로 추정되었다(그림 10 (a)). MSY일 때, 어획률(F_{MSY}) 결과는 0.67로 추정되었다(그림 10 (b)). MSY 추정 결과와 F_{MSY} 추정결과로 보아, 2009년 상반기부터 2018년 하반기 기간에 이루어진 남동해역에서 멸치 어업은 MSY 값을 넘지 않고 F_{MSY} 값을 넘지 않는 어획이 이루어졌다.

반기별 남동해역 멸치 자원량(B_t)은 최소 262,902 MT (2009년 하반기)에서 최대 1,165,890 MT (2009년 상반기)인 것으로 예측되었다(그림 11). 멸치 자원량 예측값(predicted value)은 7번째 시점인 2012년 상반기 이후로 환경수용력(K)에 가까운 정도에서 변화하였다. 또한, 2번째 시점인 2009년 하반기를 제외한 멸치 자원량 예측값은 MSY일 때 자원량(B_{MSY}) 보다 높은 상태였다. 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$) 예측값은 반기별 성어 자원량($B_{t,ma}$)

예측값 보다 반기별로 높은 값이 예측되었다(그림 12). 미성어 자원량 예측값은 최소 65,656 MT 부터 최대 257,117 MT로 예측되었고, 성어 자원량 예측값은 최소 11,840 MT 부터 최대 90,611 MT로 예측되었다. 미성어 자원량 예측값은 전체 자원량에서 반기별로 최소 0.600부터 최대 0.930까지 범위의 비율을 차지하였다(표 5; 그림 12).



표 5. 수치최적화 결과 값.

모수	점추정치	표준오차
σ	0.320	0.054
b	1.425	0.495
r	1.338	0.236
K	7.652×10^5 (MT)	4.841×10^5 (MT)
q	5.491×10^{-6} (vessel ⁻¹)	3.797×10^{-6} (vessel ⁻¹)
u_{im}	0.210	0.273
u_{ma}	0.210	0.273
R_1	0.730	0.367
R_2	0.840	0.274
R_3	0.830	0.265
R_4	0.810	0.306
R_5	0.890	0.186
R_6	0.880	0.206
R_7	0.760	0.340
R_8	0.870	0.225
R_9	0.920	0.141
R_{10}	0.840	0.272
R_{11}	0.890	0.186
R_{12}	0.930	0.148
R_{13}	0.820	0.277
R_{14}	0.890	0.212
R_{15}	0.780	0.321
R_{16}	0.750	0.364
R_{17}	0.670	0.412
R_{18}	0.740	0.371
R_{19}	0.600	0.447
R_{20}	0.870	0.223

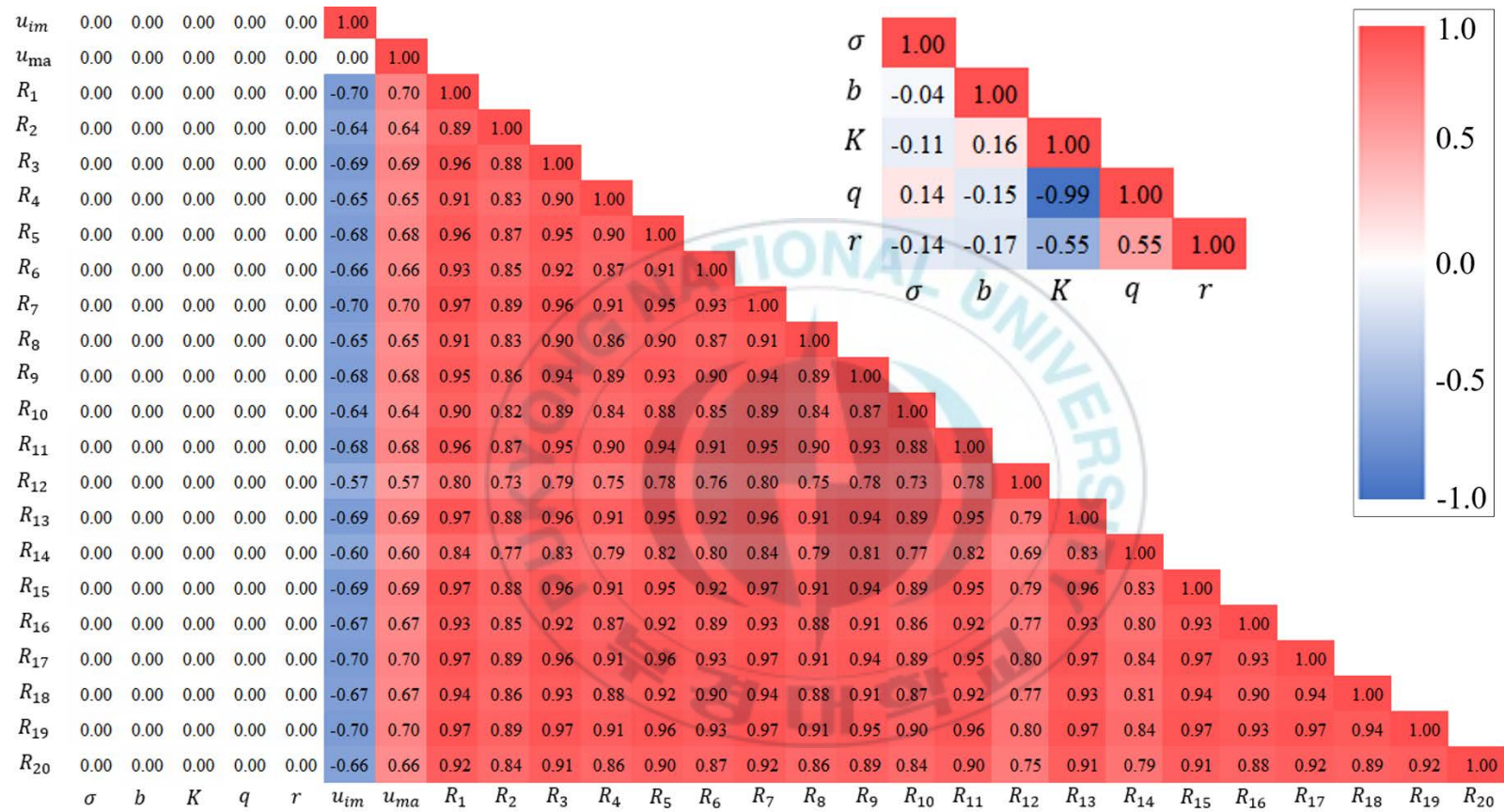


그림 9. 수치최적화 결과, 추정된 모수 간의 상관관계. 1.00(붉은색)에 가까울수록 양의 상관관계, -1.00(푸른색)에 가까울수록 음의 상관관계를 가진다. 0.00에 가까울수록 상관관계가 있지 않다.

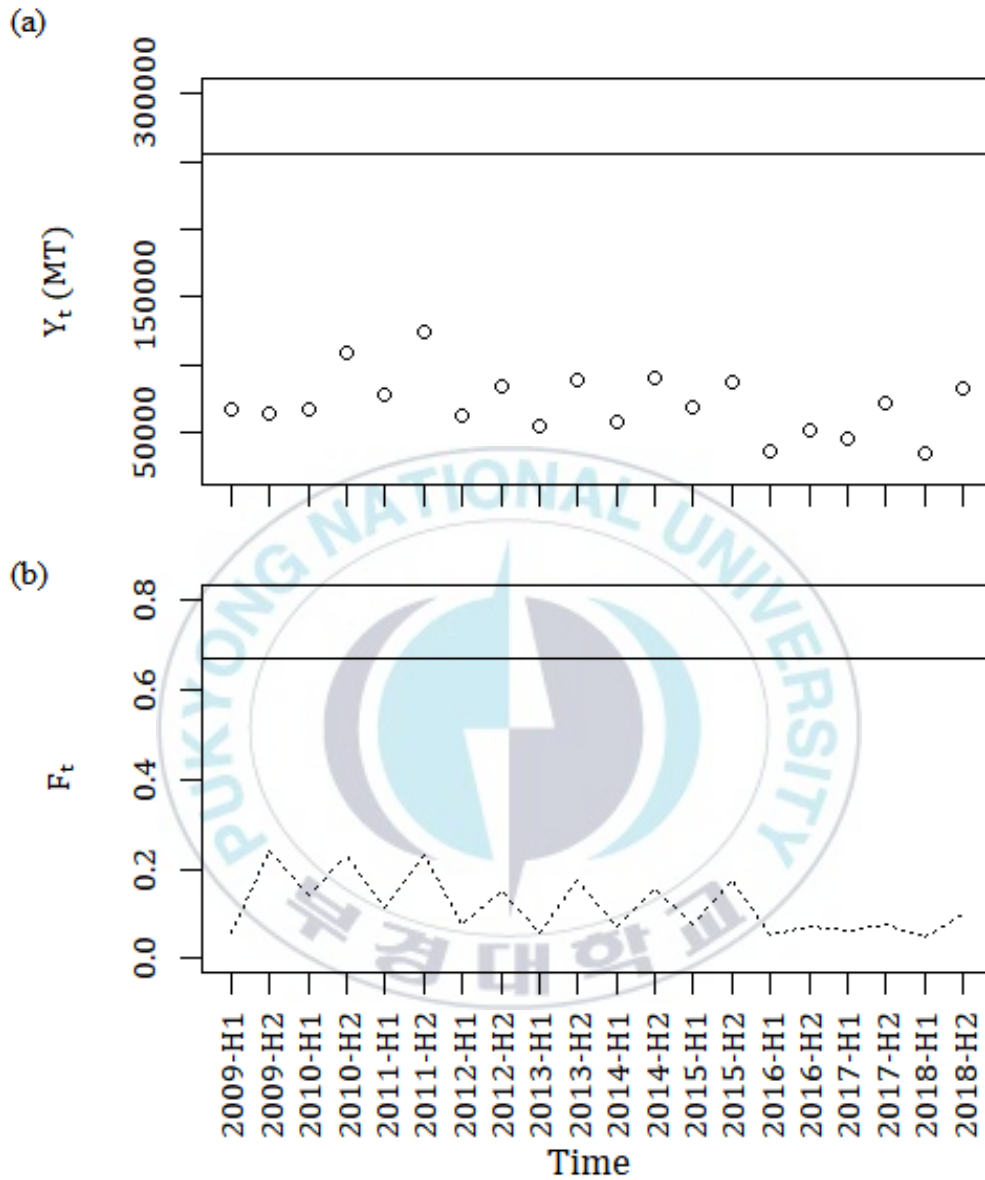


그림 10. (a) MSY 결과; (b) MSY일 때, 어획률(F_{MSY}) 결과. (a) 선은 MSY 결과값으로 255,898 MT이고, 점은 2009년부터 2018년까지 반기별 총 어획량 (Y_t) 자료값이다. (b) 선은 MSY일 때, 어획률(F_{MSY}) 결과값으로 0.67이고, 점선은 2009년부터 2018년까지 반기별 어획률 (harvest rate; F_t) 결과값이다.

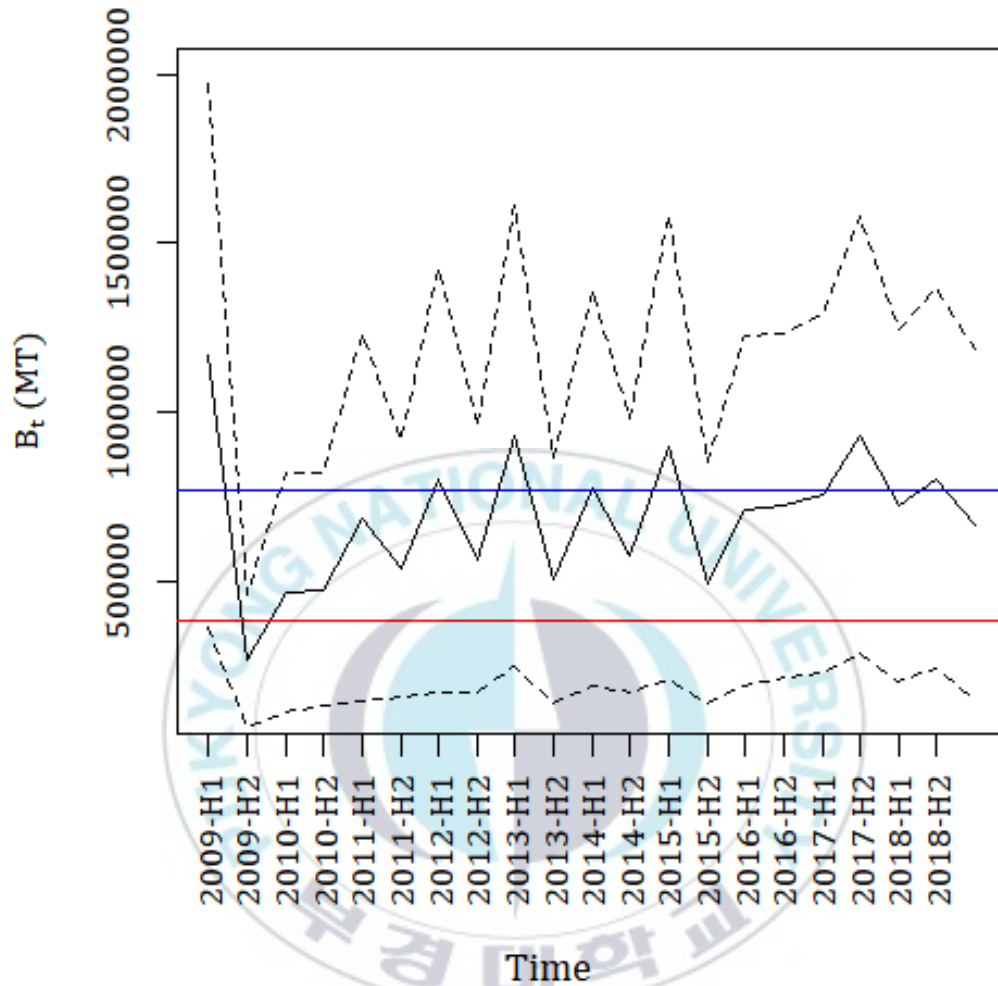


그림 11. 반기별 자원량(B_t) 예측 결과. 검은 선은 반기별 자원량 예측값 (predicted value)이고, 검은 점선은 반기별 자원량 예측값에 표준오차값을 더한 값(위쪽)과 뺀 값(아래쪽)이다. 파란선은 환경수용력(K)을 나타내며 765,189 MT이고, 붉은선은 MSY일 때 자원량(B_{MSY})을 나타내며 382,595 MT이다.

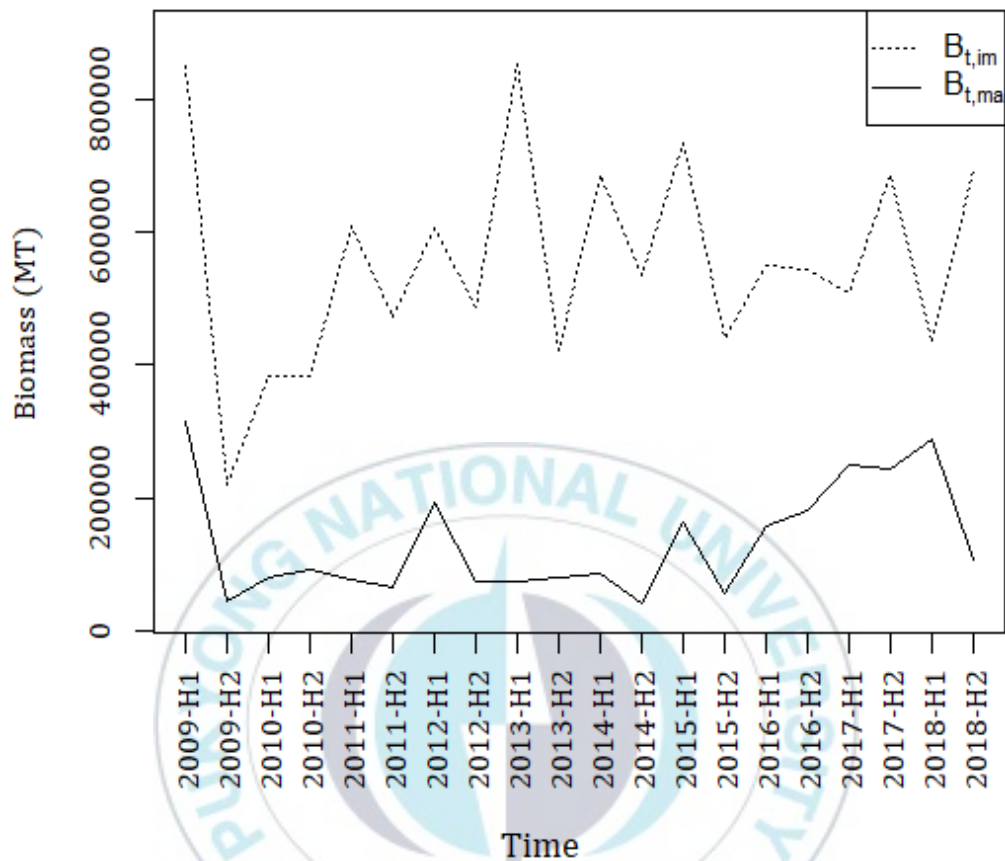


그림 12. 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과. 점선은 미성어 자원량 예측값, 선은 성어 자원량 예측값이다.

III.2. 모델 검증 결과

III.2.1. 자료 적합도

반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료에 대한 적합도 결과는 예측값(predicted value)이 자료의 추세에 따라 반기별로 변동성이 나타났다(그림 13). 예측값에서 표준오차 값을 고려한 결과값은 18번째 시점인 2017년 하반기를 제외하고 나머지 시점에서 자료값과 가까웠다. 2017년 하반기의 결과값은 자료값과 차이가 있지만, 자료의 추세를 따랐다.

반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과는 자료값과 예측값의 차이가 육안으로 확인되지만, 예측값이 자료의 추세는 따르고 있는 것을 확인할 수 있다(그림 14). 반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과는 자료값과 예측값이 거의 동일하였다(그림 15).

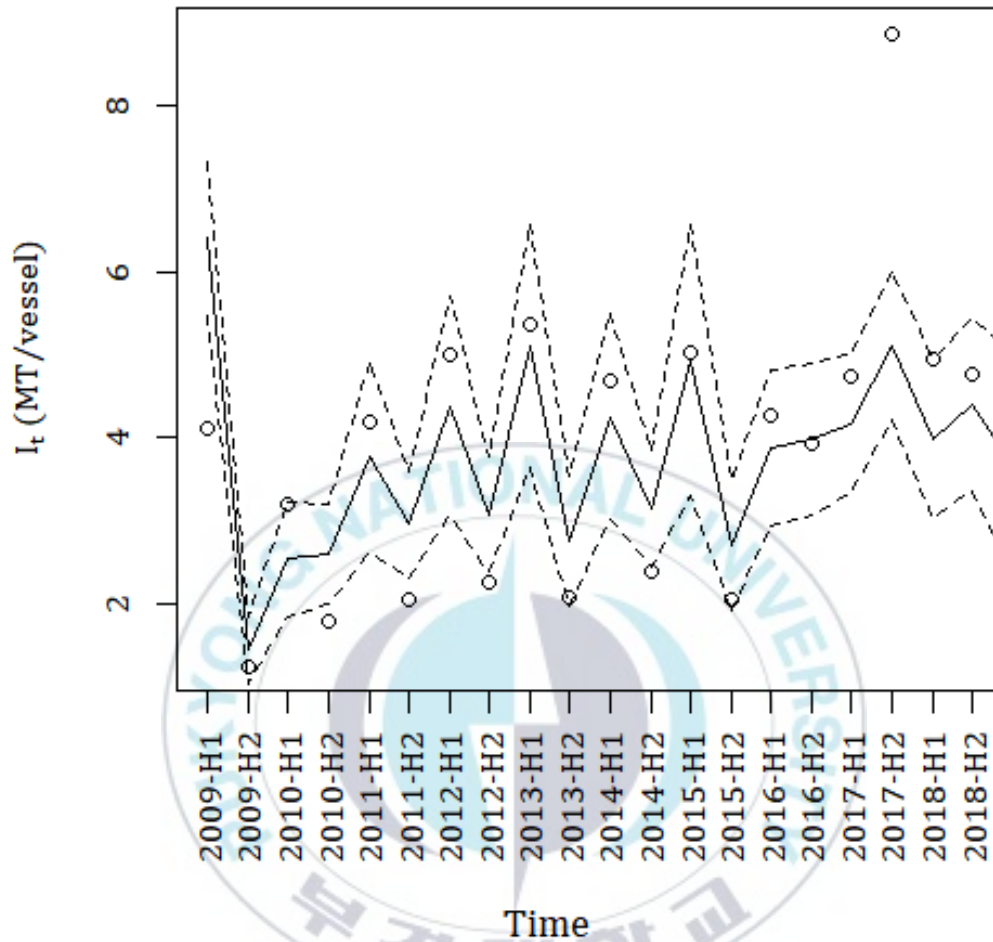


그림 13. 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료 적합도 결과. 점은 2009년부터 2018년까지 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료 값이고, 선은 예측값, 점선은 예측값에 표준오차값을 더한 값(위쪽)과 뺀 값(아래쪽)이다.

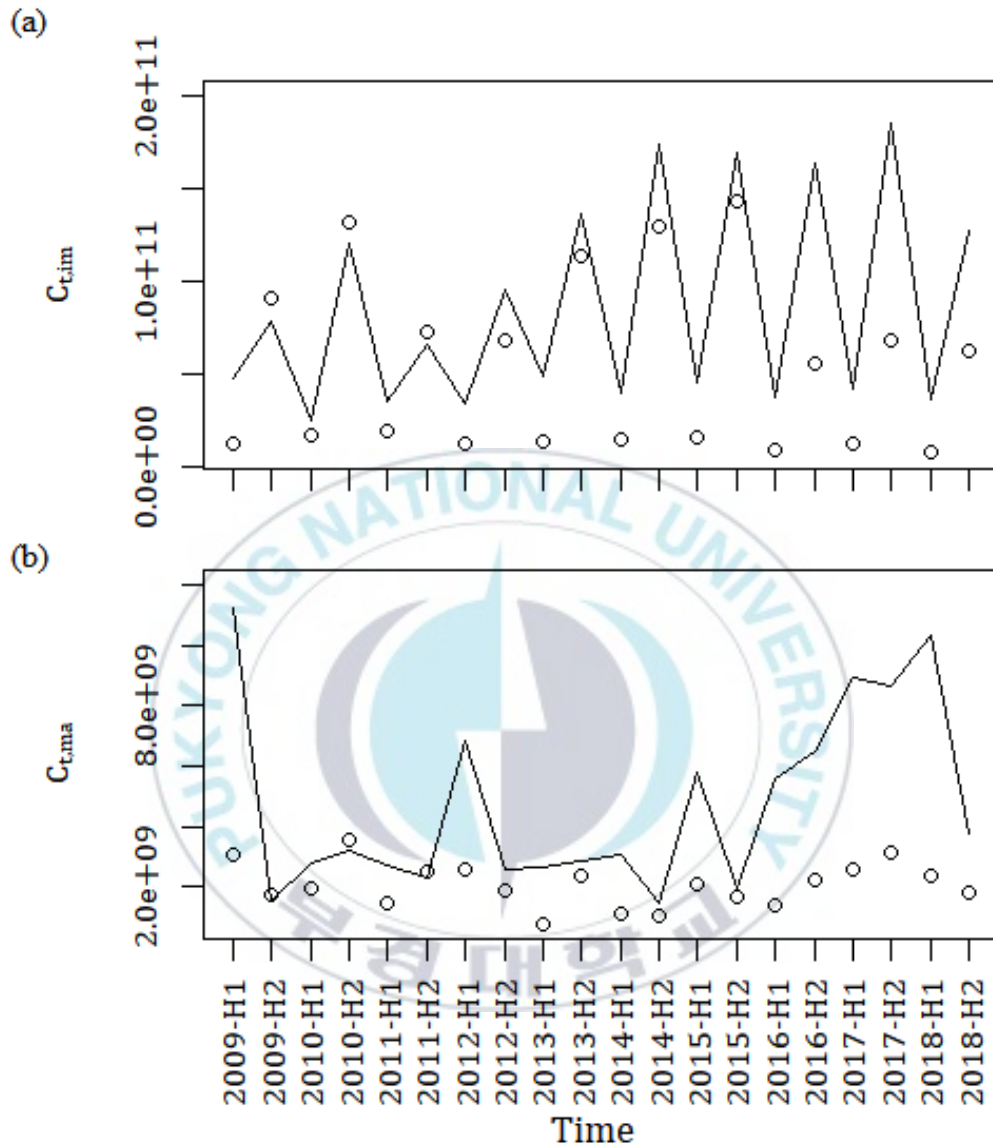


그림 14. (a) 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과; (b) 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 점은 자료값을 나타내고, 선은 예측값을 나타낸다.

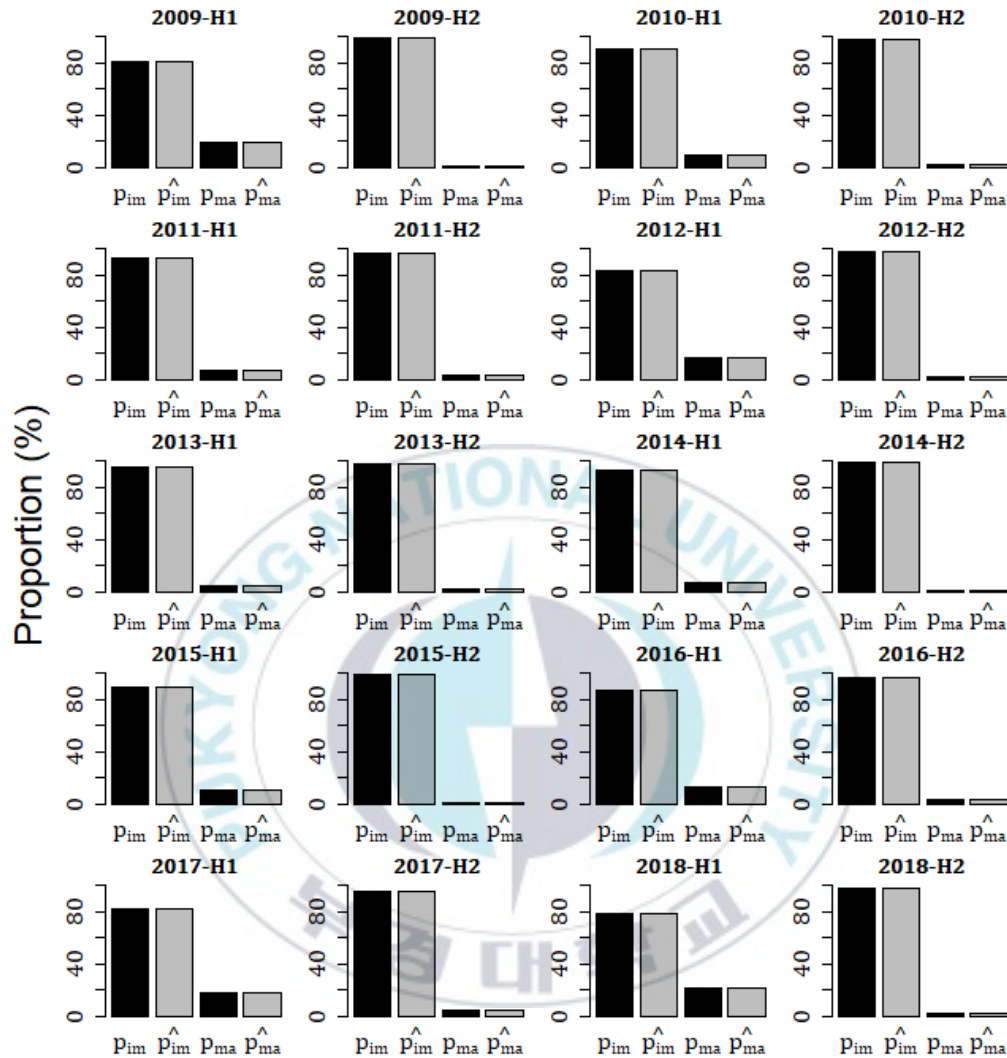


그림 15. 반기별 미성어 어휘마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어휘마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 검은색 막대 그래프는 자료값이고, 회색 막대 그래프는 예측값이다.

III.2.2. 모의실험

모의실험에서 가정된 모수의 참값은 표 6에 정리하였다. 모의실험에서 수치최적화 성공률은 약 35 %였다(즉, 500번 수치최적화 중 모수 추정 성공 173회)(그림 16; 그림 17; 그림 18). 어획능률계수(q), 미성어에 대한 어획확률(u_{im}), 성어에 대한 어획확률(u_{ma}) 및 1번째, 3번째, 4번째, 7번째, 8번째, 17번째, 19번째, 20번째 반기의 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율($R_1, R_3, R_4, R_7, R_8, R_{17}, R_{19}, R_{20}$)의 추정결과는 양의 편향이 나타났고, 이를 제외한 나머지 모수의 추정결과에서는 음의 편향이 나타났다(표 7; 그림 16; 그림 18). Relative difference (RD)의 중앙값은 모두 -24 %에서 43 % 사이의 결과가 나왔으며, 어획능률계수에 대한 RD의 중앙값이 42.8 %로 기준인 0 %에서 가장 많이 벗어났다. 어획능률계수에 대한 RD의 중앙값 결과를 제외하고는 -24 %에서 24 % 사이의 결과가 나왔다. Absolute bias는 모수의 추정값에서 참값을 빼줌으로서 구하였다(표 8).

표 6. 모의실험에서 가정된 모수의 참값.

모수	참값	모수	참값
σ	0.32	R_9	0.90
b	1.4	R_{10}	0.82
r	1.34	R_{11}	0.87
K	765,000 (MT)	R_{12}	0.91
q	5.49×10^{-6} (vessel ⁻¹)	R_{13}	0.80
u_{im}	0.2	R_{14}	0.87
u_{ma}	0.2	R_{15}	0.76
R_1	0.71	R_{16}	0.73
R_2	0.82	R_{17}	0.65
R_3	0.81	R_{18}	0.72
R_4	0.79	R_{19}	0.58
R_5	0.87	R_{20}	0.85
R_6	0.86		
R_7	0.74		
R_8	0.85		

표 7. Relative difference (RD) 결과. RD는 백분율(%)로서 나타냈다.

모수	RD의 중앙값 (%)	모수	RD의 중앙값 (%)
σ	-19.1	R_9	-1.2
b	-23.4	R_{10}	-4.0
r	-6.4	R_{11}	-0.6
K	-23.5	R_{12}	-3.1
q	42.8	R_{13}	-0.5
u_{im}	5.0	R_{14}	-0.8
u_{ma}	5.0	R_{15}	-0.3
R_1	0.8	R_{16}	-1.1
R_2	-6.1	R_{17}	0.4
R_3	2.7	R_{18}	-5.1
R_4	0.3	R_{19}	0.8
R_5	-0.3	R_{20}	2.0
R_6	-1.2		
R_7	1.8		
R_8	1.0		

표 8. Absolute bias (AB) 결과. AB는 모수 추정값에서 모수 참값을 빼 줌으로써 구하였다($\hat{\theta}_i - \theta$).

모수	AB의 중앙값	모수	AB의 중앙값
σ	-0.061	R_9	-0.011
b	-0.328	R_{10}	-0.033
r	-0.086	R_{11}	-0.005
K	-179720.486 (MT)	R_{12}	-0.028
q	2.35×10^{-6} (vessel ⁻¹)	R_{13}	-0.004
u_{im}	0.010	R_{14}	-0.007
u_{ma}	0.010	R_{15}	-0.002
R_1	0.005	R_{16}	-0.008
R_2	-0.050	R_{17}	0.003
R_3	0.022	R_{18}	-0.037
R_4	0.003	R_{19}	0.004
R_5	-0.002	R_{20}	0.017
R_6	-0.011		
R_7	0.013		
R_8	0.0094		

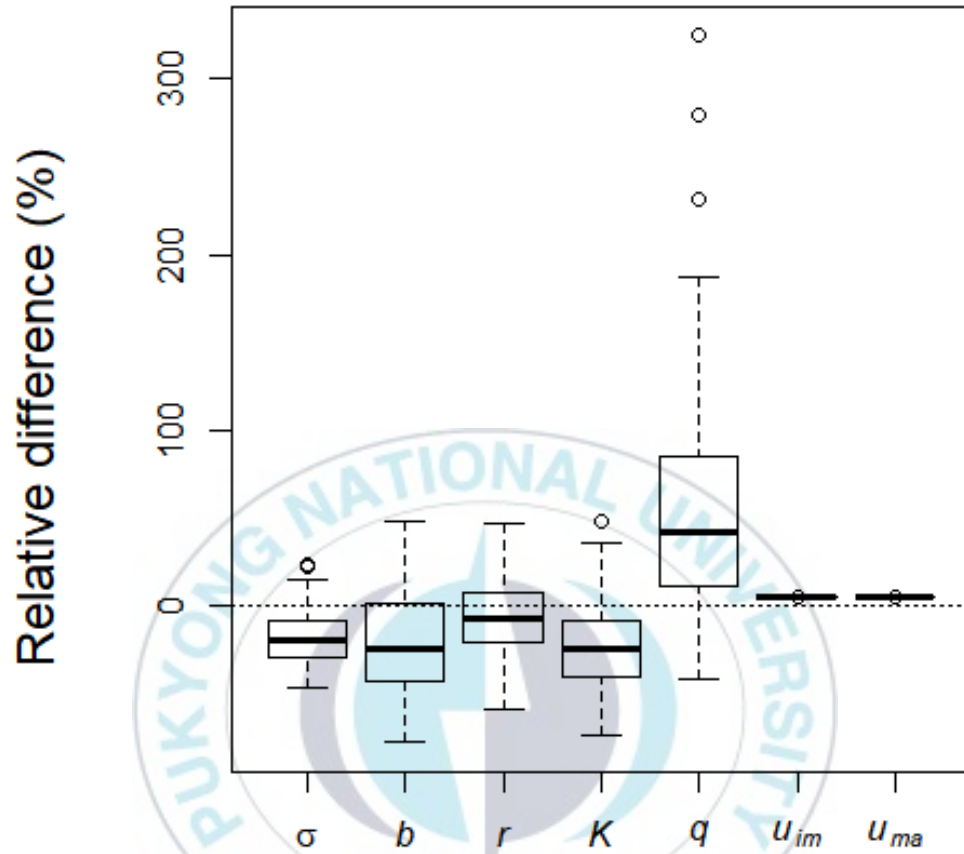


그림 16. 모의실험 결과(σ , b , r , K , q , u_{im} , u_{ma}). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference (RD)를 상자그림으로 나타냈다. 점선은 RD의 기준값으로 0 %이다.

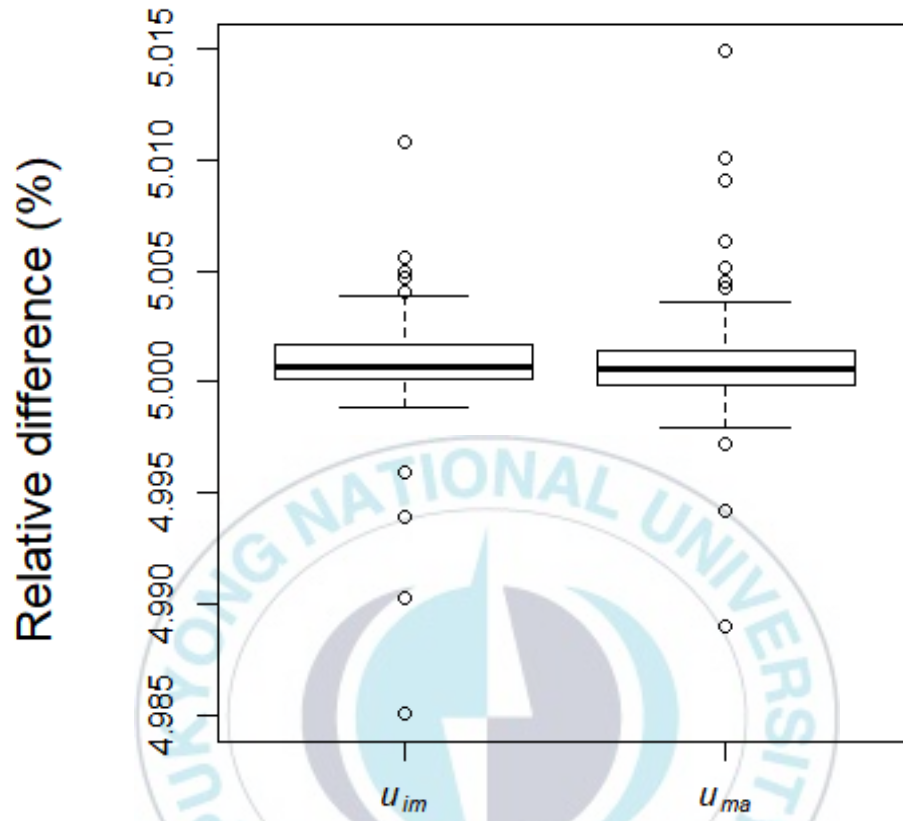


그림 17 모의실험 결과(u_{im} , u_{ma}). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference를 상자그림으로 나타냈다.

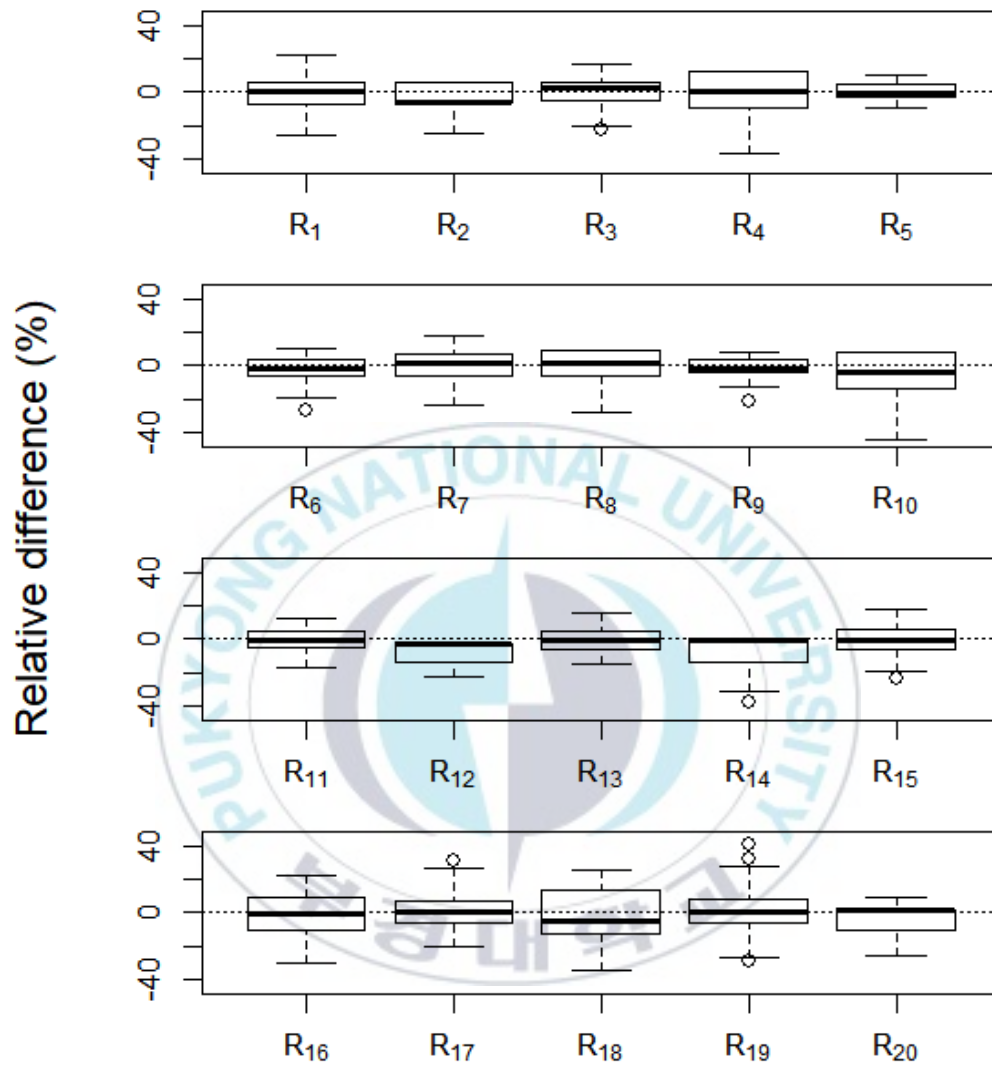


그림 18. 모의실험 결과(R_i). 500번 추정 시도하여 173번 추정에 성공하였으며, 각 모수에 대한 Relative difference (RD)를 상자그림으로 나타냈다. 점선은 RD의 기준값으로 0 %이다.

IV. 고찰

IV.1. 한국 남동해역 멸치 자원평가

한국 남동해역에서 2009년 상반기부터 2018년 하반기 기간에 멸치 어획량은 최대지속가능생산량(maximum sustainable yield; MSY) 추정결과 값보다 낮은 어획량을 기록하였고(그림 10 (a)), 반기별 어획률(harvest rate; F_t) 결과값은 MSY 일 때 어획률(F_{MSY}) 보다 낮았다(그림 10 (b)). 따라서, 이 기간에 일어난 멸치 어획은 남동해역 멸치 자원에 대해 과도한 어획을 하지 않아 남동해역 멸치 자원이 보존될 수 있는 어획이 실시되었다고 볼 수 있다. 이 결과는 2009년 하반기를 제외하고 멸치 자원량이 MSY일 때 자원량(B_{MSY})보다 높은 자원량 상태를 유지하고 2012년 상반기 이후에 환경수용력(K)에 가까운 상태가 지속된 결과(그림 11)와 유의미한 관계가 있을 것으로 추측된다.

본 연구는 남동해역의 멸치 자원에 대해 남획이 일어나고 있지 않다는 긍정적인 결과를 도출하였지만, 본 결과를 실질적인 자원관리에 사용하여서는 안 된다. 그 이유는 본 연구에서 사용되는 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료가 과학적 조사(survey)가 아닌 어업에서 얻어진 자료이므로 자원량의 상대적인 지표로서 의문이 들기 때문이다. 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료는 반기별 어획량을 반기별 출어선수로 나누어서 구해졌다. 이때 어업의 노력량인 반기별 출어선수는 하루의 조업시간 또는 조

업일수와 같은 구체적인 어업 노력을 반영하지 못한다. 또한, 기선권현망 어업의 금어기는 매년 4 - 6월 기간이므로 상반기의 단위노력당 어획량 자료는 1 - 6월 기간이 아닌 1 - 3월 기간에 수집된 어획량과 출어선수로 계산된 값이다(MOF, 2021). 따라서, 1 - 3월 기간의 자료로 계산된 값이 1 - 6월 기간을 대표한다는 가정이 필요로 하게 된다. 연구대상 해역에서 과학조사를 실시하는 것이 현재로서는 가장 정확하게 해당 해역의 자원량을 알 수 있는 방법이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 자료 대신에 과학조사 자료를 사용하면 개선된 자원평가 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

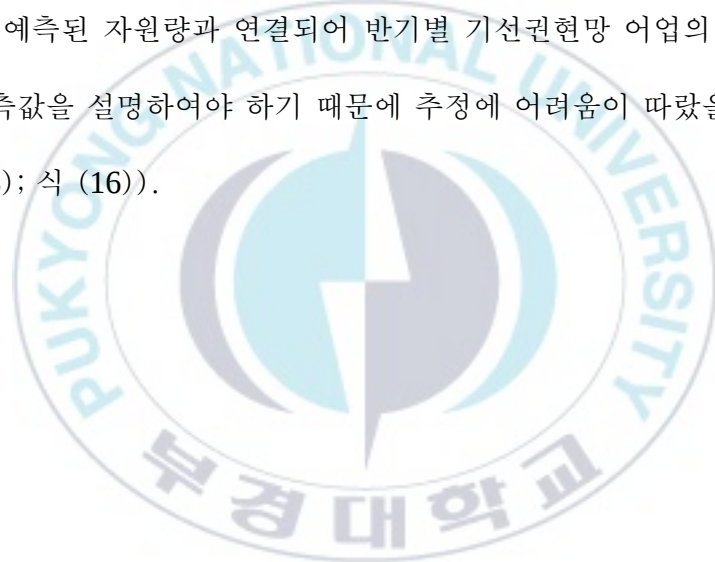


IV.2. 모델 검증

기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료에 대한 적합도 결과는 자료의 추세를 잘 따르는 것으로 확인되었다(그림 13). 특히, 2017년 하반기 경우에서만 예측값(predicted value)과 자료값의 차이가 컸고 다른 시점의 경우 자료값이 표준오차를 고려한 범위와 근사한 위치에 있어 본 연구의 자원평가 모델의 자료 적합도 결과가 좋은 것으로 볼 수 있다. 반기별 자원량(B_t)을 상태변수(random effects; state variable; hidden variable)로서 고려하였기에 2017년 하반기의 경우를 제외하고 상반기에 높은 값, 하반기에 낮은 값이 반복적으로 나타나는 자료에 대하여 좋은 적합도 결과를 이끌어 낼 수 있었던 것으로 보인다. 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과는 자료의 추세는 따르고 있었지만 적합도 결과는 좋다고 할 수 없었다(그림 14). 하지만, 반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과가 자료값과 예측값이 거의 동일하여 자료에 대한 적합도 결과가 좋다고 볼 수 있다(그림 15). 반기별 미성어 어획마릿수의 비율에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율에 대한 적합도 결과가 좋게 나온 것은 두 비율의 합이 1인 이항분포로서 고려되었기 때문으로 보인다.

모의실험에서 수치최적화 성공률이 약 35 % (즉, 500번 수치최적화 중 모수 추정 성공 173회)로 나왔던 것은 추정해야할 모수의 개수가 27개이기 때

문인 것으로 보인다. 모수를 설명할 수 있는 추가적인 자료를 이용할 시 수치 최적화 성공률이 올라갈 것으로 기대된다. 모의실험 결과를 통해 모수의 점 추정치에 대한 편향(bias)을 Relative difference (RD) 값으로 확인할 수 있었다(표 7). 어획능률계수(q)의 경우, RD의 중앙값은 42.8 %가 나왔는데, 이 결과는 어획능률계수가 작은 크기의 값(모의실험에서 가정된 참값: $5.49 \times 10^{-6} \text{ vessel}^{-1}$)으로 추정에 어려움이 따르기 때문에 나타난 결과로 보인다. 또한, 예측된 자원량과 연결되어 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 예측값을 설명하여야 하기 때문에 추정에 어려움이 따랐을 것으로 보인다(식 (3); 식 (16)).



IV.3. 멸치 미성어와 성어 자원량 예측

본 연구에서 세멸, 자멸, 소멸, 중멸은 미성어에 해당하고, 대멸은 성어에 해당한다고 가정하였다. 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 반기별 성어 자원량($B_{t,ma}$)에 대해 예측한 결과, 미성어 자원량 예측값(predicted value)이 성어 자원량 예측값보다 많았다(그림 12). 이 결과는 미성어가 성어 보다 한 마리의 평균무게가 작지만(그림 6), 미성어의 개체수가 성어의 개체수 보다 많기 때문에 나타난 결과로 보인다. Cha et al. (2004)의 고등어(*Scomber japonicus*) 위내용물 분석 연구 결과에서 우점 먹이생물인 멸치의 경우, 1 – 14 cm 체장 범위의 멸치가 발견되었으며 체장이 2 – 3 cm에 해당하는 멸치가 가장 많았다. 고등어 위내용물 분석 결과는 멸치 미성어 개체수가 성어 개체수 보다 많다는 결과와 연결되는 것으로 보인다. 하지만, 포식자인 고등어의 체장 및 개구 크기와 섭이(攝餌)된 멸치 체장과의 상관성은 추가적인 연구를 통하여 확인이 필요하다.

멸치의 미성어와 성어에 대한 체장 기준은 건멸치의 가공 이전인 생멸치에 대한 것이며, Lee et al. (2017)은 Kim and Lo (2001)의 연구를 참고하여 생멸치의 미성어와 성어 기준을 체장 8 cm로 가정하였다. 본 연구에서는 건멸치의 성숙(maturity) 정도를 판별하기에는 시간 및 비용적인 어려움과 건조된 생식소의 성숙 정도 판별에는 어려움이 따르기에 성숙체장을 참고하여 중멸은 미성어에 해당한다고 가정하였다. 하지만, 생멸치에서 건멸치로 상태가 변할 때, 체장이 어느 정도 감소하는지는 현재로서 알려진 정보가 없다. 중멸

은 건멸치 체장 4.6 – 7.6 cm에 해당하는 멸치로(표 2), 생멸치일 때 성숙체장 9 cm (Choi and Kim, 1988)보다 체장이 클 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 세멸, 자멸, 소멸, 중멸은 미성어에 해당하고 대멸은 성어에 해당한다는 가정(Case 1)과 달리, 중멸이 성어에 해당된다는 가정 하에서 추가적으로 결과를 내었다. 즉, 세멸, 자멸, 소멸은 미성어로 가정하였고, 중멸, 대멸은 성어로 가정하였다(Case 2).



IV.3.1. 중멸을 성어로 가정한 경우

새로운 미성어(세멸, 자멸, 소멸)와 성어(중멸, 대멸) 가정(Case 2)에 의해 반기별 미성어 어획비율(S_t), 반기별 미성어 한 마리의 평균무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$)를 구하였다(그림 19; 그림 20). 반기별 총 어획량(Y_t) 자료, 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료는 Case 1과 동일한 자료를 이용하였다(그림 3). 모수에 대한 사전분포 또한 Case 1에서와 동일하게 가정하였다(표 4; 그림 8). L_4 에서 ESS (effective sample size)는 35를 입력값으로 주었으며, 수치최적화를 하여 목적 함수(식 (39))를 최소로 하는 모수 추정(estimate) 및 상태변수 예측(predict)이 이루어졌다.

Case 2에서 모수 점추정치(point estimate) 및 표준오차(standard error)는 표 9에 정리하였고, 추정된 모수 간의 상관관계는 그림 21에서 확인할 수 있다. Case 1에서 모수 추정 결과(표 5)와 Case 2에서 모수 추정 결과(표 9)는 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)의 점추정치를 제외하고는 거의 차이가 없었다. 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율은 중멸이 미성어에서 성어로 가정되면서 미성어와 성어의 비율이 달라졌기 때문에 Case 1과 다른 값이 추정된 것으로 보인다.

반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 반기별 성어 자원량($B_{t,ma}$)에 대해 예측한 결과를 확인하면, 미성어(세멸, 자멸, 소멸) 자원량 보다 성어(중멸, 대멸) 자원량이 2009년 하반기, 2010년 하반기, 2014년 하반기, 2015년 하반기를

제외하고는 더 많은 것을 확인할 수 있다(그림 22). 이 결과를 통해서 중멸에 해당하는 멸치가 성어로 가정될 경우, 성어의 자원량이 미성어의 자원량 보다 풍부하다고 할 수 있다.

반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과는 자료값과 예측값(predicted value)의 차이가 육안으로 확인되지만, 예측값이 자료의 추세를 따르고 있는 것을 확인할 수 있다(그림 23). 반기별 미성어 어획마릿수에 대한 적합도 결과는 Case 1의 결과(그림 14) 보다 상반기(H1)에 대한 자료 적합도 결과가 더 좋았다. 반기별 미성어 어획마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어획마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과는 Case 1과 마찬가지로 자료값과 예측값이 거의 동일하였다(그림 24).

표 9. Case 2에서 수치최적화 결과 값.

모수	점추정치	표준오차
σ	0.320	0.054
b	1.425	0.495
r	1.338	0.236
K	7.652×10^5 (MT)	4.841×10^5 (MT)
q	5.491×10^{-6} (vessel ⁻¹)	3.797×10^{-6} (vessel ⁻¹)
u_{im}	0.210	0.274
u_{ma}	0.210	0.274
R_1	0.030	0.055
R_2	0.590	0.479
R_3	0.040	0.072
R_4	0.510	0.486
R_5	0.060	0.107
R_6	0.230	0.334
R_7	0.040	0.073
R_8	0.380	0.448
R_9	0.040	0.073
R_{10}	0.420	0.471
R_{11}	0.050	0.090
R_{12}	0.590	0.477
R_{13}	0.120	0.199
R_{14}	0.650	0.459
R_{15}	0.070	0.122
R_{16}	0.400	0.461
R_{17}	0.110	0.184
R_{18}	0.340	0.429
R_{19}	0.150	0.239
R_{20}	0.400	0.456

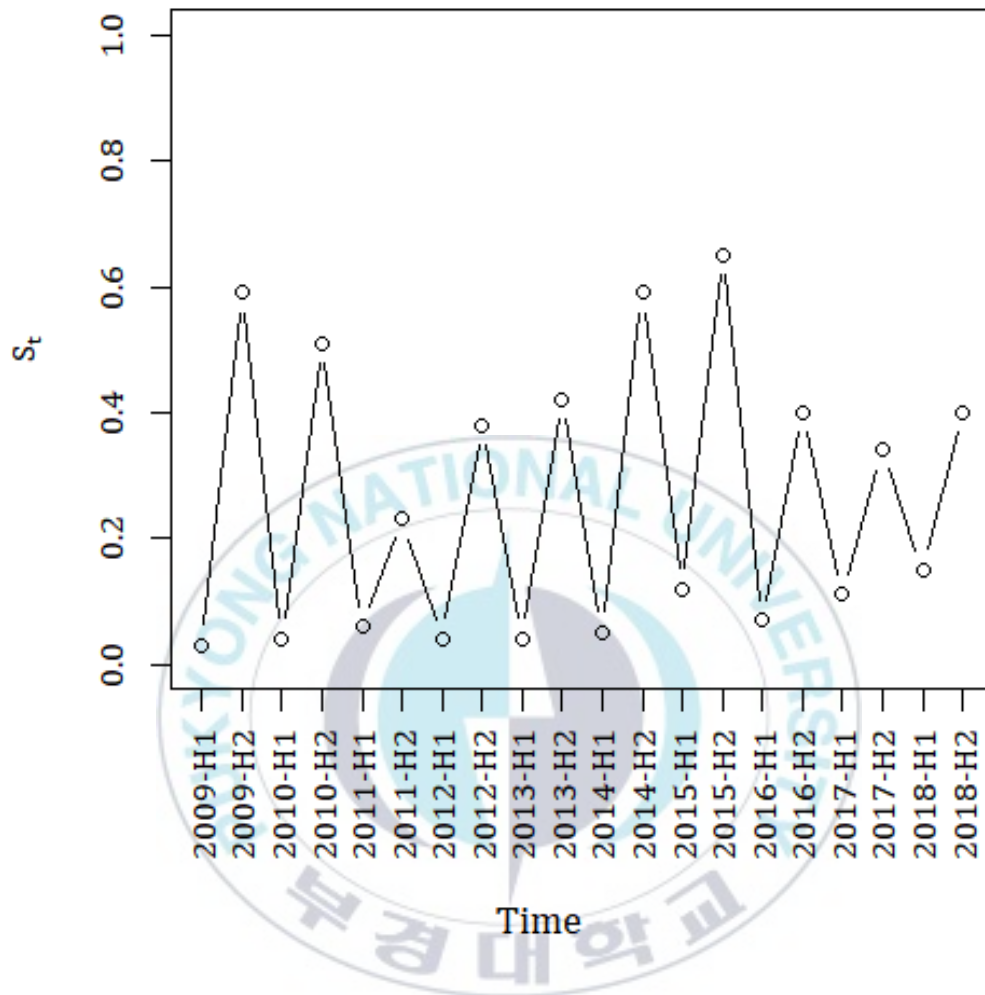


그림 19. Case 2에서 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 어획비율(S_t).
여기서 미성어는 세멸, 자멸, 소멸에 해당한다.

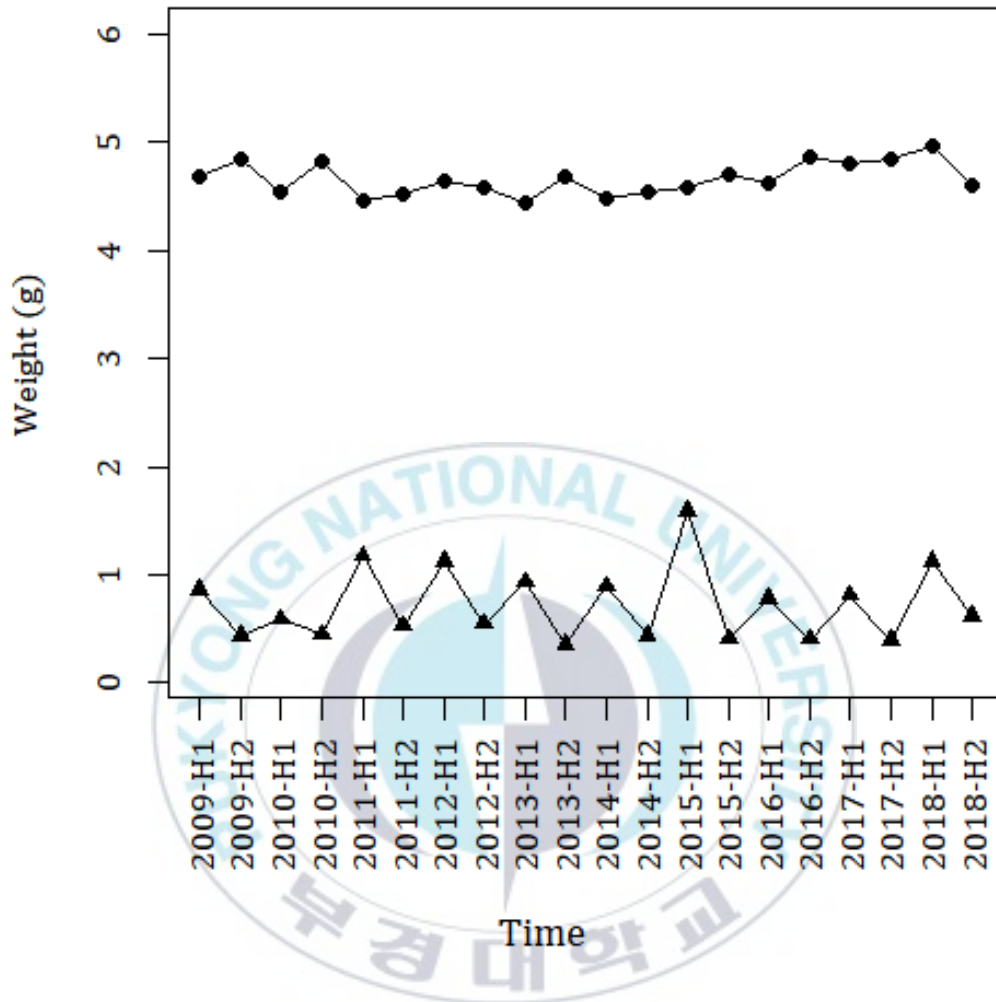


그림 20. Case 2에서 2009년부터 2018년까지 반기별 미성어 한 마리의 평균 무게($w_{t,im}$)와 반기별 성어 한 마리의 평균무게($w_{t,ma}$). 여기서 미성어는 세멸, 자멸, 소멸에 해당하고, 성어는 중멸, 대멸에 해당한다. 삼각형(▲)은 반기별 미성어 한 마리의 평균무게 값을 나타내고, 원(●)은 반기별 성어 한 마리의 평균무게 값을 나타낸다.

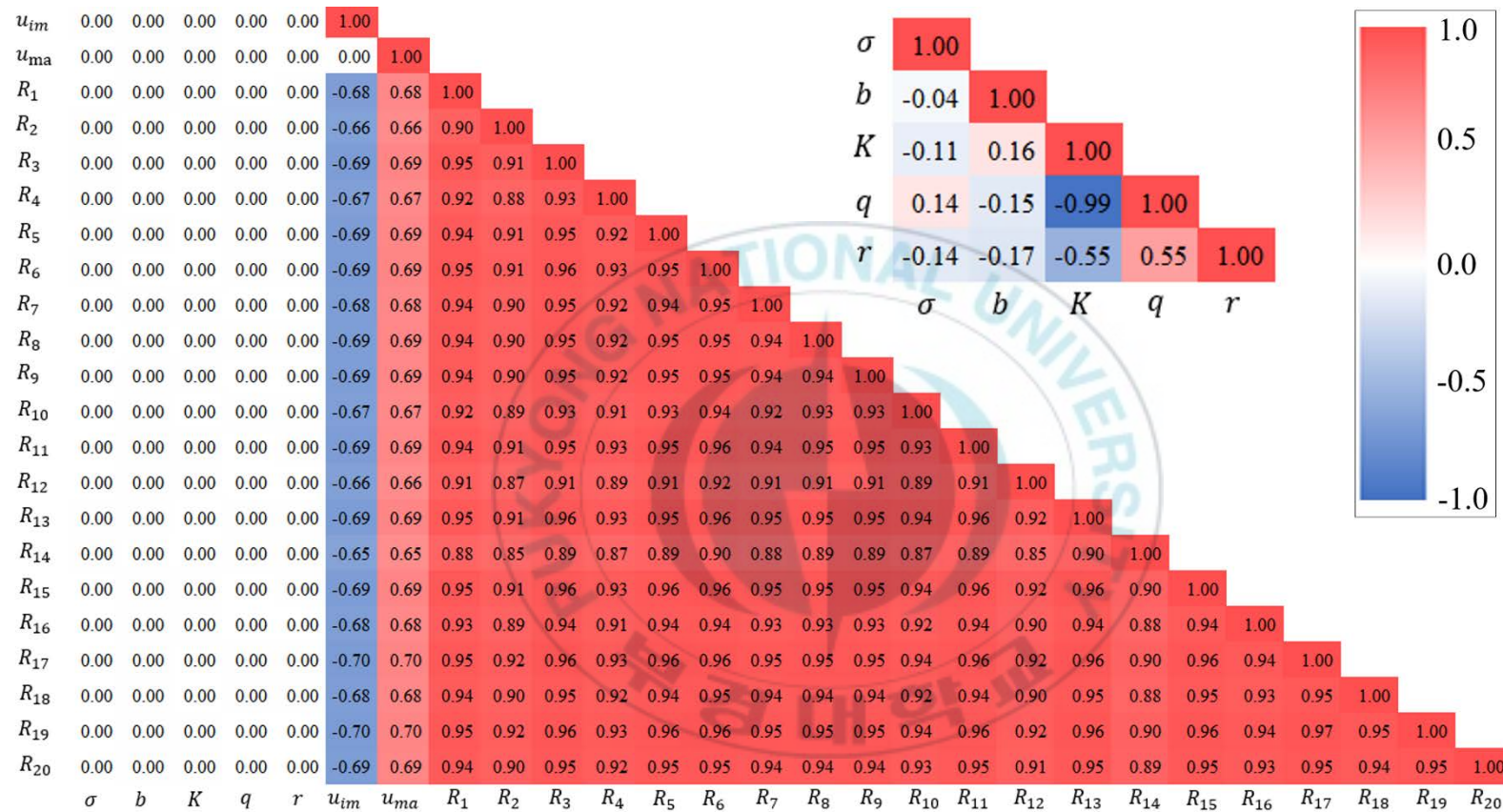


그림 21. Case 2에서 수치최적화 결과, 추정된 모수 간의 상관관계. 1.00(붉은색)에 가까울수록 양의 상관관계가 있으며, -1.00(푸른색)에 가까울수록 음의 상관관계가 있다. 0.00에 가까울수록 상관관계가 있지 않다.

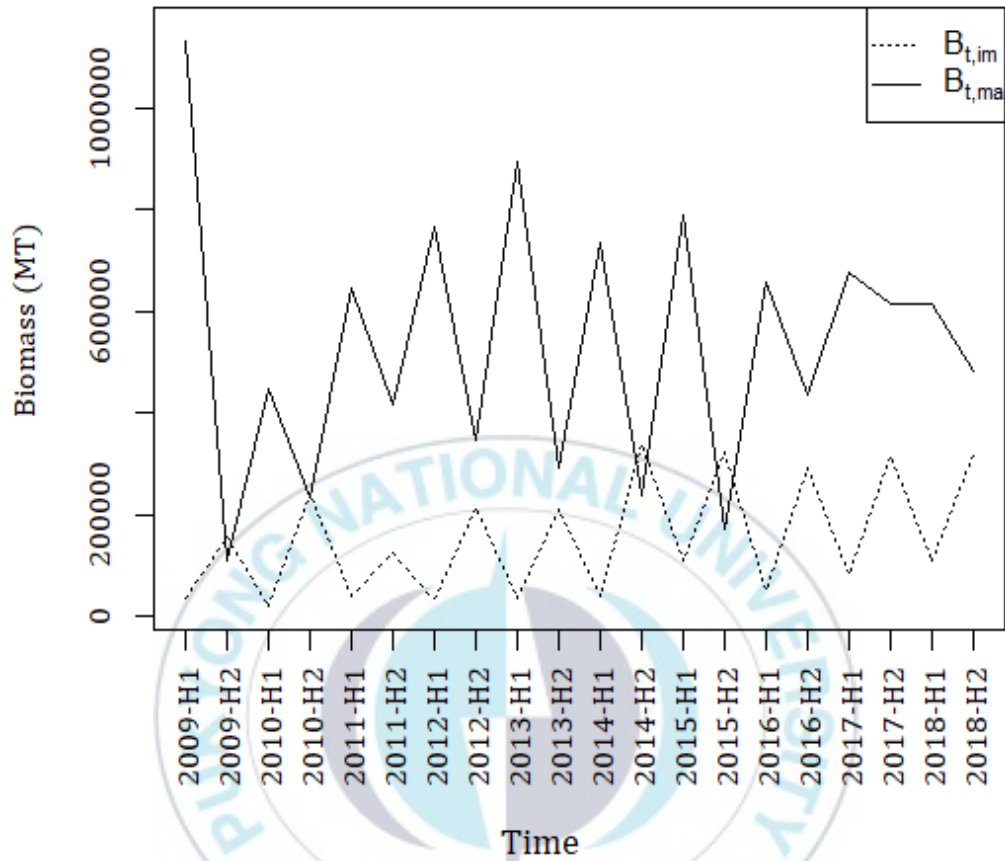
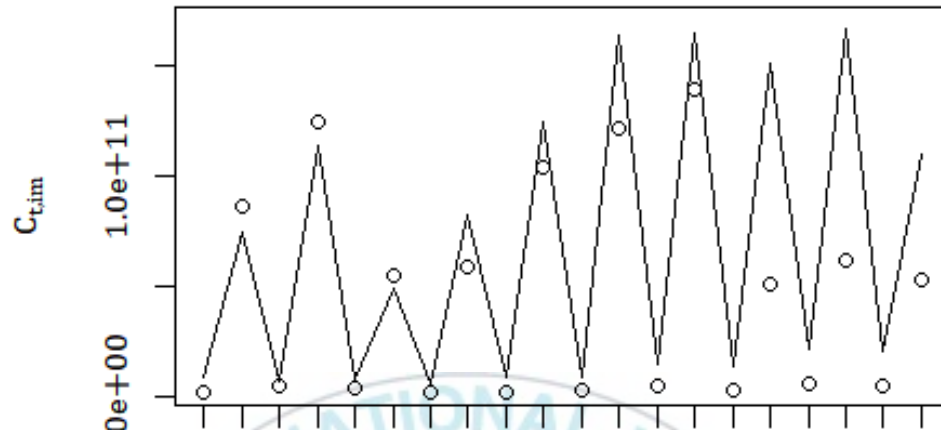


그림 22. Case 2에서 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과. 점선은 미성어 자원량 예측값(predicted value)을, 선은 성어 자원량 예측값을 의미한다.

(a)



(b)

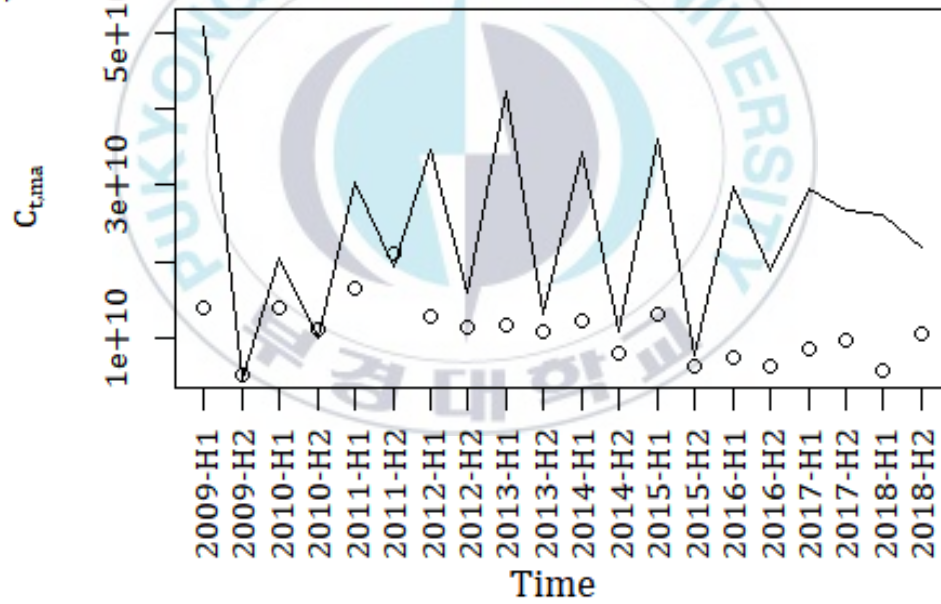


그림 23. Case 2에서 (a) 반기별 미성어 어획마릿수($C_{t,im}$)에 대한 적합도 결과 및 (b) 반기별 성어 어획마릿수($C_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 점은 자료값을 나타내고, 선은 예측값을 나타낸다.

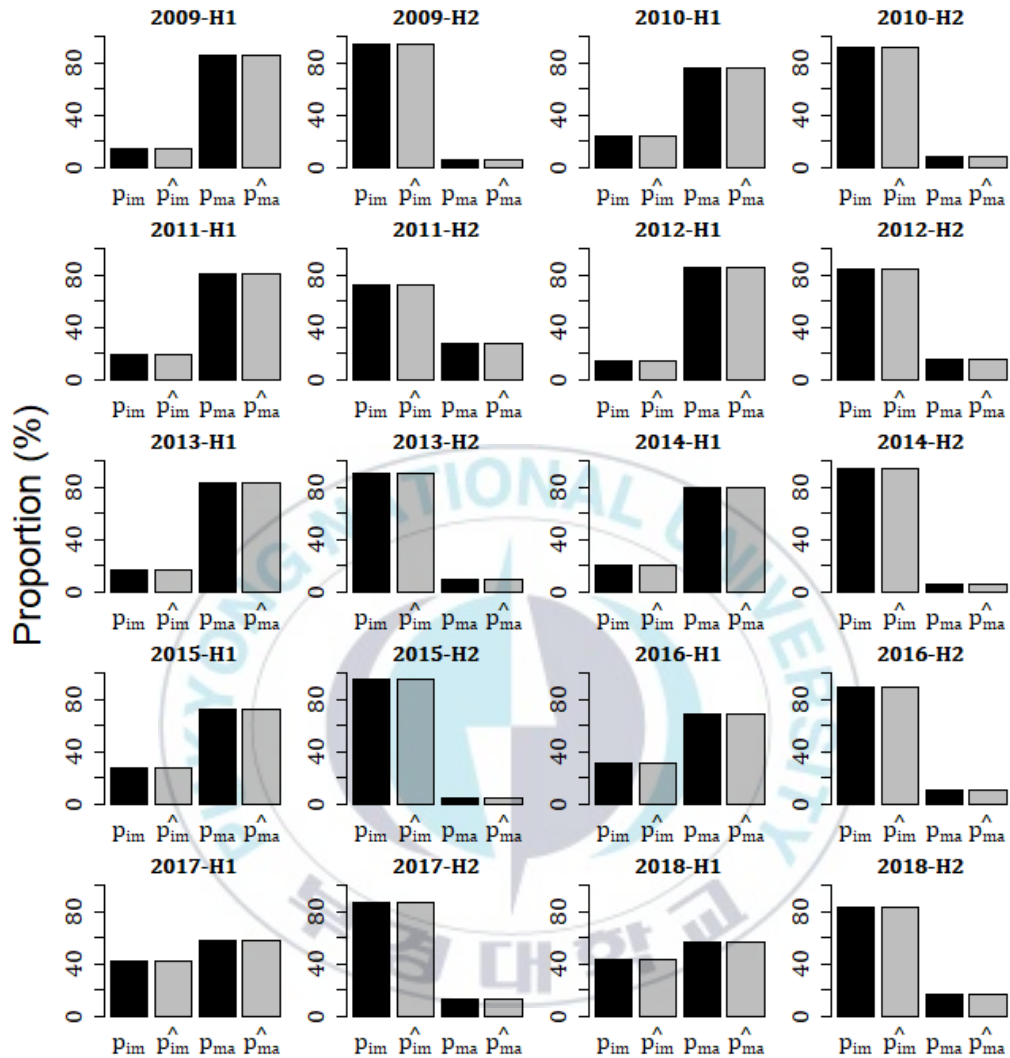


그림 24. Case 2에서 반기별 미성어 어휘마릿수의 비율($p_{t,im}$)에 대한 적합도 결과와 반기별 성어 어휘마릿수의 비율($p_{t,ma}$)에 대한 적합도 결과. 검은색 막대 그래프는 자료값이고, 회색 막대 그래프는 예측값이다.

IV.3.2. Case 1과 Case 2에 따른 멸치 미성어와 성어 자원량

미성어와 성어 가정에서 중멸을 미성어와 성어 중 어디로 가정하느냐에 따라 미성어 자원량 예측값(predicted value)과 성어 자원량 예측값의 차이가 발생하였다(그림 12; 그림 22). 본 연구에서는 중멸이 미성어로 가정되는 경우(Case 1)와 성어로 가정되는 경우(Case 2)의 결과를 종합하여 미성어 자원량($B_{t,im}$) 예측 결과와 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과를 제시한다(그림 25; 그림 26). 따라서, 한국 남동해역 멸치 미성어 자원량은 Case 2 결과 보다 많고 Case 1 결과 보다 작을 것으로 기대되며(그림 25), 성어 자원량은 Case 1 결과 보다 많고 Case 2 결과 보다 작을 것으로 기대된다(그림 26). 본 연구의 자원량 예측 결과(그림 11)를 실제 남동해역의 자원량 결과라고 해석하지는 못하기 때문에 실제 미성어와 성어 자원량은 예측된 결과보다 더 작은 값일 수 있다는 점을 주의해야 한다.

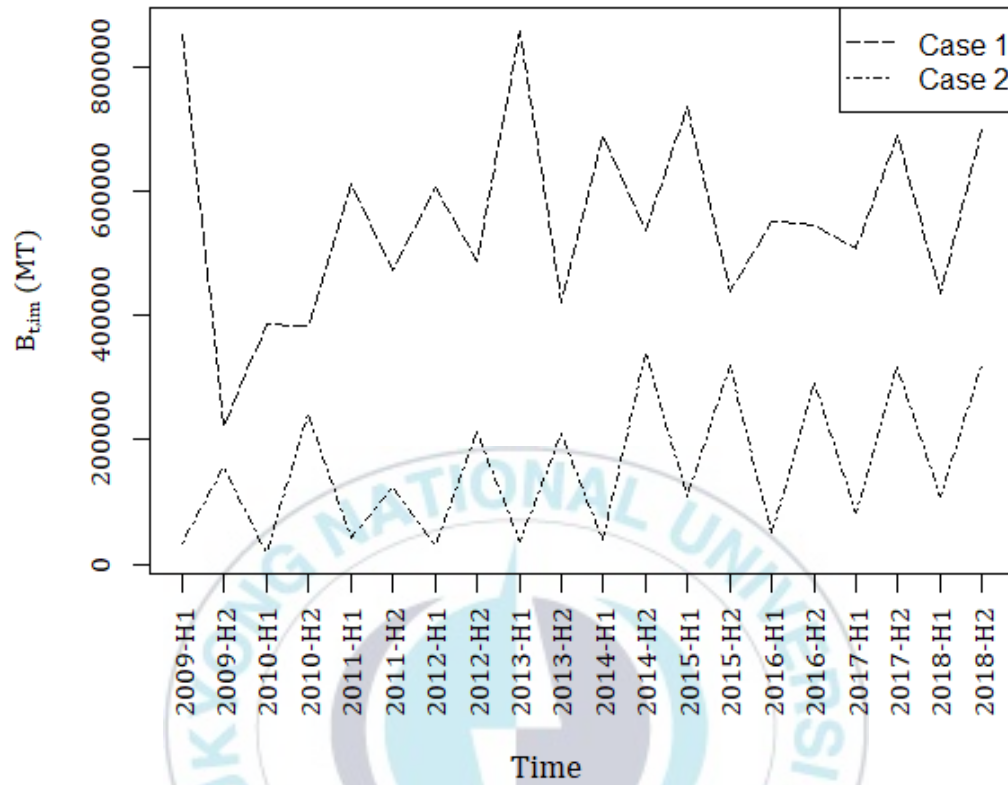


그림 25. Case 1에서 결과와 Case 2에서 결과에 따른 멸치 미성어 자원량 ($B_{t,im}$) 예측 결과.

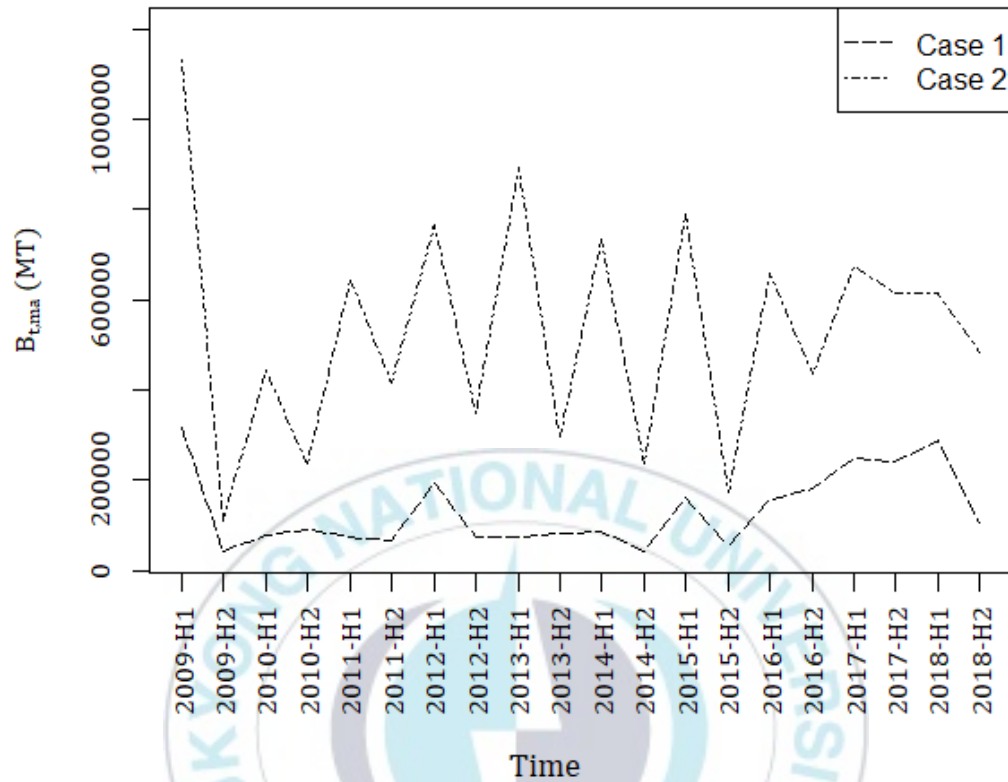


그림 26. Case 1에서 결과와 Case 2에서 결과에 따른 멸치 성어 자원량($B_{t,ma}$) 예측 결과.

IV.4. 추정된 모수 간의 상관관계

추정된 모수 간의 상관관계는 1.00에 가까울수록 양의 상관관계, -1.00에 가까울수록 음의 상관관계를 가지며, 0.00에 가까울수록 상관관계가 있지 않았다(그림 9; 그림 21). 어획능률계수(q)와 환경수용력(K)은 음의 상관관계(-0.99)를 가졌다. 어획능률계수와 환경수용력이 함께 예측된 자원량과 연결되어 반기별 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량 예측값을 설명하여야 하기 때문에 음의 상관관계를 가지는 것으로 보인다(식 (3); 식 (16)). 개체군의 내재적 성장률(r)과 환경수용력 또한 음의 상관관계(-0.55)를 가졌는데, 이에 대응하여 어획능률계수와 개체군의 내재적 성장률의 상관관계는 양의 상관관계 가진 것으로 보인다.

미성어에 대한 어획확률(u_{im})은 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)과 음의 상관관계를 보였다. 이것은 미성어가 어획이 많이 되면 자원량에서 미성어가 차지하는 비율이 감소한다는 것을 의미한다. 이에 대응하여 성어에 대한 어획확률(u_{ma})은 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)과 양의 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t) 간에는 양의 상관관계를 보였다. 이는 어느 한 시점의 미성어 자원량 비율이 이전 시점의 미성어 자원량 비율들로부터 영향을 받고, 이후 시점의 미성어 자원량 비율들에 영향을 줄 것으로 기대되기 때문에 나타난 결과로 보인다.

IV.5. 어획물의 미성어와 성어 조성

멸치 어업에서 기선권현망 어업은 미성어 멸치를 어획대상으로 하고, 자망 어업은 성어 멸치를 어획대상으로 한다(Kim et al., 2015). 실제 잡히는 어획물은 미성어와 성어가 각 어업별로 혼합되어 어획된다. 1984 - 1986년 기간의 어업별 멸치 체장 조성에서는 기선권현망 어업에서 성어에 해당하는 멸치(9 cm 이상)가 잡혔고, 자망 어업에서 미성어에 해당하는 멸치(9 cm 미만)가 잡혔다(Kim, 1988). 즉, 기선권현망 어업의 어획물은 미성어 비율이 높고, 자망 어업의 어획물은 성어 비율이 높다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 남동해역 멸치 어획량의 미성어와 성어 조성은 기선권현망 어업 어획물의 미성어와 성어 조성을 따르는 것으로 가정하였다. 그 이유는 기선권현망 어업이 남동해역 전체 어획량의 약 70 %를 차지하는 어업이고, 기선권현망 어업을 제외한 나머지 어업의 어획물에 대한 미성어와 성어 조성 정보가 없기 때문이다. 따라서, 기선권현망 어업의 어획량을 제외한 나머지 30 %의 어획량에 대한 미성어와 성어 조성은 자망 어업의 경우처럼 기선권현망 어업 어획물의 미성어와 성어 조성과의 차이가 있을 수 있다. 자망 어업은 남동해역 전체 어획량의 약 5.6 %를 차지하는 어업(KOSTAT, 2021)으로 전체 어획량에서 작은 부분을 차지하지만, 자망 어업 어획물의 미성어와 성어 조성은 성어의 비율이 높을 것으로 기대되기 때문에 이를 반영할 수 있으면 미성어와 성어 자원량 예측 결과가 개선될 수 있을 것으로 기대된다.

IV.6. 수치최적화

수치최적화의 안정성을 위해 과정오차(process error; $\varepsilon_{t,p} \sim N(0, \sigma_p^2)$)의 분산(σ_p^2)과 관측오차(observation error; $\varepsilon_{t,o} \sim N(0, \sigma_o^2)$)의 분산(σ_o^2)이 같다고 가정하여(즉, $\sigma^2 = \sigma_p^2 = \sigma_o^2$) 추정해야할 모수의 개수를 줄일 수 있었다. 또한, 과정오차의 분산과 관측오차의 분산이 동일한 경우($\sigma_p^2 = \sigma_o^2$)는 분산이 동일하지 않은 경우($\sigma_p^2 \neq \sigma_o^2$) 보다 모수 추정에 있어 편향(bias)과 같은 문제가 상대적으로 덜 발생하는 장점이 있다(Auger-Méthé et al., 2016). 실제로는 과정오차의 분산과 관측오차의 분산이 동일하지 않을 수 있으므로 분산이 동일하지 않은 경우($\sigma_p^2 \neq \sigma_o^2$)를 시도해볼 필요가 있다. 하지만, 분산이 동일하지 않으면 추정해야할 모수의 개수가 증가하기 때문에 과정오차의 분산과 관측오차의 분산에 대해 추가적으로 사전분포를 가정해야 수치최적화가 성공될 것으로 보인다.

목적함수에서 이항분포를 가정한 L_4 의 경우, ESS (effective sample size)가 사용되었다. ESS 를 사용하지 않으면 L_4 의 가중치가 목적함수의 다른 요소들에 비해 높아져 수치최적화에 어려움이 따르는 문제가 발생한다. 본 연구에서 ESS 는 Case 1에서 69를 입력값으로 주었고, Case 2에서 35를 입력값으로 주었다. Case 1과 Case 2 각각의 ESS 의 입력값은 10부터 시작하여 1씩 값을 증가시켰을 때 수치최적화가 성공하는 가장 큰 값이다. 즉, Case 1에서 경우를 보면, ESS 가 69이전에는 수치최적화가 모두 성공하였고, ESS 가 69보다 클 경우에는 수치최적화가 실패하였다.

모수에 대한 사전분포는 사전정보가 있는 경우와 사전정보가 없는 경우로 고려된다. 본 연구에서 개체군의 내재적 성장률(r)과 환경수용력(K)에는 사전정보가 있는 경우로 선행연구를 참고하여 각 모수의 사전분포에서 최빈값(Mode)을 고려할 수 있었다(FishBase, 2021; Froese et al, 2017). 미성어에 대한 어획확률(u_{im})과 성어에 대한 어획확률(u_{ma})은 사전정보가 없는 경우이지만, 0.00 – 1.00 범위에 해당되는 비율값이므로 0.00 – 1.00 범위에서 정의되는 베타분포를 사전분포로 고려할 수 있었다. 개체군의 내재적 성장률, 환경수용력, 미성어에 대한 어획확률, 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 변동계수(CV)와 미성어에 대한 어획확률, 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 최빈값은 사전분포의 주관성을 약화시키기 위해 각 사전분포가 최빈값을 포함하는 넓은 분포형태인 것을 확인하여 입력값으로 고려되었으며(그림 8), 수치최적화가 성공하는 경우였다. 선행연구와 같이 알려진 정보를 활용하는 것이 좋은 선택지이지만, 본 연구에서 그래프를 통하여 사전분포의 최빈값과 변동계수를 입력값으로 고려하는 방법이 대안이 될 수 있다.

결과를 보았을 때, 미성어에 대한 어획확률(u_{im})의 사전분포와 성어에 대한 어획확률(u_{ma})의 사전분포는 개선이 필요할 것으로 보였다. Case 1에서 미성어에 대한 어획확률의 점추정치(point estimate)와 성어에 대한 어획확률의 점추정치는 0.2100019로 동일하였고(표 5), Case 2에서 미성어에 대한 어획확률의 점추정치는 0.2099985였고 성어에 대한 어획확률의 점추정치는 0.2100012였다(표 9). 이 결과는 미성어에 대한 어획확률과 성어에 대한 어

획확률 각각의 사전분포에서 고려된 최빈값(Mode)인 0.21과 큰 차이가 나지 않았다(표 4). 또한, 모의실험에서 미성어에 대한 어획확률과 성어에 대한 어획확률 각각에 대한 Relative difference (RD)의 결과는 RD의 중앙값에 집중되어 있었다(그림 16; 그림 17). 미성어에 대한 어획확률과 성어에 대한 어획확률 각각의 사전분포에서 고려된 최빈값이 현재는 동일한 값(0.21)으로 주어졌는데, 추후 연구에서는 미성어에 대한 어획확률의 사전분포와 성어에 대한 어획확률의 사전분포 각각의 최빈값을 다른 값으로 주거나 사전정보를 통해 최빈값을 고려해야할 것으로 보인다. Case 1과 Case 2 각각의 미성어에 대한 어획확률 점추정치와 성어에 대한 어획확률 점추정치 결과는 모수 추정 결과에서 계산된 표준오차(standard error)를 각각의 점추정치에 고려하여 해석되어야 한다.

IV.7. 상태공간 잉여생산 모델

본 연구에서 주목해야할 점 중 하나는 상태공간 잉여생산 모델을 수정하여 사용하였다는 점이다. 수정된 상태공간 잉여생산 모델은 기존 모델이 추정하지 못하는 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)을 추정할 수 있고(표 5; 표 9), 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 성어 자원량($B_{t,ma}$)을 예측할 수 있다(그림 12; 그림 22). 이는 추가적인 자료로서 반기별 미성어 어획비율(S_t)을 사용하기 때문에 가능하다. 또한, 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)의 점추정치(point estimate) 뿐만 아니라 표준오차(standard error)를 계산하기 때문에 자료값인 반기별 미성어 어획비율(S_t)을 반기별 전체 자원량에 대한 미성어 자원량의 비율(R_t)로 가정하는 경우에서 제공하지 못하는 불확실성(표준오차)을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 제시하는 반기별 미성어 자원량($B_{t,im}$)과 반기별 성어 자원량($B_{t,ma}$)을 예측하는 방법을 통하여 자원 상태를 개체군 단위 보다 자세히 파악할 수 있다. 또한, 반기별 성어 자원량은 산란자원량(spawning stock biomass)으로 해석되어 자원관리를 위해 필요한 정보로 활용될 수 있다. 본 연구의 멸치에 대한 미성어와 성어 자원량 예측 결과는 기선권현망 어업의 단위노력당 어획량(I_t) 자료에서 의문이 들기 때문에 실질적인 자원관리에 활용되어서는 안 된다. 하지만, 멸치의 경우처럼 다른 어종에서도 어획량 조성 정보를 알 수 있으면, 본 연구에서 멸치 자원에 대해 미성어 자원량과 성어 자원

량을 파악했던 것과 같이 개체군 단위 보다 자세한 자원상태를 파악할 수 있을 것으로 기대된다.



V. 사사

본 연구는 한국연구재단(2019R1I1A2A01052106)으로 부터 재정적 지원을 받았습니다. 김진영 박사님과 한국해양수산개발원으로부터 기선권현망 어업의 건멸치 채장별 어획물 조성자료를 제공받았습니다. 멸치 자료 수집에는 김도율 군, 박예지 양, 송미혜 양, 우희원 양의 도움이 있었습니다.

석사과정 동안 많은 분들께 도움을 받아 혼자라면 하지 못하였을 연구를 마무리할 수 있었습니다. 먼저, 학부 때부터 저에게 관심 가져 주시고, 대학원 생활 동안 따뜻하게 지도해주신 현상윤 교수님께 감사드립니다. 교수님의 지도를 통해서 한 단계 성장할 수 있었고, 연구 진행과 마무리를 할 수 있었습니다. 멸치 연구를 시작할 수 있게 해준 김진영 박사님께 감사드립니다. 제가 연구진행에 어려움을 느낄 때 마다 관련 자료를 보내주시고, 조언을 해주신 덕분에 연구를 끝까지 진행할 수 있었습니다. 학위논문에 대해 자세한 지도를 해주신 김진구 교수님께 감사드립니다. 학부 때 수강한 교수님의 관상생물학 및 어류학 강의를 통하여 어류에 대한 애정을 가질 수 있었고, 어류인 멸치를 연구할 수 있었습니다. 자원생물학을 가르쳐 주신 김수암 교수님, 남기완 교수님, 백혜자 교수님, 오철웅 교수님, 김현우 교수님, 박원규 교수님께 감사드립니다. 교수님들의 가르침을 통하여 학문에 대해 관심을 가지고 배움을 이어 나갈 수 있었습니다. 멸치 참고문헌 수집에 도움을 주시고 연구를 응원해주신 강희중 박사님과 멸치 관련 문의에 친절히 답변 해주신 문성용 박사님께 감사드립니다.

석사과정 동안 함께 시간을 보냈던 현상윤 교수님 연구실 동료분들께 감사드립니다. 동료분들의 도움으로 석사과정을 진행할 수 있었고, 함께 나누었던 이야기들이 연구 발전에 도움이 되었습니다. 수산자원평가와 TMB언어에 대해 관심을 가지게 해주시고 도와주신 규한 형, 석사과정 시작을 함께하며 많은 대화를 나눴던 도율이, 오랫동안 함께하며 많은 도움 주신 진우 형, 부족한 부분에 대한 조언을 아끼지 않았던 민규, 멸치를 함께 알아갔던 예지, 힘들 때 마다 따뜻하게 위로해주고 연구진행에 많은 도움 주신 동영이 형, 석사과정 마무리 기간에 많은 이야기 나눴던 정현이, 청소와 수업을 함께하고 이야기를 나누며 힘을 준 승준이, 종종 커피를 사주며 힘이 되어준 효태, 연구와 프로그래밍에 대한 많은 이야기를 나누었던 유리에게 감사드립니다.

친구들의 응원도 석사과정 동안 많은 힘이 되었습니다. 학부부터 함께 해온 동훈, 동건, 진수, 락경, 재석, 태우와 민주, 서현, 서하에게 감사드립니다. 또한, 종종 연락하며 서로를 응원한 성은이, 마주칠 때 마다 항상 밝게 인사해준 재환이와 강현이게도 감사드립니다. 어린시절부터 함께하고 힘이 되어준 태완, 원일, 동욱, 우민, 형준이에게 감사드립니다.

마지막으로 거제도에 계신 할아버지, 할머니, 그리고 아버지, 어머니, 형에게 언제나 사랑하고 감사한 마음을 전합니다.

VI. 참고문헌

- 멸치권현망수협. 2021. Retrieved from <http://www.anchovy-suhyup.co.kr/index.jsp>.
- 수산청. 1995. 수산청고시 제 1995-39 호.
- An, D. 2021. Multiple fisheries for the common squid (*Todarodes pacificus*) stock, and the application of a Bayesian state-space production model for its assessment. Master's thesis. Pukyong National University.
- Auger-Méthé, M., Field, C., Albertsen, C.M., Derocher, A.E., Lewis, M.A., Jonsen, I.D., and Flemming, J.M. 2016. State-space models' dirty little secrets: Even simple linear gaussian models can have estimation problems. *Scientific Reports* 6(1): 26677.
doi:<https://doi.org/10.1038/srep26677>.
- Cha, B.Y., Gong, Y.G., Lee, C.H., and Kim, D.H. 2004. Feeding ecology of Pacific mackerel, *Scomber japonicus*, in Korean waters. *J. Korea. Soc. Fish. Res* 6(2): 14–22.
- Cha, B.Y., Yang, W.S., Kim, J.I., Jang, S.I., Chu, E.K., and Park, J.S. 2008. Spawning density and recruitment of Japanese anchovy, *Engraulis japonica* in the southern sea of Korea in 2007. *Korean Journal of Ichthyology* 20(3): 190–197.

- Choi, Y.M., and Kim, J.Y. 1988. Reproduction of anchovy, *Engraulis japonica* in the southern waters of Korea. Bull. Nat. Fish. Res. Dev. Agency 41: 27–34.
- FishBase. 2021. Retrieved from
<https://www.fishbase.ca/summary/Engraulis-japonicus.html>.
- Froese, R., Demirel, N., Coro, G., Kleisner, K.M., and Winker, H. 2017. Estimating fisheries reference points from catch and resilience. Fish and Fisheries 18(3): 506–526. doi:<https://doi.org/10.1111/faf.12190>.
- Hyun, S.-Y., and Kim, K. 2022. An evaluation of estimability of parameters in the state-space non-linear logistic production model. Fisheries Research 245: 106135.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2021.106135>.
- Jung, S. 2008. Simulation-based daily cohort analysis of Pacific anchovy (*Engraulis japonicus*) in southern Korean coastal waters. Fisheries Research 93(3): 280–288.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.05.005>.
- Jung, Y., Seo, Y.I., and Hyun, S.-Y. 2021. A Bayesian state-space production model for Korean chub mackerel (*Scomber japonicus*) stock. Fisheries and Aquatic Sciences 24(4): 139–152.
doi:<https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e14>.

- Kim, J.I. 1988. Ecological study of anchovy, *Engraulis japonica* (Houttuyn), in the southern waters of Korea. Master's thesis. National Fisheries University of Pusan.
- Kim, J.I., Yang, W.S., Oh, T.Y., Seo, Y.I., Kim, S.T., Hwang, D.J., Kim, E.H., and Jeong, S.B. 2008. Acoustic estimates of anchovy biomass along the Tongyoung-Namhae coast. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 41(1): 61–67.
- Kim, J.Y., Jeong, H.C., Kim, H., and Kang, S. 2015. Forecasting the monthly abundance of anchovies in the South Sea of Korea using a univariate approach. Fisheries Research 161: 293–302.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.08.017>.
- Kim, J.Y., and Kang, Y.J. 1992. Spawning ecology of anchovy, *Engraulis japonica*, in the southern waters of Korea. Bull. Korean Fish. Soc 25(5): 331–340.
- Kim, J., and Lo, N.C. 2001. Temporal variation of seasonality of egg production and the spawning biomass of Pacific anchovy, *Engraulis japonicus*, in the southern waters of Korea in 1983–1994. Fisheries Oceanography 10(3): 297–310. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2001.00175.x>.

KOSTAT (Statistics Korea). 2021. Korean statistical information service.

Retrieved from <http://kosis.kr/>.

Kristensen, K., Nielsen, A., Berg, C.W., Skaug, H., and Bell, B.M. 2016.

TMB : Automatic Differentiation and Laplace Approximation. Journal of Statistical Software 70(5): 1–21.

doi:<https://doi.org/10.18637/jss.v070.i05>.

Lee, H.W., Hwang, S.D., and Kim, H. 2021. Age and growth characteristic of Pacific anchovy, *Engraulis japonicus*, in the southern waters of Korea based on the year ring of otolith and collection date. Korean Journal of Ichthyology 33(1): 31–36.

doi:<https://doi.org/10.35399/ISK.33.1.5>.

Lee, K., Go, S., and Jung, S. 2017. Simulation-based yield-per-recruit analysis of Pacific anchovy *Engraulis japonicus* in the Korea Strait with varying fisheries regulations. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 50(4): 437–446.

doi:<https://doi.org/10.5657/KFAS.2017.0437>.

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2021. 수산자원관리법 시행령.

Retrieved from

<https://www.law.go.kr/LSW/lsInfoP.do?efYd=20210803&lsiSeq=234433#0000>.

- Moon, S.J., An Y.S., Jang C.S., and Lee D.H. 2011. A study on the problems and solutions of anchovy boat seine fisheries - Fisheries in the offshore around Kyungnam and Chonnam island -. the Journal of Korean Island 23(1): 83–100.
- NGII (National Geographic Information Institute). 2021. 국토정보플랫폼 국토정보맵. Retrieved from <http://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2021. Forecast · Breaking News. Retrieved from <http://www.nifs.go.kr/>.
- Oh, T.Y., Kim, J.I., Seo, Y.I., Lee, S.K., Hwang, D.J., Kim, E.H., Yoon, E.A., and Jeong, S.B. 2009. Comparison of geostatistic and acoustic estimates of anchovy biomass around the Tongyeong inshore area. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 42(3): 290–296.
- Pauly, D., Trites, A.W., Capuli, E., and Christensen, V. 1998. Diet composition and trophic levels of marine mammals. ICES Journal of Marine Science 55(3): 467–481.
doi:<https://doi.org/10.1006/jmsc.1997.0280>.
- Schaefer, M.B. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin 1(2): 23–56.
- Schlitzer, Reiner. 2021. Ocean Data View. <http://odv.awi.de>.

Team, R.C. 2013. R: A language and environment for statistical computing.
Vienna, Austria.

Youn, S.H., Kim, M.J., Kim, J.-Y., and Oh, C.-W. 2013. Feeding
characteristics of the Japanese anchovy, *Engraulis japonicus* according
to the distribution of zooplankton in the coastal waters of southern
Korea. Korean Journal of Environmental Biology 31(4): 275–287.
doi:<http://dx.doi.org/10.11626/KJEB.2013.31.4.275>.



VII. 부록

VII.1. TMB 코드

```
// a state-space production model for Korea Pacific anchovy stock

#include <TMB.hpp>

// pass missing values
template<class Type>
bool isNA(Type x){
  return R_IsNA(asDouble(x));
}

// square
template<class Type>
Type square(Type x){
  return pow(x, 2.0);
}

// dlnorm
template<class Type>
Type dlnorm(Type x, Type meanlog, Type sdlog, int give_log=0){
  // return 1/(sqrt(2*M_PI)*sd)*exp(-.5*pow((x-mean)/sd,2));
  Type logres = dnorm(log(x), meanlog, sdlog, true) - log(x);
  if(give_log)
    return logres;
  else
    return exp(logres);
}

// objective function
template<class Type>
Type objective_function<Type>::operator()(){
  // data
  DATA_VECTOR(Yt); // yield (MT) at time t
  DATA_VECTOR(S1t); // proportion of immature fish in yield;
  DATA_VECTOR(It_DNF); // CPUE at time t of Draft Net Fishery
  DATA_VECTOR(Mean_w1t); // mean weight of a immature fish
```

```

DATA_VECTOR(Mean_w2t); // mean weight of a mature fish
DATA_VECTOR(modeCV_r); // mode and CV of r for prior
DATA_VECTOR(modeCV_K); // mode and CV of K for prior
DATA_VECTOR(modeCV_u_im); // mode and CV of u_im for prior
DATA_VECTOR(modeCV_u_ma); // mode and CV of u_ma for prior
DATA_SCALAR(ESS); // effective sample size

// parameters
// fixed effects
PARAMETER(logsig_o); // sig_o: the sd of the observation error
//PARAMETER(logsig_p); // sig_p: the sd of the process error
PARAMETER(logb); //  $P1 = b \cdot \log N(0, \sigma_p^2)$ 
PARAMETER(logK); // K: carrying capacity
PARAMETER(logq_DNF); // q: scaling role, where  $I_t = q \cdot B_t$ 
PARAMETER(logr); // r: intrinsic growth rate
PARAMETER(logu_im); // u_im: catch probability of immature fish
PARAMETER(logu_ma); // u_ma: catch probability of mature fish
PARAMETER_VECTOR(logRt); // Rt: proportion of immature fish in
population;
// random effects
PARAMETER_VECTOR(logPt); //  $P_t = B_t / K$ ; Latent random variable (i.e.,
random effects; state variable; hidden variable)

// derived quantities
int ntimes = Yt.size(); // ntimes: the number of times
Type sig_o = exp(logsig_o);
Type sigo2 = sig_o*sig_o;
Type sig_p = exp(logsig_o); // assumption
//Type sig_p = exp(logsig_p);
//Type sigp2 = sig_p*sig_p;
Type b = exp(logb);
Type K = exp(logK);
Type q_DNF = exp(logq_DNF);
Type r = exp(logr);
Type u_im = exp(logu_im);
Type u_ma = exp(logu_ma);
vector<Type> Rt = exp(logRt);
vector<Type> Pt = exp(logPt);

Type logMSY = logr + logK - log(4.0);
Type MSY = exp(logMSY);
vector<Type> logBt = logPt + logK;
vector<Type> Bt = exp(logBt);

```

```

vector<Type> logpredIt_DNF = logq_DNF + logPt + logK;
vector<Type> predIt_DNF = exp(logpredIt_DNF); // predicted It
vector<Type> E_logPt(ntimes+1); // Expected values of log(Pt)'s;
                                // E_logPt(0): this is not used.

```

```

vector<Type> B1t(ntimes);
vector<Type> B2t(ntimes);
for(int i=0; i<ntimes; i++){
    // length of Bt is ntimes + 1;
    // length of Rt is ntimes.
    B1t(i) = Bt(i)*Rt(i);
    B2t(i) = Bt(i) - B1t(i);
}

```

```

vector<Type> N1t = B1t/Mean_w1t;
vector<Type> N2t = B2t/Mean_w2t;
vector<Type> Nt = N1t + N2t;

```

```

vector<Type> Y1t = Yt*S1t;
vector<Type> Y2t = Yt - Y1t;

```

```

vector<Type> C1t = Y1t/Mean_w1t;
vector<Type> C2t = Y2t/Mean_w2t;
vector<Type> Ct = C1t + C2t;

```

```

vector<Type> Et = Nt - Ct;
vector<Type> E1t = N1t - C1t;
vector<Type> E2t = N2t - C2t;

```

```

vector<Type> q1t = C1t/N1t;
vector<Type> q2t = C2t/N2t;

```

```

vector<Type> p1t(ntimes);
vector<Type> p2t(ntimes);

```

```

p1t = C1t/Ct;
p2t = 1.0 - p1t;

```

```

vector<Type> pred_p1t(ntimes);
vector<Type> pred_p2t(ntimes);

```

```

vector<Type> pred_C1t = u_im*N1t;
vector<Type> pred_C2t = u_ma*N2t;

```

```

vector<Type> pred_Ct = pred_C1t + pred_C2t;

pred_p1t = pred_C1t/pred_Ct;
pred_p2t = 1.0 - pred_p1t;

// objective function
vector<Type> nll(8); // negative loglikelihoods that have eight components
nll.setZero();

// process equation
// only for the initial biomass, which is treated as the fixed effect parameter
// logPt(0) ~ N(log(b), variance), where the variance is assumed to be sig_p
nll(0) -= dnorm(logPt(0), log(b), sig_p, true);
//std::cout<<"nll(0): "<<nll(0)<<std::endl;

for(int i=1; i<=ntimes; i++){
    if(!isNA(Yt(i-1))){ // a zero-based indexing scheme
        E_logPt(i) = log(Pt(i-1) + r*(1.0 - Pt(i-1))*Pt(i-1) - Yt(i-1)/K);
        nll(1) -= dnorm(logPt(i), E_logPt(i), sig_p, true);
    }
}
//std::cout<<"nll(1): "<<nll(1)<<std::endl;

// observation equation
for(int i=0; i<ntimes; i++){ // a zero-based indexing scheme
    if(!isNA(It_DNF(i))){
        nll(2) -= dnorm(log(It_DNF(i)), (logq_DNF + logK + logPt(i)), sig_o,
true);
    }
}
//std::cout<<"nll(2): "<<nll(2)<<std::endl;

// binomial loglikelihood
for(int i=0; i<ntimes; i++){ // a zero-based indexing scheme
    nll(3) -= (lfactorial(ESS) - lfactorial(ESS*p1t(i)) - lfactorial(ESS*p2t(i)) +
ESS*p1t(i)*log(pred_p1t(i)) + ESS*p2t(i)*log(pred_p2t(i)));
}
//std::cout<<"nll(3): "<<nll(3)<<std::endl;

// prior for r
// r ~ logN distn.
Type prior_mode_r = modeCV_r(0);
Type prior_cv_r = modeCV_r(1);

```

```

Type sig2_r = log(square(prior_CV_r) + 1.0);
Type mu_r = log(prior_mode_r) + sig2_r;
nll(4) -= dlnorm(r, mu_r, sqrt(sig2_r), true);
//std::cout<<"nll(4): "<<nll(4)<<std::endl;

// prior for K
// K ~ logN distn.
Type prior_mode_K = modeCV_K(0);
Type prior_CV_K = modeCV_K(1);
Type sig2_K = log(square(prior_CV_K) + 1.0);
Type mu_K = log(prior_mode_K) + sig2_K;
nll(5) -= dlnorm(K, mu_K, sqrt(sig2_K), true);
//std::cout<<"nll(5): "<<nll(5)<<std::endl;

// prior for u_im
// u_im ~ beta distn.
Type prior_mode_u_im = modeCV_u_im(0);
Type prior_CV_u_im = modeCV_u_im(1);
Type prior_a_im = prior_CV_u_im*prior_CV_u_im;
Type prior_b_im = 3.0*prior_CV_u_im*prior_CV_u_im*prior_mode_u_im -
prior_CV_u_im*prior_CV_u_im + prior_mode_u_im - 1.0;
Type prior_c_im = 1.0 - 2.0*prior_mode_u_im;
Type alpha_u_im = (-prior_b_im + sqrt(prior_b_im*prior_b_im -
4.0*prior_a_im*prior_c_im))/(2.0*prior_a_im);
Type beta_u_im = (alpha_u_im - 1.0 - (alpha_u_im -
2.0)*prior_mode_u_im)/prior_mode_u_im;
nll(6) -= lgamma(alpha_u_im + beta_u_im) - lgamma(alpha_u_im) -
lgamma(beta_u_im) + (alpha_u_im - 1.0)*logu_im + (beta_u_im -
1.0)*log(1.0 - exp(logu_im));
//std::cout<<"nll(6): "<<nll(6)<<std::endl;

// prior for u_ma
// u_ma ~ beta distn.
Type prior_mode_u_ma = modeCV_u_ma(0);
Type prior_CV_u_ma = modeCV_u_ma(1);
Type prior_a_ma = prior_CV_u_ma*prior_CV_u_ma;
Type prior_b_ma =
3.0*prior_CV_u_ma*prior_CV_u_ma*prior_mode_u_ma -
prior_CV_u_ma*prior_CV_u_ma + prior_mode_u_ma - 1.0;
Type prior_c_ma = 1.0 - 2.0*prior_mode_u_ma;
Type alpha_u_ma = (-prior_b_ma + sqrt(prior_b_ma*prior_b_ma -
4.0*prior_a_ma*prior_c_ma))/(2.0*prior_a_ma);
Type beta_u_ma = (alpha_u_ma - 1.0 - (alpha_u_ma -

```

```

2.0)*prior_mode_u_ma)/prior_mode_u_ma;
  nll(7) -= lgamma(alpha_u_ma + beta_u_ma) - lgamma(alpha_u_ma) -
lgamma(beta_u_ma) + (alpha_u_ma - 1.0)*logu_ma + (beta_u_ma -
1.0)*log(1.0 - exp(logu_ma));
  //std::cout<<"nll(7): "<<nll(7)<<std::endl;

// joint negative loglikelihoods
Type jnll = nll.sum();

// REPORT
REPORT(jnll);
REPORT(Bt);
REPORT(predIt_DNF);
REPORT(sig_o);
REPORT(sig_p);
REPORT(b);
REPORT(K);
REPORT(q_DNF);
REPORT(r);
REPORT(u_im);
REPORT(u_ma);
REPORT(Rt);
REPORT(Pt);
REPORT(MSY);
REPORT(B1t);
REPORT(B2t);
REPORT(C1t);
REPORT(C2t);
REPORT(pred_C1t);
REPORT(pred_C2t);
REPORT(p1t);
REPORT(p2t);
REPORT(pred_p1t);
REPORT(pred_p2t);
REPORT(E1t);
REPORT(E2t);
REPORT(Nt);
REPORT(N1t);
REPORT(N2t);

// ADREPORT
ADREPORT(sig_o);
ADREPORT(sig_p);

```

```

ADREPORT(b);
ADREPORT(K);
ADREPORT(q_DNF);
ADREPORT(r);
ADREPORT(u_im);
ADREPORT(u_ma);
ADREPORT(Rt);
ADREPORT(Pt);

ADREPORT(Bt);
ADREPORT(predIt_DNF);
ADREPORT(MSY);
ADREPORT(jnll);
ADREPORT(Bt);
ADREPORT(B1t);
ADREPORT(B2t);
ADREPORT(Nt);
ADREPORT(N1t);
ADREPORT(N2t);
ADREPORT(C1t);
ADREPORT(C2t);
ADREPORT(pred_C1t);
ADREPORT(pred_C2t);
ADREPORT(p1t);
ADREPORT(p2t);
ADREPORT(pred_p1t);
ADREPORT(pred_p2t);
ADREPORT(E1t);
ADREPORT(E2t);
ADREPORT(sigo2);

//ADREPORT(q1t);
//ADREPORT(q2t);

return jnll;
}

```