

위성전자표지와 해양환경자료를 이용한 방어(*Seriola quinqueradiata*) 이동경로 추적 연구

김창신* · 양지관¹ · 강수진¹ · 이승종² · 강수경²

국립수산과학원 연근해자원과, ¹(주)전략해양, ²국립수산과학원 수산자원연구센터

Tracking of Yellowtail *Seriola quinqueradiata* Migration Using Pop-up Satellite Archival Tag (PSAT) and Oceanic Environments Data

Changsin Kim*, Jigwan Yang¹, Sujin Kang¹, Seung-Jong Lee² and Sukyung Kang²

Fisheries Resources Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

¹Ocean Research and Strategy Corporation, Seoul 08588, Korea

²Fisheries Resources Research Center, National Institute of Fisheries Science, Tongyeong 53064, Korea

Yellowtail *Seriola quinqueradiata* tagged with a Pop-up Satellite Archival Tag (PSAT) was released off the coast of near the Moseulpo, Jeju Island and the ecological data during about 40 days was obtained. However, it is difficult to determine the spatial location of underwater ecological data. To improve the accuracy of estimating the Yellowtail migration route using temperature, suitable background field of the oceanic environment data was evaluated and used for input data. After developing of the tracking algorithm for migration route estimation, three experiment cases were estimated with ecological data among the surface layer, the mixed layer, and the whole water column. All tracking experiments move from western to eastern Jeju Island. Additionally, tracking experiment using 3D ocean numerical model reveal that it is possible to estimate the migration route using the fish ecological data of the entire water column. Therefore, using a large number of ecological data and a high-accuracy ocean numerical model to estimate the migration route seems to be a way to increase the accuracy of the tracking experiment. Moreover, the tracking algorithm of this study can be applied to small pelagic fishery using small archival electronic tags to track the migration route.

Keywords: PSAT, Migration route, Tracking algorithm, Yellowtail, *Seriola quinqueradiata*

서 론

해양동물의 표지방류에 사용되는 표지는 크게 재래식표지, 전자식표지, 음향송수신 표지로 나뉘며, 대형 해양동물 및 개체의 크기가 큰 어류의 경우 인공위성과 결합된 전자식표지의 활용도가 높다. 초기 전자식표지는 멸종위기종이나 좌초된 해양동물을 구조하고 방류 시 표지를 부착하여 분포와 이동에 관한 연구로, 주로 물범, 바다사자, 돌고래, 조류, 바다거북 등에 적용하였다(Moon et al., 2009). 최근에는 상괭이에 위성추적표지(SPOT-265A; Wildlife Computers, Redmond, WA, USA)를 부착, 방류 이후 전송된 위치와 인공위성 해양표층수온(sea

surface temperature, SST)자료를 함께 분석한 생태특성 연구가 진행되었다(Park et al., 2018b). 또한, 남극해에서는 물개에 위성전자표지를 부착하여 생태특성과 해양환경자료를 수집하고 있다(Mallett et al., 2018; Boehme and Rosso, 2021). 위성전자표지는 수중에서 위성과 교신이 되지 않아 위치 파악에 용이하지 않으므로 초기에는 표층에 노출되는 해양동물에 활용되었으나, 현재는 조도를 이용하여 간접적으로 위치를 추정하는 기술이 개발되어 어류에도 적용하였다(Patterson and Hartmann, 2011). 특히 어류에는 자료 회수율이 높은 자동분리형 위성전자표지(pop-up satellite archival tags, PSAT)를 많이 활용하고 있다(Galuardi and Lutcavage, 2012; Chittenden et al., 2013).

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 720. 2284 Fax: +82. 51. 720. 2277

E-mail address: changsin@korea.kr



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

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0787>

Korean J Fish Aquat Sci 54(5), 787-797, October 2021

Received 28 June 2021; Revised 21 July 2021; Accepted 6 September 2021

저자 직위: 김창신(연구사), 양지관(이사), 강수진(과장), 이승종(연구관), 강수경(연구관)

Oh and Jeong (2021)은 약 10 kg되는 방어(*Seriola quinqueradiata*)에 PSAT를 부착하여 생리·생태 변화를 관찰하였으며, 연근해 어종 중 대형부어류에 PSAT를 적용 가능성을 보였다. 방어는 농어목 전갱이과에 속하는 어류로, 한반도 주변해역과 일본, 하와이 등 태평양에 주로 분포하며, 경제적 가치가 높고 수요가 지속적으로 증가함에 따라, 효율적인 자원관리 및 보전이 필요한 어종이다(Jeong et al., 2016). 성어는 전장 1 m 이상 성장하며, 주 산란기는 2-6월이고, 산란장은 주로 동중국해 북부해역에서 한국의 남해와 일본 규슈 서부 연안에 걸쳐서 형성된다(Yamamoto et al., 2007; Morita et al., 2012).

기존 연구에서는 한반도 주변 해역에서 삼치, 방어와 같은 부어류를 대상으로 어획분포와 연안 어획 특성을 이용하여 회유 특성을 정리하고, 기초 생태정보와 어획변동과의 관련성을 살펴보았다(Kim et al., 2002; Kim et al., 2016). 본 연구에서는 방어 이동경로 추적 연구를 위해 PSAT를 부착하여, 획득한 수심과 수온 등 생태특성자료를 바탕으로 어류의 회유경로를 파악하고자 한다. 하지만, 주로 수중에서 생활하는 어류로부터 수집한 생태특성자료는 정확한 위치를 파악하기 어렵기 때문에, 생태특성과 해양환경자료를 동시에 활용하는 이동경로 추적기술이 필요하다. 한반도 주변해역의 해양환경 특성과 대상어종의 생태특성이 상이하기 때문에 대양에서 적용하는 방법을 바로 적용하기에는 어려움이 있다. 고도 회유성 어류의 회유경로 분석에 저해상도 인공위성자료를 이용하였으며, 저해상도 자료를 한반도 주변해역에 적용할 경우에는 해양환경 특성을 제대로 반영하지 못하며 실제 어류의 위치 파악에 많은 오차를 포함하게 된다. 이러한 이유로 부어류 이동경로 추산 알고리즘을 구축하고 이동경로를 추적할 때 한반도 주변해역이 잘 재현된 인공위성자료와 수치모델결과를 찾아 배경장으로 이용하고자 한다.

재료 및 방법

위성전자표지

어류 이동경로 추적에 사용된 PSAT는 Wildlife Computers에서 제조한 장비 중의 하나인 miniPAT으로 주로 해양생물의 이동 및 분포를 추적하는데 사용된다(Galuardi and Lutcavage, 2012; Chittenden et al., 2013). miniPAT은 해양생물에 부착하여 방류하며, 미리 설정한 시간 등 조건에 도달하면 연결고리 안

전장치가 해제, 어체에서 이탈하여 표층으로 부상한다. 그 후 Argos 위성과 송수신하여 수층에서 관측된 수심과 수온, 조도 등 어류생태정보와 현재 위치정보를 전송한다(Table 1). 회유경로 추적을 위해 2018년 12월 20일 10시(Korean standard time, KST) 경 대상어종인 방어(전장 92.1 cm, 가랑이체장 82.9 cm, 체중 8.9 kg) 등지느러미 시작점 아래 등 부위에 위성전자표지(PSAT, S/N: 65446)를 부착하고 가두리에 안정시킨 후, 22일 14시 경 제주 남서부에 위치한 모슬포항 외해에서 방류하였다.

해양관측자료

어류 이동경로 추적의 입력자료로 사용되는 인공위성자료와 해양수치모델결과와의 검증을 위하여 부이자료와 현장관측 수온자료를 사용하였다. 해양부이자료는 기상청 (KMA, 2021) 기상자료개방포털에서 제공하는 17개 정점(인천, 덕적도, 외연도, 부안, 칠발도, 신안, 추자도, 마라도, 서귀포, 거문도, 통영, 거제도, 울산, 포항, 울진, 동해, 울릉도)의 표층 수온자료를 이용하였다. 현장관측자료는 국립수산물과학원(National Institute of Fisheries Science, NIFS) 한국해양자료센터에서 제공하는 정선해양관측자료(NSO, 2021) 중에서 CTD (conductivity, temperature, depth)로 관측된 표준 수심 수온자료를 이용하였다.

인공위성 자료

배경장으로 검토한 해양위성자료들은 현장관측자료를 자료동화하여 전 지구 영역으로 생산된 L4 (processing level 4) 자료이다(Table 2). OISST (optimum interpolation sea surface temperature v2.1)는 위성, 선박, 부이 및 Argo 등 여러 관측자료를 결합하여 최적 보간법(optimal interpolation, OI) 통해 생성된다. REMSS (remote sensing systems)는 국제 해수면 온도 생산자 그룹(group for high resolution sea surface temperature, GHRSS)에서 제공하는 자료 중 하나로 NASA (national

Table 1. Technical specifications of miniPAT

Dimensions/Weight (in air)	124 mm (length)×38 mm (diameter)/60 g
Light	10 ⁻² to 10 ⁻¹⁰ W/cm ² at 440 nm
Pressure	Range, 1700 m; Resolution, 0.5 m
Temperature	Range, -20 to 50°C; Resolution, 0.05°
Other sensors	Acceleration, Wet/Dry

Table 2. Satellite products of global gridded sea surface temperature

Satellite	Institution	Spatial/temporal Resolution	Period	Reference
OISST	NOAA, USA	0.25°/ daily	1981. 09-present	Reynolds et al. (2007)
REMSS	NASA, USA	0.09°/ daily	2002. 06-present	Remote sensing systems (2017)
OSITA	Met Office, UK	0.05°/ daily	2006. 04-present	Donlon et al. (2012)

OISST, optimum interpolation sea surface temperature; REMSS, remote sensing systems; OSITA, operational sea surface temperature and sea ice analysis.

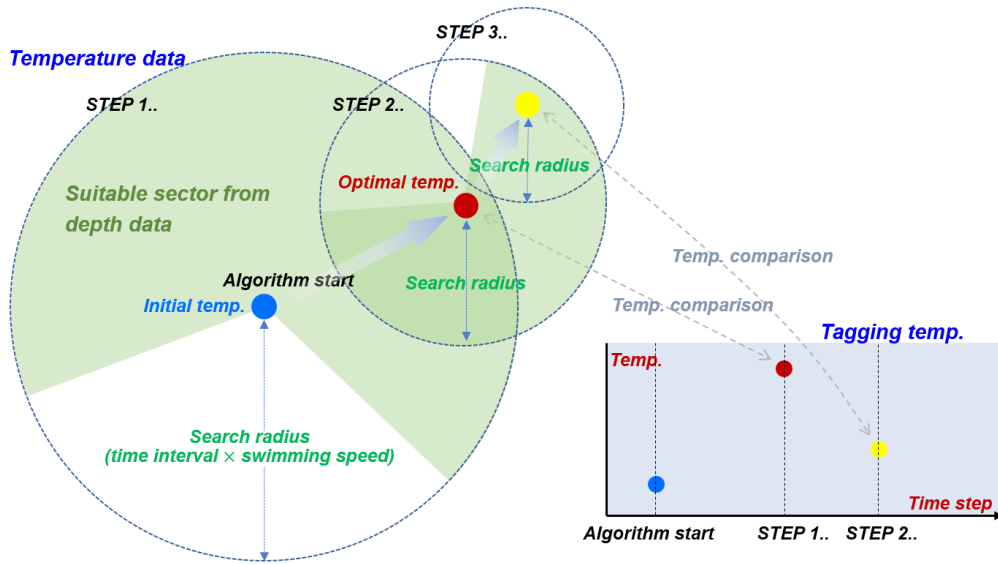


Fig. 1. Tracking algorithm of fishery migration route.

aeronautics and space administration)에서 OI기법을 적용하였으며, 다른 위성자료와 다르게 부이나 선박 등의 관측자료는 사용하지 않으며, 가시광선, 적외선 및 마이크로파 자료를 사용하여 합성하였다. OSTIA (operational sea surface temperature and sea ice analysis)도 GHRSSST에서 제공하는 자료 중 하나이며 영국기상청에서 가시광선, 적외선, 마이크로파, 표류부이 및 고정부이 관측자료를 OI기법을 통해 합성하였다. 마이크로파를 이용하면 고해상도 관측, 적외선은 준연안관측이 가능하다.

해양수치모델 결과

일반적으로 고해상도 모델의 경우 해류의 경압 및 순압 성분을 개선하여 보다 현실적인 밀도와 해류장을 재현하며, 지형 표현이 개선되어 경압성과 바닥지형간의 상호작용을 보다 잘 재현한다(Guo et al., 2003). 한반도 주변해역은 외해에서 연안으로 들어올수록, 급격한 수심변화와 복잡한 해안선의 특징을 보이므로 이를 잘 재현할 수 있는 고해상도 수치모델인 HYCOM (hybrid coordinate ocean model)을 사용하였다. HYCOM은 미국에서 구축한 해양 수치 예측 시스템으로 기존 모델의 단점인 연직 등밀도 좌표계를 보완하기 위해, 성층화가 잘 되어 있는 해역은 등밀도 좌표계, 성층화되지 않은 바다에서는 Z-좌표계, 매우 얇은 바다에서는 σ -좌표계를 동시에 사용하는 하이브리드 수직격자를 사용한다. 모델결과는 전 지구 규모로 공간 해상도는 $1/12^\circ$ 간격이며, 매일 4일간의 예측결과를 3시간 간격으로 제공한다.

이동경로 추적 알고리즘 및 적용

개발된 알고리즘은 위성 SST와 3차원 수치모델의 수온 결과를 배경장으로 사용, PSAT에서 관측한 수온과 비교하여 가장

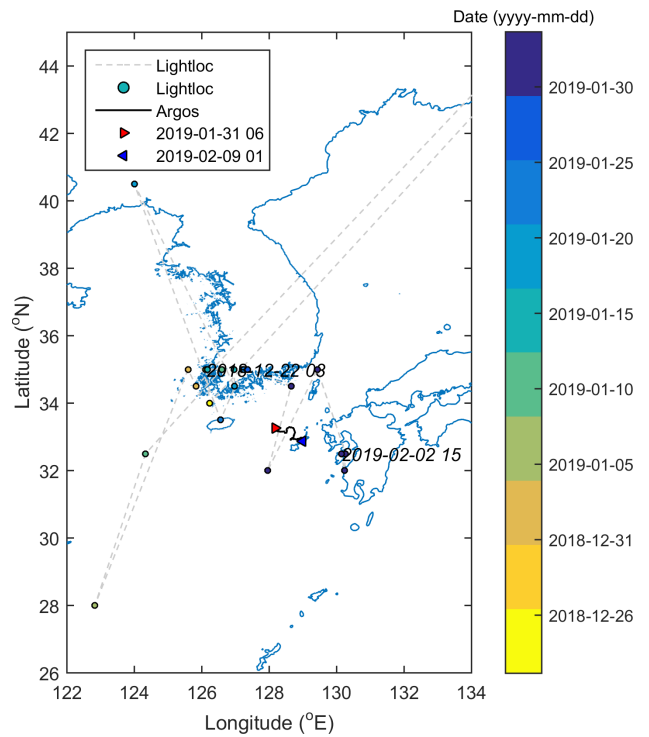


Fig. 2. Estimated result of light location (lightloc) and pop-up location (▶) by PSAT (pop-up satellite archival tags).

유사한 배경수온의 위치를 추정해 가는 방법으로 어류 이동경로를 추적하였다. 경로 중 최초 위치는 방어를 방류한 모슬포항 주변이며, 종료 위치는 PSAT가 어체로부터 탈락 후 표층으로 부상해 Argos 위성과 교신된 최초 위치이다. 생태수온자료

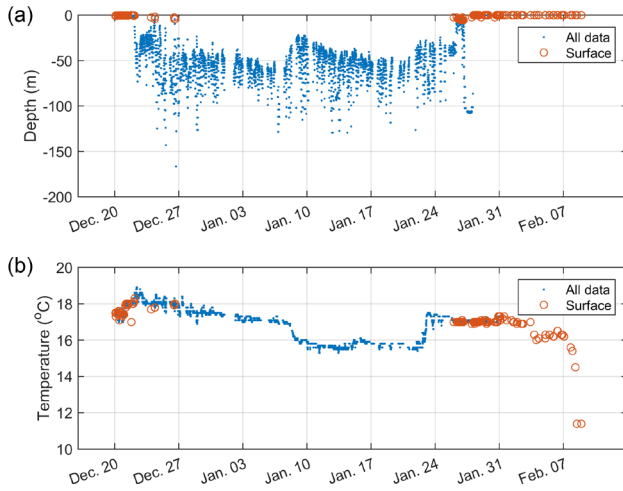


Fig. 3. Timeseries of ecological data with (a) depth and (b) temperature by PSAT (pop-up satellite archival tags).

간격(time step)마다 유영속도가 반영된 유효 반경을 설정하고, 반경 내에서 관측한 수온과 수심자료를 배경수온(위성자료 또는 모델결과)과 3차원 수심자료와 비교하여 예상 위치를 추정해 나가는 방식으로 이동경로를 계산하였다(Fig. 1). 위치 추정 시 배경수심자료(Seo, 2008; KorBathy30)를 이용하여 어류생태수심보다 수심이 얇은 해역은 이동경로 추적 범위에서 제외하였다. 수온을 기반으로 한 위치 추정 시에는 관측 수온과의 편차가 가장 작은 수온을 기준으로 위치를 추적하고, 조도를 이용한 위치 추정은 이동경로 추적 시 조도추정위치 방향의 유효 반경에 가중치를 반영하였다. 알고리즘에 반영되는 방어의 유영속도에 대한 정보 부족으로 같은 속인 부시리(*Seriola lalandi*)의 유영속도를 참고하였다(Clark and Seymour, 2006; Palstra et al., 2015). 연구결과 어체의 크기가 클수록 유영속도가 빨라짐을 확인하였으며, 569 mm BL의 경우 유영속도는 약 1.0 ms^{-1} ($U=1.7 \text{ BL s}^{-1}$)로 나타났다. 위 실험 개체보다 체장이 긴 방어에 PSAT를 부착하여 방류하였지만, 최대 이동 가능한 거리를 반영하여 방어의 유영속도는 1.0 ms^{-1} 로 가정하였다.

관측된 조도를 이용한 위치 추정은 Wildlife Computers에서 제공하는 위치추정 소프트웨어(global position estimator)를 사용하였다. 조도추정위치(light location)는 파도의 작용 및 탁도

Table 3. Analysis data combination of PSAT and oceanic background field for 3 experiments

Experiment	PSAT data	Oceanic data	Time step
EXP-S1	upper 5 m	OSTIA	irregular
EXP-S2	upper 30 m	OSTIA	daily
EXP-M	All depth	HYCOM	3 hourly

PSAT, pop-up satellite archival tags; OSTIA, operational sea surface temperature and sea ice analysis; HYCOM, hybrid coordinate ocean model.

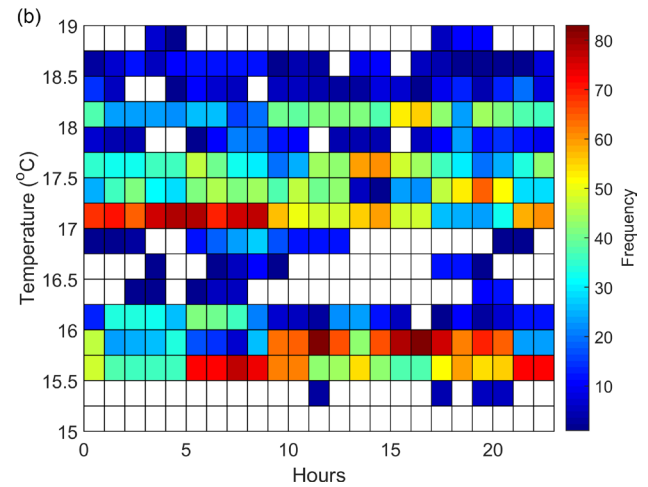
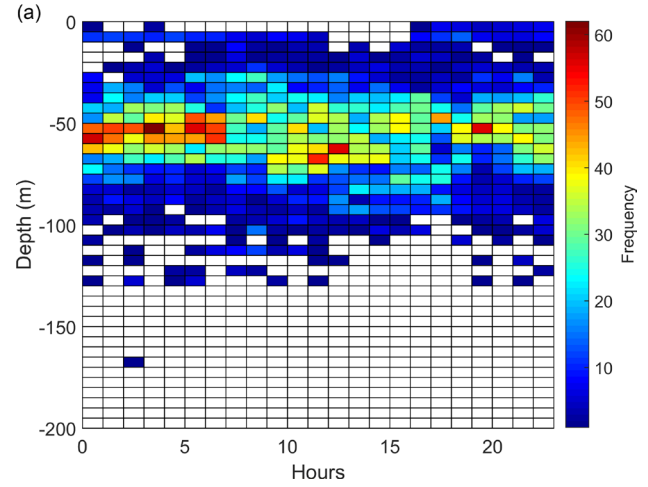


Fig. 4. Frequency heatmap of yellowtail *Seriola quinqueradiata* ecological data with (a) depth and (b) temperature.

와 같은 해양환경에 영향을 받는다(Hill and Braun, 2001; Hoolian, 2005). 조도추정위치는 많은 불확실성을 내포하고 있으므로 회유경로 추적 시 수온자료를 우선시하는 간접지표로 활용하였으며, 방어 서식 수온과 이동거리 등을 고려하여 한반도 남부와 제주해역 주변, 동중국해 북부해역(30-36°N) 사이의 조도추정위치 자료만 어류회유경로 분석에 이용하였다(Fig. 2).

생태특성자료가 관측된 약 40일간의 방어 이동경로를 추적하기 위하여 앞서 검토한 해양환경자료를 배경장으로 사용하였으며, 세 가지 실험(EXP-S1, EXP-S2, EXP-M)의 조건을 비교하였다(Table 3). EXP-S1 실험은 어류생태자료 중 표층수온자료와 인공위성 SST를 분석하였다. 5 m 이하의 표층 생태수온자료만을 이용하여 추정하였으므로 관측생태자료의 부족으로 전체 기간 중 초반과 후반부를 주로 사용하였으며 시간 간격도 불규칙적으로 추정하였다. EXP-S2 실험은 혼합층을 고려하여 30 m 수층까지 생태수온자료를 인공위성 SST를 분석하였

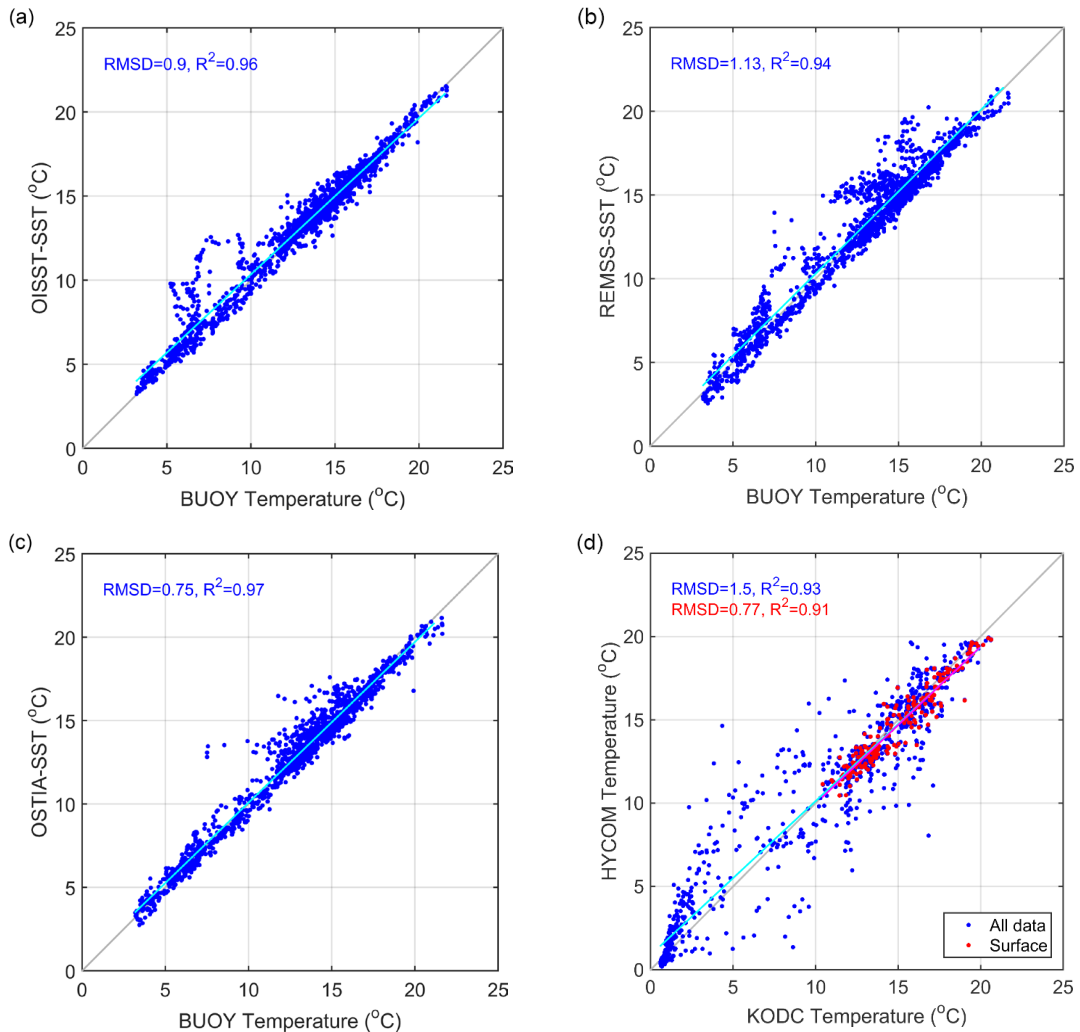


Fig. 5. Comparisons between observation and oceanic environment data. a, KMA buoy and OSTIA SST; b, KMA buoy and REMSS SST; c, KMA buoy and OSTIA SST; d, KODC and HYCOM; KMA, Korea meteorological administration; OSTIA, operational sea surface temperature and sea ice analysis; REMSS SST, remote sensing systems sea surface temperature; KODC, Korea oceanographic data center; HYCOM, hybrid coordinate ocean model.

다. EXP-S1 실험보다 많은 생태수온자료를 위치 추정에 활용할 수 있으며, 일일 간격인 위성자료와 분석을 용이하게 하기 위하여 혼합층 생태수온자료 역시 하루 간격으로 재구성하였다. EXP-M 실험은 모든 생태자료와 수치모델결과를 분석하였다. 수치모델결과를 배경장으로 이용하면 앞선 실험들과 달리 전층 생태수온자료를 활용할 수 있으므로, 모델결과가 제공되는 3시간 간격에 맞추어 방어의 위치와 서식 수온을 추정하였다.

결 과

생태자료 분석

방류시점인 2018년 12월 22일부터 이듬해 1월 31일까지

PSAT로 수집된 방어의 이동 수심과 변화를 Fig. 3에 나타냈다. 어체에서 분리된 PSAT는 부상하여 Argos 위성과 최초 통신 (Fig. 2, ▶) 이후 표층해류를 따라 약 10일간 이동하였으며 2월 9일 마지막 통신(Fig. 2, ◀)후 교신이 중단되었다.

해당 개체는 표층부터 수심 약 170 m까지 조사기간 전반에 걸쳐서 일주 수직 운동이 활발하게 나타났으나, 12월 27일부터 이듬해 1월 25일까지는 표층수온은 관측되지 않았다. 분포 수온대는 15-19°C로 나타났으며 주로 서식 적수온 범위 내에 분포하였다. 관측기간 동안 40-70 m 수층에서 높은 빈도를 보이므로 주서식 수층으로 추정된다(Fig. 4a). 새벽(0-7시)에는 50-60 m 수층에서 가장 높은 밀집도를 보이고, 주간(9-15시)에는 60-70 m 수층에서 높은 빈도를 보이고 있다. 시간대별 수

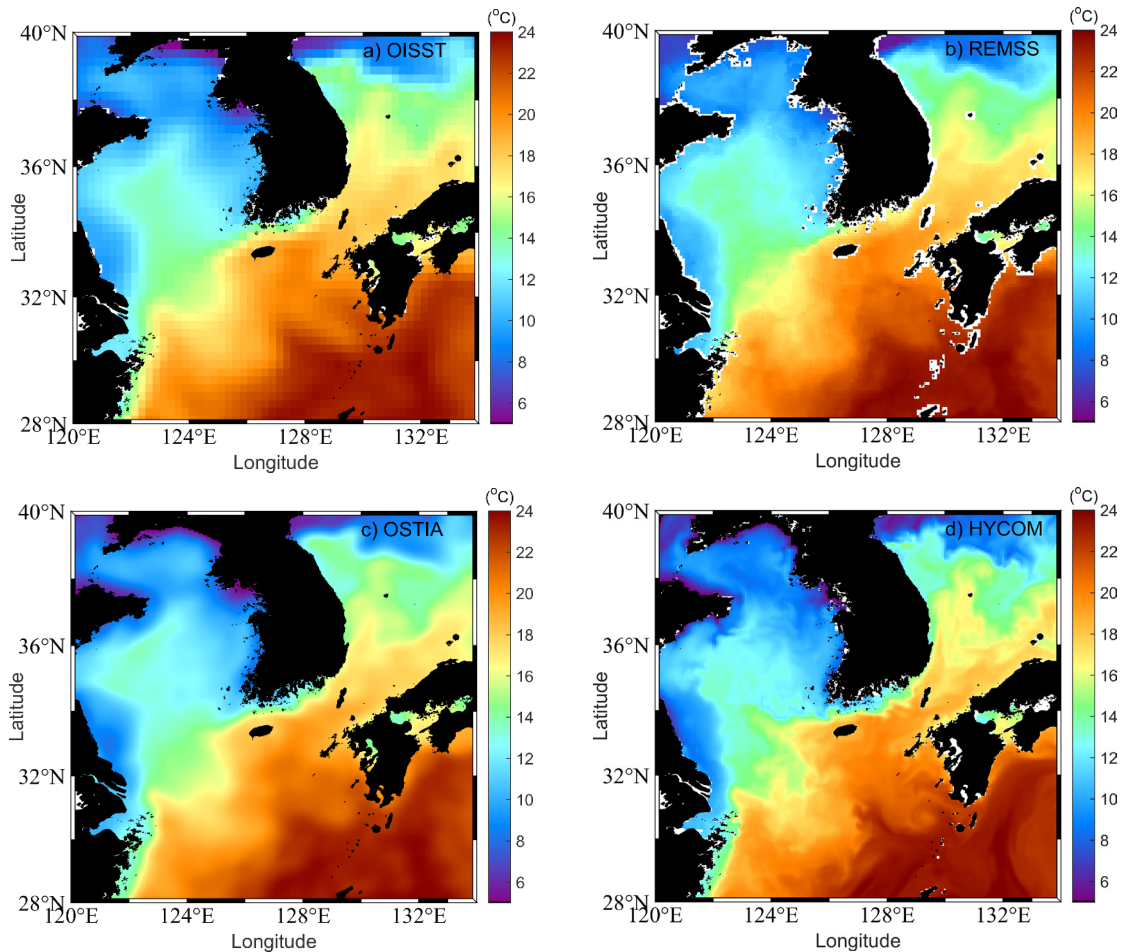


Fig. 6. Spatial distribution of the sea surface temperature among. a, OISST; b, REMSS; c, OSTIA; d, HYCOM. OISST, optimum interpolation sea surface temperature; REMSS, remote sensing systems; OSTIA, operational sea surface temperature and sea ice analysis; HYCOM, hybrid coordinate ocean model.

온의 빈도를 보면 17°C 이상과 $15.5\text{--}16^{\circ}\text{C}$ 의 두 가지 수온대로 나눌 수 있다. 17°C 이상 수온대에서 높은 빈도가 나타나는 시간은 주로 야간(특히 0-9시)이며, $15.5\text{--}16^{\circ}\text{C}$ 는 새벽부터 저녁까지 넓은 시간대를 보이지만 주간(11-17시)에 최대 빈도를 보인다(Fig. 4b).

한 개체의 수심생태자료만을 사용하여 분석하였기 때문에 야간과 주간의 주서식 수층의 명확한 구분은 힘들지만, 야간의 주서식 수층 집중도는 매우 높음을 알 수 있다. 또한 수심과 수온을 같이 비교하면 상대적으로 야간보다는 주간에 깊은 수심으로 수직 이동하는 것으로 보인다. 주간에는 야간보다 상대적으로 수온이 낮은 깊은 수층대를 선호한다는 것을 알 수 있다.

배경장 분석

세 가지 위성자료(OISST, REMSS, OSTIA)에 대해 각각 기상청의 해상기상부이의 정점에서 가장 가까운 위성자료를 추출한 후, 자료의 분산도를 나타내는 평균 제곱근 편차(root mean

square difference, RMSD)와 결정계수(coefficient of determination, R^2)을 산출하였다(Fig. 5a-5c). 분석에 사용한 위성자료 모두 결정계수 값이 0.94 이상으로 어류 이동경로를 추정하기 위한 겨울철 수온의 공간분포를 잘 설명하고 있었다. 세 가지 위성자료 중 RMSD가 가장 낮고 결정계수 값이 가장 높은 OSTIA가 부이관측자료와 가장 높은 정확도를 보인다 판단하여, OSTIA를 경로 분석의 배경장으로 사용하였다.

수치모델 결과의 비교 검증을 위해 2018년 12월 정선해양관측자료와 가장 가까운 관측시간, 관측정점 및 관측수심의 모델 결과를 추출하여, 관측자료와 모델결과의 RMSD 및 결정계수를 산출하였다(Fig. 5d). 표준 수심 별 NSO 관측수온자료와 HYCOM 모델결과를 비교한 결과 RMSD는 1.50로 나타났고, R^2 는 0.93 이상의 높은 상관관계를 나타냈다. 표층수온의 경우, 전 층 비교 보다 높은 정확도(RMSD=0.77, $R^2=0.91$)를 보여 어류 회유 경로 추정의 배경장으로 활용하였다.

방류시점인 2018년 12월 22일의 세 가지 인공위성 표층수온자료의 공간분포를 비교하였다(Fig. 6a-6c). OISST의 경우 OSTIA와 수온 분포가 유사하지만, 낮은 공간 해상도로 해상력이 떨어지고 육지와 인접한 연안해역의 재현성이 낮게 나타났다(Fig. 6a). REMSS의 경우 OISST보다 높은 해상도를 보이며 전선역 주변 미세구조가 셋 중에 가장 잘 재현되지만, 연안쪽의 자료는 가장 부재한 것으로 나타났다(Fig. 6b). OSTIA의 경우 고해상도 자료로 수온분포가 잘 재현되는 것으로 판단되며, 육지와 인접한 연안쪽의 자료도 잘 재현되고 있다(Fig. 6c). 또한, 위성 표층수온은 HYCOM 수치모델결과에 비하여 평활화가 많이 된 수온 분포를 보이는 반면, 수치모델결과는 전선역 등에서 수온 변동성이 크게 나타나며 해류에 의해 생성된 미세구조가 재현되었다(Fig. 6d). 전반적으로 위성 SST와 유사한 공간 수온 분포를 보이며 어류 회유경로 추정의 배경자료로 사용하기 적절한 것으로 판단된다.

모습포항에서 방류가 일어난 시기와 위치가 유사한 제주 남부해역의 314 정선관측자료와 수치모델결과를 비교하였다(Fig. 7). 현장관측자료에서는 겨울철 혼합이 강하게 나타나고 있다. 수치모델결과는 수심 75 m까지는 강한 혼합층이 재현되었으나, 75 m 보다 깊은 해역은 재현의 한계를 보인다.

이동경로 추적 실험

구축한 알고리즘을 이용하여 방어의 이동경로를 추정하였으며, 이동경로 추적에 사용된 수온과 추정된 위치의 배경장 수온을 같이 비교하였다(Fig. 8). EXP-S1의 경우 표층 생태수온자료와 추정위치수온은 최대 약 0.5°C의 차이를 보인다(Fig. 8a). EXP-S2의 경우 추적기간 중 1월 25일에 약 1.5°C의 차이를 보이는 것 이외에는 추정수온이 생태수온과 유사하게 추정되었다(Fig. 8b). EXP-M의 추정수온은 1월 중순과 2월 하순에 최대 약 2°C의 수온 오차를 보이고 있으며, 그 외 기간에는 전반적으로 추정수온이 관측생태수온을 따라 유사하게 추정되었다(Fig. 8c). 세 가지 실험 모두 방류 초기부터 1월 중순까지 추정수온은 생태수온과 높은 정확도를 보인다.

세 가지 방어 이동경로 추정실험은 모두 제주도 인근 해역 또는 서부해역에 머문 후 PSAT 부상 위치인 제주 동부해역으로 이동하였다(Fig. 9). 표층 생태수온자료와 위성 SST로 추정된 이동경로는 방류초기 제주 서부와 동부연안으로 이동, 추후 제주 북동쪽과 동쪽 근해로 이동하였다(EXP-S1; Fig. 9a). 혼합층 생태수온자료와 위성 SST로 추정된 이동경로는 방류초기 제주 서쪽의 제주난류 해역으로 이동, 1월 중순까지 머무르다 제주 남부로 이동, 1월 말에는 제주 동부로 이동하였다(EXP-S2; Fig. 9b). 전층 생태수온자료와 수치모델 결과로 추정된 이동경로는 위성 SST를 사용하여 추정한 이동경로의 특성을 모두 보인다(EXP-M; Fig. 9c).

표층생태자료만을 가지고 추정한 결과(EXP-S1)는 자료 부족으로 이동초기에 제주 서부와 동부연안으로 추정되었으나, 전

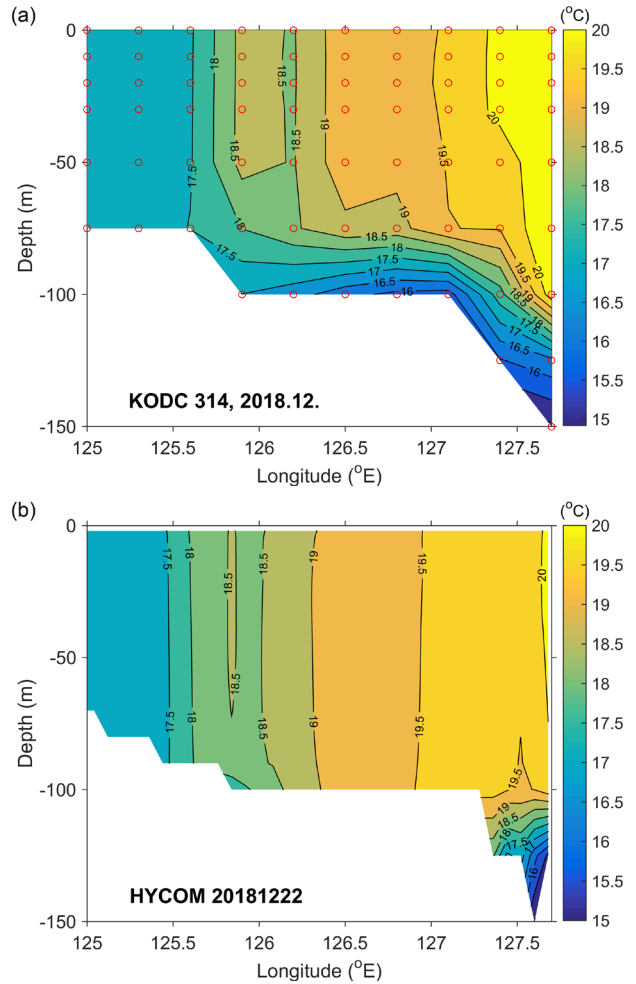


Fig. 7. Vertical temperature section of NIFS line 314 from (a) CTD observation (○) and (b) HYCOM model result in December 2018. NIFS, National Institute of Fisheries Science; CTD, conductivity, temperature, depth; HYCOM, hybrid coordinate ocean model.

층 수온을 활용함에 따라 입력자료의 증가로 초기 이동경로가 보다 자세히 재현 되었다. 이후 다시 제주 서쪽의 제주난류 해역으로 이동하여 1월 중순까지 머무르다가 하순에는 제주 동부로 이동한 것으로 추정되었다.

제주남부지역과 제주 동부지역은 대만난류-대만난류 시스템 (Isobe 1999; Teague et al., 2003) 영향으로 유속이 강하며 고온·고염의 성격을 띤다. 또한 제주남부에서 서부로 제주난류가 분지되어 제주해협까지 영향을 미치며, 이러한 양상은 Fig. 6과 같이 인공위성과 수치모델 모두 표층수온에서 볼 수 있다. 광범위하게 수괴가 일정한 지역으로 검색반경이내의 가까운 지역으로 어류의 이동경로를 찾게 되어, EXP-S1와 EXP-S2의 결과가 같은 배경장을 써도 다른 이동경로로 추정되었을 가능성이 높다. EXP-S1는 입력자료 부족으로 위성과 통신하여 위치정보

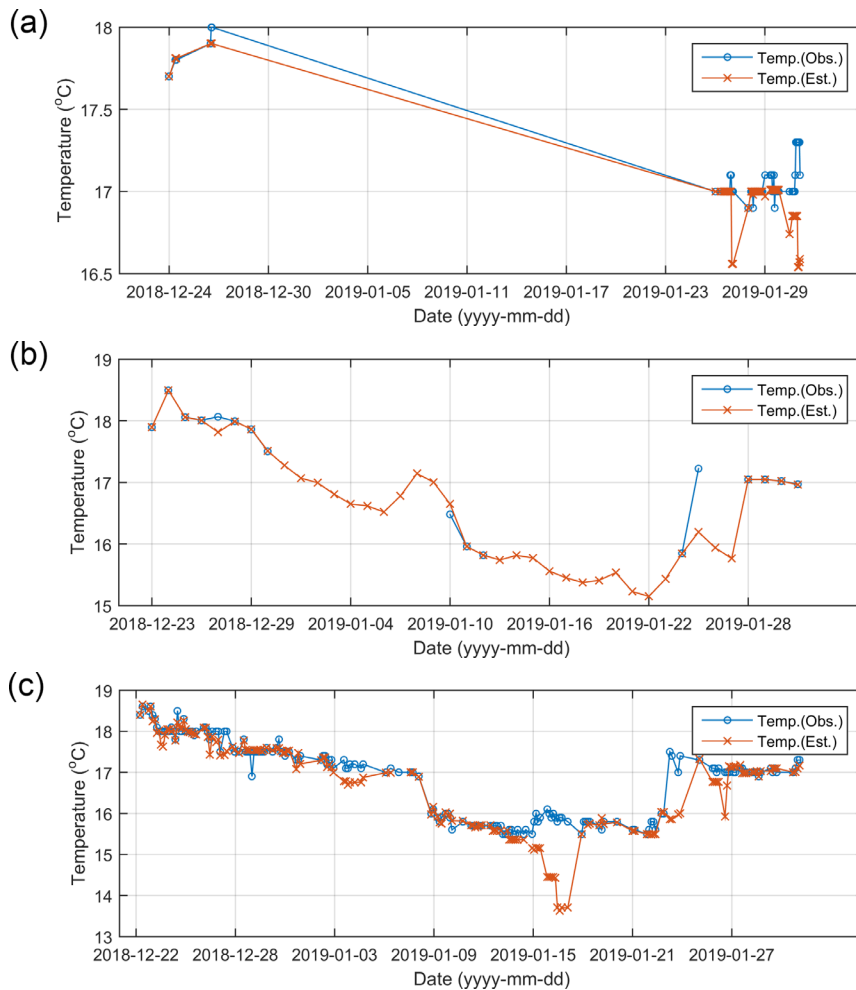


Fig. 8. Ecological temperature data and estimated temperature by fish migration route tracking among the (a) EXP-S1, (b) EXP-S2 and (c) EXP-M.

가 있는 제주주변해역과 PSAT가 부상한 지역에 집중적으로 나타났으며, EXP-S2는 혼합층 수온을 활용함에 따라 입력자료의 증가로 초반과 후반 이동경로가 보다 자세히 재현되었다. 세 가지 이동경로 추적 연구는 기존 어획량 기반 방어 회유경로(Kim et al., 2002; Kim et al., 2017) 범위 안에서 추정되었다.

고 찰

본 연구는 방어에 PSAT를 부착하여 직접 관측한 생태정보로부터 이동경로를 분석하였다. 이동경로 추적 정확도 향상을 위하여 어류생태특성과 해양환경자료를 동시에 파악하는 분석기법이 필요함에 따라, 한반도 주변해역에서 이동경로 추정에 배경장으로 쓰일 정확도 높은 환경자료를 찾고 회유경로를 잘 재현할 수 있는 알고리즘을 구축하였다. 이동경로 추적 알고리즘 구축 결과가 방어의 회유경로 추정 가능성을 보이며, 방어가겨

울철에 제주도 주변해역에서 남해동부지역 및 일본으로 이동함을 보였다. 또한 다양한 해양환경자료를 이용하여 한국 연근해 방어의 회유경로를 처음으로 추적하고 정도 높은 3차원 해양수치모델을 이용하면 방어의 이동경로 추적에 용이할 수 있음을 제시하였다.

하지만 이동경로를 추적함에 있어, 방어 한 개체의 결과만을 사용하여 전체 방어의 회유 경로를 알기 어려운 부분이 있다. 비록 한 개체가 과거 어획기반 회유경로 추정 범위에 포함되긴 하지만, 회유 해역을 보다 자세히 알기 위해서는 다수의 PSAT를 이용하여 보다 많은 생태특성자료 확보 방안을 마련하여야 한다. Musyl et al. (2011)의 연구결과에 따르면 PSAT의 자료 회수율은 79%이나, 그 중 82%는 조기 분리되었으며 18%만이 설정된 기간을 완수하는 것으로 보고하였다. 조기 분리의 원인으로 어획과 사망 등 다양한 이유가 있으나 부착 실패가 높은 요인으로 지목하였다. PSAT의 조기분리를 방지하고 자료회수율

을 증대하기 위해서는 적용 가능한 대상생물들의 최적 부착방 안뿐만 아니라 회복 및 유영에 미치는 영향에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

수온, 수심 및 조도 등 생태특성자료를 기존보다 장기간 다 획득할 수 있는 기술을 모색하여야 하며, 보다 많은 생태자료를 확보하여 분석하면 이동경로, 계절회유 추적 뿐만 아니라, 주야 수직이동, 주서식 수층과 수온대와 같은 생태특성에 대한 상세한 분석이 가능할 것으로 보인다.

방어는 기존 연구에서 제주도 주변해역에서 서해와 동해로 계절 회유하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2002; Kim et al., 2017). 그러나 본 연구는 겨울철에 국한된 이동경로 추적 연구 이기에, 추후 연구에서는 다양한 시기와 지역에서 많은 개체에 PSAT 부착하여 다수의 생태특성자료를 획득하면 수평과 수직 이동 및 서식지 분포와 분산, 계절이동에 대한 연구를 진행 할 수 있을 것이다. 또한 현재 획득한 생태관측자료의 한계로 정도 관리(quality control, QC)에 대한 연구가 부족하다. QC는 통계적 처리를 통해 일정한 신뢰범위 내에서 자료를 관리하며, 이 과정을 생태관측자료에 적용하여 정확도와 정밀도를 확보한 뒤 자료 분석이 요구된다.

본 연구에서는 표층 생태자료 관측이 부족한 경우 혼합층을 고려한 회유경로 추정이 가능함을 보였으며, 추후 연구에서는 계절별 지역별로 혼합층 깊이를 산정하여 이동경로를 추정 시 조건에 따라 차등 적용하는 방안이 필요 할 것이다.

EXP-M 추적결과 중1월 17일 전·후의 수온 추정은 최대 2°C 이상의 높은 수온 차이를 보인다(Fig. 8c). 이 시기의 생태특성 (15.5-16°C, 50-100 m)을 반영해야하는 모델결과를 이용한 추정반경내의 수온의 오차가 다른 기간에 비하여 크게 산정 되었다. 이는 이동경로 예측에 쓰인 생태특성자료는 관측 초반과 후반에만 표층으로 유영한 기록이 있어 자료 중반에 표층생태 수온의 부재와 조도의 낮은 정확도 이동경로 추적시 불확실성을 증대한 것으로 생각되며, 추가적으로 생태특성자료를 수집하여 분석이 요구된다. 또 다른 가능성 중 하나는 다른 이동경로 추적 실험들은 고려되지 않은 시기이기에 단정짓기는 어려우나, 제주 서부해역은 황해 중심부 방향으로 좁고 깊은 골이 존재하여 50-100 m 수심을 나타낼 수 있는 지역이므로 수온의 오차가 상대적으로 높지만 서식환경으로 추정된 것으로 생각된다. 따라서 수치모델 결과를 이용한 이동경로 추적실험은 가능성을 제시하였으나, 적합한 배경장과 추정반경 선정이 수반되어야 한다.

정확도 높은 배경장과 관측자료를 활용한 분석이 방어의 세부 이동경로를 재현할 수 있으므로, 관측자료와 정확도 높은 해양 수치모델 배경장을 같이 분석하여 이동경로를 추산하는 방안이 추후에 활용도가 높아 보인다. 그러나 현재 대부분의 해양수치모델의 결과는 대부분 표층 해양환경의 모사에 초점을 두고 있다. 혼합층 아래의 수온은 실제 관측값과 상이한 경우가 대다수로 현재 수치모델의 한계점이며, 본 연구의 관측자료와 모델

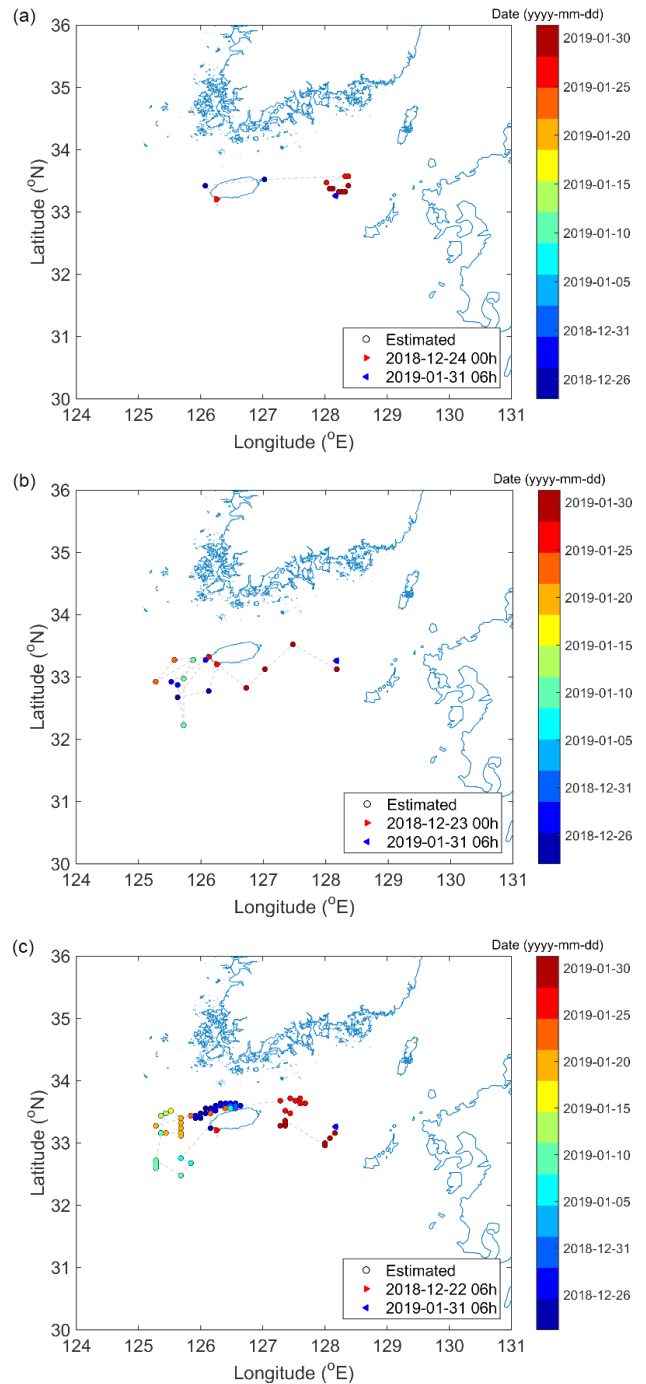


Fig. 9. Tracking of fish migration routes experiments among the (a) EXP-S1, (b) EXP-S2 and (c) EXP-M.

결과의 비교(Fig. 7)에서도 나타났다. 많은 연구자들이 고해상도 지역해 모델 구축, 지역해에 적합한 parameter 개선, 자료동화 기술을 접목하는 등 수치모델 결과를 개선하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 본 연구결과에서 사용된 배경장은 고해상도 모

델결과이지만 자료동화 기법이 고려되지 않은 전지구 예측모델 결과로, 모든 지역적인 특성을 반영하기에는 어려움이 있다. 따라서 한반도 주변해역의 특성이 잘 반영하고 자료동화 기법 고려된 고해상도 재분석장을 이용하면, 현장관측수온과 모델결과의 오차 감소로 한반도 주변해역을 회유하는 어종의 이동경로 추정에 탁월한 성능을 보일 것으로 생각된다.

정확도 높은 이동경로 추정을 위해서는 배경장의 정확도 검증 뿐만 아니라 알고리즘의 지속적인 개선이 요구된다. 생태 중심과 수온을 이용하는 이동경로 추정 알고리즘에서 추정수온과 생태수온의 오차가 큰 시점에서는 고정된 유영속도를 유동적으로 증가시켜 확장된 최대반경에서 수온 차이를 줄이는 기술적인 개선도 요구된다.

Hill and Braun (2001)과 Hoolihan (2005)에 따르면 조도추정 위치 계산시 사용하는 조도자료는 해양환경에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 한반도 주변해역은 양자강저염수, 황해, 쿠로시오 등의 영향으로 동중국해에서 동해로 대한해협을 통해 많은 물질수송이 이루어 진다(Beardsley et al., 1985; Chen et al., 1994). 그러므로 해양환경 및 기상상태 등을 고려하여 추가적으로 검증하는 등 자료의 정도관리 방안이 필요하다.

비록 본 연구는 자료 획득율이 높은 PSAT를 부착한 대형 부어류를 대상으로 생태정보를 수집하고 회유경로를 파악하는 기초 연구이지만, PSAT 뿐만 아니라 소형 기록식 전자태그를 부착한 소형 부어류에도 적용하여 이동경로 및 회유경로를 추적할 수 있다. 이를 통해 우리나라 어업생산량의 대부분을 차지하는 다수의 부어류 유영특성, 계절적인 회유 및 이동경로 등 생태 특성에 관한 활용 연구가 가능할 것으로 보인다. 또한 향후 수산 자원예측을 위해서는 어류생태 빅데이터를 구축하여야 하며, 예측 결과 검증 및 활용을 위해 정확도 높은 어류 이동경로 및 회유 특성을 파악할 필요성이 있다.

사 사

이 논문은 2021년 국립수산물품질관리원 수산과학연구사업(한국형 연근해 생태계 변동 예측모델 기술개발, R2021069)의 지원으로 수행된 연구이며, 논문을 세심하게 검토하여 주신 심사위원님께 감사드립니다.

References

- Beardsley RC, Limeburner R, Yu H and Cannon GA. 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Cont Shelf Res* 4, 57-76. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(85\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0278-4343(85)90022-6).
- Boehme L and Rosso I. 2021. Classifying oceanographic structures in the Amundsen Sea, Antarctica. *Geophys Res Lett* 48, e2020GL089412. <https://doi.org/10.1029/2020GL089412>.
- Chen C, Beardsley RC, Limeburner R and Kim K. 1994. Comparison of winter and summer hydrographic observations in the Yellow and East China Seas and adjacent Kuroshio during 1986. *Cont Shelf Res* 14, 909-929. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)90079-5).
- Clark TD and Seymour RS. 2006. Cardiorespiratory physiology and swimming energetics of a high-energy-demand teleost, the yellowtail kingfish *Seriola lalandi*. *J Exp Biol* 209, 3940-3951. <https://doi.org/10.1242/jeb.02440>.
- Chittenden CM, Ådlandsvik B, Pedersen OP, Righton D and Rikardsen AH. 2013. Testing a model to track fish migrations in polar regions using pop-up satellite archival tags. *Fish Oceanogr* 22, 1-13. <https://doi.org/10.1111/fog.12000>.
- Donlon CJ, Martin M, Stark J, Roberts-Jones J, Fiedler E and Wimmer W. 2012. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sens Environ* 116, 140-158. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.017>.
- Galuardi B and Lutcavage M. 2012. Dispersal routes and habitat utilization of juvenile Atlantic bluefin tuna *Thunnus thynnus* tracked with mini PSAT and archival tags. *PLoS One* 7, e37829. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037829>.
- Guo X, Hukuda H, Miyazawa Y and Yamagata T. 2003. A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio-roles of horizontal resolution on JEBAR. *J Phys Oceanogr* 33, 146-169. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2003\)033<0146:ATNOMF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)033<0146:ATNOMF>2.0.CO;2).
- Hill RD and Braun MJ. 2001. Geolocation by light level. In: Electronic tagging and tracking in marine fisheries. Sibert JR and Nielsen JL, eds. Springer, Dordrecht, Netherlands, 315-330. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1402-0_17.
- Hoolihan JP. 2005. Horizontal and vertical movements of sailfish *Istiophorus platypterus* in the Arabian Gulf, determined by ultrasonic and pop-up satellite tagging. *Mar Biol* 146, 1015-1029. <https://doi.org/10.1007/s00227-004-1488-2>.
- HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). 2021. Data server. Retrieved from <https://www.hycom.org/dataserver> on Jun 26, 2021.
- Jeong JM, Hwang KS, Song SH, Kim HY, Park JH and Lee JH. 2016. Feeding habits of juvenile and young yellow tail *Seriola quinqueradiata* in coastal waters of the South Sea, Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 635-641. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0635>.
- Kim SW, Ahn JS and Lee Y. 2017. The effect of interannual variations in water temperature on the yellowtail catch *Seriola quinqueradiata*, in the eastern part of the Korean Peninsula. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 23, 909-917. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2017.23.7.909>.
- Kim H, Lim YN, Song SH and Kim YH. 2016. Understanding the migration path of spanish mackerel *Scomberomorus niphonius* using catch distributions. *Korean J Fish Aquat Sci* 49, 376-384. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2016.0376>.
- Kim JT, Rho HK, Kim SH, Ko JC, Ahn YH and Choi CM. 2002. Characteristics of catch fluctuation and distribution of Yellow tail *Seriola quinqueradiata*, Temminck et Schlegel,

- in Korean waters. *J Korean Soc Fish Ocean Technol* 38, 11-19. <https://doi.org/10.3796/KSFT.2002.38.1.011>.
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2021. KMA weather data service. Retrieved from <https://data.kma.go.kr> on Jun 26, 2021.
- Isobe A. 1999. The Taiwan-Tsushima Warm current system: Its path and the transformation of the water mass in the East China Sea. *J Oceanogr* 55, 185-195. <https://doi.org/10.1023/A:1007837912348>.
- Mallett HK, Boehme L, Fedak M, Heywood KJ, Stevens DP and Roquet F. 2018. Variation in the distribution and properties of circumpolar deep water in the eastern Amundsen Sea, on seasonal timescales, using seal-borne tags. *Geophys Res Lett* 45, 4982-4990. <https://doi.org/10.1029/2018GL077430>.
- Moon DY, Jung MM, An YR, Choi SG, Oh BS, Kim ZG, Lee C, Kim MJ and Kim SY. 2009. Distribution and strandings of endangered sea turtles in Korean waters. *Korean J Fish Aquat Sci* 42, 657-663. <https://doi.org/10.5657/kfas.2009.42.6.657>.
- Morita T, Kumakura N, Morishima K, Mitsuboshi T, Ishida M, Hara T, Kudo S, Miwa M, Ihara S, Higuchi K, Takeuchi T and Yoshizaki G. 2012. Production of donor-derived offspring by allogeneic transplantation of spermatogonia in the yellowtail *Seriola quinqueradiata*. *Biol Reprod* 86, 176. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.111.097873>.
- Musyl MK, Domeier ML, Nasby-Lucas N, Brill RW, McNaughton LM, Swimmer JY, Lutcavage MS, Wilson SG, Galuardi B and Liddle JB. 2011. Performance of pop-up satellite archival tags. *Mar Ecol Prog Ser* 433, 1-28. <https://doi.org/10.3354/meps09202>.
- NIFS (National Institute of Fisheries Science). 2021. KODC (Korea Oceanographic Data Center) NSO (NIFS serial oceanographic observations). Retrieved from www.nifs.go.kr/kodc on Jun 26, 2021.
- Oh SY and Jeong YK. 2021. Effects of external pop-up satellite archival tag (PSAT) tagging method on blood indices and PSAT attachment efficiency of yellowtail *Seriola quinqueradiata*. *Korean J Fish Aquat Sci* 54, 38-45. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0038>.
- Palstra AP, Mes D, Kusters K, Roques JA, Flik G, Kloet K and Blonk RJ. 2015. Forced sustained swimming exercise at optimal speed enhances growth of juvenile yellowtail kingfish *Seriola lalandi*. *Front Physiol* 5, 506. <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00506>.
- Park JW and Oh SY. 2018. Physiological responses of marine fish to external attachment of pop-up satellite archival tag (PSAT). *Ocean Polar Res* 40, 169-176. <https://doi.org/10.4217/OPR.2018.40.3.169>.
- Park KJ, Yamada K and Sohn H. 2018. Results of satellite tag monitoring and a preliminary study of the influence of sea surface temperature on a rehabilitated finless porpoise *Neophocaena asiaorientalis* in Korea. *Korean J Fish Aquat Sci* 51, 456-460. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2018.0456>.
- Patterson TA and Hartmann K. 2011. Designing satellite tagging studies: estimating and optimizing data recovery. *Fish Oceanogr* 20, 449-461. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2011.00595.x>
- Remote Sensing Systems. 2017. MWIR optimum interpolated SST data set. Ver. 5.0. Santa Rosa, CA, U.S.A. Retrieved from <https://doi.org/10.5067/GHMWI-4FR05> on Jun 26, 2021.
- Reynolds RW, Smith TM, Liu C, Chelton DB, Casey KS and Schlax MG. 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J Climate* 20, 5473-5496. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- Seo SN. 2008. Digital 30 sec gridded bathymetric data of Korea marginal seas-KorBathy30s. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 20, 110-120.
- Teague WJ, Jacobs GA, Ko DS, Tang TY, Chang KI and Suk MS. 2003. Connectivity of the Taiwan, Cheju and Korea straits. *Cont Shelf Res* 23, 63-77. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00150-4).
- Yamamoto T, Ino S, Kuno M, Sakaji H, Hiyama Y, Kishida T and Ishida Y. 2007. On the spawning and migration of yellowtail *Seriola quinqueradiata* and research required to allow catch forecasting. *Bull Fish Res Agen* 21, 1-29.