



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](#)

이학석사 학위 청구논문

연령구조모형을 사용한 남방참다랑어
(*Thunnus maccoyii*)의 자원평가



2007년 2월

부경대학교 대학원

수산해양학연합동과정

권 유 정

이학석사 학위청구논문

연령구조모형을 사용한 남방참다랑어
(*Thunnus maccoyii*)의 자원평가

지도교수 장창익

이 논문을 이학석사 학위논문으로 청구함

2007년 2월

부경대학교 대학원

수산해양학연합동과정

권유정

권유정의 이학석사 학위논문을 인준함

2006년 12월 5일



주 심 이 학 박사 문 대 연 인

위 원 이 학 박사 이 재 봉 인

위 원 이 학 박사 장 창 익 인

목 차

Abstract 1

서 론 3

1. 다량어류 종류 및 관리위원회 3

1.1 눈다랑어 3

1.2 날개다랑어 4

1.3 황다랑어 5

1.4 가다랑어 5

1.5 참다랑어 7

2. 다량어류 자원평가 방법 10

2.1 생산량모델 10

2.2 연령구조모델 12

2.3 평가방법의 장단점 20

2.4 MULTIFAN-CL 22

3. 연구목적 22

자료 및 방법 24

1. 자료의 재구성 24

1.1 해역의 정의 24

1.2 시간의 정의 24

1.3	어업의 정의	26
1.4	어획량과 노력량 자료	26
1.5	체장빈도 자료	26
1.6	표지 자료	29
1.7	순간자연사망계수	29
2.	개체군 역학모델	31
2.1	연령구조 모델	31
2.2	회유	32
2.3	체장-체중 관계	36
2.4	성장식	37
2.5	선택성	38
2.6	어획능률	39
2.7	순간어획사망계수	40
2.8	표지-재포 역학모델	41
2.9	자원량 및 산란자원량 추정	42
2.10	산란자원량-가입량 관계	43
2.11	적정어획사망계수 및 적정어획연령	44
2.12	생물학적허용어획량 (ABC)	46
3.	민감도 분석	47
3.1	회유에 대한 민감도 분석	47
3.2	순간자연사망계수에 대한 민감도 분석	50
	결 과	52
1.	입력자료의 검정	52
1.1	어업별 어획량	52

1.2 어업별 체장빈도	54
1.3 표지채포	55
2. 파라미터 추정	55
2.1 회유율	55
2.2 체장-체중 관계	55
2.3 성장식	58
2.4 선택성 및 어획능률	63
3. 자원평가 결과	63
3.1 순간어획사망계수	63
3.2 자입량	71
3.3 가원량	74
3.4 산란자원량-가입량 관계	77
3.5 걱정어획사망계수 및 걱정어획연령	81
3.6 생물학적 기준점 및 생물학적허용어획량 (ABC)	82
고찰	89
요약	94
사사	95
참고문헌	97

*Stock assessment of
southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*),
using age-structured model*

You Jung Kwon

*URIP of Fisheries and Oceanography, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*, SBT) is one of the most important tuna species in terms of the significance in the ecology and the economy. Catches were highest in 1961 with 85,000mt, but declined substantially as the catch rate dropped. Recent studies indicated that there were large declines in spawning biomass as well as in recruitment. In this study, a stock assessment of SBT was carried out using the age-structured MULTIFAN-CL model. Catch, effort, length-frequency and tagging data were stratified by quarter (for the period 1965~2004), by three model regions and by 5 fisheries to be used in the analysis. The

instantaneous coefficient of natural mortality (M) of SBT estimated from the Zhang and Megrey method was 0.103/year. The sensitivity analysis was carried out for the uncertainty of two parameters, that is, movement and natural mortality. Results showed that biomass and recruitment of SBT had significantly declined after 1965. The acceptable biological catch (ABC) was estimated to be 5,375 ton, based on the $F_{40\%}$ reference point.



서 론

다랑어류 (Genus *Thunnus*)는 경골어강 (Class Osteichthyes) 농어목 (Order Perciformes) 고등어과 (Family Scombridae)에 속하는 어류이며, 눈다랑어 (Bigeye tuna, *Thunnus obesus*), 날개다랑어 (Albacore, *Thunnus alalunga*), 황다랑어 (Yellowfin tuna, *Thunnus albacares*), 가다랑어 (Skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*) 및 참다랑어 (Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*)가 있으며 (Table 1), 다랑어 유사종 (tuna-like species)으로는 황새치 (Swordfishes, *Xiphias gladius*)등 새치류가 있다. 이들은 모두 외양성이고, 고도회유성으로 장거리 이동 능력을 가지고 있으며, 각 대양별로 하나 혹은 두 개의 계통군으로 구성되어 있다 (FAO, 1997). 다랑어류는 대부분 연승 (longline), 선망 (purse seine) 및 채낚기 (pole-and-line)어업에서 어획된다. 선망어업 및 채낚기어업은 표층성 다랑어류를 어획대상으로 하는 반면, 연승어업은 상당한 깊이에 있는 어류를 대상 종으로 한다 (An, 2001).

1. 다랑어 종류 및 관리위원회

1.1 눈다랑어

눈다랑어 (Bigeye tuna, *T. obesus*)는 전 대양의 온대 및 열대해역에 광범위하게 분포하며, 대양의 표층 근처 또는 중층 수역 (수심 0~250m)에서 생활한다 (FAO, 2003). 동부태평양에서는 10°N~10°S에서 연중 산란을 하나 북반구에서는 4~9월, 남반구에서는 1~3월이 주 산란기이다. 눈다랑어는 전

대양에 분포하기 때문에 각 서식해역에 따라 관리하는 위원회가 각각 다르다 (Table 2). 동부태평양 해역의 눈다랑어는 전미열대다랑어위원회 (Inter-American Tropical Tuna Commission, IATTC)에서 자원관리를 하며, 중·서부태평양에서는 중·서부태평양수산위원회 (Western and Central Pacific Fisheries Commission, WCPFC), 대서양에서는 대서양다랑어보존위원회 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna, ICCAT), 인도양에서는 인도양다랑어위원회 (Indian Ocean Tuna Commission, IOTC)에서 관리를 하고 있다. 본 수산자원의 자원상태는 인도양을 제외한 태평양 및 대서양의 눈다랑어는 과도어획으로 인한 남획상태에 있는 것으로 평가되고 있다 (Maunder and Harley, 2005, ICCAT, 2005, Hampton et al., 2006a).

1.2 날개다랑어

날개다랑어 (Albacore, *T. alalunga*)는 전 대양의 열대 및 온대해역 (45°N~40°S)에 광범위하게 분포하며, 표층 근처에서부터 중층에 주로 서식한다 (FAO, 2003). 동부태평양 해역의 눈다랑어는 IATTC에서 관리를 하며, 중·서부태평양에서는 WCPFC, 대서양에서는 ICCAT, 인도양에서는 IOTC에서 관리를 하고 있다 (Table 2). 날개다랑어는 어획량보다 자원량이 더 많이 추정되므로 현재의 자원상태는 안정된 수준에 있는 것으로 평가되고 있다 (IATTC, 2000, Langley and Hampton, 2006).

1.3 황다랑어

황다랑어 (Yellowfin tuna, *T. albacares*)는 전 대양의 열대 및 아열대 해역에 걸쳐 광범위하게 분포하며, 주로 표층부터 수온약층 주위에 서식한다 (FAO, 2003). 황다랑어 역시 전 대양에 널리 분포하기 때문에 관리하는 다랑어 위원회는 동부태평양 해역의 눈다랑어는 IATTC에서 관리를 하며, 중·서부태평양에서는 WCPFC, 대서양에서는 ICCAT, 인도양에서는 IOTC에서 관리를 하고 있다 (Table 2). 황다랑어의 자원상태는 현재 중서부태평양 해역을 제외하고는 과도어획으로 인한 남획상태에 있으므로, 어획량을 조속히 줄여야 한다는 연구결과가 있다 (Hoyle and Maunder, 2005, ICCAT, 2004, Hampton et al., 2006b).

1.4 가다랑어

가다랑어 (Skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*)는 전 대양의 열대 및 온대 수역에 광범위하게 분포하며, 대표적인 부어성 어종으로 수온 전선대에 대부분 서식한다 (FAO, 2003). 가다랑어는 동부태평양 해역의 눈다랑어는 IATTC에서 관리를 하며, 중·서부태평양에서는 WCPFC, 대서양에서는 ICCAT, 인도양에서는 IOTC에서 관리를 하고 있다 (Table 2). 대부분의 다랑어류가 전 대양에서 과도어획으로 인한 남획상태에 있으나, 가다랑어는 자원량이 매우 안정된 수준에 있는 것으로 평가되고 있다 (Maunder and Harley, 2004, Langley et al., 2003).

Table 1. Tuna species and its management bodies

Species	Scientific name	Management Body	Stock Status	Reference
Bigeye tuna	<i>Thunnus obesus</i>	IATTC ¹ , WCPFC ² , ICCAT ³ , IOTC ⁴	Overfished	Maunder and Harley, 2005; ICCAT, 2005; Hampton et al., 2006a
Albacore	<i>Thunnus alalunga</i>	IATTC, WCPFC, ICCAT, IOTC	Stability	IATTC, 2000; Langley and Hampton, 2006
Yellowfin tuna	<i>Thunnus albacares</i>	IATTC, WCPFC, ICCAT, IOTC	Overfished	Hoyle and Maunder, 2005; ICCAT, 2004; Hampton et al., 2006b
Skipjack tuna	<i>Katsuwonus pelamis</i>	IATTC, WCPFC, ICCAT, IOTC	Stability	Maunder and harley, 2004; Langley et al., 2003
Bluefin tuna	<i>Thunnus thynnus</i>	IATTC, WCPFC, ICCAT, IOTC, CCSBT ⁵ , ISC ⁶	Overfished	ISC, 2004; CCSBT, 2006

1 IATTC : Inter-American Tropical Tuna Commission

2 WCPFC : Western and Central Pacific Fishery Commission

3 ICCAT : International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna

4 IOTC : Indian Ocean Tuna Commission

5 CCSBT : Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna

6 ISC : International Scientific Committee for Tuna and Tuna-like species in the North Pacific Ocean

1.5 참다랑어

참다랑어 (Bluefin tuna, *T. thynnus*)는 북방참다랑어 (Northern bluefin tuna, *T. thynnus*)와 남방참다랑어 (Southern bluefin tuna, *T. maccoyii*)로 구분되며, 이중 북방참다랑어는 태평양, 대서양 및 인도양의 세계 주요 3대양에 서식하고 있으며 열대, 온대, 아한대역에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 북방참다랑어 (Northern bluefin tuna, *T. thynnus*)는 북위 30° 이북 해역의 태평양 및 인도양에서 서식하는 참다랑어 종이다. 태평양 해역에 서식하는 북방참다랑어는 일본과 필리핀 사이에서 4~8월에 산란을 하며, 성장하여 동부태평양 및 북태평양 아한대~아열대 전 해역을 회유한다. 인도양에 서식하는 북방참다랑어는 산란장이 정확히 밝혀진 곳은 없으며, 일본에서 잠시 머문 유어가 남쪽으로 내려왔거나 산란 후 산란장에서 바로 남으로 내려온 고령어로 추정되고 있다.

북방참다랑어는 분포하는 해역이 넓기 때문에 대서양다랑어보존위원회 (International Commission for the Conservation of Atlantic Tuna, ICCAT), 전미열대다랑어위원회 (Inter-American Tropical Tuna Commission, IATTC) 및 북태평양다랑어류잡정과학위원회 (International Scientific Committee for Tuna and Tuna-like species in the North Pacific Ocean, ISC) 등 3개의 다랑어 위원회에서 관리하고 있다 (Table 2). 북방참다랑어를 대상으로 어획하는 조업국은 한국, 일본, 대만, 미국, 캐나다 등이며, 대상어업은 선망, 연승, 정치망어업 등이고, 총어획량은 2만~2만 5천톤의 범위에서 이루어지고 있다. 북방참다랑어의 자원상태는 1960년대 이후 산란자원량이 지속적으로 감

Table 2. Management area and assessment method used by tuna management body

Management Body	Management Area	Target Species	Member countries	Assessment Methods
IATTC	Eastern Pacific	YFT, BET, SKJ, ALB	15	A-SCALA ¹
ICCAT	Atlantic	YFT, BET, SKJ, ALB	42	Production models (ASPIC ² , PROFIT ³ , BSP ⁴ , Delay-Different model), Age-structured models (VPA, ELBUEY age-structured production model, MULTIFAN-CL ⁵), Yield- and Spawner-per-recruit
IOTC	Indian	YFT, BET, SKJ, ALB	23	ASPM ⁶ , Bayesian age-structured production model, CATAGE ⁷ , PROCEAN ⁸
ISC	North Pacific	YFT, BET, SKJ, ALB	15	ADAPT, MULTIFAN-CL ⁵
WCPFC	Western & Central Pacific	YFT, BET, SKJ, ALB	29	MULTIFAN-CL ⁵
CCSBT	Habitat of SBT (Indian & Atlantic)	SBT	5	OM ⁹

1 A-SCALA : Age-structured statistical catch-at-length analysis

2 ASPIC : A stock production mode incorporating covariates

3 PROFIT : Generalized stock production model

4 BSP : Bayesian surplus production model

5 MULTIFNA-CL : Multiple length frequency + FA model

6 ASPM : Age-structured production model

7 CATAGE : Catch-at-age model

8 PROCEAN : Production catch/effort analysis

9 OM : Operating model

소 추세를 보이고 있으며, 1990년에는 최저의 산란자원량을 나타낸 바 있다. 그러나 1990년 이후에 산란자원 및 어린자어의 가입량이 회복되는 경향을 보이고 있으며, 5개 조업국이 현재의 어획수준만 유지한다면 안정된 자원을 확보 할 수 있을 것으로 평가되고 있다 (ISC, 2004).

남방참다랑어 (*Thunnus maccoyii*)는 인도양에서 전체 남방참다랑어 어획량의 절반이 넘는 73%가 어획되며, 태평양에서 21%, 대서양에서 6%가 어획된다 (ICCAT, 2006). 호주와 일본이 1952년에 남방참다랑어의 산란장에서 조업을 시작한 이래 어업 초기에는 연승어업이 확장되어, 1961년 85,000톤의 최고 어획량을 기록하였으며 (Fig. 1(a)), 이후 감소하여 현재는 15,000톤 내외로 어획하고 있다 (CCSBT, 2005).

1952년 어획을 시작한 이래 일본은 1970년대 초반까지 남방참다랑어를 90%이상 어획하였으며 호주는 10~20%정도를 어획하였으나, 최근에는 일본과 거의 동일한 비율로 어획하고 있다 (Fig. 1(b)). 그 외, 대만, 인도네시아, 한국 및 뉴질랜드가 1980년대 중반에서부터 어획을 시작한 이래 10%~30%의 비율로 남방참다랑어를 어획하고 있다. 한국의 경우 1991년에 인도양과 태평양에서 연승어업으로 조업을 시작한 후 1997년에 680톤으로 최고로 어획하였다. 어업별로는 전체적으로 연승이 1970년대 초반까지 70%이상의 어획률을 나타냈고, 1970년대부터 1980년대 후반까지는 호주의 표층어업이 확장되어 1982년에는 표층어업에서 남방참다랑어의 50%가 어획되었다 (Fig. 1(c)).

2. 다랑어류 자원평가 방법

2.1 생산량모델

ASPIC (A stock-Production Model Incorporating Covariates) 모델은 ICCAT의 대서양 눈다랑어의 자원평가 방법으로, 어획량 및 노력량 자료를 사용하는 Schaefer의 잉여생산량모델을 기반으로 하는 모델이다 (Table 3). ASPIC 모델은 Fortran 프로그램을 사용하며, 기본 입력 자료는 CPUE, 내적증가율 (r), 최대지속적생산량 (MSY), 어획능력 (q)이 사용된다.

PRODFIT 모델은 ICCAT의 대서양 눈다랑어 및 황다랑어의 자원평가 방법으로 최소자승법과 평형상태에 대한 Pella and Tomlison의 생산량 모델을 기반으로 하는 모델이다. 기본 입력 자료는 시간별 어획량 및 노력량 자료가 사용된다 (Table 3).

Bayesian Surplus Production (BSP) 모델은 ICCAT의 대서양 눈다랑어의 자원평가 방법으로 CPUE 자료를 사용하여 Schaefer model 또는 Fletcher/Schaefer 모델을 기반으로 하는 모델이다. 기본 입력 자료는 어획량, CPUE, 성장계수 (K), 어획능력 (q) 및 내적증가율 (r) 등이 사용된다 (Table 3).

Delay-Different 모델은 ICCAT의 대서양 눈다랑어의 자원평가 방법으로 연령-구조 모델과 자원량 모델 사이의 값들이 고려되어 진다 (Table 3).

PROCEAN (PROduction Catch/Effort Analysis) 모델은 인도양에 서식하는 다랑어 (YFT, BET, SKJ, ALB) 자원평가 방법으로 각 어업에 대한 어획률 및 계군에 대한 환경수용력에 대한 관측오차와 추정오차를 포함하는 다종어업의 비평형 Pella and Tomlison 모델이다. 이 방법 역시, 베이지안 접근법

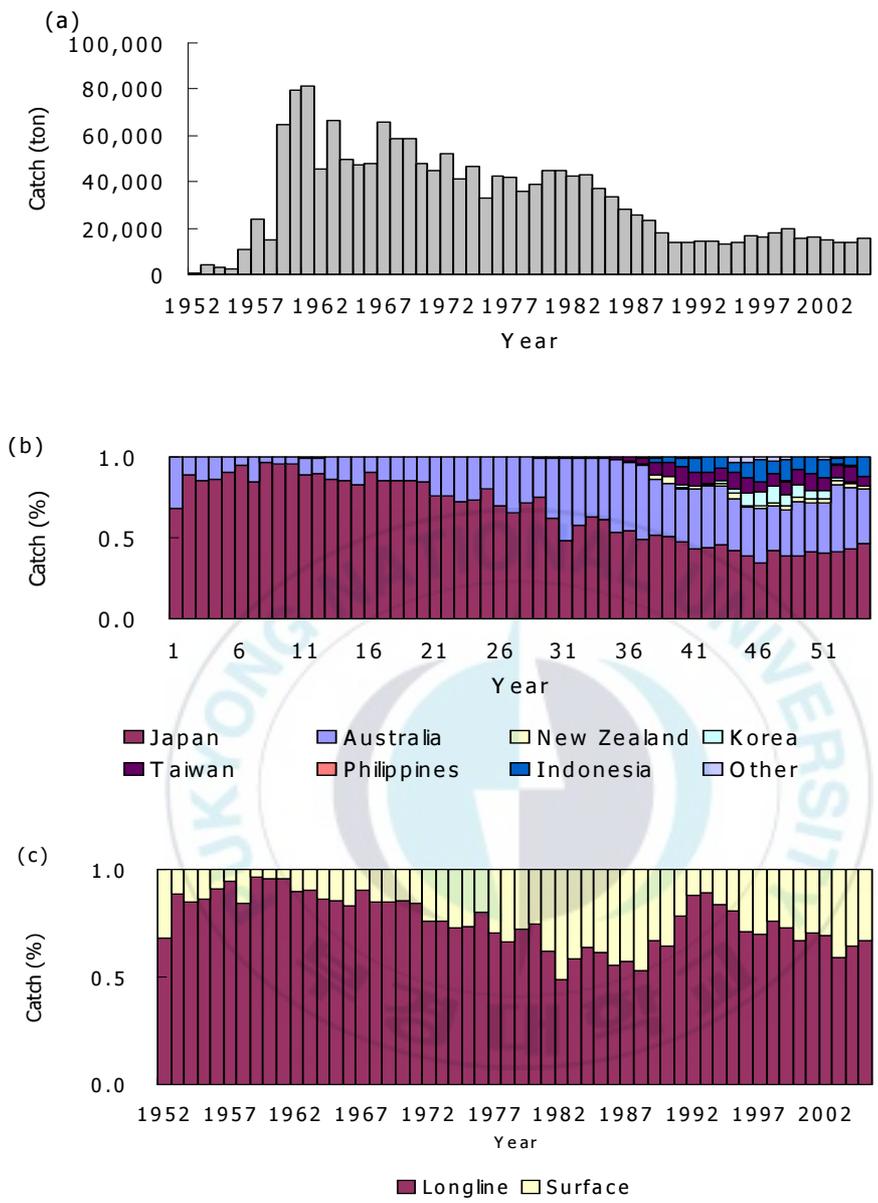


Fig. 1. Variations in annual catch of southern bluefin tuna, (a) by year, (b) by countries and (c) by fishing gears in the world oceans (CCSBT, 2005).

을 사용하여 초기자원량 및 성장률 (r), 환경수용력 (K), F_{MSY} 등에 대한 사전·사후 분포를 계산한다 (Table 3).

2.2 연령구조모델

연령구조모델은 현재 많은 자원평가에 있어서 선택하는 방법 중의 하나이다. VPA와 같이 단순한 결정론적 방법을 채택하는 모델에서 다양한 자료 및 평가과정의 통계적 모델로 변화하고 있다 (McAllister and Ianelli, 1997). 통계적 연령구조모델은 파라미터를 추정하는데 있어서 신뢰구간을 추정하는 보다 진보적인 결정론적 모델들이다. 이것은 위험도분석 (Risk Analysis)을 통한 관리 방안을 작성하는데 있어서 자원평가의 불확실성을 허용한다. 현재 연령구조모델에서 사용되고 있는 베이지안 접근법은 계군 통합분석에 있어서 가장 효과적인 구조를 가지고 있으며, 결과에 대한 불확실성의 범위를 충분히 설명할 수 있는 방법이다 (McAllister and Ianelli, 1997, Punt and Hilborn, 1997). 통계적 연령구조 모델의 두 번째 이점은 실제 상태에 따른 모델의 가설과 비교하는 목적 함수를 제공하는 것이다 (Fournier et al., 1998).

결정론적이고 통계적인 연령구조 모델은 연령별 어획량 자료에 의해 결정된다. 연령별 어획량은 각 어류 개체의 다양한 생물학적 부분에서 연간 분석으로 얻을 수 있다. 일반적으로, 연령별 구성성분들은 연령구조 분석법에 따른 연령별 체장관계를 사용하여 체장빈도 표본으로 얻어진다. 이런 순차적인 접근법의 형태에서, 연령별 체장의 변동은 종종 무시된다. 연령구조 모델의

Table 3. Tuna stock assessment methods using production model

Category	Model	Species	Committee (Area)	Input data	Features
Production model	ASPIC	Bigeye	ICCAT (Atlantic)	CPUE, r, MSY, q	Schaefer surplus production model Fits a several forms of surplus-production model to catch and relative abundance (or effort) data. Include the logistic (Schaefer), exponential-yield (Fox), and generalized (Pella-Tomlinson in parameterization of Fletcher) models.
	RPODFIT	Bigeye Yellowfin	ICCAT (Atlantic)	Catch, Effort	Fits the generalized stock production model of Pella and Tomlinson by least-squares and equilibrium approximation

Table 3. Continued

Category	Model	Species	Committee (Area)	Input data	Features
Production model	BSP	Bigeye	ICCAT (Atlantic)	CPUE, K, r, q	Fits either a Schaefer or a generalized surplus production model to CPUE data assuming observation error only
	Delay-Difference	Bigeye	ICCAT (Atlantic)	Catch, Effort	Considered intermediate between an age-structured production model and a biomass aggregated production model
	PROCEAN	Bigeye Yellowfin Skipjack	IOTC (Indian)	Catch, Effort, Catch-at-age, Growth parameters, Length age key	Non-equilibrium Pella and Tomlinson production model

파라미터들과 체장빈도 자료로부터 추정되는 연령별 구성성분들이 오히려 나은 방법이다. 이러한 방법에서, 파라미터들은 연령별 어획량으로 추정되는 것보다 체장 자료로 추정하는 것이 오히려 조정하기가 더 쉽다 (Fournier et al., 1998).

A-SCALA (Age-structured Statistical Catch-at-Length Analysis) 모델은 IATTC의 동부태평양에 서식하는 눈다랑어, 황다랑어 및 가다랑어의 자원평가 방법으로 MULTIFAN-CL 모델을 기반으로 한다 (Table 4). 기본 입력 자료는 어획량 (중량, 미수), 노력량 및 체장-조성 자료가 사용되며, 쿼터별로 나뉘어 분석된다. 잉여생산량 모델 (Schaefer, Pella and Tomlinson)과 연령-구조 모델을 사용한다. A-SCALA 모델은 AD model builder를 사용한 프로그램이며, 어획량, 체장-조성 자료 등의 적합성으로 결과의 신뢰성을 알 수 있으며, 추정 되는 결과로는 자원량, 가입량, 선택성, 어획률, 성장곡선, 평균 최대지속적생산량 (AMSY), 예측 자원량 등으로 나타난다. MULTIFAN-CL 모델과는 다르게 모든 어업에 체장-조성 자료가 없어도 되며, 부재시 모델에서 추정가능 하며, 폐기량 및 환경적 요소 (SST)등도 고려되어 진다. 그러나 MULTIFAN-CL 모델처럼 회유성이 큰 다랑어에 대한 공간적인 구조 개념이 없으며, 표지-재포 자료도 사용되지 않아 같은 자료를 사용하여 A-SCALA 모델과 MULTIFAN-CL 모델을 동시에 분석 하였을 때, 결과는 차이가 난다. 하지만, 이 차이점에 대해서는 아직 IATTC에서도 구체적으로 토론한 결과가 없다.

VPA 모델은 ICCAT에서 대서양에 서식하는 모든 다랑어 (ALB, BET,

YFT, BFT, SKJ)의 자원평가 방법으로, 어획량, 노력량, 풍도 및 표지-재포 자료가 사용되는 연령-구조 모델이다. 이 모델은 Fortran 언어를 사용하며, 다랑어 자원의 풍도나 사망률 추정을 위해 사용된다 (Table 4).

ELBUEY 연령구조 생산량 모델은 ICCAT의 대서양 눈다랑어의 자원평가 방법으로 선택성, 성숙 및 연령별 체중에 관한 자료를 이용하여 어획량 자료를 통한 단일 풍도지수를 조절할 수 있다 (Table 4).

MULTIFAN-CL (Multiple length frequency + FA model (by Fournier and Archibald); MFCL) 모델은 WCPFC의 중서부태평양 해역에 서식하는 다랑어의 자원평가에 사용되는 체장을 기반으로 하는 연령구조 모델이다 (Table 4). 사용되는 자료는 어획량, 노력량, 체장-조성 및 표지-재포 자료가 사용된다. 앞의 다른 위원회에서와 마찬가지로 일반적인 역학 모델로 자원량을 추정하며, 베이지안 접근법으로 매개변수들에 대한 접합성 및 오차를 보정한다. 그러나 다른 모델과는 다르게 회유에 따른 공간적 분포에 대한 가정을 하고 있으며, 이를 위해 표지-재포 자료가 사용된다.

Bayesian 연령구조 생산량 모델은 인도양에 서식하는 다랑어를 대상으로 하는 자원평가 방법이며, 치어와 성어, 두 연령집단으로 나누어 성장에 대한 불확실성을 감소시킨 방법이다. 이 방법에서는 steepness를 0.9로 두었으며, 단지 초기가입량만을 추정할 수 있다 (Table 4).

ASPM (Age-Structured Production Model) 모델은 인도양의 다랑어 자원평가 방법으로 사용되며, 연승 CPUE와 관련된 어획능력계수를 시간에 따라 일정하다고 가정을 한다. 그러나 이 방법에서는 steepness를 0.99로 두어 현

Table 4. Tuna stock assessment methods using age-structured model

Category	Model	Species	Committee (Area)	Input data	Features
Age-structured model	A-SCALA	Bigeye Yellowfin Skipjack	IATTC (East Pacific)	Catch, Effort, Length- frequency environmental factors Discards	Based on the MULTIFAN-CL, Including the environmental factor
	VPA	Bigeye Yellowfin Skipjack Bluefin Albacore	IATTC (East Pacific)	Catch, Effort	Assesses the abundance and mortality of animal populations by fitting age- structured population equations to catch, effort, abundance and tag- recapture data Can set any parameter constant, rather than estimating it Can apply constraints to any parameter Accommodates Bayesian priors

Table 4. Continued

Category	Model	Species	Committee (Area)	Input data	Features
Age-structured model	ELBUEY	Bigeye	IATTC (East Pacific)	Catch, Effort, Selectivity, Weight-at-age	Fit a single abundance index to catch data using information on selectivity, maturity and weight-at-age
	MULTIFAN-CL	Bigeye Yellowfin Skipjack Albacore	WCPFC (Western and Central Pacific)	Catch, Effort, Length-frequency, Tagging	MULTIFAN model, FA model to estimate the parameters including the migration factor
	ASPM	Bigeye Yellowfin Skipjack	IOTC (Indian)	Catch, Effort	Assumes that the catchability coefficients relating the longline fleet CPUEs to abundance are constant over time

Table 4. Continued.

Category	Model	Species	Committee (Area)	Input data	Features
Age-structured model	CATAGE	Bigeye Yellowfin Skipjack	IOTC (Indian)	Catch, Effort	The process error model for catchabilities combines a random walk that allows for slow trends in fishing power and a robust error that allows for high frequency random variability in annual catchabilities
	Bayesian age-structured production model	Bigeye Yellowfin Skipjack	IOTC (Indian)	Catch, Effort	Separate two age groups, juveniles and adults, to avoid the problems introduced by the uncertainty in growth
	OM	Southern Bluefin	CCSBT (Indian and South Atlantic)	Catch, Effort, Catch-at-age, Catch-at-length, Tagging	Fit the every parameters for only southern bluefin tuna

재 사용되고 있는 어획자료에 대해 비현실적으로 추정된다 (Table 4).

CATAGE (Catch-at-length model) 모델 역시, 인도양의 다랑어 자원평가 방법으로 각각의 어업에 대한 선택성 및 어획률에 대한 관측오차와 추정오차 모두를 포함한 다종어업의 통계적인 연령별 어획량 모델이다. 이 방법은 베이저안 접근법 및 MCMC (Markov Chain Monte Carlo)를 사용하여 파라미터의 오차 및 적합성을 나타낸다 (Table 4).

운영모델 (Operating Model)은 인도양 및 남부대서양 일대에 서식하는 남방참다랑어를 위한 자원평가 방법이다. 남방참다랑어의 자원변동을 시뮬레이션 하기 위한 모델로, MP (Management Procedure)를 테스트하기 위해 사용되며, 연령구조모델이며 AD model builder를 사용한다. 운영모델 (OM)에서 사용되는 자료는 어획량, 노력량, 연령별 어획량, 체장별 어획량, 표지-재포, 연령별 체장 자료가 사용된다. 베이저안 접근법은 grid approach를 사용하여 steepness, M, CPUE, omega, q, sample size에 관한 가정들로 앞으로의 자원량 예측에 대한 시뮬레이션을 한다 (Table 4).

2.3 평가방법의 장단점

각 위원회별로 다양한 평가 방법들을 사용하여 자원평가를 하고 있으나, 추정하는 방법적인 측면에 있어서는 매우 유사한 형태를 가지고 있다. 일반적으로 입력되는 기본자료는 어획량, 노력량 및 체장 조성자료 이며, 추가적으로 표지 자료 및 환경적인 요소들이 사용된다. 대부분의 연령구조 모델이 사용되며, 파라미터들의 불확실성 및 관측자료와 추정되는 자료의 적합성을

위해 베이지안 접근법과 우도함수 또는 MCMC의 기법들을 사용하고 있다. 이러한 방법들은 확률론적인 접근 방법들로, 추정과정에서 발생하는 오차나 불확실성에 대해 현재 다량어 외의 다른 어종에 대한 자원 평가법이나 관리 방안들에서는 거의 사용되고 있지 않은 매우 유용한 방법들이다. 특히, CCSBT에서 사용되고 있는 운영모델 (OM)은 남방참다량어라는 단일 종에 맞추어서 개발된 방법으로써, 사용되는 가정 및 파라미터들이 한 종에 맞게 설정되어 있으며, 다른 방법들과는 달리 불확실성에 대한 여러 가지 경우 (grid approach, robustness test)들을 가정하여 반복적인 실험을 통해 완벽한 관리방안을 얻고자 하는 모델이다.

그러나 WCPFC에서 사용되고 있는 MULTIFAN-CL 모델 외의 다른 평가 방법들은 고도 회유하는 다량어의 생태학적 특성을 살리지 못하는 단점을 가지고 있다. 따라서 대부분의 위원회에서는 MULTIFAN-CL 모델을 이용한 다량어 자원평가 기법에 대해 고려되어 지고 있으며, CCSTB에서도 회유성에 대한 공간적 분포의 개념 도입의 중요성을 강조하고 있다 (ICCAT, 2006).

다량어 위원회는 해역별로 나뉘어져있지만, 여러 개의 산란장을 가지고 있기 때문에 같은 종이라고 해도 단일 계군으로 보기는 어렵다. MULTIFAN-CL 모델에서는 이 종들을 단일계군이라 가정을 하여 자원평가를 하기 때문에 어느 정도의 불확실성을 내포하고 있다. 그러나 남방참다량어의 경우 인도네시아의 자바섬의 남부해역에 하나의 산란장을 가지고 있기 때문에 단일 계군으로 보며, 이 종에 대해 MULTIFAN-CL 모델을 이용한 자원평가는 앞의 가정에 대한 불확실성은 제거되기 때문에 적합하다.

2.4 MULTIFAN-CL 모델

앞서 기술한 바와 같이, 다랑어류 자원평가방법은 일반적인 개체군역학모델 및 연령-구조모델에 의해 추정되며, 파라미터의 불확실성 및 적합성을 위해 베이지안 접근법, 우도함수, MCMC 등의 방법을 사용한다. CCSBT를 제외한 모든 다랑어류 관리위원회에서는 하나 이상의 모델을 사용하여 다랑어류 및 새치류에 대한 자원평가를 수행하고 있어, 대상자원에 대한 자원생태학적 특성치 추정에 있어서는 많은 불확실성을 내포하고 있다. 이에 비해, CCSBT의 운영모델 (OM)은 하나의 대상종인 남방참다랑어의 자원생태학적 특성치를 사용함으로써 불확실성을 줄일 수는 있다. 하지만, 회유성이 강한 남방참다랑어의 생태적 특성을 고려하지 못해 공간적 분포분석이 수행되지 못하는 한계를 가지고 있다.

한편, MULTIFAN-CL 모델은 각 어종에 대한 생태학적 자료 및 파라미터 추정에 필요한 가정들을 설정할 수 있도록 구성되어 있기 때문에 다른 자원평가 방법에 비해 종에 대한 특성치를 잘 나타낼 수 있다. 더욱이 다랑어의 특성상 고려되어야 하는 회유에 대해서 유일하게 공간적 분포의 개념을 포함한 자원평가방법이다.

3. 연구목적

지금까지 남방참다랑어를 대상으로 이루어지고 있는 자원평가는 1994년부터 남방참다랑어보존위원회 (Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna, CCSBT)에서 운영모델 (OM)을 사용하여 행해지고

있으며, 자원평가 결과를 바탕으로 관리절차 (Management Procedure)에 의한 TAC의 쿼터량 산정으로 지난 10년간 관리되고 있다. 그럼에도 불구하고, 산란자원량 수준은 여전히 낮은 상태이며, 현재의 어획수준으로는 2020년까지 1980년의 산란자원량으로 회복시키겠다는 CCSBT의 관리목표가 달성되기 어려운 상태이다 (CCSBT, 2000). 이러한 문제점이 발생하게 된 원인들은 (1) 다양한 어업으로 어획되는 남방참다랑어 어업의 특성에도 불구하고, 일본 연승어업 자료만을 사용하기 때문에 도출되는 결과들은 불확실성을 내포하고 있다. (2) CCSBT내에서도 문제시 되고 있는 회유에 대한 공간적인 개념을 포함시키지 않아 파라미터 추정에 대한 불확실성을 더 높이고 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 현재 남방참다랑어를 대상으로 어획하고 있는 5개 어업의 어획상황 자료를 사용하고, 회유에 대한 공간적인 개념을 포함시켜 최근 다랑어류 자원평가에 널리 사용되고 있는 MULTIFAN-CL (Hampton and Fournier, 2001) 모델에 적용하여 보다 객관적이고 과학적인 남방참다랑어의 자원상태를 평가하고자 한다.

하지만, 본 논문에서는 남방참다랑어를 대상으로 TAC 쿼터량 배분을 위하여 조업국에서 개발된 관리절차 (MP)들은 자국의 상황에 맞추어 개발되고 추정되는 결과들 또한 자국의 이익을 우선시하기 때문에 다루지 않기로 하였다.

자료 및 방법

1. 자료의 재구성

MULTIFAN-CL 모델은 기본적으로 시간과 계군 회유에 따른 해역별 어업자료로 구성 되어 있는데 어획미수, 노력량, 체장빈도 및 표지방류 자료가 모델의 입력자료로 사용된다.

1.1 해역의 정의

CCSBT의 해역구분을 기본으로 하여 세 개의 해역으로 나누었다 (Fig. 2). 해역 1은 위도 10~20°S, 경도 100~130°E에 해당하는 인도네시아 자바섬의 남부 해역에 위치하는 곳으로서 남방참다랑어의 유일한 산란장으로 알려져 있는 곳이다 (CCSBT, 2005). 해역 2는 위도 30~34°S, 경도 120~140°E를 포함하는 해역으로 호주의 표층어업 어장이다. 해역 3은 위도 20°S이하의 남부 대서양, 남부 인도양 및 남부 태평양 해역으로 대부분의 연승어업이 일어나는 해역이다 (Fournier *et al.*, 1990).

1.2 시간의 정의

본 연구에 사용된 자료는 1965년부터 2004년까지 해역별 어업자료인 어획량과 노력량, 체장빈도자료 및 표지자료이며, 분기별로 나누어서 사용하였다 (1~3, 4~6, 7~9, 10~12월).

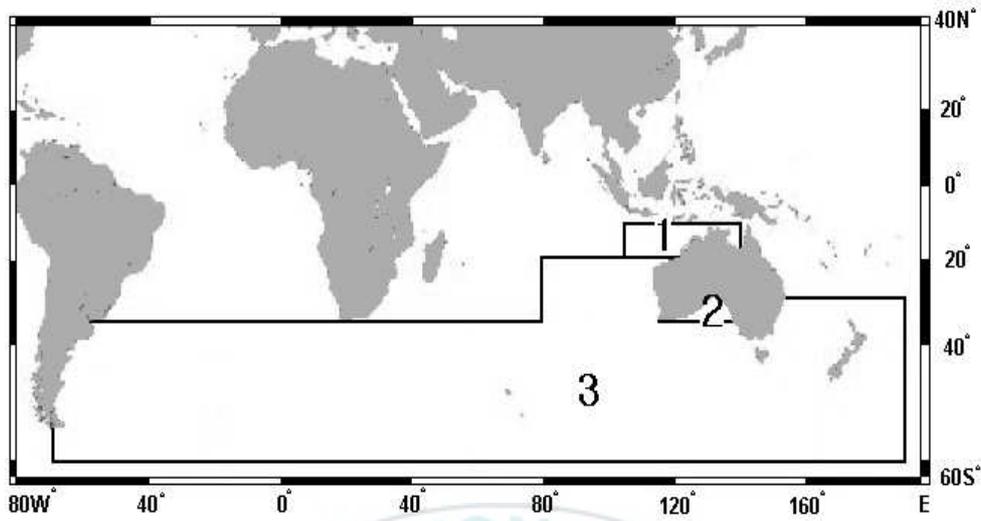


Fig. 2. Definition of regions for southern bluefin tuna in this study (modified from Butterworth *et al.*, 2003).



1.3 어업의 정의

MULTIFAN-CL 모델에서는 비슷한 선택성과 어획능률을 갖는 어업 단위로 정의해야하므로 (Hampton, 2002), 본 연구에서는 어구의 형태, 어법 그리고 해역에 의해 구분하였다. 남방참다랑어의 한국, 일본, 호주, 뉴질랜드, 대만의 연승어업 및 호주의 표층어업에 의해 어획이 되므로 해역 및 어업에 따라 크게 5가지로 분류하였다 (Table 5).

1.4 어획량과 노력량 자료

어획량 및 노력량 자료는 CCSBT 웹사이트로부터 획득하였으며 (<http://www.ccsbt.org>, 이하 CCSBT web-site), 이 자료는 Table 5에서 정의된 어업을 분기별로 나누어 사용하였다. ID어업을 제외한 모든 연승어업의 어획량은 어획미수를 사용하였으며, ID어업과 AUS어업에서는 어획중량 (kg)을 사용하였다. 노력량은 ID어업을 제외한 모든 연승어업에서 낚시바늘당 어획미수 (inds./hook)를 단위로 사용하였으며, AUS어업에서는 조업일수당 어획량 (kg/day)를 단위로 사용하였다. ID어업의 경우, 노력량의 자료가 제공되지 않기 때문에, 모델에서 추정되었다. 연승어업의 CPUE의 경우, GLM (Generalized Linear Model)을 사용하여, 각국의 CPUE에 대해서 표준화하였다 (Fig. 3).

1.5 체장빈도자료

체장빈도자료는 해역별 어업에서 채집된 개체의 자료 (CCSBT web-site)를

Table 5. Definition of fishery types exploiting southern bluefin tuna

No.	Fishery type	Nationality	Gear	Region
1	LL1	AU ¹ , JP ² , TW ³	Longline	1
2	ID	ID ⁴	Longline	1
3	AUS	AU	Surface	2
4	LL2	AU, JP, KR ⁵ , NZ ⁶ , TW	Longline	2
5	LL3	AU, JP, KR, NZ, TW	Longline	3

1 Au : Australia
 2 JP : Japan
 3 TW : Taiwan

4 ID : Indonesia
 5 KR : Korea
 6 NZ : New Zealand



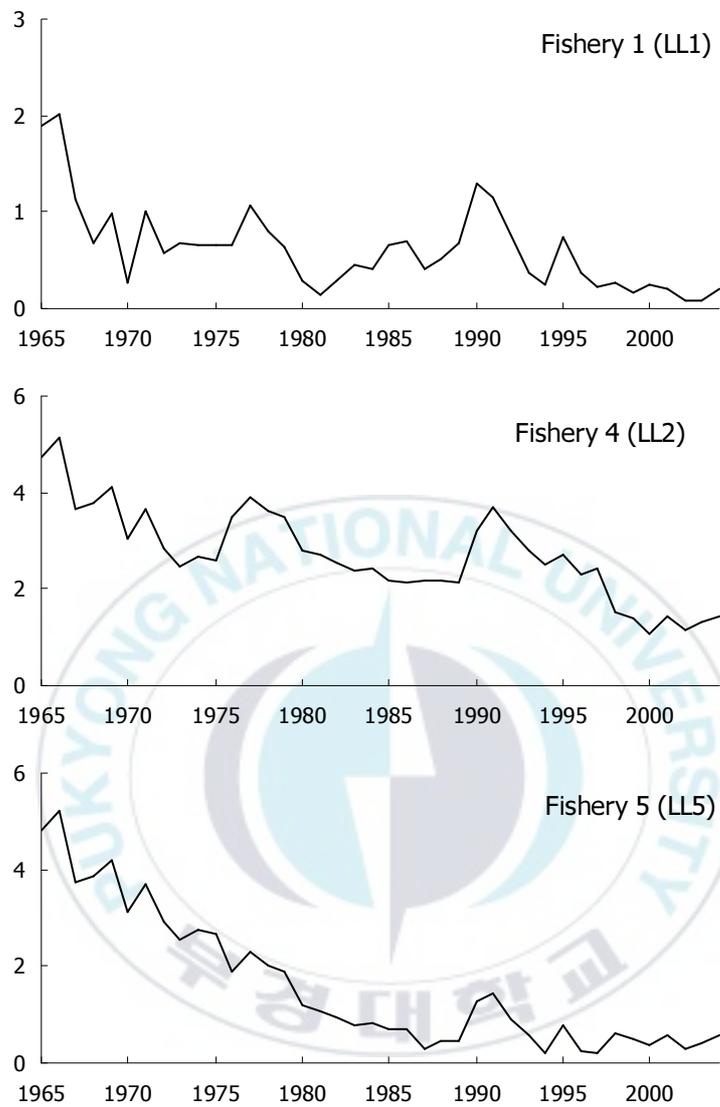


Fig. 3. Standardized CPUE for longline fishery of southern bluefin tuna.

사용하여 2cm의 단위로 30~31cm부터 272~273cm까지의 체장범위 자료를 사용하였다.

1.6 표지 자료

본 연구에서 사용된 표지재포자료 (CCSBT web-site)는 1990년 방류 후 2004년까지 재포된 14,000마리의 자료를 바탕으로 방류와 재포시의 체장을 분기별로 묶어서 사용하였다.

1.7 순간자연사망계수

현재 CCSBT에서는 남방참다랑어의 자원평가에 있어서 성숙연령 10세 이후의 순간자연사망계수는 0.14/년으로 사용되고 있으며, 이 값은 1991년부터 1996년까지 표지 재포된 6천 마리에 대한 생존율의 값으로 추정되었다 (Polacheck *et al.*, 1998). 따라서 본 연구에서는 남방참다랑어의 순간자연사망계수 값을 다시 구해보고자, Zhang and Megrey (2006) 방법에 의해 추정하였다.

Zhang and Megrey 방법에 의한 순간자연사망계수는 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$M = \frac{\beta K}{e^{K(t_{mb} - t_0)} - 1} \text{-----(1)}$$

식(1)에서, $t_{mb} = C_i \times t_{max}$ 이고 C_i 는 계수, t_{max} 는 관측된 최대 연령, K 는 von Bertalanffy 성장계수, β 는 체장-체중 관계식으로부터 추정되었다.

Zhang and Megrey 방법은 기존의 Alverson and Carney (1975) 방법을 개선한 방법으로, Alverson and Carney 방법에서는 60개의 종을 대상으로 추정된 상수값 0.38/년을 모든 종에 적용하였으나, Zhang and Megrey 방법은 적용범위를 부어류와 저어류로 나누어 각각 0.302와 0.440값을 적용하였다. 이 상수값은 최대연령과 자원량이 최대인 연령 (t_{mb})의 상대비 (t_{mb}/t_{max})를 나타내며, 31종의 부어류와 60종의 저어류 등 총 91종의 생활사 특성치를 사용하여 구한 값이다. 체장-체중과의 관계를 통해 적용되어지는 β 값을 사용함으로써 각각의 종의 특징을 더 명확히 적용하였다.

Zhang and Megrey 방법으로 추정된 남방참다랑어의 순간자연사망계수는 1 세일 때 0.5/년, 10세 이후에서는 0.103/년으로 추정되었으며, 2~9세 사이의 순간자연사망계수는 식(2)에 의해 계산되었다 (Fig. 4).

$$M_a = \begin{cases} M_1 = 0.5 \\ M_{2-9} = M_1 + (M_{10} - M_1) \frac{a^{0.7}}{10^{0.7}} \\ M_{10} = 0.103 \end{cases} \text{-----(2)}$$

여기서, M_1 과 M_{10} 은 각각 1세와 10세의 순간자연사망계수다.

Zhang and Megrey 방법에서 순간자연사망계수의 분산은 식(3)부터 식(6)까지를 사용해서 계산되었다.

$$var(M) = \left(\frac{\partial M}{\partial \beta}\right)^2 \cdot var(\beta) + \left(\frac{\partial M}{\partial K}\right)^2 \cdot var(K) + \left(\frac{\partial M}{\partial t_0}\right)^2 \cdot var(t_0) \quad \text{---(3)}$$

$$\frac{\partial M}{\partial \beta} = \frac{K}{e^{K(t_{mb}-t_0)} - 1} \quad \text{-----(4)}$$

$$\frac{\partial M}{\partial K} = \frac{\beta [e^{K(t_{mb}-t_0)} - K t_{mb} e^{K(t_{mb}-t_0)} + K t_0 e^{K(t_{mb}-t_0)} - 1]}{[e^{K(t_{mb}-t_0)} - 1]^2} \quad \text{-----(5)}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t_0} = \frac{\beta K^2 e^{K(t_{mb}-t_0)}}{[e^{K(t_{mb}-t_0)} - 1]^2} \quad \text{-----(6)}$$

추정된 순간자연사망계수의 분산은 0.0014였으며, 상위 95% 신뢰구간에서의 순간자연사망계수는 0.117/년, 하위 95% 신뢰구간에서는 0.089/년으로 계산되었다 (Table 6).

2. 개체군 역학모델

2.1 연령구조 모델

해역별 표지되지 않은 개체의 역학 모델은 식(7)과 같다.

$$N'_{atr} = \begin{cases} \bar{R} \log(\varphi_t) \alpha_r \gamma_{tr} & ; a=1; 1 \leq t \leq T \\ N'_{a,1,r} & ; 1 < a < A; t=1 \\ N_{a-1,t-1,r} e^{-Z_{a-1,t-1,r}} & ; 1 < a < A; 1 < t \leq T \\ N_{a-1,t-1,r} e^{-Z_{a-1,t-1,r}} + N_{a,t-1,r} e^{-Z_{a,t-1,r}} & ; a=A; 1 < t \leq T \end{cases} \quad \text{-----}(7)$$

여기서, N'_{atr} 은 회유가 일어나기 전의 해역 r 에서 시간 t 를 시작점으로 하는 a 세의 개체수, N_{atr} 은 회유가 일어난 후의 해역 r 에서 시간 t 를 시작점으로 하는 a 세의 개체수이며, \bar{R} 은 공간적으로 집합된 가입의 시간적 평균을 나타낸다. ϕ_t 는 $\sum_r \phi = 0$ 으로 일정할 때, 평균 가입 \bar{R} 부터의 공간적으로 집합된 시간 t 에서 승범편차 e^{ϕ} 를 결정하는 계수이다. γ_{tr} 은 해역 r 에서 시간 t 일 때 추가적인 가입 편차를 나타내며, A 는 연령 계급의 전체 개수, T 는 기간의 전체 개수를 나타낸다. Z_{atr} 은 해역 r 에서 시간 t 의 a 세의 순간사망계수, F_{atr} 은 해역 r 에서 시간 t 의 a 세의 순간어획전사망계수, f_r 은 해역 r 에서 발생하는 어업의 어업지수, M_a 는 연령 a 에서의 순간자연사망계수를 나타낸다.

2.2 회유

회유는 각 시간에 따른 시작점에서 순간적으로 발생함을 가정한다. 각 해역 $r=1, \dots, R$ 에서 N'_{atr} 와 N_{atr} 의 요소를 가진 N'_{ar} 와 N_{ar} 을 개체들이 이동하기 시작 전과 후로 둔다. v_a^{rs} 을 a 세에서 해역 r 에서 s 로 회유하

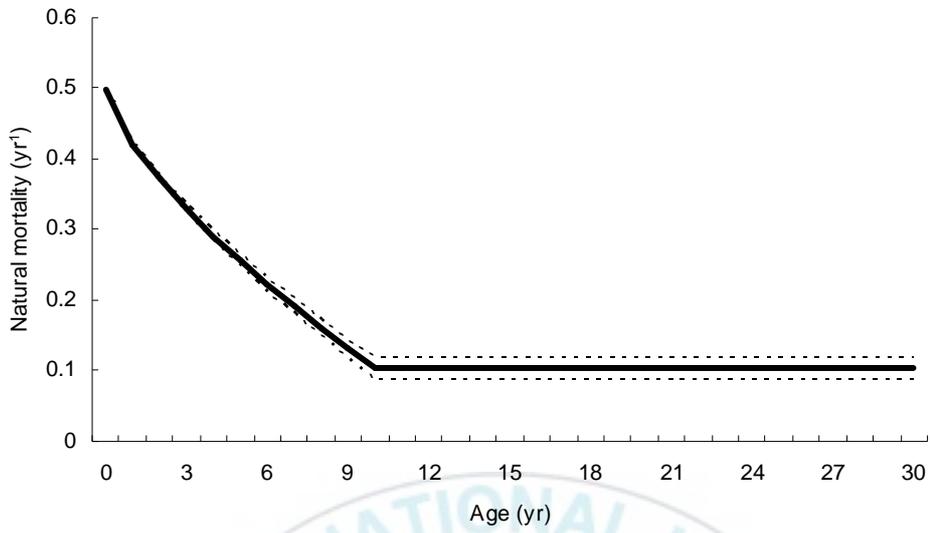


Fig. 4. Natural mortality (yr⁻¹) of southern bluefin tuna.

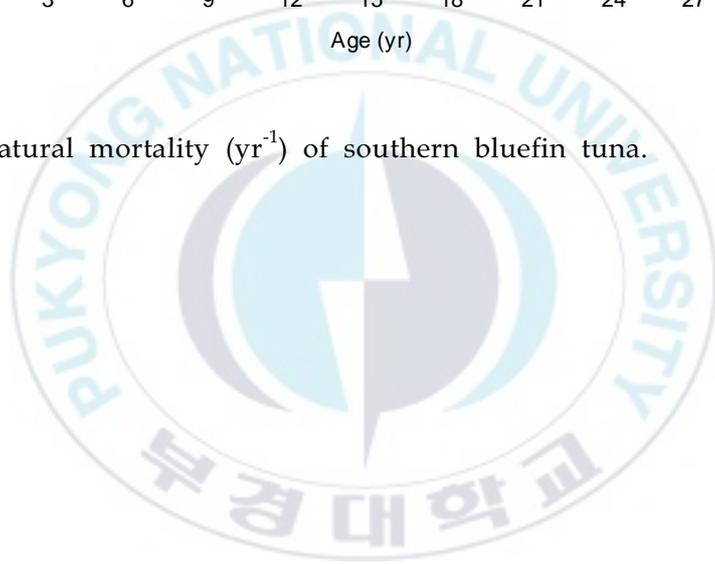


Table 6. Estimated natural mortality by Zhang and Megrey's method

Natural mortality (yr ⁻¹)	Variance	95% confidence interval
0.103/yr	0.0014	(0.1172/yr, 0.0886/yr)



는 회유계수라고 정의하면, 회유 후의 풍도는 식(8)과 같이 추정된다.

$$N_{atr} = N'_{atr} - \left(\sum_{s \neq r} v_a^{rs} \right) N_{atr} + \sum_{s \neq r} v_a^{sr} N_{ats} \quad \text{-----}(8)$$

또는 행렬형식으로 식(9)와 같다.

$$B_a N_{at} = N'_{at} \quad \text{-----}(9)$$

여기서, B_a 는 식(10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$B_a = \begin{bmatrix} 1 + \sum_{j \neq 1} v_a^{j1} & \cdot & \cdot & \cdot & -v_a^{R1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -v_a^{1i} & \cdot & 1 + \sum_{j \neq i} v_a^{ji} & \cdot & -v_a^{Ri} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -v_a^{1R} & \cdot & \cdot & \cdot & 1 + \sum_{j \neq R} v_a^{jR} \end{bmatrix} \quad \text{-----}(10)$$

따라서 회유에 따른 변화는 식(11)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_{at} = B_a^{-1} N'_{at} \quad \text{-----}(11)$$

회유율이 클 경우에도 충분히 안정적으로 반영할 수 있도록 만들어 졌다. 또한, 공간적으로 접하지 않아 v_a^{rs} 과 v_a^{sr} 이 0으로 두었을 때도, 시간에 의해 조금의 회유를 가정하고 있다.

연령별 회유계수는 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_a^{rs} = \phi_0^{rs} \exp(\phi_1^{rs} (\kappa_a)^{\phi_2^{rs}}) \text{ -----(12)}$$

여기서, $\kappa_a = (2a - A - 1) / (A - 1)$ 으로 나타내어지며, 이 값은 -1과 +1사이에 존재한다. ϕ_0^{rs} 는 0세일 때 해역 r 에서 s 로 회유하는 변수이며, 회유는 ϕ_0^{sr} 의 값의 증감에 따라 변동하며, 연령의 증가로 인해 ϕ_0^{rs} 등의 값들이 추가된다.

2.3 체장 (L)-체중 (W) 관계

체장-체중 관계식을 추정하기 위하여, 남방참다랑어의 12,158개체의 체장 및 체중자료 (CCSBT web-site)를 사용하였다. 적절한 상대성장 모델식의 매개변수를 추정하기 위해서는 사용된 자료의 오차구조 (error structure)를 확인하는 것이 이상적이다. 오차구조는 함수의 독립변수에 대해 오차의 크기가 일정한 합적 오차구조 (additive error structure)와 함수의 독립변수에 따라 오차가 증가하는 곱적 오차구조 (multiplicative error structure)로 나눌 수 있다 (Quinn and Deriso, 1999). 합적 오차구조와 곱적 오차구조사이에서의

일반식은 식(13)과 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W = aL^\beta + \varepsilon_i \text{ -----(13)}$$

$$W = aL^\beta \cdot \varepsilon_i \text{ -----(14)}$$

여기서, ε_i 는 평균은 0이고, 분산은 σ^2 인 임의오차항이다. 오차구조의 설정은 전체 표본을 체장과 체중에 대한 그래프로 나타냄으로써 확인 할 수 있다. 매개변수 a, β 의 추정은 합의 오차구조일 때는 비선형 최소자승법 (nonlinear least squares)을 사용하고, 곱의 오차구조일 때는 선형 최소자승법 (linear least squares)을 사용한다. 즉, 곱의 오차구조를 가지는 식(14)에 대수를 취해서 아래의 식(15)으로 변환한 후 직선회귀하여 파라미터를 추정한다.

$$\ln W_i = \ln a + \beta \ln L_i + \varepsilon_i \text{ -----(15)}$$

2.4 성장식

본 연구에서는 동물의 성장을 나타내는데 일반적으로 사용하는 von Bertalanffy 성장모델을 선택하여 모델의 파라미터를 추정하였다. 여기서 von Bertalanffy 성장 파라미터를 추정하는 데는 연령별 체장 자료 (CCSBT web-site)를 이용하여, 일반식은 다음의 식(16)과 같다.

$$l_{t_i} = L_{\infty} (1 - e^{-K(t_i - t_0)}) \quad \text{-----}(16)$$

여기서, l_{t_i} 는 i 개체의 연령 t_i 시의 체장, t_i 는 i 개체의 연령, L_{∞} 는 이론적 최대체장, K 는 성장계수, t_0 는 체장이 0일 때의 이론적 연령이다.

2.5 선택성

어업별, 연령별 선택성 s_{af} 는 연령에 따라 감소하지 않을 수도 있으며, 주어진 연급군에서 연령을 연령에 따라 일정하게 할 수도 있다. s_{af} 는 직접 추정이 가능하기도 하며, 다음과 같이 선택성 s'_f 의 체장별 벡터 N^z 의 함수와 같이 매개변수화하여 식(17)와 같이 추정 될 수 있다.

$$x(l) = \frac{l - (\mu_1 - \sigma_1)}{(\mu_A + \sigma_A) - (\mu_1 - \sigma_1)} \quad \text{-----}(17)$$

여기서, μ_a 는 a 세의 평균 체장이며, σ_a 는 a 세의 체장에 대한 표준편차를 나타낸다. $x(l)$ 은 가장 어린 연급군의 평균체장과 표준편차의 차 $(\mu_1 - \sigma_1)$ 에서 최고 연급군의 평균체장과 표준편차의 합 $(\mu_A + \sigma_A)$ 까지의 구간에 따른 체장 l 의 상대적 거리이다. 이 구간 함수는 식(18)와 같다.

$$l(x) = x(\mu_A + \sigma_A) + (1 - x)(\mu_1 - \sigma_1) \quad \text{-----}(18)$$

따라서 연령별 선택성은 식(19)과 같다.

$$s_{af} = \int N(\mu_a, \sigma_a) I(x) S(s'_f, x) dx \quad \text{-----}(19)$$

여기서, $N(\mu, \sigma, \lambda)$ 은 표준편차 σ , 평균 μ 인 체장 λ 에 대한 정규밀도함수이다. $S(s'_f, x)$ 는 구간 $[0 - 1]$ 사이의 함수 x 에 대한 선택성이다. S 는 매개변수 s'_f 에 의해 정의되며, 구간 $[(\mu_1 - \sigma_1) - (\mu_A + \sigma_A)]$ 에 따라 동일한 구간으로 $\lambda^2 - 1$ 에 대한 선택성은 이들 파라미터사이의 보간법으로 재정의된다. 이 보간법은 s'_f 를 고려하여 목적함수로서 구별됨을 가정하며, 구간 $x(-2\sigma_a)$ 과 $x(+2\sigma_a)$ 사이의 불연속적인 중앙값으로 나타낸다.

2.6 어획능률

시간에 따른 어획능률은 식(20)과 같이 추정된다.

$$q_{t+\delta, f} = q_{t, f} e^{n_f} \quad \text{-----}(20)$$

여기서, e^{n_f} 는 정규구간 δ 에서 발생하는 것으로 가정된 어획능률의 누적 변화율을 나타낸다. 연간 어획능률은 두 개의 파라미터의 사인곡선의 형태를 가지고 계절적으로 변동하거나, 임의적으로 증가하는 형태를 나타낸다. 식 (21)에서 $q'_{t, f}$ 는 계절적으로 조정하기 전의 어획능률이며, v_t 는 시간 t 에서의

연간 분기별 적분상수이며, c_f^1 은 어업별 크기 파라미터, c_f^2 는 어업별 상태 파라미터, c_f^3 는 연간 발생하는 공간적 구간에서의 12계절적 형태편차를 나타내고 있다.

$$q_{t f} = \begin{cases} q_{t f}^i \exp\left(c_f^1 \sin\left[2\pi\left(\frac{v_t}{4} - c_f^2\right)\right]\right) \\ q_{t f}^i c_f^3 \end{cases} \quad \text{-----(21)}$$

2.7 순간어획사망계수

어업 f 에 의한 시간 t 에서 a 세의 어획개체수는 식(22)와 같이 추정된다.

$$C_{at f} = \frac{F_{at f}}{Z_{atr f}} [1 - e^{-Z_{atr f}}] N_{atr f} \quad \text{-----(22)}$$

여기서, r_f 는 어업 f 가 발생한 해역을 나타내며, 순간어획사망계수는 식(23)과 같이 추정된다.

$$F_{at f} = s_{af} q_{t f} B_{r f}^{\beta} E_{t f}^{\zeta} e^{\varepsilon_{t f}} \quad \text{-----(23)}$$

여기서, s_{af} 는 a 세의 어업 f 의 선택계수, $q_{t f}$ 는 시간 t 에서 어업 f 의 어획능력계수, B 는 시간 t 에서 해역 r 의 자원량지수를 나타낸다. β 는 어획능력

에 대한 자원량의 변동에 관한 파라미터이며, E_{jt} 는 시간 t 에서 어업 j 의 어획노력량, ζ 은 어획능률에 대한 노력량의 파라미터, ε_{jt} 는 노력량에서의 오차를 나타낸다.

2.8 표지-재포 역학모델

표지된 개체에 대한 역학모델은 표지되지 않은 개체에 대한 역학모델과 유사하며, 파라미터들의 추정은 이 두 가지 모델의 대부분을 공유한다. 표지에 의해 재조정될 수 있는 것은 표지는 연급군지수 c 에 의한 해역 r_c^{rel} , 시간간격 t_c^{rel} 에서 방류된 연급군 a_c^{rel} 의 표지된 개체의 방류 연급군을 그룹화 되었으며, 가입은 표지-방류에 의해 나타내어진다. 연급군들은 표지된 개체가 연급군 지수 c^* 에 의해 그룹화 되어진 후 a^{pool} 전의 연급군을 통해 나누어진다. 연급군, 시간 및 해역에 의해 표지된 개체수는 식(24)와 같다.

$$N_{ctr}^T = \begin{cases} 0 & ; t < \min(t_c^{rel}) \\ N_c^{rel} & ; t = t_c^{rel} ; r = r_c^{rel} ; c \neq c^* \\ N_{c,t-1,r}^T e^{-Z_{c,t-1,r}^T} & ; t_c^{rel} < t < t_c^{rel} + a^{pool} - a_c^{rel} ; c \neq c^* \\ N_{c^*,t-1,r}^T e^{-Z_{c^*,t-1,r}^T} + \sum_{b \in gt} N_{b,t-1,r}^T e_{b,t-1,r}^T & ; t < \min(t_c^{rel}) ; c \neq c^* \end{cases} \text{-----}(24)$$

여기서, 시간 t 에서 표지된 연급군을 어획한 연급군 지수로 둔다. 일반적으로

로, 순간어획사망계수는 표지되고 표지되지 않은 개체를 동일하다고 가정한다. 그러나 방류후의 시간동안 표지된 개체가 표지되지 않은 개체와 혼합되지 않는다. 그러므로 방류한 연급군, 연령 시간 및 어업에 의해 표지된 개체의 순간어획사망계수는 식(25)과 같이 추정된다.

$$F_{ctf}^T = \begin{cases} fn_3(R_{ctf}^{Tobs}, X_{tf}) & ; t_c^{rel} \leq t < t_c^{rel} + n^{mix} \\ F_{a(c,t),t,f} & ; t \geq t_c^{rel} + n^{mix} \end{cases} \text{-----}(25)$$

여기서, n^{mix} 는 혼합된 시간의 수이다. 표지된 개체들이 혼합될 때까지 시간동안의 순간어획사망계수는 표지된 개체의 어획은 시간 t 에서 어업 f 에 의한 표지-재포획 X_{tf} 를 보정하는 관측된 표지-재포획 R_{ctf}^{Tobs} 로부터 결정된다고 가정한다.

표지된 개체의 회유는 식(8)과 유사하다. 따라서 표지된 개체의 회유에 관한 추정식은 식(26)과 같다.

$$N_{ctr}^T = N_{ctr}^{T'} - \left(\sum_{s \neq r} v_a^{rs} \right) N_{ctr}^{T'} + \sum_{s \neq r} v_a^{sr} N_{cts}^{T'} \text{-----}(26)$$

2.9 자원량 및 산란자원량 추정

시간에 따른 해역별 자원량 및 산란자원량은 식(27)와 같이 추정된다.

$$B_{tr}^t = \sum_{a=1}^A N_{atr} \omega_a ; B_{tr}^s = \sum_{a=1}^A N_{atr} \omega_a p_a^{mat} \quad \text{-----}(27)$$

여기서, ω_a 는 평균체중이며, p_a^{mat} 는 a 세의 성숙비율이다. 연령별 성숙비율은 입력자료에서 고정되어있으며, 평균체중은 식(28)과 같이 추정된다.

$$\omega_a = \int N(\mu_a, \sigma_a, l) l^b dl \quad \text{-----}(28)$$

여기서, μ_a 는 평균체장, σ_a 는 a 세의 체장의 표준편차이며, $N(\mu, \sigma, l)$ 은 평균 μ 와 표준편차 σ 를 가진 정규분포를 따른다. 이 식은 평균체장 μ_a 를 3.5로 기준하여 0.5의 체장간격으로 나누어진다.

2.10 산란자원량-가입량 관계

전체해역의 산란자원량 $B_t^s = \sum_r B_{tr}^s$ 과 가입연령에 대한 자원량 $R_{t+t_{lag}}$ 은 전체해역에서 시간 t 에서 Beverton and Holt 자원량-가입량 관계를 가정하며, 식(29)와 같이 나타낸다.

$$R_{t+t_{lag}} = \frac{\alpha B_t^s}{\beta + B_t^s} \quad \text{-----}(29)$$

2.11 적정어획사망계수 및 적정어획연령

남방참다랑어의 최대의 가입당생산량을 산출하는 적정어획사망계수 및 적정어획연령은 식(30)의 Beverton and Holt (1957) 모델을 사용하여 추정하였다.

$$\frac{Y}{R} = F \exp[-M(t_c - t_r)] W_\infty \sum_{n=0}^3 \frac{U_n \exp[-nK(t_c - t_0)]}{F + M + nK} \cdot (1 - \exp[-(F + M + nK)(t_m - t_c)]) \quad \text{-----(30)}$$

여기서, $\frac{Y}{R}$ 은 가입당생산량, U는 단위노력당어획량 (CPUE)으로서 $U_0 = 1$, $U_1 = -3$, $U_2 = 2$, $U_3 = -1$ 이며, W_∞ , K , t_0 은 von Bertalanffy 성장식의 계수들이고, M은 순간자연사망계수, t_r 은 어장가입연령, t_c 는 어구가입연령 혹은 어획개시연령이고, t_m 은 최고연령이다. 남방참다랑어 자원을 이 모델에 적용시키기 위해서 사용한 입력자료는 이론적 최대체중 (W_∞)이 105.9kg, 성장계수 (K)는 0.169/년, 체장이 0일 때의 이론적 연령 (t_0)은 -1.45세, 순간자연사망계수 (M)은 0.103/년, 어장가입연령 (t_r)은 0.035세, 최고연령 (t_m)은 30세가 사용되었다. 본 연구에서는 표층어업과 연승어업의 어획개시연령 (t_c)이 다르기 때문에 표층어업과 연승어업에 대해 각각 가입당생산량모델을 적용했다. 표층어업에서 어획개시연령 (t_c)은 1.47세, 연승어업에서의 어획개

시연령 (t_c)은 3.66세가 사용되었다.

$F_{0.1}$ 은 생물학적 기준점에 의한 자원관리에 있어서 자원이 개발 중이거나 회복 중이거나에 관계없이 바람직하다고 판단되어 관리행위의 목표가 될 수 있는 수준의 어업이나 자원의 상태를 가리키는 목표기준점이며, 어획이 없을 때의 가입당생산량 곡선에 대해 기울기의 10%가 되는 기울기에 해당하는 어획사망계수를 의미한다. 적정 $F_{0.1}$ 은 Beverton and Holt (1957) 모델을 순간어획사망계수에 대해 미분하여 식(31)을 구한 후, 그 결과의 10%가 되는 값에 해당하는 순간어획사망계수의 값으로 추정하였다.

$$\begin{aligned} \frac{d(Y/R)}{dF} = & \exp[-M(t_c - t_r)] W_{\infty} \left\{ \frac{1}{M} \cdot [1 - \exp(-M(t_m - t_c))] + \right. \\ & \frac{-3 \exp[-K(t_c - t_0)]}{M+K} \cdot [1 - \exp(-(M+K)(t_m - t_c))] + \\ & \frac{3 \exp[-2K(t_c - t_0)]}{M+2K} \cdot [1 - \exp(-(M+2K)(t_m - t_c))] + \\ & \left. \frac{-\exp[-3K(t_c - t_0)]}{M+3K} \cdot [1 - \exp(-(M+3K)(t_m - t_c))] \right\} \end{aligned} \quad \text{-----(31)}$$

여기서, 식(31)의 계수는 식(30)의 계수와 같다. 식(31)을 사용하여 계산한 기울기의 10%에 해당하는 F값을 찾기 위하여 F값들을 반복 대입하여 $F_{0.1}$ 값을 추정하였다.

가입당산란자원량의 추정은 가입당산란자원량 모델식인 식(32)를 사용하여 주어진 가입연령에 대해서 어획이 전혀 없을 때 ($F=0$)의 산란자원량을 기준으로 그 산란자원량의 40%의 자원량을 유지시킬 수 있는 순간어획사망 계수인 $F_{40\%}$ 를 추정하였다.

$F=0$ 일 때의 가입당산란자원량 (SB/R)은

$$\frac{SB}{R} \Big|_{F=0} = \sum_{t=t_r}^{\Lambda} m_t \cdot e^{-M(t_c-t_r)} \cdot e^{-M(t-t_c)} \cdot W_{\infty}(1 - e^{-K(t-t_0)})^3 \quad \text{-----}(32)$$

이 된다. 여기서, SB 는 산란자원량이며, 식(32)에서 사용된 연령별 성숙비 (m_t)를 제외한 모든 계수들은 식(30)에서 사용한 계수와 같다. 식(32)에서 사용된 연령별 성숙비 (m_t)는 Table 7과 같다.

어떤 특정 F 값 $F=F_1$ 일 때의 가입당산란자원량 (SB/R)은 식(33)과 같이 추정된다.

$$\frac{SB}{R} \Big|_{F=F_1} = \sum_{t=t_r}^{\Lambda} m_t \cdot e^{-M(t_c-t_r)} \cdot e^{-(M+F)(t-t_c)} \cdot W_{\infty}(1 - e^{-K(t-t_0)})^3 \quad \text{-----}(33)$$

2.12 생물학적허용어획량 (ABC)

생물학적허용어획량 (ABC)은 Zhang and Lee (2001)가 제시한 이용 가능

한 정보의 질적 수준에 따라 5단계의 방법으로 추정이 가능하다 (Table 8). 본 연구에서는 Zhang and Lee (2001)가 제시한 5단계 방법 중 2단계 방법으로 ABC를 추정하였다.

남방참다랑어의 생물학적허용어획량은 현재의 자원상태를 판단하여 적절한 순간어획사망계수인 F_{ABC} 를 결정하고, 생물학적허용어획량 (ABC)은 식 (34)에 의해 추정되었다.

$$ABC = \frac{BF_{ABC}}{(F_{ABC} + M)} (1 - \exp[-(F_{ABC} + M)]) \quad \text{-----}(34)$$

여기서, B 는 MULTIFAN-CL 모델에서 추정된 2004년의 자원량, M 은 순간 자연사망계수이다.

3. 민감도 분석

본 연구에서 남방참다랑어 회유 및 파라미터 추정에 있어서 불확실성에 대한 자원변동을 알아보고자, 회유 및 순간자연사망계수에 대한 민감도 분석을 하였다.

3.1 회유에 대한 민감도 분석

MULTIFAN-CL 모델은 다랑어의 회유를 고려한 공간적인 개념이 포함된 모델로서, 본 연구에서는 크게 3개의 해역으로 나누어 남방참다랑어의 회유

Table 7. Maturity rate at age of southern bluefin tuna

age (yr)	1	2	3	4	5	6
Maturity rate	0.00	0.14	0.22	0.30	0.38	0.47
age (yr)	7	8	9	10	11	12
Maturity rate	0.55	0.64	0.73	0.82	0.91	1.00
age (yr)	13	14	15	16	17	18
Maturity rate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
age (yr)	19	20	21	22	23	24
Maturity rate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
age (yr)	25	26	27	28	29	30
Maturity rate	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Table 8. Tiers used to determine acceptable biological catch (ABC) in accordance with the level of information available for fisheries management system (Zhang and Lee, 2001)

Tier 1. Information available : Reliable estimates of B, B _{MSY} , F _{MSY} and F _{X%}	
1a) Stock status : B/B _{MSY} >1	F _{ABC} = F _{MSY}
1b) Stock status : α < B/B _{MSY} ≤ 1	F _{ABC} = F _{MSY} × (B/B _{MSY} - α) / (1 - α)
1c) Stock status : B/B _{MSY} ≤ α: F _{ABC} = 0	
Tier 2. Information available : Reliable estimates of B, B _{X%} and F _{X%}	
2a) Stock status : B/B _{40%} >1	F _{ABC} = F _{40%}
2b) Stock status : α < B/B _{40%} ≤ 1	F _{ABC} = F _{40%} × (B/B _{40%} - α) / (1 - α)
2c) Stock status : B/B _{40%} ≤ α: F _{ABC} = 0	
Tier 3. Information available : Reliable estimates of B and F _{0.1}	
	F _{ABC} = F _{0.1}
Tier 4. Information available : Time-series catch and effort data	
4a) Stock status : CPUE/CPUE _{MSY} >1	ABC=MSY
4b) Stock status : α < CPUE/CPUE _{MSY} ≤ 1	ABC= MSY × (CPUE/CPUE _{MSY} - α) / (1 - α)
4c) Stock status : CPUE/CPUE _{MSY} ≤ α: ABC=0	
Tier 5. Information available : Reliable catch history	
	ABC=P×Y _{AM} (arithmetic mean catch over an appropriate time period), 0.5 ≤ P ≤ 1.0

For tiers 1, 2 and 4, α is set at a default value of 0.05.

를 고려하였다. 그러나 현재 남방참다랑어에 대한 자원평가를 하고 있는 CCSBT에서는 회유를 고려하지 않고 전체를 하나의 해역으로 두고 자원평가를 하고 있으므로, 회유를 고려한 공간적 분포의 개념도입이 자원평가에 어떻게 영향을 미치는가에 대해 민감도 분석을 실행하였다. 따라서 본 연구에서는 MULTIFAN-CL 모델을 사용한 분석에서 해역을 CCSBT와 동일하게 하나의 해역으로 통합한 것과 해역을 3개로 나누어 회유를 고려한 결과를 비교하고자 한다.

3.2 순간자연사망계수에 대한 민감도 분석

남방참다랑어의 순간자연사망계수에 대한 민감도 분석을 위해 현재 CCSBT에서 사용되고 있는 값을 사용하였다 (Fig. 5). CCSBT에서 추정된 순간자연사망계수인 1세에서 0.5/년, 2세~9세 사이의 순간자연사망계수는 식 (2)에 의해 계산되었으며 (IATTC, 2006), 10세 이후는 0.14/년을 사용하였다.

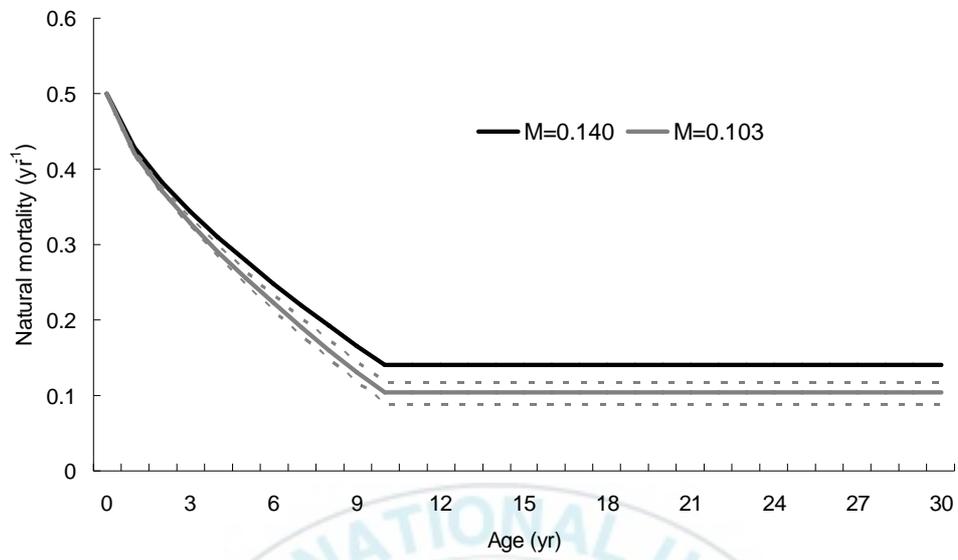
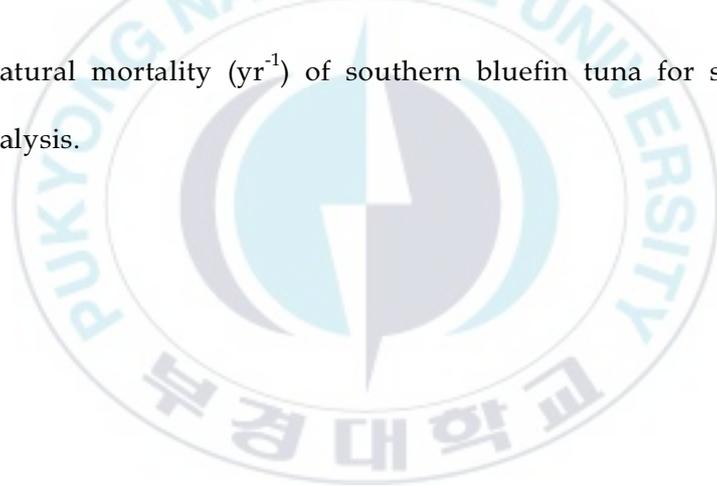


Fig. 5. Natural mortality (yr^{-1}) of southern bluefin tuna for sensitivity analysis.



결 과

1. 입력자료의 검정

1.1 어업별 어획량

어획량 자료는 시간과 어업에 따라 정의되었다. 추정된 어획량은 결정계수 0.995 ($P < 0.0001$)로 관측된 어획량 자료와 매우 유사한 경향을 나타냈다 (Fig. 6). LL1어업은 산란장 (해역 1)에서 조업하는 일본, 호주 및 대만의 연승어업에서 어획되는 어획개체수를 나타내며, 1960년대 중반에서 후반까지 높은 어획량을 나타냈으나, 이후 급격히 감소하여 현재 300개체내외의 낮은 어획량을 나타내고 있다. ID어업은 산란장 (해역 1)에서 조업하는 인도네시아의 연승어업에 대한 어획량을 나타낸 것으로, 1980년대 중반부터 급격히 증가하여 1990년대 후반에 가장 높은 어획량을 나타낸 후 2000년 이후 감소 추세를 나타내고 있다. AUS어업은 호주 표층어업 어장 (해역 2)에서 조업하는 선망, 채낚기 및 트롤어업에 대한 호주의 어획량 자료를 나타낸 것으로, 1980년대 초반에 급격히 증가하여, 1983년에 최고 어획량을 나타냈으며, 이후 감소하다 1990년대 중반부터 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. LL2어업은 호주 표층어업 어장 (해역 2)에서 조업하는 일본, 호주, 대만, 뉴질랜드 및 한국의 연승어업에 관한 어획개체수를 나타내고 있으며, 1960년대 중반에 높은 어획량을 나타냈으나, 이후 감소하여 1990년대 중반부터는 100여 개체의 어획량을 나타내고 있다. LL3어업은 남방참다랑어의 성어 개체들이 서식

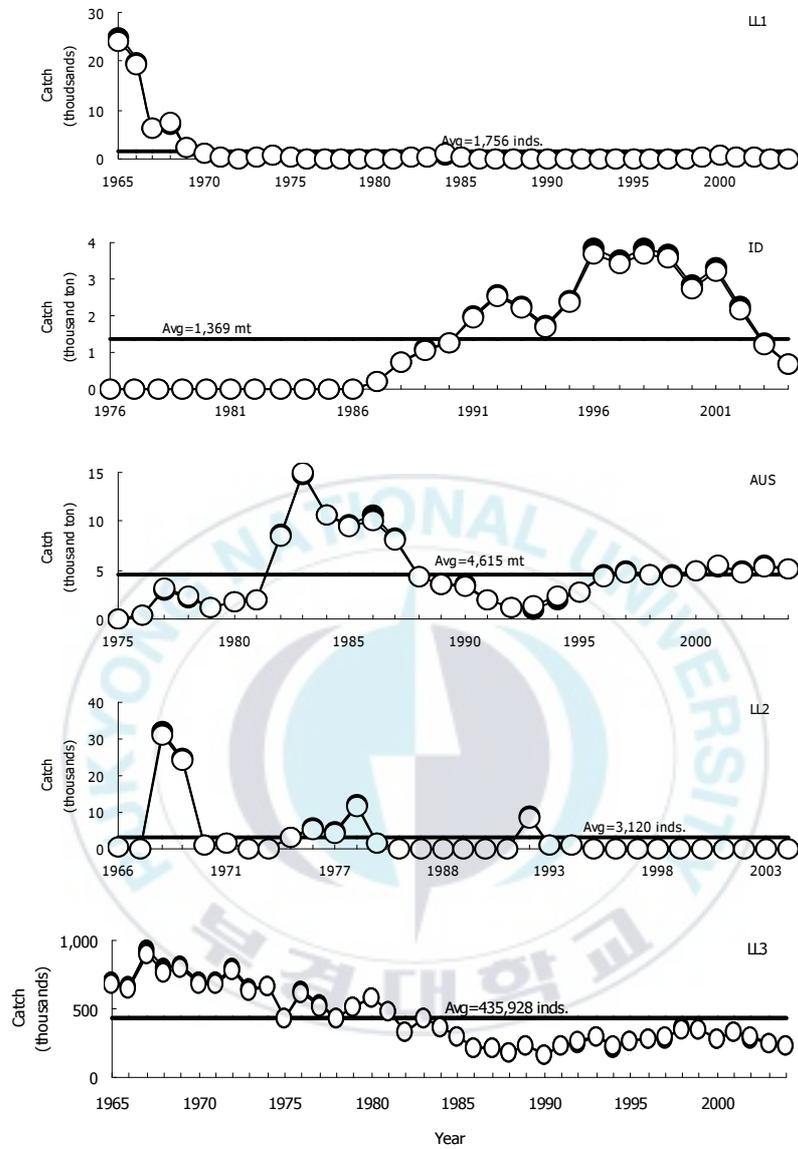


Fig. 6. Variations in observed (dark circles) and predicted (open circles) catch of southern bluefin tuna by fishery.

하는 서식장으로 (해역 3) 일본, 호주, 대만, 뉴질랜드 및 한국의 연승어업에 대한 어획개체수를 나타내고 있다. 전체 해역 중 가장 높은 어획량을 나타내고 있으며, 1967년 이후 꾸준히 감소추세를 나타내고 있으며, 2000년 이후로는 30만 개체내외의 어획량을 나타내고 있다.

1.2 어업별 체장빈도

체장빈도 자료는 어업에 따라 사용되었으며, 모델에서 추정된 값은 관측된 값과 비슷한 형태를 나타냈다 (Fig. 7). LL1어업의 경우, 관측치에서 체장 140~180cm에서 가장 많이 어획되었으며, 추정치도 관측치와 유사한 경향으로 추정되었다. ID어업에서는 관측치에서는 체장 150~200cm사이의 개체들이 주로 어획되었으며, 추정치에서는 180cm의 개체가 가장 높이 추정되었다. AUS어업은 어린 개체들을 주 목표종으로 하기 때문에, 50~100cm의 개체들이 주로 분포하고 있으며, 추정치에서는 100cm에서 가장 높게 추정되었다. LL2어업 역시 AUS어업과 같은 어장에서 어획을 하므로, 관측치에서는 70~130cm의 개체들이 높게 분포하며, 추정치에서도 105cm가 가장 높게 추정되었으며, 그 형태도 유사하게 나타났다. LL3어업은 관측치에서는 100~180cm의 개체들이 주로 분포하였으며, 추정치에서는 150cm의 체장에서 가장 높이 추정되었다. 전체적인 해역에 따른 체장빈도를 볼 때, 해역 1에서 체장 170cm에서 대부분 어획이 이루어지며, 해역 2에서는 80cm, 해역 3에서는 150cm의 체장에서 대부분 어획됨을 볼 수 있다.

1.3 표지-재포

표지-재포의 추정된 값은 어획량 및 체장-빈도 결과와는 다르게 관측된 값과 좋은 적합성을 보이지 않았다 (Fig. 8). 관측치를 보면 1990년부터 표지-방류되어 1997년까지 338마리로 재포된 개체수가 꾸준히 증가하였으나 이후 100여마리로 감소하였다. 처음 4개년은 결정계수가 0.988 ($P < 0.05$)로 높은 적합성을 보였으나, 그 이후에는 0.878 ($P < 0.05$)로 처음 4개년보다는 낮은 적합성을 나타냈다. 그러나 전반적인 증감의 경향은 일치하게 나타났다.

2. 파라미터 추정

2.1 회유율

Fig. 9과 Table 9은 각 해역별 자원량의 분포 비율을 나타낸다. 자원 분포 비율은 식(8)에 의해 추정된 회유계수 및 각 해역별 가입량의 평균 분포에 의해 계산된다. 해역 1에서의 전체 자원량 중 44%가 해역 1에서 이입된 것으로 추정되었으며, 해역 2에서의 전체 자원량 중 54%, 해역 3에서는 53%가 각각의 해역에서 이입된 것으로 추정되었다. 반면, 이출율은 해역 1에서의 전체 자원량 중 56%가 각각 해역 2와 해역 3으로 이출되었으며, 해역 2는 46%, 해역 3에서는 47%가 각각 다른 해역으로 이출된 것으로 추정되었다.

2.2 체장-체중 관계

우선 오차구조를 알기 위해 총 12,158마리에 대한 체장 (L)과 체중 (W)간의 관계를 그래프를 통해 알아본 결과 체장이 커질수록 체중의 변이가 더

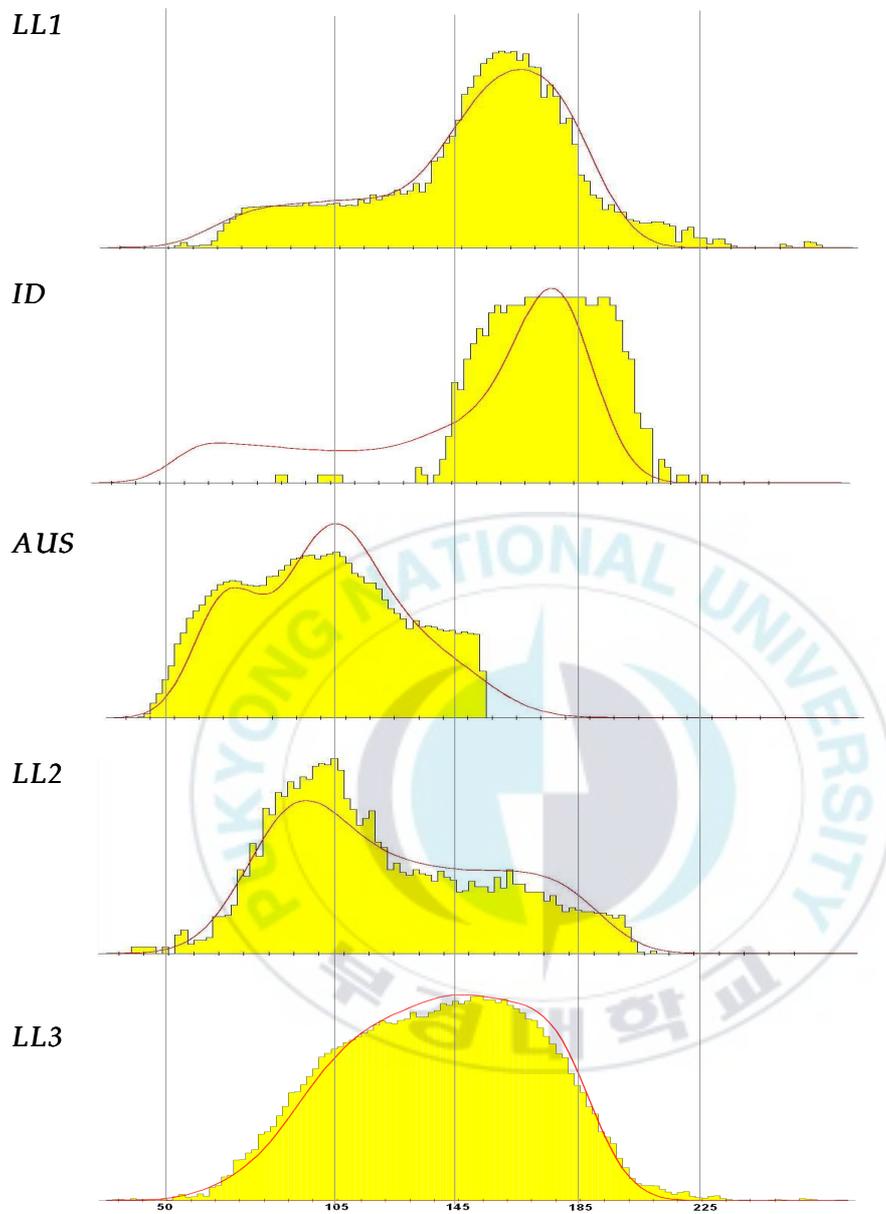


Fig. 7. Observed (histograms) and predicted (line) length frequency of southern bluefin tuna by fishery.

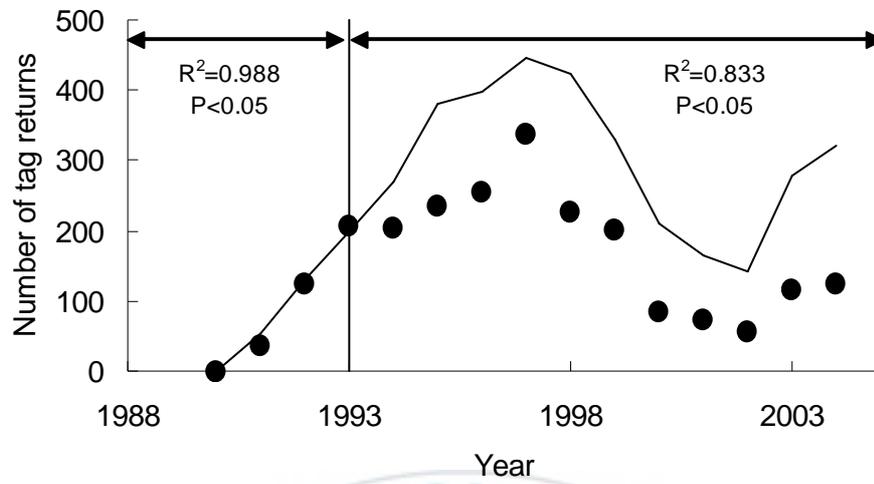
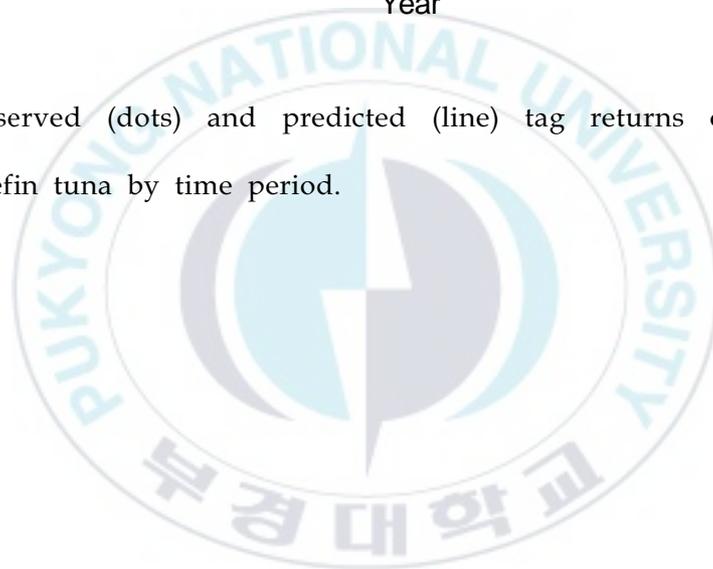


Fig. 8. Observed (dots) and predicted (line) tag returns of southern bluefin tuna by time period.



커지는 곱의 오차구조를 가짐을 알 수 있었다 (Fig. 10). 추정된 체장-체중 관계식은 식(35)과 같으며, 식(15)에 의한 직선회귀결과는 Table 10에 나타내었다.

$$W=1.8926E-05L^{2.9781} \quad (R^2=0.8835) \quad \text{-----}(35)$$

2.3 성장식

식(16)에서의 von Bertalanffy 성장식을 구하기 위하여 연령별 체장 관계식이 식(36)와 같이 추정되었다. 추정된 이론적 최대연령 (L_{∞})은 185.39cm였으며, 성장계수 (K)는 0.169/년, 체장이 0일 때의 이론적 연령 (t_0)은 -1.448세로 나타났다 (Table 11). Fig. 11은 추정된 성장 파라미터에 의한 연령별 평균 체장을 나타내고 있으며, 보여 지는 점들은 CCSBT에서 추정된 연령별 체장을 나타내고 있다 (CCSBT web-site). 이식을 사용하여 연령별 체장을 추정하였으며, 본 연구에서 추정된 성장곡선과 유사한 형태를 나타내고 있다.

$$L_t=185.39(1-e^{-0.169(t+1.448)}) \quad \text{-----}(36)$$

Table 12는 연령별 평균 체중 및 체장을 나타내며, 연령별 평균 체중은 추정된 체장-체중 관계식 식(35)에 의해 추정되었으며, 연령별 평균 체장은 추정된 von Bertalanffy 성장식 식(36)에 의해 추정되었다.

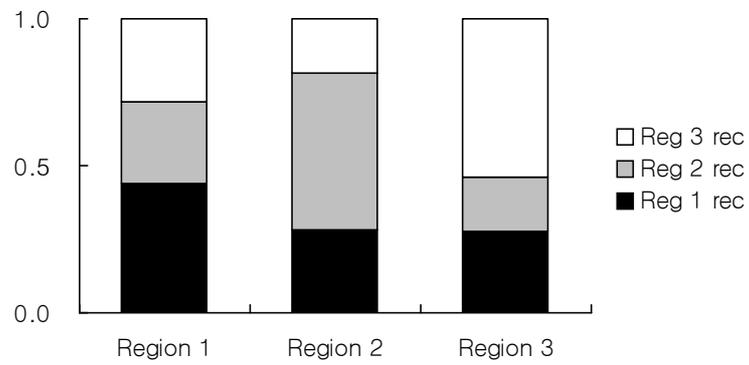


Fig. 9. Proportional distribution of total biomass in each region apportioned by the source region of the fish.



Table 9. Proportional distribution of total biomass in each region

From \ To	Region 1	Region 2	Region 3	Export
Region 1	44%	28%	28%	56%
Region 2	28%	54%	18%	46%
Region 3	28%	19%	53%	47%



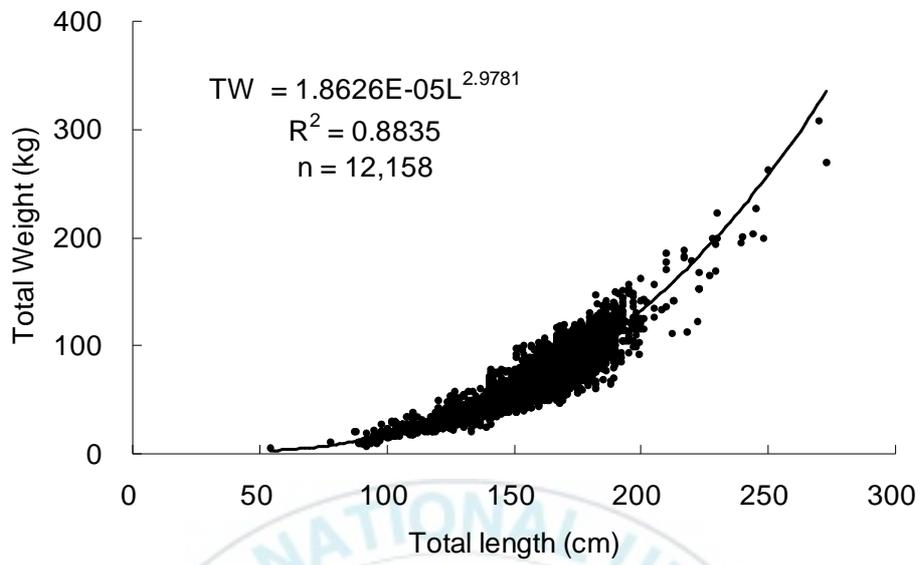


Fig. 10. Relationship between total length and total weight of the southern bluefin tuna.

Table 10. Regression statistics for the relationship between total length and total weight of southern bluefin tuna

Statistics	Value
$\ln \alpha \pm SE$	-10.891±0.04985
95% CI for $\ln \alpha$	(-10.7932, -10.9887)
$\beta \pm SE$	2.9781±0.00981
95% CI for β	(2.997329, 2.958874)
$\alpha = \exp(\ln \alpha)$	1.8626E-05
95% CI for α	(2.0538E-05, 1.6892E-05)
n	12,158
R^2	0.8835

2.4 선택성 및 어획능률

각 어업별로 추정된 선택성은 시간에 따라 일정하며, 연승어업에 있어서는 연령에 따라 선택성이 증가한다고 가정되었다 (Fig. 12). 추정된 선택성은 각 어업별 체장 자료의 차이를 반영한다. 연승어업에서는 5세 이상의 개체들에 대해서는 대부분의 선택성이 1로 추정되었으며, AUS어업은 어획대상을 어린 개체로 하기 때문에, 3세에서 가장 높은 선택성을 나타냈다.

연도별 어획능률은 어업에 따라 추정되었다 (Fig. 13). LL3어업을 제외한 대부분의 어업에서 어획능률이 시간에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 특히, AUS어업의 경우, 1990년대 중반부터 어획능률이 급속히 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 14은 연도별 노력량 편차를 나타내고 있다. 이 값은 로버스트 테스트 (robust test)방법이 사용되었으며, 어획능률이 계절에 따른 변동 없이, 모델에서 추정된 노력량과 잘 조화를 이룬다면 노력량 편차는 0의 값에 분포한다.

3. 자원평가 결과

3.1 순간어획사망계수

연령별, 연도별로 추정된 순간어획사망계수 (F)에서 1세에서 5세까지의 F 는 1965년부터 1975년까지 평균 0.01/년의 낮은 값을 나타내다가 이후 급속히 증가하여 1986년에는 0.51/년으로 최대값을 나타냈다 (Fig. 15). 이후, 1990년대 초반까지는 다시 감소추세를 나타냈으나, 1995년부터 다시 증가하

Table 11. Estimated parameters of von Bertalanffy growth equation of the southern bluefin tuna

Parameters	Value	Variance
L_{∞}	185.39 cm	0.4945
K	0.169 /yr	2.9906E-05
t_0	-1.448	0.0240



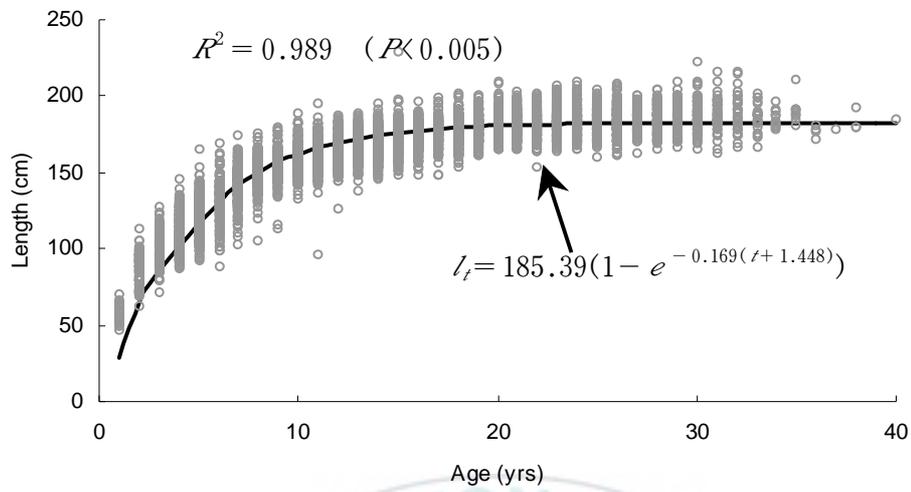


Fig. 11. Estimated von Bertalanffy growth curve of southern bluefin tuna (line). The length frequency by age of southern bluefin tuna (circles).

Table 12. Mean weight and length at age of southern bluefin tuna

age (yr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Weight (kg)	4.19	9.23	15.76	23.22	31.09	38.99	46.62	53.78	60.38	66.35
Length (cm)	62.68	81.71	97.80	111.39	122.87	132.57	140.76	147.69	153.53	158.48
age (yr)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Weight (kg)	71.69	76.42	80.58	84.20	87.35	90.07	92.40	94.41	96.13	97.60
Length (cm)	162.65	166.18	169.16	171.68	173.80	175.60	177.12	178.40	179.49	180.40
age (yr)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Weight (kg)	98.85	99.92	100.82	101.59	102.25	102.80	103.27	103.67	104.01	104.29
Length (cm)	181.18	181.83	182.38	182.85	183.24	183.58	183.86	184.10	184.30	184.47

여 최근 (2004년)까지 평균 0.24/년의 F 를 나타내고 있다. 1세에서 5세까지의 F 의 평균은 0.144/년으로 1세에서 30세까지의 전체 F 의 평균인 0.058/년보다 두배 이상 높은 값을 나타냈다.

6세에서 10세까지의 F 역시 1세에서 5세까지의 값과 유사하게 1965년부터 1975년까지 평균 0.01/년의 낮은 값을 나타내다가 이후 급속히 증가하여 1986년에는 0.44/년으로 최대값을 나타냈다. 이후, 1990년대 초반까지는 다시 감소추세를 나타냈으나, 1995년부터 다시 증가하여 최근 (2004년)까지 평균 0.21/년의 F 를 나타내고 있다. 6세에서 10세까지의 F 의 평균은 0.126/년으로 1세에서 30세까지의 전체 F 의 평균보다 높은 값을 나타냈다.

11세에서 30세까지의 F 역시 1965년부터 1975년까지 평균 0.001/년의 낮은 값을 나타내다가 1980년대 중반에 잠시 증가하였으나 이후, 1990년대 초반까지는 다시 감소추세를 나타냈으나, 1995년부터 다시 증가하여 최근 (2004년)까지 평균 0.04/년의 F 를 나타내고 있다. 11세에서 30세까지의 F 의 평균은 0.019/년으로 1세에서 30세까지의 전체 F 의 평균보다 낮은 값을 나타냈다.

해역별 순간어획사망계수는 Fig. 16과 같이 추정되었다. 해역 1에서의 평균 순간어획사망계수는 0.006/년이며, 1980년대 후반부터 증가하기 시작하여, 2002년에 0.027/년으로 가장 높은 F 값을 나타냈다. 해역 2에서의 평균 F 값은 0.05/년이며, 1986년에 0.18/년으로 가장 높은 F 값을 나타냈다. 해역 3에서의 평균 F 값은 0.0002/년으로 1980년대 중반까지는 지속적으로 감소추세를 나타냈으나, 이후 증가하는 경향을 나타냈으며, 2001년에 가장 높은 F

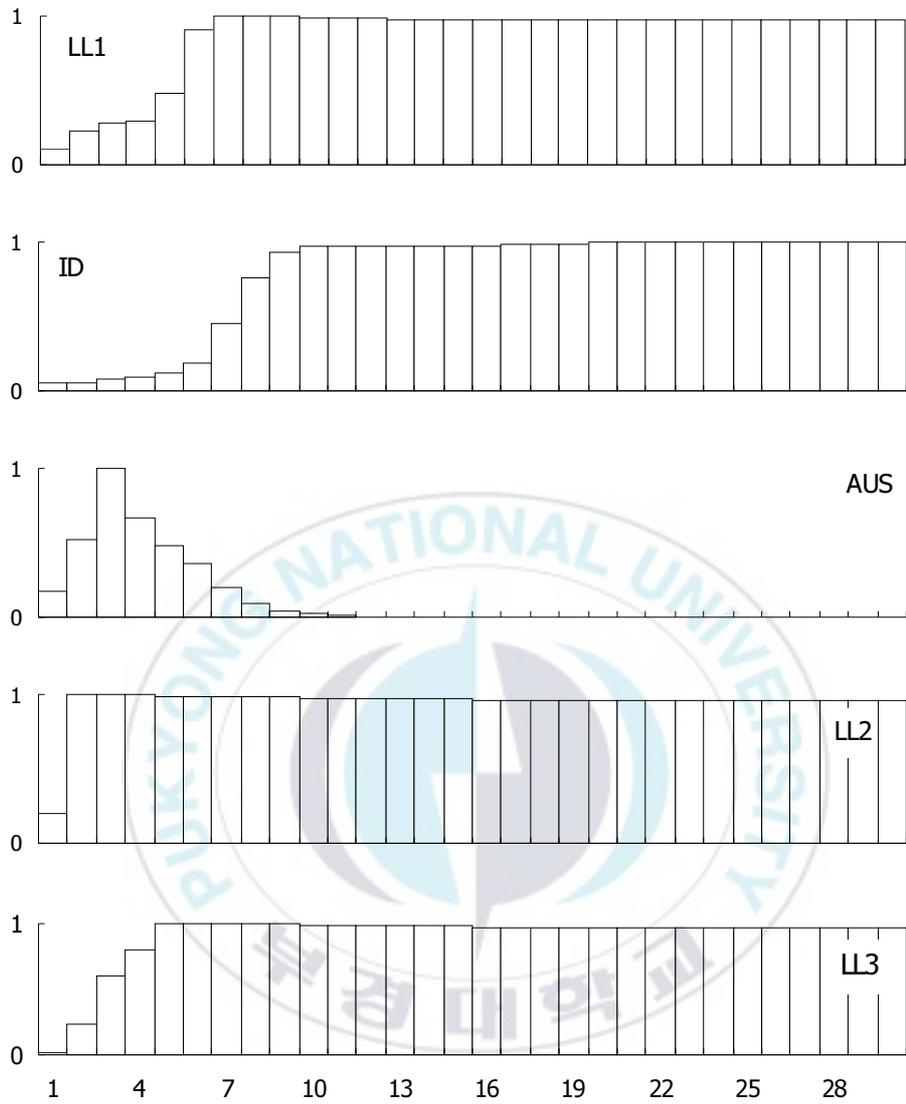


Fig. 12. Estimated selectivity coefficients of southern bluefin tuna by fishery.

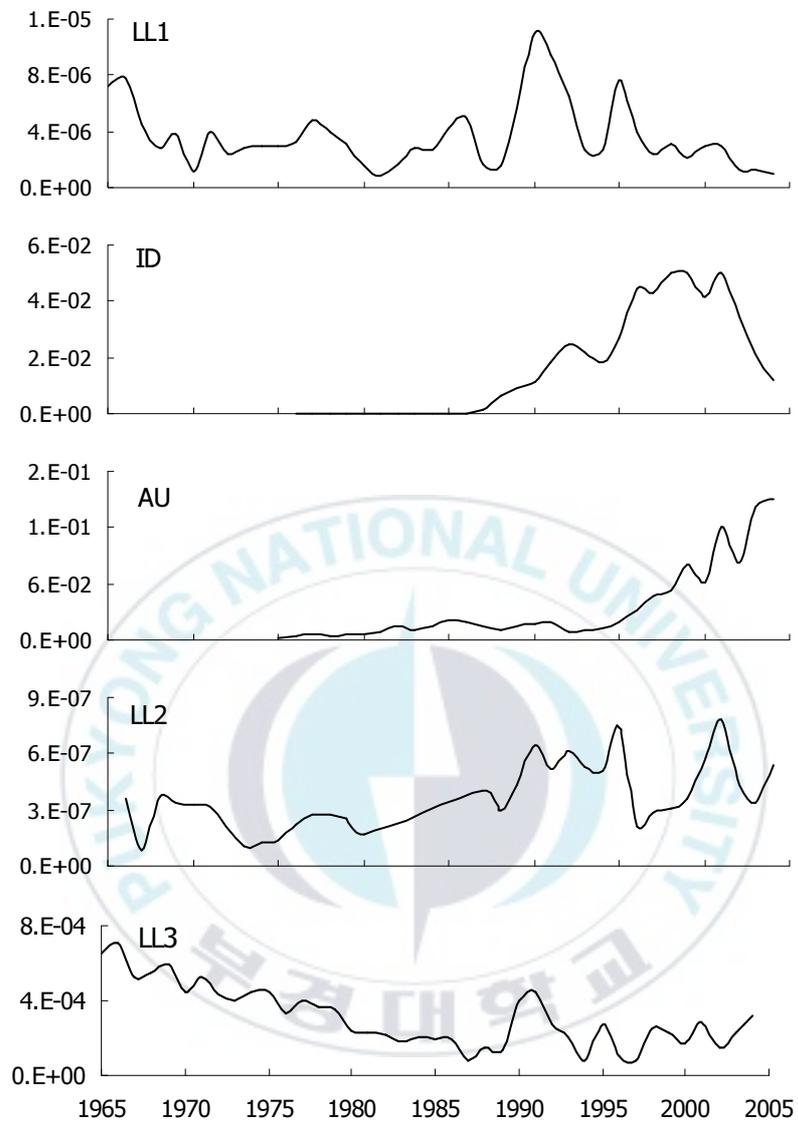


Fig. 13. Estimated time series of catchability of southern bluefin tuna by fishery.

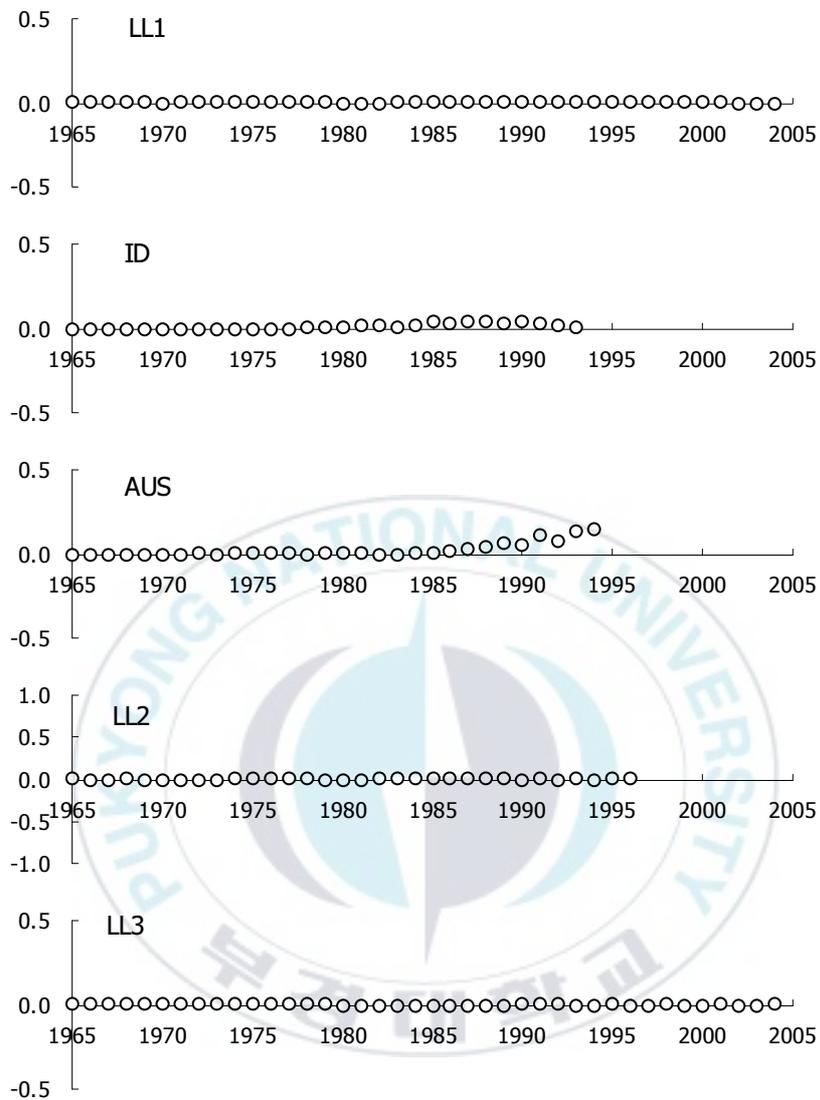


Fig. 14. Distribution of effort deviations over time of southern bluefin tuna by fishery.

값을 나타냈으나 이후 다시 감소하는 경향을 나타냈다.

3.2 자원량

MULTIFAN-CL 모델에서 추정된 남방참다랑어의 연도별 자원량은 Fig. 17(a)과 같다. 1965년에 65만톤으로 가장 높게 추정되었으며, 이후 지속적으로 감소하여 최근 (2004년)에는 19만톤으로 1965년 자원량의 30%로 감소하였다.

순간자연사망계수 (M)에 대한 민감도 분석의 결과 1970년대 중반까지는 약 10만톤의 자원량의 차이를 나타냈으나, 그 차이가 점점 줄어들어 최근 (2004년)에는 3만톤의 차이를 나타냈다 (Fig. 17(b)).

해역의 구분에 따른 민감도 분석의 결과를 비교해보면, 해역을 구분하지 않았을 때 (R1)의 자원량보다 해역을 3개로 구분하였을 때 (R3)의 자원량이 평균 15만톤 높게 추정되었다 (Fig. 17(c)). 최근 (2004년)의 R1의 자원량은 6만 4천톤으로 추정었다.

CCSBT에서 남방참다랑어의 자원평가에 사용되는 순간자연사망계수 값인 0.140/년과 본 연구에서 Zhang and Megrey 방법에 의해 새롭게 추정된 0.103/년 값과의 비교에서는 $M=0.140$ /년일 때가 $M=0.103$ /년에서의 자원량보다 높게 추정이 되었다 (Fig. 17(d)).

남방참다랑어의 연도별 산란자원량은 Fig. 18(a)과 같으며, 1965년에 51만톤으로 가장 높게 추정되었으며, 이후 지속적으로 감소하여 최근 (2004년)에는 14만톤으로 1965년 자원량의 28%로 감소하였다.

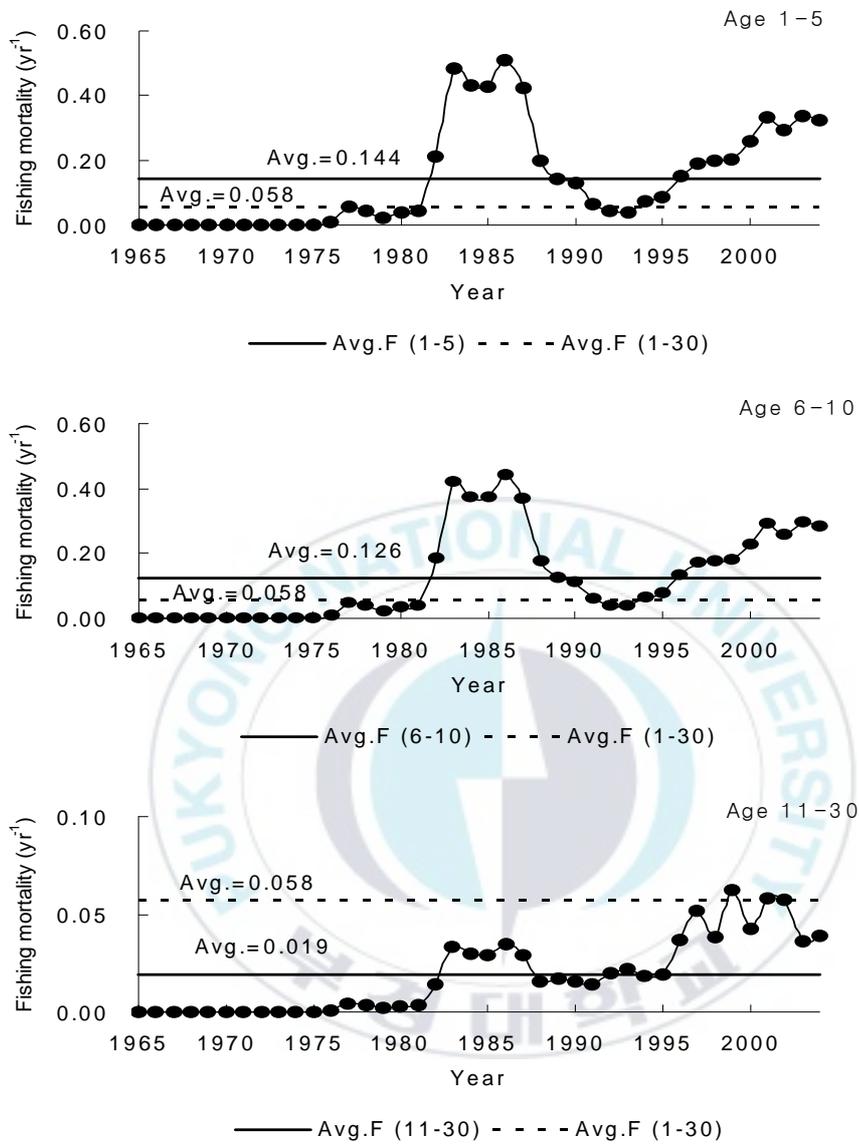


Fig. 15. Estimated average instantaneous fishing mortality rates by age group of southern bluefin tuna.

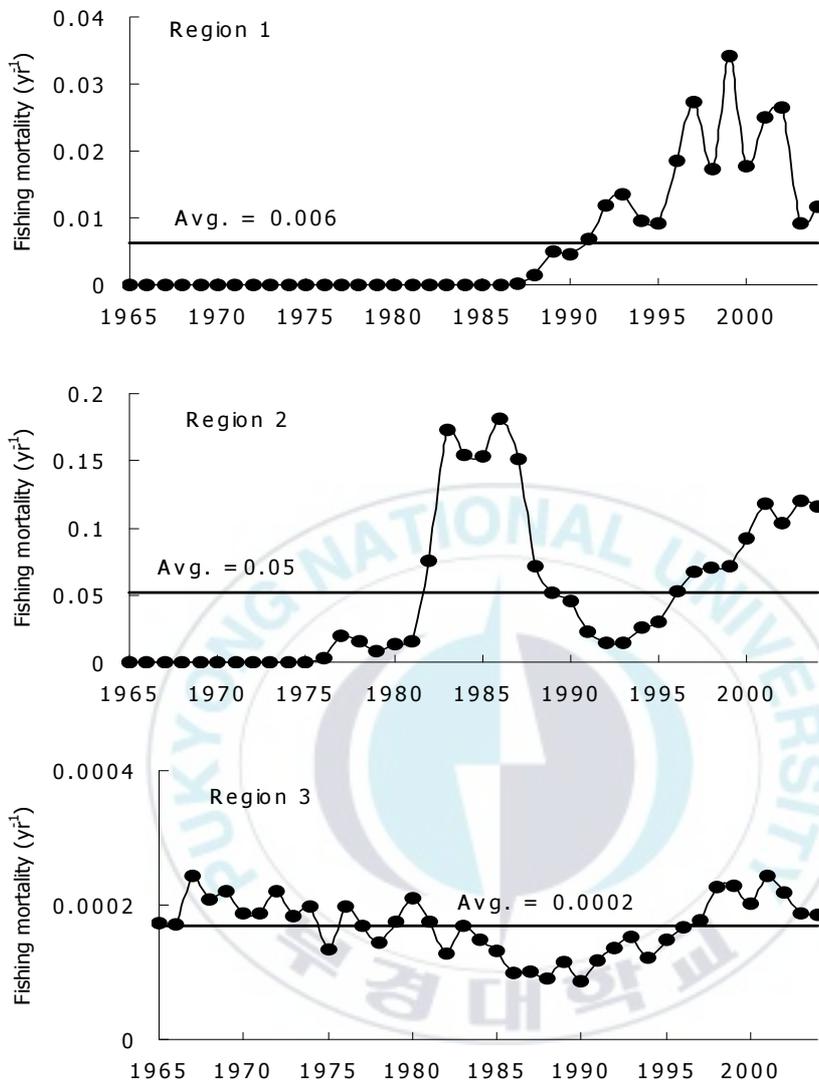


Fig. 16. Estimated average instantaneous fishing mortality rates by region group of southern bluefin tuna.

순간자연사망계수 (M)에 대한 민감도 분석의 결과 95% 신뢰구간의 하한값보다 상한값과 유사하게 추정되었으며, 상한값에서는 평균 2만 9천톤, 하한값에서는 평균 5만 8천톤의 차이를 나타냈다 (Fig. 18(b)).

해역의 구분에 따른 민감도 분석의 결과 R3보다 R1의 산란자원량이 평균 13만톤 적게 추정이 되었으나, 감소하는 경향에 있어서는 유사한 형태를 나타냈다 (Fig. 18(c)).

순간자연사망계수에 대한 민감도 분석에서는 $M=0.140$ /년 일 때의 산란자원량이 $M=0.103$ /년의 산란자원량보다 평균 6만톤 높게 추정되었다 (Fig. 18(d)).

3.3 가입량

MULTIFAN-CL 모델에서 추정된 남방참다랑어의 연도별 가입량은 Fig. 19(a)과 같다. 1969년에 72억 마리로 가장 높게 추정되었으며, 이후 지속적으로 감소하여 최근 (2004년)에는 22억 마리로 1965년 자원량의 31%로 감소하였다.

순간자연사망계수 (M)에 대한 민감도 분석의 결과 95% 신뢰구간의 하한값과 유사하게 추정되었으며, 상한값과는 평균 22억 마리의 차이를 나타냈다 (Fig. 19(b)).

해역의 구분에 따른 민감도 분석의 결과를 비교해보면, R1의 가입량보다 R3의 가입량이 평균 11억 마리 더 높게 추정되었다 (Fig. 19(c)). 그러나 1979, 1982, 1993 및 2002년에는 R1의 가입량이 R3보다 더 높게 추정되었다.

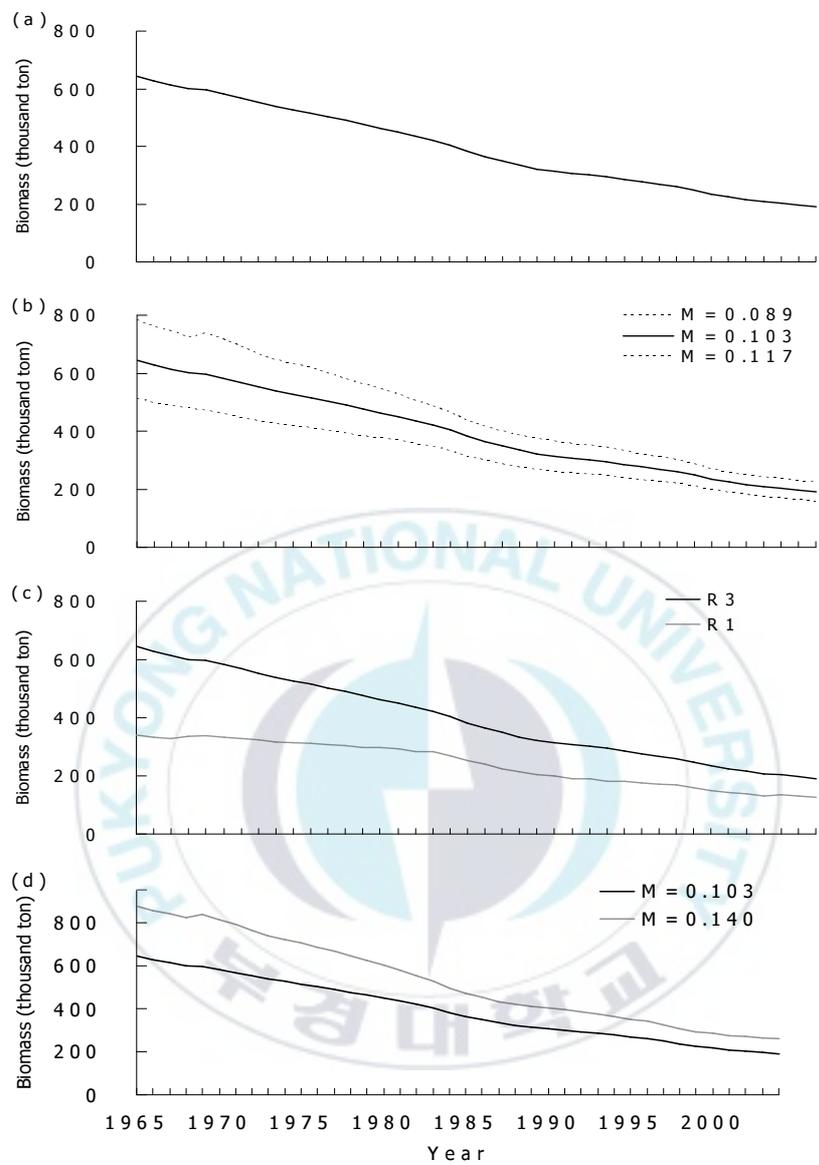


Fig. 17. Estimated total biomass of southern bluefin tuna.

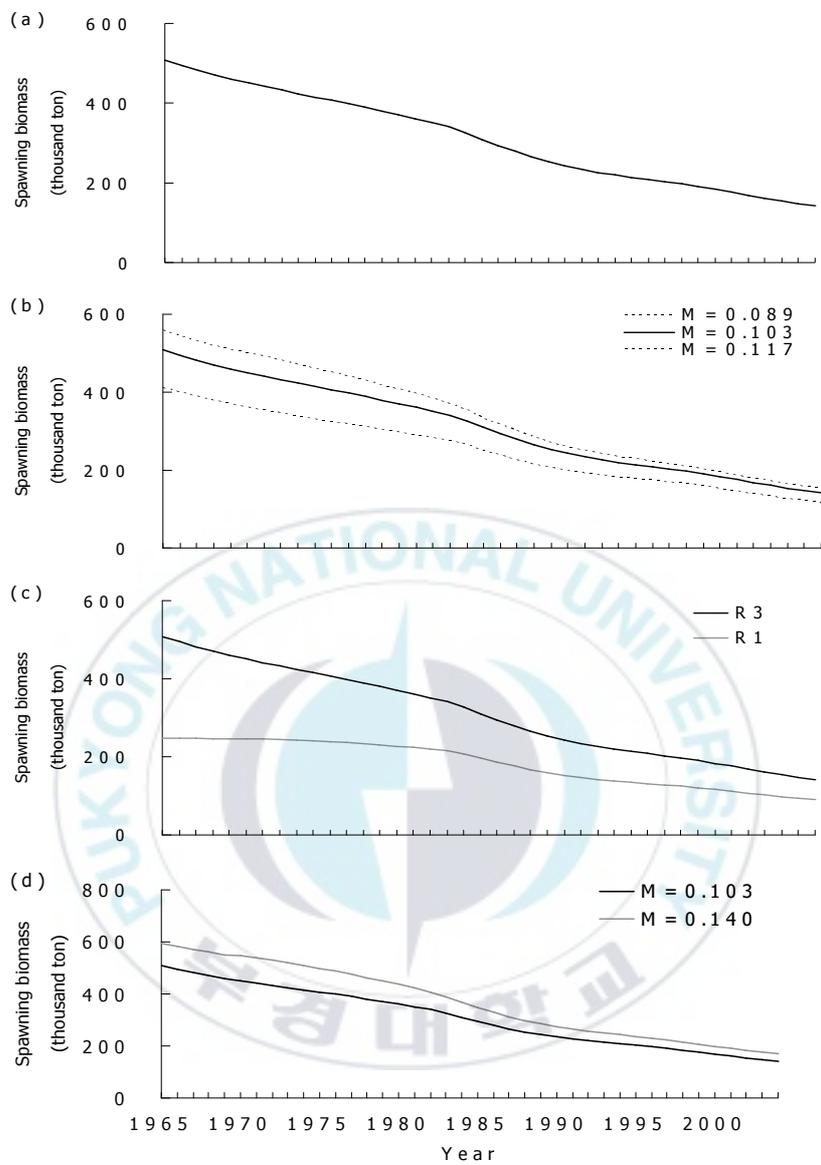


Fig. 18. Estimated spawning biomass of southern bluefin tuna.

최근 (2004년)의 가입량은 R1일 때 12억 마리로 추정되었으며, 감소하는 경향에 있어서는 유사한 형태를 나타냈다.

$M=0.140/\text{년}$ 과 $M=0.103/\text{년}$ 의 가입량 비교에서는 $0.140/\text{년}$ 일 때의 가입량이 $0.103/\text{년}$ 의 가입량보다 평균 29억 마리 높게 추정되었다 (Fig. 19(d)).

3.4 산란자원량-가입량 관계

1966년부터 2004년까지 추정된 산란자원량-가입량의 관계에서 1966년에는 20년간의 산란자원량의 중앙값 (246,824톤)과 가입량의 중앙값 (35억 마리)으로 볼 때, 상대적으로 높은 산란자원량 및 가입량을 나타냈다 (Fig. 20). 그러나 이후 지속적인 감소로 인하여, 최근 (2004)의 산란자원량 및 가입량은 매우 낮은 값을 나타냈다.

연도별 산란자원량-가입량 관계를 살펴보면, 1966년부터 1975년, 1977년부터 1979년, 1983년부터 1985년에는 높은 산란자원량 및 높은 가입량을 나타냈다 (Table 13). 1986년, 1988년, 1990년에서 1991년에는 높은 가입량을 나타냈으나, 낮은 산란자원량을 나타냈다. 1976년, 1980년에서 1982년에는 산란자원량은 높았으나 낮은 가입량을 나타냈다. 1987년, 1989년 및 1992년부터 2004년 최근까지는 낮은 산란자원량 및 가입량의 형태를 나타냈다.

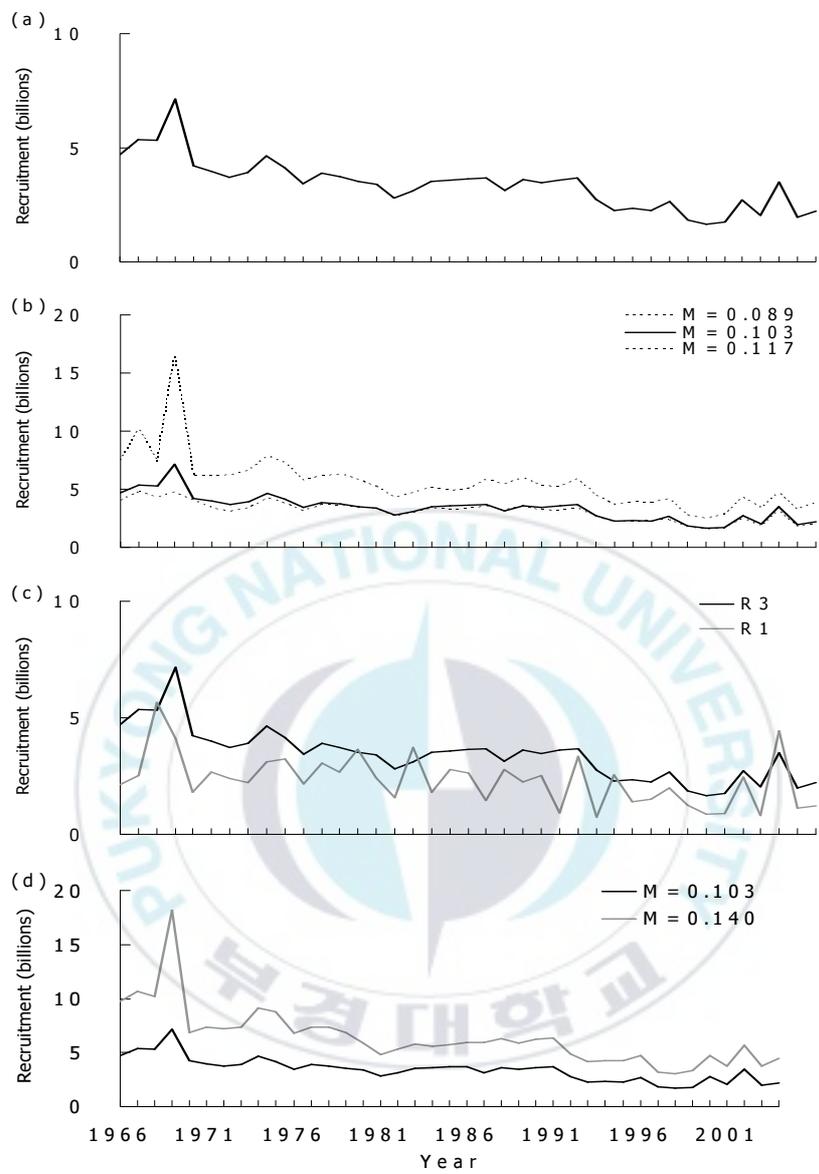


Fig. 19. Estimated recruitment of southern bluefin tuna.

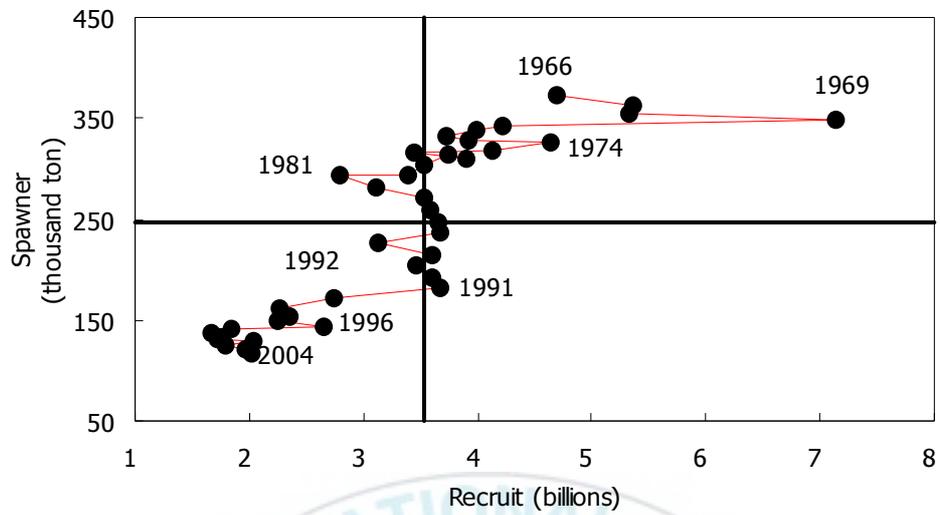
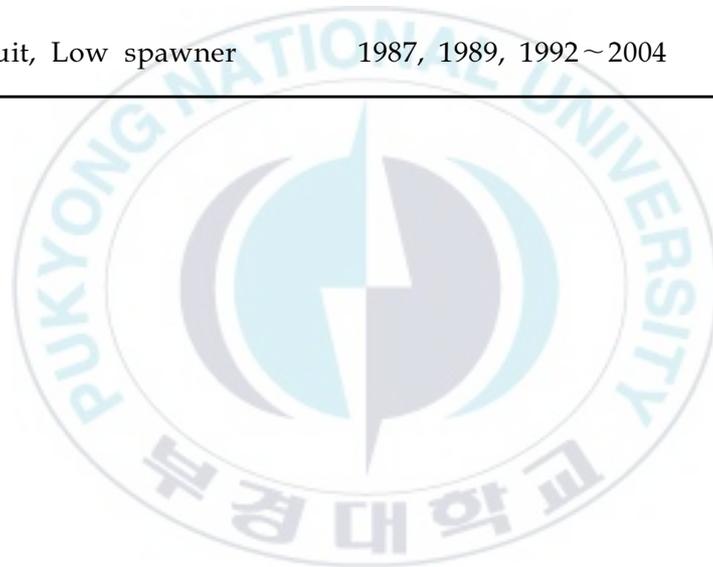


Fig. 20. Relationship between spawning biomass and recruitment of southern bluefin tuna. Vertical and horizontal lines indicate the median values of recruitment and spawning biomass of southern bluefin tuna during 1966~2004, respectively.

Table 13. Relative levels in the relationship between spawning biomass and recruitment of southern bleufin tuna during 1966~2004

Stock level	Years
High recruit, High spawner	1966~1975, 1977~1979, 1983~1985
High recruit, Low spawner	1986, 1988, 1990, 1991
Low recruit, High spawner	1976, 1980~1982
Low recruit, Low spawner	1987, 1989, 1992~2004



3.5 적정어획강도 및 어획개시연령

순간어획사망계수 (F)와 어획개시연령 (t_c)에 대한 가입당생산량 (Y/R)은 표층어업과 연승어업의 어획개시연령이 다르기 때문에 각각 추정되었다.

표층어업에서의 순간어획사망계수 (F)에 대한 가입당생산량 (Y/R)과 어획개시연령 (t_c)과의 관계는 Fig. 21와 같으며, 점선은 현재의 t_c 인 1.47세, $F=0.22$ /년에서의 가입당생산량이 약 15.72kg 임을 나타내고 있다. 현재 t_c 에서 F 를 높이면 가입당생산량이 감소하는 것을 볼 수 있으므로, 현재의 F 값 수준인 0.22/년에서 최대의 가입당생산량을 얻기 위해서는 t_c 를 6세 정도로 높여야 한다. t_c 에 대한 F 와 가입당생산량 간의 관계는 Fig. 22에서 보여준다. 현재 t_c 인 1.47세에서 최대의 가입당생산량은 $F=0.15$ /년 정도에서 16.36kg을 나타냈다.

연승어업에서의 F 에 대한 가입당생산량과 t_c 와의 관계는 Fig. 23와 같으며, 점선은 현재 t_c 인 3.66세, $F=0.24$ /년에서의 가입당생산량이 약 19.80kg 임을 나타내고 있다. 현재 t_c 에서 F 를 높이면 가입당생산량이 감소하는 것을 볼 수 있으므로, 현재의 F 값 수준인 0.24/년에서 최대의 가입당생산량을 얻기 위해서는 t_c 를 6.5세 정도로 높여야 한다. t_c 에 대한 F 와 가입당생산량간의 관계는 Fig. 24에서 보여준다. 현재 t_c 인 3.66세와 $F=0.24$ /년에서 최대의 가입당생산량인 19.80kg을 나타냈다.

3.6 생물학적 기준점 및 생물학적허용어획량

생물학적 기준점 및 생물학적허용어획량은 표층어업과 연승어업으로 나누어 각각 추정되었다 (Table 14 and Table 15).

표층어업의 t_c 1.47세에 대한 $F_{0.1}$ 은 0.091/년이었으며, 이때의 가입당생산량은 42.02kg으로 추정되었다. 어획이 전혀 없을 때의 산란자원량의 40%의 수준을 유지시킬 수 있는 순간어획사망계수 $F_{40\%}$ 는 0.074/년이며 이때의 가입당산란자원량은 137.69kg으로 추정되었다 (Table 14). 자원상태에 의해 추정된 F_{ABC} 는 0.027/년으로 추정되었으며, 식(34)에 의해 추정된 표층어업에서의 남방참다랑어의 생물학적허용어획량 (ABC)은 1,673톤으로 추정되었다 (Table 15).

연승어업의 t_c 3.66세에 대한 $F_{0.1}$ 은 0.118/년이었으며, 이때의 가입당생산량은 39.92kg으로 추정되었다. $F_{40\%}$ 의 값은 0.094/년으로 추정되었으며, 이때의 가입당산란자원량은 137.69kg으로 추정되었다 (Table 14). 자원상태에 의해 추정된 F_{ABC} 는 0.034/년으로 추정되었으며, 식(34)에 의해 추정된 연승어업에서의 남방참다랑어의 ABC는 3,702톤으로 추정되었다 (Table 15). 따라서 표층어업과 연승어업의 ABC를 합한 남방참다랑어의 전체 ABC는 5,375톤으로 추정되었다.

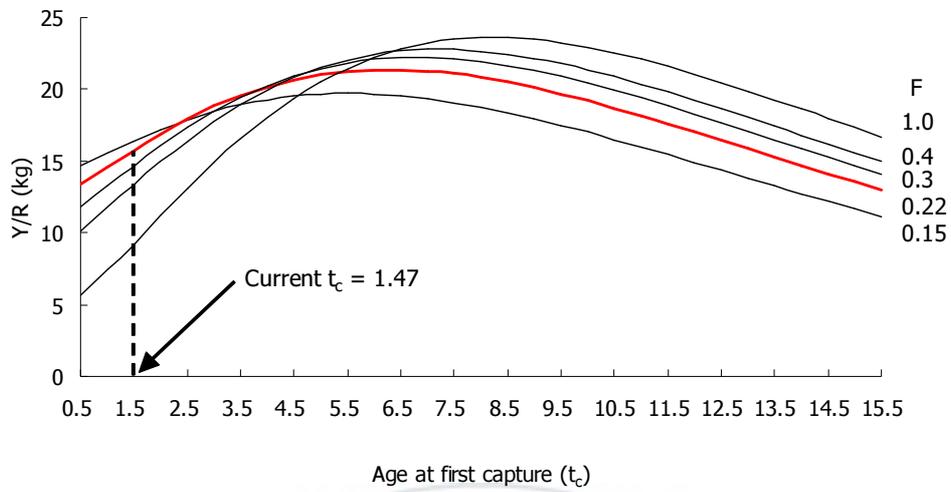


Fig. 21. Yield per recruit curves of southern bluefin tuna by surface fishery: Y/R against the age at first capture (t_c) for various fishing mortalities (F).

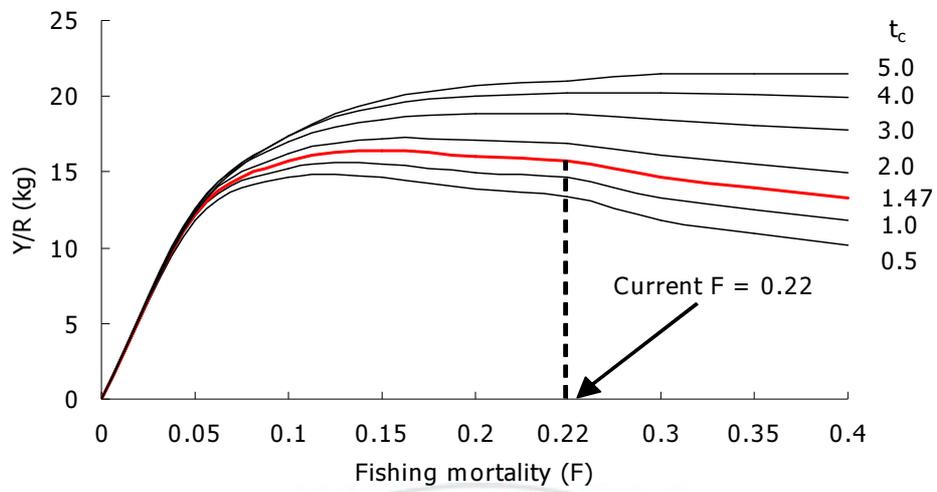


Fig. 22. Yield per recruit curves of southern bluefin tuna by surface fishery: Y/R against fishing mortality (F) for various ages at first capture (t_c).

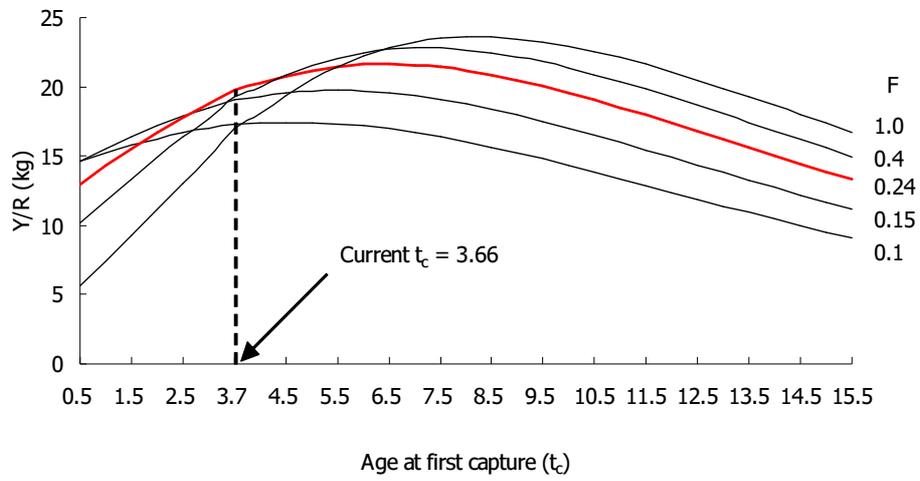


Fig. 23. Yield per recruit curves of southern bluefin tuna by longline fishery: Y/R against the age at first capture (t_c) for various fishing mortalities (F).

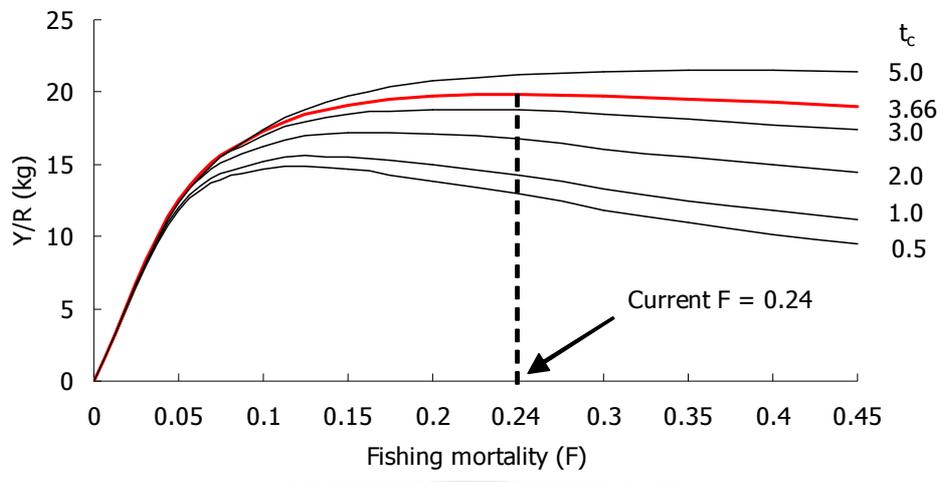


Fig. 24. Yield per recruit curves of southern bluefin tuna by longline fishery: Y/R against fishing mortality (F) for various ages at first capture (t_c).

Table 14. Yield and spawning biomass per recruit of southern bluefin tuna under harvest strategies on $F_{40\%}$, F_{ABC}

Fishery	Age at first capture (year)	Fishing mortality		Yield and Spawning Biomass per Recruit (kg)	
		$F_{0.1}$ (yr^{-1})	$F_{40\%}$ (yr^{-1})	$F_{0.1}$	$F_{40\%}$
Surface fishery	1.47	0.091	0.074	42.02	137.69
Longline fishery	3.66	0.118	0.094	39.92	137.69



Table 15. Acceptable biological catch (ABC) estimates of southern bluefin tuna

	Surface fishery	Longline fishery
F_{current}	0.223/yr	0.242/yr
$F_{40\%}$	0.074/yr	0.094/yr
$SB/R]_{F(40\%)}$	137.686kg	137.686kg
$SB/R]_{\text{current } F}$	53.834kg	53.834kg
B_{current}	66,059,000kg	116,509,000kg
$B_{40\%} = B_{\text{current}} \times (SB/R]_{F(40\%)} / SB/R]_{\text{current } F}$	168,953,000kg	297,984,000kg
$B/B_{40\%}$	0.391 (stock status : 2b)	0.391 (stock status : 2b)
$F_{ABC} \leq F_{40\%} \times (B/B_{40\%} - a) / (1 - a)$	0.027/yr	0.034/yr
$ABC = \frac{BF_{ABC}}{(F_{ABC} + M)(1 - \exp[-(F_{ABC} + M)])}$	1,673 ton	3,702 ton

고 찰

MULTIFAN-CL 모델은 CCSBT에서 사용되고 있는 관리방안과는 달리 계군의 공간적 구조를 결합시켜 평가하는 모델이다. 해역에 따른 다양한 국가의 선박과 어구를 분리해서 평가를 할 수 있으므로 회유성이 큰 다랑어의 자원평가에 적합하다. 본 연구에서는 현재 자원평가 방법론에 국제적으로 이견을 보이고 있는 남방참다랑어 자원에 대하여 MULTIFAN -CL 모델을 사용하여 분석하였다. CCSBT에서 남방참다랑어 자원관리를 위해서 사용되는 관리방안들은 현재 일본의 연승어업 자료만이 이용되므로 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 한국, 일본, 호주, 대만, 뉴질랜드 및 인도네시아의 연승어업 자료와 호주 표층어업 자료를 사용하였으며, 대상어종에 대한 각각의 어업 및 해역에 대한 회유성을 고려하여 자원평가를 하는 MULTIFAN-CL 모델에 의해 남방참다랑어의 자원평가를 처음으로 시도하였다.

각 해역별 회유율에서 이출율을 보면, 해역 2와 해역 3의 경우에는 각각 46%와 47%가 다른 해역으로 이출이 되며, 50% 이상이 원래 서식하던 해역에서 서식을 하고 있는 것으로 추정되었다. 그러나 해역 1에서의 경우, 이 해역의 자원 중 56%가 다른 해역을 이출을 하는 것으로 추정되었으며, 해역 2와 해역 3의 이출율을 비교하였을 때, 해역 1에서 가장 높은 이출율을 보였다. 남방참다랑어의 유일한 산란장이라고 알려져 있으며, 본 연구의 결과에

서도 이를 입증하였다.

MULTIFAN-CL 모델에서 추정된 남방참다랑어의 자원량은 1965년 65만톤 이후 지속적인 감소추세를 나타냈으며, 최근 (2004년)의 자원량은 1965년 자원량의 30%로 매우 낮은 값을 나타냈다. 또한, 최근 (2004년)의 산란자원량의 경우, 1965년 51만톤의 28% 수준인 14만톤으로 추정되었다. CCSBT에서 추정된 산란자원량과 비교하였을 때, 1976년까지는 본 연구에서 추정된 산란자원량이 평균 8만톤 낮게 추정되었으나, 최근 (2004년)의 산란자원량에서는 CCSBT에서 추정된 산란자원량 6만톤과 비교하였을 때, 3배로 높게 추정되었다. 본 연구에서 사용된 MULTIFAN -CL 모델은 입력하는 생태학적 특성치는 다랑어 종에 따라 다르게 입력이 되나, 대부분 다랑어 종에 대한 자원평가의 추정 과정은 동일하게 사용되고 있다. 그러나 CCSBT에서 사용되는 자원평가 추정 과정은 남방참다랑어 한 종에 대한 추정 방법이므로, 산란자원량을 추정하는 과정에서 추정되는 성숙연령에서 체중-재생산 관계에 대한 파라미터와 관련이 있는 것으로 보인다.

해역의 구분에 따른 민감도 분석에서 추정된 자원량을 비교하였을 때, 해역을 구분하지 않았을 때 (R1)의 자원량보다 해역을 3개로 구분하였을 때 (R3)의 자원량이 평균 15만톤 높게 추정되었다. 이것은 MULTIFAN-CL 모델에서는 어획량, 체장빈도 및 표지 자료는 각 해역별로 구분이 되어 사용되어지나, 성장계수, 연령별 성숙비 및 순간자연사망계수 등과 같은 생태학적 특성치들은 모든 해역에서 동일하다는 가정 하에 사용이 되므로, R1과 R3의 값의 차이는 이런 생태학적 입력 파라미터의 가정과 관련이 있는 것으로 보인다.

다.

순간자연사망계수 (M)에 대한 민감도 분석에서 추정된 자원량을 비교하였을 때, $M=0.140$ /년의 자원량이 $M=0.103$ /년의 자원량보다 평균 14만톤 높게 추정되었으며, 산란자원량의 경우에서도 평균 6만톤 높게 추정되었다. CCSBT에서 추정한 0.140/년은 1991년부터 1997년까지 표지 채포된 6천마리의 개체에 대한 생산율 및 표지 채포율을 통해 추정된 결과이다. 그러나 본 연구에서 M 을 추정하는데 사용된 Zhang and Megrey 방법은 생물 종을 부어 및 저어로 구분하여 추정을 하였으며, 성장계수 및 체장-체중 관계에 의한 파라미터 등도 고려되어 추정되었다. 따라서 CCSBT에서 M 값을 추정하는 방법과 비교하였을 때, Zhang and Megrey 방법이 보다 합리적인 방법이라 할 수 있다.

남방참다랑어 자원을 가입당생산량 및 가입당산란자원량 모델에 적용시켰을 때, 표층어업과 연승어업에서 어획하는 개체의 연령이 다르기 때문에, 동일한 어획개시연령 (t_c)을 적용시킬 수가 없었다. 따라서 본 연구에서는 표층어업과 연승어업을 구분하여 가입당생산량 및 가입당산란자원량 모델에 적용했다. 어획물곡선법에 의해 추정된 표층어업에서의 어획개시연령 (t_c)은 1.47세로 추정되었으며, MULTIFAN-CL 모델에서 추정된 표층어업의 순간어획사망계수 (F)는 0.22/년으로 추정되었다. 현재의 t_c 에서 순간어획사망계수를 높혀도 가입당생산량의 값은 감소하는 결과로 추정되었기 때문에, 현재의 F 에서는 t_c 를 6세로 높일 때 최대 가입당생산량값을 얻을 수 있다. 또한, 현재의 t_c 에서는 최대 가입당생산량을 얻기 위해서는 F 를 0.15/년 정도

에서 16.36kg이기 때문에, 현재 F 값인 0.22/년보다 낮출 필요가 있다. 그러나 F 값을 0.1/년으로 낮추어도 15.74kg의 가입당생산량을 얻기 때문에 최대 가입당생산량의 값과 차이가 많이 나지 않았다.

연승어업에서의 t_c 는 3.66세로 추정되었으며, MULTIFAN- CL 모델에서 추정된 연승어업의 순간어획사망계수 (F)는 0.24/년으로 추정되었다. 현재의 t_c 에서 F 를 높혀도 가입당생산량의 값은 감소하는 결과로 추정되었기 때문에, 현재의 F 에서는 t_c 를 6.5세로 높일 때 최대 가입당생산량값을 얻을 수 있다. 또한, 현재의 t_c 와 F 값에서 최대 가입당생산량인 19.80kg이었으나, F 를 0.15/년 정도로 낮추어도 가입당생산량이 19.06kg이기 때문에 최대 가입당생산량의 값과 차이가 많이 나지 않았다.

가입당산란자원량 모델을 이용하여 생물학적 관리기준점인 $F_{40\%}$ 에 의해 추정된 ABC는 5,375톤으로 2007년부터 변경되는 CCSBT의 TAC 쿼터량인 11,530톤의 절반수준으로 추정되었다. CCSBT에서는 일본 연승어업자료만을 사용하여 남방참다랑어의 TAC 쿼터량 산정을 하기 때문에 1970년대 후반부터 크게 증대되어 남방참다랑어 어획량 중 40% 이상을 차지하고 있는 표층 어업을 고려하지 않기 때문에 CCSBT의 TAC 쿼터량이 과대추정 되어진 것으로 보여진다. 그로 인해 10년 넘게 자원관리를 하고 있음에도 자원량은 매우 낮은 상태를 나타내고 있으며, 회복 될 기미를 보이고 있지도 않다. 여기에는 또한 최근 CCSBT 회의에서 밝혀진 일본의 불법적인 과도어획도 문제가 되었다. 일본의 TAC 할당량이 6천톤임에도 불구하고, 지난 20년간 1만 2천톤에서 2만톤 가량을 더 어획하여 국제적인 비난을 사기도 했었다. 따라서

TAC 쿼터량 산정에 있어서 표층어업자료의 포함과 일본의 불법적인 과도어획량을 모두 고려한다면 현재의 TAC 쿼터량보다 더 낮출 필요가 있다고 보여진다.

일반적으로 MULTIFAN-CL 모델과 같은 연령구조 모델은 연령에 따라 파라미터들을 추정하기 때문에 정확한 생태학적 입력 파라미터 값들을 요하게 된다. 만약 입력 파라미터 값이 잘못 추정되었을 경우, 도출되는 결과 역시 잘못 추정되므로, 파라미터 추정에 신중을 기해야 할 필요성이 있다.



요 약

남방참다랑어는 다랑어류 중에서도 생물학적으로나 경제학적으로 중요한 종중의 하나이다. 1961년 8만 5천톤으로 가장 높은 어획량을 나타낸 이후, 지속적으로 감소추세를 나타내고 있다. 최근의 연구에서는 가입량 및 산란자원량의 수준도 크게 감소하고 있는 경향을 나타냈다. 본 연구에서는 연령구조 모델인 MULTIFAN-CL 모델을 사용하여 남방참다랑어의 자원평가를 하였다 (Fournier et al., 1998). 본 연구에서는 3개의 해역 및 5개의 어업에 따라 1965년에서 2004년까지의 어획량, 노력량, 체장빈도 및 표지 자료를 분기별로 나누어 사용하였다. 순간자연사망계수 (M)은 CCSBT에서 사용되는 0.14/년 대신에 Zhang and Megrey 방법에 의해 추정된 0.103/년을 사용하였다. 본 연구에서 남방참다랑어 회유 및 파라미터 추정에 있어서 불확실성에 대한 자원변동을 알아보고자, 회유 및 순간자연사망계수에 대한 민감도 분석을 하였다. 1965년 이후, 남방참다랑어의 자원량 및 가입량은 뚜렷이 감소하고 있는 경향을 나타냈다. 생물학적 기준점에 의해 추정된 ABC는 5,375톤으로 추정되었다.

사 사

저의 미흡한 논문이 작은 결실을 맺기까지 많이 부족한 저를 끊임없는 애정과 관심으로 가르침을 주신 장창익 교수님께 깊은 존경과 감사의 마음을 드립니다. 바쁘신 와중에서도 많은 조언과 관심을 가져주신 문대연 박사님께 깊은 감사의 마음을 드리며, 논문의 시작부터 끝까지 기틀을 잡아 주시고, 많은 조언을 해 주신 이재봉 박사님께 깊은 감사의 마음을 드립니다.

여러모로 부족한 저에게 많은 격려와 관심을 가져주신 NOAA NMFS의 J. Ianelli 박사님과 SPC의 J. Hampton 박사님, 일본 원양수산연구소의 H. Kurota 박사님, CSIRO의 M. Basson 박사님과 D. Kolody 박사님께 깊은 감사의 마음을 드립니다.

언제나 관심을 가져주시고, 따뜻한 격려를 해주신 국립수산과학원의 제주도수산연구소 최영민 연구관님, 서해수산연구소의 손명호 연구사님, 남해수산연구소의 이선길 연구사님, 서영일 연구사님, 동해수산연구소의 이성일 연구사님, 윤상철 연구사님, 한국연안생태연구소의 이만우 선배님께 감사의 마음을 드리며, 고래연구소의 박경준 선배님과 송경준 선배님께도 감사의 마음을 드립니다. 또한 아낌없는 관심과 격려를 아끼지 않은 수산자원학 실험실의 나종현, 신영재, 이종희 선배님과 박희원 동기님과 실험실의 후배님들께도 감사의 마음을 드립니다.

제가 어렵거나 힘들 때 자신의 일처럼 걱정하고 용기를 북돋아 주신 백명선 언니 그리고 내 친구 류정윤 군에게도 감사를 드립니다.

어릴 때부터 항상 저를 물심양면으로 도와주고 지금까지 버틸 수 있게 해준 저의 정신적 지주 이성은 양과 그녀의 배기사인 배신한 군에게도 깊은 감사의 글을 전합니다.

항상 부족하고 못난 저를 위해 고생하시는 부모님께 사랑과 감사의 마음을 올립니다. 못난 자식을 세상에서 제일 잘났다고 믿으시고, 가족을 위해 너무 많은 고생을 하신 우리 어머니 강금자 여사님께 사랑과 말로는 표현할 수 없는 존경과 감사를 드립니다. 더욱 열심히 해서 부모님께 진정으로 효도하는 자식이 되도록 노력하겠습니다. 늘 “잠 좀 자라!”를 외치면서 튼튼한 동생을 세상에서 가장 연약한 줄 알고 언제나 걱정하는 우리 오빠 권유진 군에게 감사의 마음을 전하며, 이제 걱정을 안해도 된다는 말을 전하고 싶습니다. 많이 부족하고 미흡한 논문이지만, 이 작은 결실이 제 논문에 도움을 주신 많은 분들께 조금이나마 보답이 되었으면 하는 바램입니다.

참고문헌

- An. D.H. 2001. Tuna abundance in relation to oceanic conditions in the Western Central Pacific Ocean. Ph. D. Dissertation. Pukyong National University.
- Butterworth, D.S., J.N. Ianelli and R. Hilborn. 2003. A statistical model for stock assessment of southern bluefin tuna with temporal changes in selectivity. *African Journal Marine Sciences*, 25, 331-361.
- CCSBT (Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna). 2000. Report of the Special Meeting, Canberra, Australia.
- CCSBT (Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna). 2001. Report of the Second Meeting of the Stock Assessment Group, Tokyo, Japan.
- CCSBT (Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna). 2005. Report of the Tenth Meeting of the Scientific Committee, Narita, Japan.
- CCSBT (Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna). 2006. Report of the Seventh Meeting of the Stock Assessment Group,

Tokyo, Japan.

FAO. 1997. Review of the state of world fishery resources. Marine Fisheries.

Fournier, D.A., J.R. Sibert, J. Majkowski and J. Hampton. 1990. MULTIFAN a likelihood-based for estimating growth parameters and age composition from multiple length frequency data sets illustrated using data for southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*). Can. J. Fish. Aquat Sci., 47, 301-317.

Fournier, D.A., J. Hampton and J.R. Sibert. 1998. MULTIFAN-CL: a length-based age-structured population model for fisheries stock assessment, with application to South Pacific albacore (*Thunnus alalunga*). Can. J. Fish. Aquat Sci., 55, 2105-2116.

Hampton, J. 2002. Stock assessment of skipjack tuna in the western and central Pacific Ocean. 15th Standing Committee on Tuna and Billfish Working Paper SKJ-1.

Hampton, J. and D.A. Fournier. 2001. A spatially disaggregated, length-based, age-structured population model of yellowfin tuna

(*Thunnus albacares*) in the western and central Pacific Ocean. Mar. Freshwater Res., 52, 937-963.

Hampton, J., P. Kleiber, A. Langley, Y. Takeuchi and M. Ichinokawa. 2005. Stock assessment of bigeye tuna in the western and central Pacific Ocean. 1st Meeting of the Scientific Committee of the Western and Central Pacific Fisheries Commission SA WP-2.

Hampton, J., A. Langley and P. Kleiber. 2006a. Stock Assessment of Bigeye Tuna in the Western and Central Pacific Ocean, Including an Analysis of Management Options. Manila, Philippines.

Hampton, J., A. Langley and P. Kleiber. 2006b. Stock Assessment of Yellowfin Tuna in the Western and Central Pacific Ocean, Including an Analysis of Management Options. Manila, Philippines.

Hoyle, S.D. and M.N. Maunder. 2005. Status of Yellowfin Tuna in the Eastern Pacific Ocean in 2004 and outlook for 2005. 3-102.

IATTC (Inter-American Tropical Tuna Commission). 2000. Status of Albacore Tuna in the Pacific Ocean.

IATTC (Inter-American Tropical Tuna Commission). 2005. Introduction of a statistical age-structured model used for southern bluefin tuna in CCSBT, California, USA.

ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2004. 2003 ICCAT Atlantic Yellowfin Tuna Stock Assessment Session. 56(2), 443-527.

ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2005. Report of the 2004 ICCAT Bigeye Tuna Stock Assessment Session. 58(1), 1-110.

ICCAT (International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas). 2006. Report for biennial period, 2004-05 Part II English version SCRS. 2, 120-127.

ISC (International Scientific Committee for Tuna and Tuna-like species in the North Pacific Ocean). 2004. Report of the 3rd ISC Pacific Bluefin Tuna Working Group. Honolulu, USA.

Kleiber, P., J. Hampton and D.A., Fournier. 2006. MULTIFAN-CL User's

Guide, 123pp.

Langley, A., M. Ogura and J. Hampton. 2003. Stock assessment of skipjack tuna in the western and central Pacific Ocean. SCTB16 Working Paper.

Langley, A.D. and J. Hampton. 2006. An Update of the Stock Assessment for South Pacific Albacore Including an Investigation of the Sensitivity to key Biological Parameters Included in the Model. WCPFC-SC2.

Maunder, M.N. and S.J. Harley. 2004. Status of Skipjack Tuna in the Eastern Pacific Ocean in 2003 and outlook for 2004. 109-167.

Maunder, M.N. and S.J. Harley. 2005. Status of Bigeye Tuna in the Eastern Pacific Ocean in 2004 and outlook for 2005. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. Stock Asses. Rep. 3: 103-206.

McAllister, M.K. and J.N. Ianelli. 1997. Bayesian stock assessment using catch-age data and the sampling-importance resampling algorithm. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 54: 284-300.

- Punt, A.E. and R. Hilborn. 1997. Fisheries stock assessment and decision analysis: the Bayesian approach. *Rev. Fish Biol. Fish.* 7: 35-63.
- Quinn II T.J. and R.B. Deriso. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*. Oxford Univ. Press, New York, 542pp.
- Zhang C.I. and J.B. Lee. 2001. Stock assessment and management implications of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) in Korean waters, based on the relationships between recruitment and the ocean environment. *Progress in Oceanography* 49: 513-537.
- Zhang C.I. and B.A. Megrey. 2006. A revised Alverson and Carney model for estimating the instantaneous rate of natural mortality. *Trans Amer. Fish. Soc.* 135(3).