

바닷새 및 해양어류의 이동 연구 동향: 위치추적 기법과 연구 사례를 중심으로

최진환, 윤성호, 홍미진, 강기호, 이후승^{1,*}

경희대학교 생물학과 및 한국조류연구소, ¹한국환경연구원 환경평가본부

Research trends in seabird and marine fish migration: Focusing on tracking methods and previous studies

Jin-Hwan Choi, Seongho Yun, Mi-Jin Hong, Ki-Ho Kang and Who-Seung Lee^{1,*}

Department of Biology and Korea Institute of Ornithology, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea

¹Environment Assessment Group, Korea Environment Institute, Sejong 30147, Republic of Korea

*Corresponding author

Who-Seung Lee

Tel. 044-415-7323

E-mail. wslee@kei.re.kr

Received: 17 September 2021

First Revised: 28 December 2021

Second Revised: 27 February 2022

Revision accepted: 2 March 2022

Abstract: In this study, trends in research methods and topics of seabird and marine fish migration were examined. Based on the framework of existing animal migration studies, future research directions were proposed in relation to the migration of seabirds and fish. In terms of research methodology, with the development of science and technology, tracking techniques using radio telemetry, acoustic telemetry, RFID (radio-frequency identification), satellite tracking, and geolocators are widely used to study seabird and fish migration. Research is also conducted indirectly through a population survey and the analysis of substances in the body. Research contents are largely classified into extrinsic factors that affect migration (such as environmental variables and interspecific competition), intrinsic factors such as hormones, anthropogenic activities including fishery and offshore wind farm, and the effect of global climate change. In future studies, physiological factors that influence or cause migration and dispersal should be identified concerning intrinsic factors. For the analysis of migration ability, it is necessary to study effects of changes in the magnetic field on the migration ability of seabirds and fish, interspecific differences in spatiotemporal migration ability, and factors that influence the migration success rate. Regarding extrinsic factors, research studies on effects of anthropogenic disturbances such as fishery and offshore wind farm and global climate change on the migration and dispersal patterns of marine animals are needed. Finally, integrated studies on the migration of seabirds and fish directly or indirectly affecting each other in various ecological aspects are required.

Keywords: seabirds, marine fish, tracking, migration

서 론

생물이 이용할 수 있는 서식환경은 자신들의 환경 적응

력(adaptability)과 유연성(plasticity)의 정도에 따라 결정될 수 있다(Edelaar *et al.* 2017). 그러나 적합하게 결정된 서식환경은 계절적, 생물학적 요인 등에 의해 다시 변화할 수

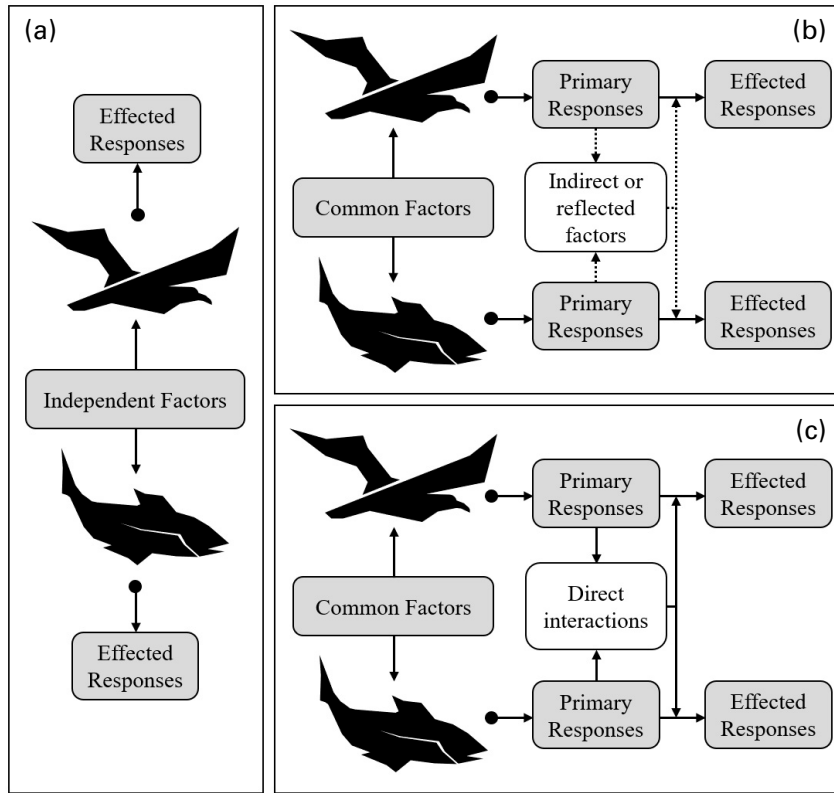


Fig. 1. Research trends of seabird and marine fish migration depending on different factors. (a) Independent factors affecting each seabird and marine fish, focusing on direct effects on migration responses of seabirds and marine fishes. (b) Many factors can influence both seabirds and marine fishes, with traditional researches focusing on effects of indirect or reflected factors on the interaction between them due to difficulties such as high costs. (c) Recent techniques offer possibilities to consider direct interaction effects between seabirds and marine fish.

있으며, 적응할 수 없는 수준(degree)의 변화가 발생할 경우, 다른 서식공간으로 이동하는 전략을 선택한다(Pecl *et al.* 2017). 또한, 생물의 이동은 살아가는 데 있어 얻을 수 있는 자원적, 유전적 이익과 손해 사이의 균형을 맞추기 위해 발생할 수 있다(Nathan *et al.* 2008). 특히 동물의 이동은 유전적으로 가까운 개체군 무리에서 일부가 유전적 다양성 및 자원 결핍 등의 이유로 공간적으로 분리되는 분산(dispersal)과, 먹이자원을 비롯한 생물기후적 요인, 즉 계절 및 생애주기에 따라 적합한 서식지로 개체군이 이동하는 이주(migration) 등 목적과 규모에 따라 구분된다(Allen and Singh 2016). 따라서 생물의 이동은 한 개체 단위에서의 자원적, 유전적 이익에서부터 종 및 개체군 전체의 생존과 깊은 관련이 있다.

종의 이동은 생태적으로 연관된 다른 종의 이동을 유발하거나 생존에 영향을 준다(Kraus *et al.* 2018). 예를 들어, 회유성 어류인 연어류(e.g. *Oncorhynchus nerka*)는 번식을

위해 바다에서 담수로 장거리 이주를 하는데, 이동 시기에 맞추어 Kodiak brown bear (*Ursus arctos middendorffi*)의 취식지 이동 현상이 나타난다(Deacy *et al.* 2019). 또한 삵꾸기(*Cuculus canorus*)와 같은 탁란 조류는 숙주종의 여름철 이주 시기 및 분포의 변화 등으로 번식 성공률에 직접적인 영향을 받는다(Avilés *et al.* 2014). 이처럼 종간 상호작용이 생존에 중요한 역할을 할수록, 혹은 생존에 있어서 관련된 자원의 특이성이 높고 그 관계의 수가 적을수록, 연관된 종의 이동 패턴은 생존 및 이동 패턴에 직접적인 영향을 미칠 수 있다(Mabey 2004).

이동을 통한 공간 이용의 변화로 나타나는 종간 상호작용은 해양생태계에서, 특히 바닷새(seabirds)와 해양어류(marine fish)에서 뚜렷하게 나타나기도 한다(Rahel and McLaughlin 2018). 구분되고 단절되는 서식지 이용을 보이는 육상 조류(landbirds) 및 담수어류(freshwater fish)와 달리 바닷새와 해양어류의 연속적인 서식지 이용 패턴은

살아가는 동안 상대적으로 긴 이동 거리를 통한 다양한 이주 전략을 갖는다(Brown *et al.* 2021). 또한, 서식지 연속성은 환경 변화에 따른 이주를 용이하게 하므로 육상생태계에 비해 해양생태계에서 서식지 이주 패턴이 잘 나타난다(Johnston *et al.* 2002). 특히 해양어류의 경우, 치어 일 때 얕은 해안(단, 일부종의 경우는 담수)을 선호하나, 성체가 될수록 깊고 넓은 해양환경을 선호하는 패턴의 성장주기에 따른 이주 현상도 확인된다(Polte *et al.* 2017). 이에 따라 해양어류를 주 먹이원으로 삼는 바닷새는 해양어류의 이주 패턴에 따라 번식, 성장, 생존에 영향을 받을 수 있다(Crawford and Shelton 1978; Hentati-Sundberg *et al.* 2018).

바닷새와 해양어류의 이동 패턴 및 이들 사이의 상호작용에 대한 연구는 오랫동안 많은 연구자에 의해 이루어져 왔지만, 기술, 인력, 연구비용 및 해양환경 특성상 직접적인 연구의 어려움 등의 제약으로 인해 연구 대상종이 한정되거나, 개체수의 변동 확인을 통해 이동 패턴을 간접적으로 유추할 수밖에 없었다(Comte and Olden 2018). 하지만 최근 연구 기술의 발달로 다양한 위치추적 방법이 고안되어 이용되고 있으며, 다양한 바닷새 및 해양어류 종의 이동 패턴이 평가 및 연구되고 있다(Carneiro *et al.* 2020, Fig. 1). 따라서 본 연구에서는 최근 바닷새 및 해양어류의 이동 패턴 연구 방법의 동향을 살펴보고 어떤 연구가 진행되었는지 고찰하며, 기존 동물 이동 연구의 기본 틀에 의거하여 바닷새와 해양어류의 이동에 관한 연구의 필요성에 대해 논하고자 한다.

바닷새 및 해양어류의 이동 연구

1. 이동 연구 방법

1) 위치추적 장비를 이용한 이동 연구 방법

위성통신기술의 발달로 다양한 위치추적 기술이 개발되었으며, 이를 통하여 종과 서식환경에 적합한 추적 장비들을 연구에 적용하고 있다(Table 1). 전파추적 기법(radio telemetry)은 특정 주파수의 전파(e.g. very high frequency; VHF)를 연구자가 설정한 주기로 발생시키는 소형 발신기를 대상종에 부착한 뒤, 수신기를 이용하여 발신기의 전파 발생 방향을 추적하는 방법이다(Winter *et al.* 1978; Priede and French 1991). VHF 발신기는 소형화가 잘 이루어졌

기 때문에, 포유류, 조류와 같은 고등 척추동물부터 심지어는 곤충에게까지 부착하여 연구에 이용할 수 있다. 이 때문에 넓은 범위의 육상생태계 공간 이용 패턴을 파악하는데 이용되고 있다. 그러나 어류의 경우, 수중 환경이라는 전파 방해요인이 있어 수면 활동을 주로 하는 종이나, 수심이 얕고 공간적 이동 제약이 있는 환경에서 서식하는 종에서만 한정적으로 전파추적 방법을 이용할 수 있다(Winter *et al.* 1978). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 음향추적 기법(acoustic telemetry)이 해양어류 연구에 주로 쓰이고 있다(Solomon and Potter 1988; Crossin *et al.* 2017; Heo *et al.* 2019). 음향추적 기법은 전파추적 기법과 비슷한 방법으로 이용되나 VHF 대신 음향발신기를 이용한다는 점이 특징이다. 따라서 추적 대상에 음향발신기를 부착한 뒤, 음향수신기를 이용하여 음파가 발생하는 위치를 추적한다.

수신기를 이용한 장치로서 RFID (radio-frequency identification)를 이용한 이동 패턴 연구 기법도 있다(Markham 2008; Pinter-Wollman and Mabry 2010). 하지만 RFID 수신기가 연구하고자 하는 위치마다 설치되어야 하기 때문에 비용이 많이 들며, 또한 대상종의 이동 경로상에 설치해야 하므로 취식지나 번식지와 같이 공간 이용 패턴이 뚜렷한 장소와 이동 경로 및 목적이 파악된 종에 한정적으로 적용 가능한 기술이다. 예를 들어 바닷새의 경우, 번식지에 자신의 둥지와 취식지(foraging site)를 반복해서 오가므로 둥지에 이출입 수신기를 설치하여 취식 및 이동의 빈도 등을 확인할 수 있다(Zangmeister *et al.* 2009). 해양어류의 경우, 회유성 어류의 번식 이동 예상 경로에 수신기를 설치하여 내수 또는 바다로의 이동 연구를 진행할 수 있다(Bégout *et al.* 2016). 그러나 둥지 또는 번식지로의 구체적인 이동 경로 및 종의 행동 특성에 대한 연구기반이 마련되지 못한 경우에는 해당 방법을 이용한 연구는 실효적이지 못하다는 단점이 있다. 또한 해양어류의 경우, 담수보다 수심이 깊고 이동 경로를 특정 짓기 어려우므로 해양어류 연구에 RFID를 이용한 기술을 적용하는 것은 어려울 수 있다.

직접적으로 추적하는 방법을 적용하기 힘든 연구대상이나 장거리 이주성 동물의 이동 패턴 연구에는 GPS나 Argos와 같은 위성추적 기법을 이용한다(Sims *et al.* 2009; Graham *et al.* 2012). GPS 발신기나 Argos 발신기(platform transmitter terminal; PTT)로부터 실시간으로 대상의 위치 정보를 전송받는 방법은 전 지구적 범위에서 이동 패턴 연구를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 비용이 고가이

Table 1. Summary of various tracking methods for seabirds and fish

Technology	Characteristics	Limitations	Applications	References
Radio telemetry	<ul style="list-style-type: none"> Well-compacted miniaturization Emit radio signals from the transmitter and receive the signals with Yagi-antenna 	<ul style="list-style-type: none"> Highly limited to use in water Limited detecting ranges Highly Sensitive to localized radio interference Necessity of triangulation methods to acquire accuracy location information 	<ul style="list-style-type: none"> Identifying local habitat use of seabirds and fishes living in shallow waters (<15 m) or water surface 	<p>Priede and French 1991 Winter <i>et al.</i> 1978</p>
Acoustic telemetry	<ul style="list-style-type: none"> Similar to radio-tracking telemetry, but use acoustic signals Can provide detailed movement data depending on tracking method and conditions 	<ul style="list-style-type: none"> The receiver must be submerged in water Limited in shallow waters Highly Sensitive to localized acoustic interference Necessity of triangulation methods to acquire accuracy location information 	<ul style="list-style-type: none"> Fishes living in deep water (>20 m) 	<p>Crossin <i>et al.</i> 2017 Heo <i>et al.</i> 2019 Solomon and Potter 1988</p>
Radio - frequency identification (RFID)	<ul style="list-style-type: none"> Highly minimized devices Track when RFID - attached individuals pass sites installed receiver device 	<ul style="list-style-type: none"> High cost due to number of receiver devices depending on target movement pathways 	<ul style="list-style-type: none"> Birds and fishes, predictable pathway and movement (e.g. fish migration pattern, bird nest-foraging movement frequency) 	<p>Bégot <i>et al.</i> 2016 Graham <i>et al.</i> 2012 Markham 2008 Pinter-Wollman and Mabry 2010 Zangmeister <i>et al.</i> 2009</p>
Satellite tracking	<ul style="list-style-type: none"> Receives real-time location information of the target from such as GPS transmitters and Argos platform transmitter terminals (PTT). 	<ul style="list-style-type: none"> The highest cost in comparison with other tracking methods Comparatively rough location information 	<ul style="list-style-type: none"> Birds and fishes for tracking long-term movements or migration 	<p>Sims <i>et al.</i> 2009</p>
Geolocator	<ul style="list-style-type: none"> Record environmental factors such as light intensity, humid, atmospheric pressure and temperatures depending on manual interval. Location is evaluated by sunset and sunrise timing with predicting light intensity 	<ul style="list-style-type: none"> Geolocator must be retrieved to acquire recorded information by recapturing, or remote receiving such as Bluetooth nearby target individuals Highly Sensitive to localized light interference to predict coordinates 	<ul style="list-style-type: none"> Birds and fishes for tracking their movement and evaluating environmental factors 	<p>Arneill <i>et al.</i> 2019 Chittenden <i>et al.</i> 2013 Delord <i>et al.</i> 2019 González-Solis <i>et al.</i> 2007 Magnusdottir <i>et al.</i> 2012 Ramos <i>et al.</i> 2019 Stenhouse <i>et al.</i> 2012 Takahashi <i>et al.</i> 2008</p>
Pop-up satellite archival tag (PSAT)	<ul style="list-style-type: none"> Record several environmental factors like geolocator, and transmit the information data through the satellite when the PSAT is jettisoned and floated above the water by specific event (e.g. manual timing, external impact) 	<ul style="list-style-type: none"> Must be jettisoned and floated above the water Highly Sensitive to localized light interference to predict coordinates 	<ul style="list-style-type: none"> Fishes for tracking their movement and evaluating environmental factors 	<p>Aarstrup <i>et al.</i> 2009 Arrizabalaga <i>et al.</i> 2008 Lutcavage <i>et al.</i> 1999</p>

고 부착하는 발신기가 상대적으로 무거워 적용 가능한 대상종의 범위가 제한되는 한계성이 있다.

재포획이 용이한 대상의 경우, 지오로케이터(geolocator)를 부착하여 연구기간 동안 광량, 온도, 습도를 기록하고, 추후 이를 회수하여 간접적으로 위치정보를 얻는 방법이 있는데, 주로 서식지 충실도(site fidelity), 즉 이전 번식도시 및 번식동지로 되돌아오는 비율이 높은 바닷새(Arneill *et al.* 2019)의 이동 연구에서 이용된다(González-Solís *et al.* 2007; Stenhouse *et al.* 2012; Delord *et al.* 2019). 재포획이 어려운 어류의 경우 인공위성 전자표지표(pop-up satellite archival tag; PSAT)를 이용하여 수심, 수온 등의 환경정보를 저장하고, 사전에 설정한 날짜 또는 일정 강도 이상의 자극을 받았을 경우 개체로부터 탈착되어 수면으로 떠올라 위성을 통하여 저장된 정보를 전송한다(Chittenden *et al.* 2013). 기존에는 추적기의 크기 문제로 인하여 주로 대형종에만 부착 가능했지만, 현재는 경량화가 이루어져 소형종에도 적용할 수 있다(Aarestrup *et al.* 2009).

위치추적 장비의 부착은 대상 동물에게 생활사적, 행동적, 또는 생리적 측면에서 다양하게 영향을 미칠 수 있으므로, 그러한 영향을 최소화하기 위하여 동물의 몸무게 대비 장비 무게의 상한선(%)을 정하여 이를 초과하지 않게 부착하도록 권고되고 있다. 조류에서는 장비의 무게가 부착 개체 몸무게의 5% 미만이어야 하며(Cochran 1980; Gaunt *et al.* 1997), 3% 미만이 권장되고 있다(Phillips *et al.* 2003). 어류의 경우에는 부착 개체 몸무게의 2%를 넘지 않는 장비를 부착하는 것이 일반적이다(Jepsen *et al.* 2005).

2) 개체군 조사를 이용한 이동 연구 방법

연구지역 내 개체군 단위의 분포 및 밀도 변화 추이를 통해 이동 추이를 예측하는 방법도 있다. 즉, 연구지역 전반에 걸친 모니터링을 통해 개체수의 시계열적 밀도 변화로 이동 패턴을 간접적으로 확인하는 방법이다(Louzao *et al.* 2020). 이 방법은 조사 빈도가 높고 총 조사 기간이 길수록 구체적인 이동 변화를 대변하는 정보가 될 수 있다. 바닷새의 경우 직접적인 관찰을 통한 개체 밀도 조사가 가능하지만, 어류 조사는 직접적인 관찰에 큰 어려움이 따른다. 이 때문에 GPS 장비를 부착한 어선들을 연구지역 내에 일정한 간격으로 분산시킨 뒤, 해당 위치에서 포획되는 대상종의 밀도를 추정하는 방법이 이용되고 있다(Sims *et al.* 2004; Erismann *et al.* 2012) 비록 개체 밀도 조사를 통한 이동 추이

예측은 앞선 실제 위치를 추적하는 방법보다는 정확성이 낮을 수 있지만, 무리를 이루고 포획이 용이한 대상일 경우 대상종의 크기와 관계없이 이용할 수 있다는 장점이 있다.

3) 체내 물질 분석을 통한 이동 연구 방법

안정성 동위원소 기법(stable isotope analysis; SIA)을 이용한 생물의 이동 연구 방법은 환경 내 유기물의 순환에 따라 특정 환경에서 서식하는 유기체의 구성 유기물이 환경 내 방사성 동위원소의 비율을 반영하게 되는 것을 원리로 한다(Hansson *et al.* 1997). Isoscape (isotope + landscape)는 이러한 동위원소비를 공간 분포 모델화시킨 체계로서, 생물의 이동 패턴을 연구하는 데 기여한다. 주로 이용되는 원소 중 탄소는 육상 및 해양생물 전반의 이동 분석에 이용되는 원소로 육상생물은 대기 중의 CO₂의 동위원소비의 영향을 많이 받으며, 해양생물은 해수 내의 용존 무기탄소의 원소비의 영향을 주로 받는다(Fry 1988). 일반적으로 위도에 따라 탄소의 동위원소비가 달라지며 고위도로 갈수록 원소의 총 무게가 가벼워진다(Rau *et al.* 1982). 또한, 해양의 경우 열수구의 위치에 따라 황(S)의 안정동위원소비가 크게 달라진다(MacAvoy *et al.* 1998). 해수 내 수소 및 산소의 안정동위원소비는 지역에 따른 차이 없이 일정하게 유지되는 편이나, 담수와 만나는 지점이나 빙하가 녹아 해수와 섞이는 지역의 경우 원소비는 크게 변화한다(Craig 1957; Dansgaard 1964). 이러한 동위원소 기법은 바닷새나 도요·물떼새와 같은 장거리 이주성 철새의 이동 연구에 많이 이용되었으며(Atkinson *et al.* 2005; Ramos *et al.* 2009), 또한 청어류, 연어류, 빙어류, 농어류 등 회유성 어류 및 해양어류의 이동경로 파악에 주요한 지표로 활용되어 왔다(Kline *et al.* 1998; Doucett *et al.* 1999; MacAvoy *et al.* 2000).

이외에도 지화학적 특성을 이용한 기원지 추정 방법이 있다(Thorrold *et al.* 2001). 이 방법은 동위원소 기법과 유사하나, 환경의 동위원소비율 외의 원소비의 차이를 이용하는 방법이다. 어류의 경우 주로 경골어류의 생활사적 이동 패턴을 보는 데 이용되는데, 이들의 이석(otolith)은 출생한 서식지에 퇴적되어 있는 무기물로부터 형성되기 때문이다(Campana 1999). 또한, 이석의 성장은 서식환경에 퇴적된 무기물이 기존 이석의 표면에 추가됨으로써 이루어지므로 이석의 층별 무기물 비율 분석을 통하여 서식지 이동 패턴을 확인할 수 있다.

2. 이동 연구 주제의 다양화

1) 외적 요인과 이동 및 분산 사이의 관계

위치추적 기술의 발달로 바닷새의 취식지 파악이 용이해짐에 따라, 취식지의 먹이량과 밀접한 관련이 있는 해수 온도, 수심 등과 같은 환경적 요인들 중 해양동물들의 공간 이동 및 분산에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 구체적으로 밝힐 수 있는 연구가 가능해졌다(Grémillet *et al.* 2008; Bugoni *et al.* 2009; Waugh *et al.* 2018; Afán *et al.* 2019). 예를 들어 해양어류의 경우, 시기별로 변화하는 광량에 따른 Atlantic herring (*Clupea harengus*)과 플랑크톤인 *Calanus finmarchicus*의 개체 증감을 비교하여 이들의 포식-피식 관계 및 시기별 취식 이주 등이 연구되었으며(Varpe and Fiksen 2010), Atlantic salmon (*Salmo salar*)에서 온도 및 광주기에 따른 번식 이주의 변화가 나타난다는 것도 밝혀졌다(Taranger *et al.* 1998). 또한, Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*)은 서식환경의 온도에 따라 번식지의 분포가 결정되는 결과를 보이기도 했다(Bruge *et al.* 2016). 동태평양에서 서식하는 백상아리(*Carcharodon carcharias*)의 경우, 용존 산소량이나 해수온도와 같은 환경요인의 변화가 이들의 이주 패턴에 영향을 줄 수 있다는 것도 연구되었다(Nasby-Lucas *et al.* 2009). 한편, 바닷새에서는 빙하환경이 king penguin (*Aptenodytes patagonicus*)의 취식지 이용에 영향을 줄 수 있다는 연구가 진행되었으며(Bost *et al.* 2004), 바다오리(*Uria aalge*)와 Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) 유체(juvenile)의 이동이 해수의 용승 및 댐의 방류와 같은 환경 변화의 영향을 받아 서로 간의 포식-피식 관계가 변화한다는 것이 확인되었다(Wells *et al.* 2017).

동물의 이동 및 분산은 이러한 환경변수들과 같은 비생물적 요인뿐 아니라, 공생 및 포식-피식 관계 등의 중간 상호작용과 같은 생물적 요인의 영향도 받을 수 있으므로, 이에 관한 연구도 꾸준히 진행되어 오고 있다(Masello *et al.* 2010; Navarro *et al.* 2013). 예를 들어, 산호초 어류종들 사이의 경쟁으로 인하여 각 종의 생태적 지위(ecological niche)에 따른 일일 이주 패턴이 나타나기도 한다는 연구 결과가 있었다(Shulman 1985). 특히 Phillips *et al.* (2005)의 연구에서는 조류의 생태적 지위에 따라 종별 이동 패턴에 차이가 있음을 밝혀냈다. 이들은 알바트로스류의 일종인 light-mantled sooty albatross (*Phoebastria palpebrata*)가 같은 지역에서 다른 알바트로스류 및 습새류(Procellariiformes)와의 경쟁을 회피하기 위하여 주로 야간에 먹이활동을 하며, 번

식지로부터 멀리 떨어진 취식지를 이용하는 것을 확인하였다(Table 2).

2) 내적 요인과 이동 및 분산 사이의 관계

동물의 몸 상태 및 항상성의 유지는 주변의 외적 환경요인뿐만 아니라, 유전, 형태, 생활사, 생리 등에 따른 내적 요인들에 의해서도 조절된다(Uusi-Heikkilä *et al.* 2008). 각 개체별 또는 개체군 수준에서 일어나는 행동은 일차적으로 이러한 내적 요인의 영향에 대한 반응으로 나타나며, 이에 따라 장거리 이주성 동물들의 이주 시기가 결정되거나 번식 및 비번식 시기의 생태적 차이 등이 발생하기도 한다. 따라서 최근 동물 이동 연구는 체내에서 발생하는 물질대사에 따른 개체의 공간 이용 및 이동 패턴을 밝히거나, 반대로 이동에 따른 환경 변화 등의 요인이 어류의 체내 물질 농도 변화에 어떤 영향을 미치는지에 관한 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어 연어류에 대한 연구(Birnie-Gauvin *et al.* 2019)에서는 스트레스 수준과 영양상태는 이주 거리 및 이주 성공에 유의한 영향을 줄 수 있다는 것이 밝혀졌다. 또한, 혈당 코티솔(cortisol)은 개체가 받는 스트레스 수준을 나타내는 지표가 되는데, 이 코티솔 농도가 높은 연어 개체일수록 강에서 이주를 시작하는 시기가 빨랐지만, 성공적으로 바다에 도착하지 못하는 결과를 보였다. Watt *et al.* (1975)은 해수에서 담수로 이동하는 회유성 어류의 체내 칼시토닌과 칼슘의 농도를 측정하여 면역 수준의 변화를 확인하였다. 칼슘의 농도는 암수 모두 담수로 올라갈수록 감소하는 패턴을 보였으나, 칼시토닌의 농도는 수컷에서 감소한 반면 암컷에서는 증가하는 경향이 나타나, 번식 주기에 칼시토닌이 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 증명하였다. 또한, 음향추적을 통하여 눈다랑어(*Thunnus obesus*)가 체온 항상성의 유지를 위해 수직 이동 패턴을 보인다는 것도 연구된 바 있다(Dagorn *et al.* 2000). 바닷새의 경우, 코르티코스테론(corticosteroid) 농도가 높을수록 알바트로스류인 black-browed albatross (*Thalassarche melanophris*)의 취식 이동 거리와 이동 시간이 감소한다는 보고가 있다(Angelier *et al.* 2007). 또한 장거리 이주 시 넓은 대양을 거쳐 이동하는 조류(e.g. songbirds)의 경우(Sillett and Holmes 2002; Newton 2007) 에너지의 효율을 높이기 위해 대체로 온화한 환경조건을 갖춘 생산성 높은 경로를 따라 이동한다는 연구가 수행된 바 있으며, 유조-성조와 같은 생활사적 요인에 따라 이주 경로에 차이를 보이는 결과들도 보고되었다(Péron and Grémillet 2013; Ramos *et al.* 2019) (Table 3).

Table 2. Summary of research to date regarding extrinsic factors affecting migration of seabirds and marine fish

Research topic		Research method	References	Research content	
Extrinsic factor	Environmental variable	Relationship between distribution/foraging ecology and environmental factors	Population survey	Amorim <i>et al.</i> 2009	Potential relationships between the spatial structure and distribution of the three seabird species and environmental factors (sea surface temperature, chlorophyll <i>a</i> concentration, distance to fronts, wind, distance to island shore or tern colonies, distance to seamounts, seabed slope, and depth)
			Population survey	Bruge <i>et al.</i> 2016	Influence of temperature change on Atlantic mackerel's spawning distribution and projection of how it may change under future climate change scenarios
			Population survey	Burke <i>et al.</i> 2013	Relationships between the distribution of yearling migrants from three Chinook salmon stocks and geospatial and environmental covariates (chlorophyll <i>a</i> and temperature)
		Tracking		Domalik <i>et al.</i> 2018	Influence of static and/or dynamic oceanographic features (sea surface temperature, chlorophyll <i>a</i> concentration, and bathymetry) on cassin's auklet (<i>Ptychoramphus aleuticus</i>)'s individual and population level patterns of habitat use
		Tracking		Lea <i>et al.</i> 2018	Relationships between environmental factors (sea surface temperature, primary productivity, thermal fronts, and bathymetry) and movement patterns in migratory marine predators of different size classes
		Population survey		Leum and Choat 1980	Activity patterns of red moki (<i>Cheilodactylus spectabilis</i>) in different reef areas of varying environmental variables (depth, topography, algal and echinoid abundance) at different times
		Tracking		Nasby-Lucas <i>et al.</i> 2009	Vertical behavioral patterns and pelagic habitat use of white sharks (<i>Carcharodon carcharias</i>) relative to depth, ambient temperature and oxygen concentration
		Tracking		Phillips <i>et al.</i> 2006	Key wintering areas, distribution during the early breeding season, individual variability in site preference, oceanographic factors underlying site selection and temporal variation therein, spatiotemporal overlap with fisheries in white-chinned petrels
		Tracking		Matsumoto <i>et al.</i> 2016	Relationships between oceanic physical features (sea surface temperature and chlorophyll <i>a</i> concentration) and foraging distribution of streaked shearwaters (<i>Calonectris leucomelas</i>)
		Tracking		Meatley <i>et al.</i> 2019	Timing of movements of white-winged scoters (<i>Melanitta fusca</i>) in southern New England and fine-scale resource selection and habitat use patterns in relation to distance from shore, depth, bottom slope, sediment grain size, sea surface temperature and salinity, and chlorophyll <i>a</i>

Table 2. Continued

Research topic		Research method	References	Research content
Extrinsic factor	Environmental variable	Tracking, stable isotopes	Navarro and González-Solis 2009	Environmental determinants of foraging strategies in cory's shearwaters (<i>Calonectris diomedea</i>) in relation to chlorophyll <i>a</i> concentration and oceanic winds
	Relationship between distribution/foraging ecology and environmental factors	Tracking	Waugh <i>et al.</i> 2018	Influence of climatic conditions, marine productivity, bathymetry, the core fishery zone, concurrent fishing activity, light conditions, sex, and breeding stage on Westland petrel (<i>Procellaria westlandica</i>) foraging patterns
Interspecific interaction	Interspecific segregation/overlap of foraging niche	Tracking	Clewlow <i>et al.</i> 2019	Degree of niche segregation in foraging areas and dive depths that arises from allochory in sympatric Adélie (<i>Pygoscelis adeliae</i>) and chinstrap (<i>P. antarcticus</i>) penguins and their resilience to climate change
		Stable isotopes	Hussey <i>et al.</i> 2011	Inter- and intra-species ontogenetic variability in diet, trophic position, and habitat use of two large shark species
		Tracking, stable isotopes	Navarro <i>et al.</i> 2013	Ecological segregation of sympatric planktivorous petrels in a horizontal (spatial movements), vertical (diving strategies) and temporal (at-sea diel activity patterns) dimension
		Tracking	Petalas <i>et al.</i> 2021	Niche partitioning of sympatric seabird populations through differentiation in diet and spatial foraging range
		Tracking	Pickett <i>et al.</i> 2018	Extent and consistency of foraging (space use patterns) and dietary niche segregation between Adélie and gentoo penguins (<i>Pygoscelis papua</i>) during the austral breeding season
		Tracking	Quillfeldt <i>et al.</i> 2015	Winter distribution and environmental conditions (sea surface temperature) in the habitat used of closely related petrel species
		Tracking	Reisinger <i>et al.</i> 2020	Intra- and interspecific niche segregation (foraging distribution and diet) of the sympatric two giant petrels
		Population survey	Ronconi and Burger 2011	Inter- and intra-specific competition over foraging space with respect to distance from shore among sympatric pursuit-diving seabirds

Table 3. Summary of research to date regarding intrinsic factors affecting migration of seabirds and marine fish

Intrinsic factor	Research topic	Research method	References	Research content
	Relationship between hormone concentration and migration/foraging behavior	Population survey	Angelier <i>et al.</i> 2007	Change of the baseline levels of corticosterone and prolactin, two hormones involved in reproduction according to age and breeding experience in the black-browed albatross during the brooding stage
		Tracking	Birnie-Gauvin <i>et al.</i> 2019	Investigation of the relationship between three physiological parameters (baseline cortisol, baseline glucose and low molecular weight antioxidants) and the timing and success of Atlantic salmon and sea trout (<i>Salmo trutta</i>) kelt migration
	Difference in migration pattern according to life stages	Tracking	Afán <i>et al.</i> 2019	Differences in migration routes, habitat preferences and survival rates of scopol's shearwaters (<i>Calonectris diomedea</i>) between age classes
		Tracking	Campioni <i>et al.</i> 2020	Effect of aging on migratory strategy (migratory timing and destination) of cory's shearwaters
		Stable isotope	Clarke <i>et al.</i> 2010	Estimation of migration distances and the degree of connectivity (exchange of individuals among subpopulations) of Atlantic silverside (<i>Menidia menidia</i>)
		Tracking	de Grissac <i>et al.</i> 2016	Post-natal movement strategy in closely related juvenile seabirds and differences from adults
		Stable isotope	Longmore <i>et al.</i> 2011	Inference of stock structuring and population connectivity of roundnose grenadier (<i>Coryphaenoides rupestris</i>) by otolith geochemistry
		Tracking	Péron and Grémillet 2013	Modelling of spatial habitat use patterns and investigation of interannual variability in king penguins' accessibility to marine resources by identification of key oceanographic variables driving their foraging distribution and prediction of foraging range over the 21st century
		Tracking	Ramos <i>et al.</i> 2019	Differences in annual movements, schedule and at-sea activity patterns between juvenile and adult cory's shearwaters
		Tracking, stable isotopes	Weimerskirch <i>et al.</i> 2014	Change in distribution, foraging movements and feeding ecology of wandering albatross (<i>Diomedea exulans</i>) throughout all life-history stages

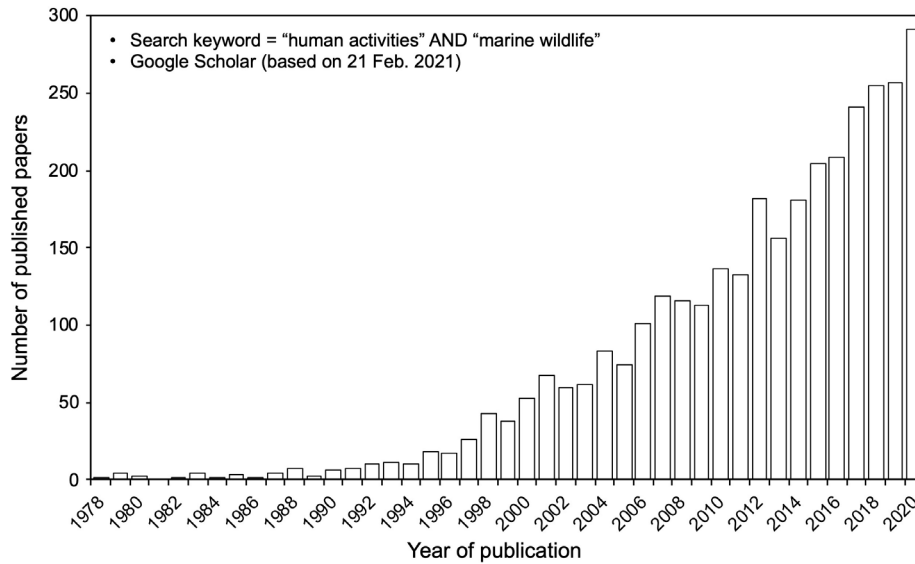


Fig. 2. Growth in the research about effects of human activities on marine wildlife based on a keyword search of articles using 'human activities' AND 'marine wildlife' on Google scholar carried out on February 21, 2021. Google scholar URL: <https://scholar.google.com>.

3) 인위적 활동에 따른 바닷새 및 해양어류의 이동 및 분산 영향

해양 서식지의 감소는 생물다양성을 감소시키고 서식환경에 민감한 종의 생존을 위협하는 요인 중 가장 크고 단적인 원인으로 여겨지고 있으며, 생태계의 기능과 항상성 측면에서 매우 중대하게 다루어지고 있는 주제이기도 하다(Walters and Wethey 1996; Wilcove *et al.* 1998). 이 때문에 해양 서식지 감소가 해양 생물들에게 미치는 영향은 최근 해양생태계 관련 연구의 주요 이슈 중 하나이다(Agardy 2000). 이 중 산호초와 연안 및 하구 지역은 가장 많은 소실 위협을 받고 있는 해양 서식지로, 훼손 후 환경 복원이 매우 어렵다는 점이 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 해양 서식지의 훼손 및 손실은 대부분 인간에 의한 어업활동 [e.g. 낚시, 준설 (dredging), 트롤 어업 (trawling), 연승 어업 (long-lining), 폭파 낚시 (dynamite fishing)], 화학 오염, 빛 공해, 소음, 공업용수 활용, 제방 설치 등으로 인하여 발생하는데 이는 해양의 산성화, 부영양화, 공간의 물리적 손실, 화학 오염 등의 결과를 초래하여 기존에 서식하던 생물들의 생존에 위협을 가한다(Dayton *et al.* 1995; Benstead *et al.* 1999; Longcore and Rich 2004; Hellström *et al.* 2016; Filous *et al.* 2017). 따라서 인위적 활동이 해양동물들에게 미치는 영향에 관한 연구는 지속적으로 증가하고 있으며(Fig. 2), 특히 어류의 이동 및 분산과 관련된 연구는 인간의 경

제활동과 관련하여 중점 연구분야로 자리매김하고 있다(Cornejo-Donoso *et al.* 2017).

갈매기류와 같이 인간의 활동에 친화적인 바닷새의 경우, 어선의 어업활동과 이들의 먹이활동 사이의 상호작용에 대한 연구가 이루어져 왔으며(Bodey *et al.* 2014; Corbeau *et al.* 2019), 어업활동이 이루어지는 영역과 바닷새들의 취식영역 사이의 관계 및 경쟁요인에 관한 연구도 꾸준히 수행되어 왔다(Copello and Quintana 2009; Sommerfeld *et al.* 2016; Clay *et al.* 2019). 또한 해상발전단지 (offshore wind farm)의 건설이 바닷새의 이주에 미치는 영향에 대해서는 전 세계적으로 연구되어 왔으며, 이로 인한 조류 충돌 (bird strike)은 최근 사회적인 이슈가 되었다(Garthe and Hüpopp 2004; Masden *et al.* 2009; Furness *et al.* 2013) (Table 4). 해상발전단지 건설로 인해 수중 생태계에 발생하는 소음이 주변에 서식하는 어류들의 공간 이용 패턴 및 분산에 영향을 미치는 것을 보여주는 연구들도 공개되었다(Johnston *et al.* 2014). 또한, 회유성 어류와 같이 경제적으로 중요한 종들의 경우, 환경의 변화가 미치는 영향에 대한 연구가 상당 부분 진행되어 왔다. 이들은 특히 다른 어류종에 비해 환경의 변화에 대해 더 크게 영향을 받을 수밖에 없는데, 서식지 손실 발생 시 인근의 적합한 서식지로 이동해 생활할 수 있는 일반 어류와는 달리 회유성 어류의 경우 반드시 번식지로 회귀하여야 하기 때문이며, 이는 번식지

Table 4. Summary of research to date regarding anthropogenic activities affecting migration of seabirds and marine fish

Research topic		Research method	References	Research content
Anthropogenic activity	Fishery	Tracking	Bodey <i>et al.</i> 2014	Influence of fishing vessels on foraging behaviors of northern gannet (<i>Morus bassanus</i>) in near real-time, depending on gear type and activity
	Effects of fishing boats on foraging behavior	Population survey	Cherel <i>et al.</i> 1996	Examination of numbers of seabirds and their feeding behavior on offal and discards in Kerguelen waters and quantification of incidental catches of seabirds
		Tracking	Corbeau <i>et al.</i> 2019	Investigation of the use of AFS (area restricted search) by wandering albatrosses when attending fishing boats compared with presumed natural foraging
		Tracking	Torres <i>et al.</i> 2011	Quantification of fine-scale overlap between individual white-capped albatrosses (<i>Thalassarche steadi</i>) and commercial fishing activity and characterization of behavioral changes in albatross foraging behavior patterns when associating with vessels
		Tracking, stable isotopes	Votier <i>et al.</i> 2010	Influence of commercial fisheries' activity on the foraging behavior of individual breeding northern gannets in relation to use of fishery discards and behavioral response to trawlers
		Tracking	Votier <i>et al.</i> 2013	Examination of at-sea behavior of chick-rearing northern gannets in relation to fishing boats by quantification of interactions between birds and fishing vessels using bird-borne cameras
		Population survey	Wickliffe and Jodice 2010	Examination of spatial distribution and abundance of four locally breeding seabirds in relation to shrimp trawling activity in the nearshore waters
	Overlap between fisheries and distribution	Tracking	Clay <i>et al.</i> 2019	Inference of potential bycatch risk by quantification of spatial overlap between four threatened seabird populations and longline and trawl fisheries by region, fishing fleet, year and month
		Tracking	Copello and Quintana 2009	Analysis of spatiotemporal relationship between the marine areas used by southern giant petrels (<i>Macronectes giganteus</i>) and the distribution and total catch of the different fisheries
		Population survey, tracking	Guy <i>et al.</i> 2013	Evaluation of the spatial and temporal overlap of five groundfish fisheries and one shrimp fishery with three albatross species using an overlap index derived as the product of total fishing effort and at-sea survey density of black-footed albatross (<i>Phoebastria nigripes</i>)
		Tracking	Petersen <i>et al.</i> 2008	Examination of the foraging strategies and distribution of two albatross species in relation to fisheries, bathymetry and remotely sensed oceanographic features

Table 4. Continued

Research topic		Research method	References	Research content
Anthropogenic activity	Fishery	Tracking	Pichegru et al. 2009	Estimation of the overlap between vulnerable seabirds and South African purse-seine fishery activities
	Overlap between fisheries and distribution	Tracking	Sztukowski et al. 2017	Assessment of the spatiotemporal overlap between the vulnerable Campbell albatross (<i>Thalassarche impavida</i>) and large commercial fishing boats
Offshore wind farm	Effects of offshore wind farms on distribution/foraging ecology	Population survey	Bergström et al. 2013	Assessment of integrated effects of the offshore wind farm on the abundance, distribution patterns and species composition of benthic fish communities
		Tracking	Garthe et al. 2017	Assessment of impacts of offshore wind farms on the distribution and foraging behavior of northern gannets in the southern North Sea
		Population survey	Larsen and Guillemette 2007	Assessment of effects of the wind turbines on the flight behavior of wintering common eiders (<i>Somateria mollissima</i>) and identification of the underlying factors that may increase the risk of collision
		Population survey	Mendel et al. 2019	Assessment of effects of the offshore wind farm construction and associated ship traffic on loon distributions in the German North Sea on a large spatial scale using a 'before-after' control impact analysis approach
		Tracking	Perrow et al. 2006	Assessment of potential impact of the offshore wind farm on foraging movements, home range and activity patterns of little terns (<i>Sterna albifrons</i>)
		Tracking	Reubens et al. 2013	Investigation of the residency, site fidelity, and habitat selectivity of Atlantic cod on a temporal scale at windmill artificial reef
		Tracking	Thaxter et al. 2015	Examination of movements, time budgets and area utilization of lesser black-backed gull (<i>Larus fuscus</i>) for assessment of potential interaction with offshore wind farm areas
		Population survey	Welcker and Nehls 2016	Determination of the displacement of seabirds during the first three years of operation of the wind farm and estimation of the response distance to wind turbines at sea
	Estimation of potential collision risk with offshore wind farms	Population survey	Brabant et al. 2015	Estimation of the number of collision victims at Belgian offshore wind farm using a collision risk model based on technical turbine specifications, bird-related parameters and bird density data
	Overlap between offshore wind farms and distribution			

Table 4. Continued

Research topic		Research method	References	Research content
Anthropogenic activity	Offshore wind farm	Tracking	Cleasby <i>et al.</i> 2015	Prediction of potential collision risk with offshore wind farm by estimating the foraging ranges, densities, and flight heights of northern gannets
	Estimation of potential collision risk with offshore wind farms	Tracking	Corman and Garthe 2014	Estimation of the overlap between flight height of foraging lesser black-backed gulls and the rotor area of most operating wind turbines
	Overlap between offshore wind farms and distribution	Tracking	Cranmer <i>et al.</i> 2017	Application of a new model to empirical data on the duration of foraging flights and colony attendance bouts of central-place foraging marine birds for the development of impact functions that estimate the probability of collision fatality and for specific management in relation to wind-energy planning application
Ship traffic	Effects of ship traffic on distributions and movements	Tracking	Thaxter <i>et al.</i> 2019	Evaluation of spatiotemporal vulnerability of lesser black-backed gulls to wind farm collision using sensitivity to collision and turbine density
		Tracking	Wade <i>et al.</i> 2014	Investigation of the movement of the great skua (<i>Stercorarius skua</i>) according to colony location, breeding status, and nest status and quantification of the overlap of birds with leased and proposed marine renewable energy developments
		Tracking	Vanermen <i>et al.</i> 2020	Investigation of the effect of distance to the wind farm edge on the encounter rate of lesser black-backed gulls, with special attention to the role of turbine-associated perching behavior
Light pollution	Effects of light pollution on flight behavior	Population survey	Burger <i>et al.</i> 2019	Quantification of the effects of the presence of ships, vessel size and speed on the distribution and abundance of red-throated divers (<i>Gavia stellata</i>) and estimation of the resettlement time after disturbance by a ship
		Population survey	Schwemmer <i>et al.</i> 2011	Elucidation of the effects of passing ships on the distribution patterns, habitat loss, and species-specific flight reactions of sensitive seabirds, as well as the potential for habituation
Oil pollution	Effects of oil pollution on migration	Tracking	Rodríguez <i>et al.</i> 2015	Investigation of the flight characteristics to assess the extent and intensity of the impact of light pollution on the pathway of cory's shearwater to the sea and the contribution of geographical variables on the light pollution impact on colonies
		Tracking	Montevocchi <i>et al.</i> 2012	Investigation of the spatiotemporal distribution of the northern gannet to clarify mortality impacts and risks resulting from the Deepwater Horizon blowout in the Gulf of Mexico

로의 경로의 훼손, 무분별한 인위적 개발 등의 영향이 장기간 동안 해당 개체군의 생존을 위협하는 요인이 될 수 있다는 것을 보여준다(Xue *et al.* 2019).

4) 기후변화에 따른 바닷새 및 해양어류의 이동 및 분산 영향

인간 활동에 의한 지구온난화의 발생은 해수온도의 상승, 해수 증발량 증가, 염분 및 용존 산소량의 감소와 같은 환경 변화를 야기할 수 있다(Jacobs *et al.* 2002; Alexander *et al.* 2006; Hoegh-Guldberg and Bruno 2010). 기후변화로 인한 환경의 변화는 동물들로 하여금 저마다의 생물기후학적 유연성에 따라 변한 환경에 적응하거나 각자에게 맞는 환경이 있는 곳으로 이동하게 하며, 이동에 제한이 있는 종은 생존에 위협을 받게 된다. 특히 고등 척추동물과는 다르게 해양어류는 대부분이 변온동물로서, 산염기 조절, 물질대사, 성장 등과 같은 생리작용이 해수온도에 매우 민감하게 영향을 받기 때문에 기후변화로 인한 생존 위협에 취약하다(Heath *et al.* 2012). 예를 들어, 육상생물들은 기후변화에 따라 평균 16.9km를 10년에 걸쳐 이주하는 것으로 집계되었으나(Chen *et al.* 2011), 이에 반하여 해양생태계의 기초가 되는 동물성 플랑크톤의 경우 10년당 약 250km의 거리를 이동하는 것이 확인되기도 하였다(Beaugrand *et al.* 2002). 이러한 플랑크톤의 공간적 분포 변화는 해양생물들의 분포 및 이동에 지대한 영향을 미치는데, 특히 어류 유채들의 경우 주요 먹이원으로서 플랑크톤에 대한 의존도가 높다. 따라서 지구온난화로 인한 기후변화의 영향을 평가하고 해양생물자원 및 생태계를 보전하기 위하여 여러 분류군에 대한 꾸준한 모니터링 및 기후변화영향 예측 모델 연구가 수행되어 왔다(Araújo *et al.* 2005; Harley *et al.* 2006; Ainsworth *et al.* 2011). 특히 해수의 용존산소량의 감소는 어류와 패각류의 이주 행동을 억제하기도 한다는 연구나, Atlantic cod (*Gadus morhua*)가 용존산소량이 감소하는 상황에서 좀 더 추운 장소로 이동하여 물질대사 수준을 낮추는 패턴을 밝힌 연구를 통하여 항상성과 이동 및 이주 능력 사이의 관계가 확인되기도 하였으며, 기온변화가 동물의 내·외적 요인과 함께 복합적으로 작용하여 이들의 공간 이용 및 분산에 영향을 줄 수 있다는 연구들도 진행되어 왔다(Lafrance *et al.* 2005; Röckmann *et al.* 2011). 해양어류 및 무척추동물들과 다르게 바닷새의 경우는 추적장치를 이용한 공간 이용 패턴 확인이 용이하므로 기후변화로 인한 이동 패턴 및 분포의 변화에 관한 연구가 해양어류에 비

해 활발하게 이루어지고 있다(Veit *et al.* 1996; Ainley *et al.* 2005; Crawford *et al.* 2008) (Table 5).

기후변화가 동물에게 미치는 영향에 대한 예측 모델 연구는 광범위한 분류군에서 진행되어 왔으며, 이를 위한 모델링 방법이 다양하게 개발되어 왔다. 이러한 예측 연구들은 대부분의 해양생물들이 시간이 지남에 따라 극 방향으로 이동하게 될 것이라는 결과를 보여주었다. 하지만 어류의 경우, 인간의 산업활동 및 어업으로 인하여 준성체와 성체의 치사율이 매우 높아 어류 개체군의 장기적인 공간 이용 패턴 연구가 어려운 상황이다(Greenstreet and Rogers 2006). 또한 지구온난화로 인한 해양환경의 변화가 해양생물들에게 미치는 영향에 대한 구체적인 연구 결과는 바닷새보다 해양어류에서 더욱 미흡한 실정이다(Miller *et al.* 2014; Vollset *et al.* 2016). 따라서 기후변화에 따른 해양어류의 분포 및 이동 패턴에 대한 연구는 해양생태계의 보전을 위해 필수적으로 시행되어야 할 것으로 판단된다.

3. 국내 바닷새 및 해양어류 이동 연구 사례

과거 국내에서 바닷새의 이동과 관련된 연구는 주로 개체군 조사를 통하여 수행되었다(Min and Won 1976; Park and Won 1993; Lee and Yoo 2002; Kim *et al.* 2017). 그러나 다양한 위치추적 기술이 발전함에 따라 국내에서도 추적 장비들을 활용하는 연구들이 점차 시도되고 있으며, 여러 장비 중 GPS 발신기(Hong *et al.* 2019)와 Argos 발신기(Choi *et al.* 2009)가 주로 사용되고 있다. 비용이 적게 드는 GPS 발신기가 더 널리 사용되고 있으며, 상대적으로 가격이 높은 Argos 발신기는 주로 국가기관의 연구사업 등에서 주로 쓰이고 있다. 특히 해상풍력발전사업과 관련하여 국가기관에서는 바닷새와 해양어류에 대한 GPS 발신기를 이용한 대규모 이동 연구를 수행하고 있다. 해양어류의 경우 음향추적 장치를 사용한 연구가 국내에서 지속적으로 수행되어 왔으며(Shin *et al.* 2004; Shin *et al.* 2005; Kang *et al.* 2008; Heo *et al.* 2019; Shin *et al.* 2019; Heo *et al.* 2021), 최근에는 안정동위원소 분석(Choi *et al.* 2020) 및 이석의 원소비 분석(Bae and Kim 2020), 그리고 인공위성 전자표지표 부착(Im and Jo 2015; Kim *et al.* 2021)을 통하여 해양어류의 이동 패턴을 파악하는 연구도 시도되는 등 연구방법론적 측면에서 다양화가 이루어지고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 각각의 분류군의 이동에 관한 연구는 개별적으로 진행되고 있지만, 해양생태계 내에서 긴밀하게 연관되

Table 5. Summary of research to date regarding global climate change affecting migration of seabirds and marine fish

Research topic		Research method	References	Research content
Global climate change	Distributional change	Tracking	Avalos <i>et al.</i> 2017	Comparison of the interannual changes in the foraging behavior of the cory's shearwater, breeding in two islands with contrasting productivity patterns in their surroundings, and during the period of recovery from this drastic climatic event
	Change in distribution/foraging behavior due to climate change	Tracking	Bost <i>et al.</i> 2015	Effects of the large-scale climatic anomalies in the Southern Hemisphere on the foraging behavior and population dynamics of the king penguin
		Population survey	Dulvy <i>et al.</i> 2008	Effects of climate change on the distribution of demersal fish assemblage in the North Sea and development of an indicator that is taxonomically representative of a wide range of fish species
		Stable isotope	Grecian <i>et al.</i> 2016	Investigation of the historical and contemporary non-breeding distribution of two petrel species in relation to climatic warming
		Tracking	Krüger <i>et al.</i> 2018	Prediction of the distributions of selected seabird species and fisheries in the Southern Oceans under current climate conditions, and projection of these distribution based on the IPCC scenarios to quantify likely changes in the resulting overlap
		Population survey	Mueter and Litzow 2008	Examination of shifts in the distribution of demersal fishes and crustaceans in response to recent climate warming (northward retreat of the cold pool)
		Population survey	Nye <i>et al.</i> 2009	Quantification of the relationship between the spatial distribution of marine fish stocks and recent oceanographic changes associated with climate change in the Northeast United States continental shelf ecosystem
		Population survey	Oedekoven <i>et al.</i> 2001	Investigation of the density and distribution of three most abundant seabird species to elucidate the variation in the types of responses to climate variation in relation to their respective morphologies and natural history patterns
		Population survey	Péron <i>et al.</i> 2010	Effects of ocean warming on subantarctic seabird distribution and abundance at sea in the southern Indian Ocean
		Tracking	Péron <i>et al.</i> 2012	Characterization and modelling of the foraging habitat of king penguins during incubation and brooding, and prediction of how projected warming of the Southern Ocean would affect their foraging range over the 21st century
		Population survey	Perry <i>et al.</i> 2005	Effects of recent increases in sea surface temperature on the distribution of exploited and nonexploited North Sea fishes in relation to life-history traits
		Tracking	Somveille <i>et al.</i> 2020	Prediction of how climate change might affect the large-scale migratory movement and distribution of albatrosses that breed in the southern Indian Ocean by projection of the model using environmental conditions for 2100 based on the IPCC scenario

Table 5. Continued

Research topic		Research method	References	Research content
Global climate change	Distributional change	Population survey	Spencer 2008	Relationship between spatial distribution of six flatfish species groups and temporal changes in the location of the cold pool in the eastern Bering Sea
	Change in distribution/foraging behavior due to climate change	Tracking	Thorne <i>et al.</i> 2016	Examination of how El Niño-Southern Oscillation (ENSO) conditions influence wind available to foraging albatrosses during breeding, and how this in turn impacts albatross movement and habitat use
		Population survey	Tseng <i>et al.</i> 2011	Examination of the relationship between distribution of Pacific saury (<i>Cololabis saira</i>) and sea surface temperature and evaluation of the impacts of climate change on their potential habitats
		Tracking	Weimerskirch <i>et al.</i> 2012	Assessment of effects of changes in wind conditions over the Southern Ocean on the foraging ecology of the wandering albatross and inference of the possible consequences of such change on life history
		Tracking	Weimerskirch and Prudor 2019	Examination of the response in foraging behavior of two seabird species to the approach and passage of a cyclon
Temporal mismatch	Change in breeding/migration period due to climate change	Population survey	Asch 2015	Relationships between phenological changes of 43 species of fish larvae off California and regional climate indices and the seasonality of SST, coastal upwelling, and zooplankton displacement volume
		Tracking	Clewlow <i>et al.</i> 2019	Quantification of the degree of niche segregation in foraging areas and depths that arises from allochry in sympatric Adélie and chinstrap penguins and their resilience to climate change
		Population survey	Rogers and Dougherty 2018	Effects of climate and population demographic structure on spawning phenology (spawn timing and duration of the spawning season) of walleye pollock (<i>Gadus chalcogrammus</i>)
		Population survey	Sauser <i>et al.</i> 2021	Investigation of the trends and relationships between climate variables and hatching dates of the snow petrel (<i>Pagodroma nivea</i>) and examination of the impact of the hatching date and environmental covariates on the fledging probability
		Population survey	Thompson <i>et al.</i> 2012	Investigation of change in the seasonal abundance of pelagic seabirds in association with trends in change in marine climate and primary productivity (chlorophyll <i>a</i>) in the Alaska Gyre
		Population survey	Votier <i>et al.</i> 2009	Investigation of factors influencing timing of breeding (median laying date) in the common guillemot (<i>Uria aalge</i>)

어 있는 바닷새와 해양어류의 생태적 관계를 고려한 융합적 연구는 오늘날까지 미비한 실정이다.

바닷새 및 해양어류 이동에 관한 향후 연구 제언

동물들의 이동은 생리적으로 적합하거나, 혹은 생존에 있어서 필수적인 자원을 얻기 용이한 환경을 찾고자 할 때 나타나는 행동이다. 따라서 동물의 이동에 대한 정보는 대상종의 생태환경적 특징 및 생활사를 연구하는 데 있어 열쇠가 될 수 있기 때문에 생태학 연구에서 매우 중요하다 (Ropert-Coudert and Wilson 2005; Jørgensen *et al.* 2008; Rutz and Hays 2009). 이에 동물들의 이동 행동을 연구하고 이들의 행동생태적 특성을 이해하고자 하는 연구가 증가하고 있다. 바닷새와 해양어류에서도 이러한 연구 동향에 따라 다방면의 목적하에 이동 연구가 진행되어 왔다. 그럼에도 불구하고 바닷새와 해양어류에 대한 이동 연구는 아직까지 미비한 상황인데, 이는 첫째로 해양이라는 공간적 제약이 있고, 둘째로 이동 연구를 위한 기술을 적용할 수 있는 대상종이 제한되며, 셋째로 연구를 위하여 필요한 비용이 크기 때문이다 (Fedak 2004; Welch *et al.* 2004; Graham *et al.* 2010; Auger-Méthé *et al.* 2017). 그러나 어업활동 및 해상풍력단지 건설, 간척 사업 등과 같은 인위적 요인에 의해 해양생물들이 생태환경적 영향을 많이 받게 됨에 따라, 해양 생물들의 공간생태 및 환경 변화에 따른 이들의 공간 이용 패턴의 변화에 대한 정보의 필요성이 매우 증가하고 있다. 따라서 Nathan *et al.* (2008)이 구축한 동물의 이동 연구 체계에 의거하여 바닷새와 해양어류의 이동 연구의 필요성에 관하여 서술하고자 한다.

1. 내적 요인과 이동 패턴 사이의 관계 분석에 관한 향후 연구 제언

동물의 이동 패턴은 유전, 형태, 생활사, 생리적 요인 등이 복합적으로 얽힌 내적 요인의 영향을 받으며, 이러한 영향에 의해 발생한 행동은 다시금 내적 요인에 영향을 미치는 피드백으로 작용한다 (Uusi-Heikkilä *et al.* 2008). 내적 요인과 공간 이용 패턴 사이의 관계는 생태학적으로 가장 기초적인 동물의 특성을 보여주기 때문에 이에 따른 선행 연구가 중요하나, 아직 이에 관한 구체적인 연구가 미흡한 상황이다. 따라서 1) 이동과 분산에 영향을 주거나 유발하는

요인이 되는 체내 생리적 요인이 무엇인지, 2) 이주 형태 (resident, short-distance and long-distance migrant)의 표현형이 생리적 상태를 반영하는지, 3) 개체의 영양상태와 이주 능력이 서로 관계가 있는지, 4) 체내의 어떤 생리적 변화가 개체군 단위의 이동 및 정착, 확장 및 축소에 영향을 주는지 등의 연구가 다양한 바닷새와 해양어류를 대상으로 수행되어야 한다 (Lennox *et al.* 2019).

2. 이동 능력 분석에 관한 향후 연구 제언

동물들은 종 및 환경, 생활사적 단계에 따라 원하는 목적지로 도달하기 위한 길을 찾는 기작과 방법이 다양하다 (Ueda *et al.* 1998; Ueda 2018). 대부분의 장거리 이주성 동물들은 자기장을 이용하는 것으로 알려져 있으며 (Durif *et al.* 2013; Putman *et al.* 2014), 이와 함께 후각 및 시각적 단서를 이용하는 경우 (Ueda *et al.* 1998)도 있다. 하지만 서식지마다 환경요인이 다양하고, 시간에 따라 변화의 정도도 다르게 나타나기 때문에 서식지 충실도가 높은 종일수록 환경 변화에 따른 적응력이 중요하다. 따라서 인위적인 요인에 의하여 해양환경의 급격한 변화가 발생하는 상황에서 바닷새 및 해양어류의 이주 시기, 이주 경로의 효율성, 이주의 정확성에 영향을 미치는 요인의 규명이 중요해지고 있다. 이를 위해 추후 1) 자연적, 인위적인 요인에 의한 자기장의 변화가 바닷새 및 해양어류의 이주 능력에 미치는 영향이 무엇인지, 2) 종별 시공간적 이주 능력의 차이가 어떻게 나타나는지, 3) 어떤 외부적 요인이 이들의 이주 정확성 및 성공률에 영향을 미칠 수 있는지 등의 연구가 필요할 것으로 여겨진다 (Lennox *et al.* 2019).

3. 외부 환경적 요인이 이동에 미치는 영향에 관한 향후 연구 제언

내적 요인 외에도 동물의 이동 및 분산에 영향을 주는 주요 요인으로 일주기, 달의 위상, 인간의 어업활동, 기후변화와 같은 외부 환경적 요인이 주목받고 있으며 이에 관한 연구가 전 세계적으로 빠르게 시도되고 있다 (Walther *et al.* 2002; Bradshaw and Holzapfel 2007; Lynch *et al.* 2016; Reid *et al.* 2019). 하지만 지역적 특성과 더불어 외부자극에 대한 반응 및 이동 능력에 개체군별 차이가 있을 수 있으며, 어류의 경우 크기가 큰 종이나 회유성 어류에 대하여 이동 연구가 주로 이루어졌기 때문에 다양한 지역적 범위에서의 연구가 필요하다. 특히 기후변화에 의한 전 세계적 규모의

Table 6. Summary of research topics and contents required in the future

Research topics	Research contents
Analysis of relationship between intrinsic factors and migration/dispersal pattern	<ul style="list-style-type: none"> • What are the physiological factors that influence migration and dispersal? • Do physiological states reflect migratory phenotypes? • Are nutritional state of individuals relevant to migration ability? • What physiological changes influence migration, colonization, expansion/contraction of distribution at the population scale?
Analysis of migration ability	<ul style="list-style-type: none"> • What are the effects of changes in magnetic fields caused by natural and anthropogenic factors on the migration ability of seabirds and marine fish? • How is the difference in spatiotemporal migration ability by species appeared? • What external factors can influence migration accuracy and success rate?
Analysis of the effects of environmental factors on migration	<ul style="list-style-type: none"> • Is there a relationship between fishery and migration/dispersal patterns of marine animals? • What are the effects of spatial disturbances and noise such as offshore wind farms on migration/dispersal patterns of marine animals? • What are the effects of global climate change on migration/dispersal patterns of marine animals?

개체군 이주 가능성의 증가는 해양 산업에 직접적으로 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에 기후변화에 따른 해양동물들의 이동 및 분산 연구의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 해양 산업이 발달하고 있는 우리나라에서는 1) 어업활동과 해양동물들의 이주 및 분산 패턴 사이에 관계가 있는지, 2) 해상풍력단지과 같은 소음 및 공간적 방해요인이 이동 및 분산 패턴에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 높아졌으며, 3) 지구온난화로 인한 기후변화가 해양동물들의 이동 및 분산 패턴에 미치는 영향에 대한 예측 등의 연구 필요성이 대두되고 있다. 이러한 연구 결과는 미래의 수산 자원 및 생태 보전을 위한 계획 수립 또한 가능하게 하므로 (Lennox *et al.* 2019), 국가 차원의 정책적 연구추진이 필요할 것으로 판단된다.

4. 바닷새 및 해양어류의 융합연구에 관한 향후 연구 제언

바닷새와 해양어류는 하나의 해양생태계를 이루는 구성원임과 동시에 각각 포식자와 피식자로 뚜렷하게 구분되는 해양 먹이사슬 관계를 갖는다(Barrera-Oro 2002). 특히, 바닷새의 경우 휴식 및 번식에 있어 육상에서의 활동이 생활사 중 필수적으로 나타나기 때문에 이들의 해상 먹이활동은 해양과 육상 사이의 물질 순환을 유발하는 매개자 역할을 하기도 한다(Anderson and Polis 1999; Keatley *et al.* 2009; Hentati-Sundberg *et al.* 2020). 또한, 포식자와 피식자 관계로 연결되어 있는 바닷새와 해양어류의 관계로 인하여,

이들의 개체 밀도, 성장 속도, 생활사에 따른 이동 및 이주는 서로에게 직·간접적으로 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 바닷새에 의한 어류의 피식률은 이들의 산란 장소, 성장 속도 및 성장에 따른 이동 및 이주에 따라 결정된다(Straty and Haight 1979). 이 중 산란 장소, 이동 및 이주와 같은 요인은 포식자인 바닷새의 시간에 따른 취식 범위와 깊은 관련이 있을 수 있으며, 이들의 성장 속도 및 성장률은 포식 조류의 포식 시기 및 피식 어류의 포식률과 관련이 있을 수 있다. 또한, 해양어류 간 시공간적 동소성에 의하여 이들 사이의 먹이사슬 관계에 따른 상호 영향이 있을 수밖에 없으며, 이는 다시 바닷새의 먹이자원 접근성에도 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 연구 결과도 보고된 바 있다(Ashmole *et al.* 1971; Straty and Haight 1979). 이러한 바닷새와 해양어류 사이의 밀접한 시공간적 동소 관계는 나아가 인간의 어업활동과 바닷새의 생존 및 치사율에도 영향을 주는 주요 요인으로 떠오르고 있다. 대규모로 이루어지는 해양 어업활동으로 인해 그물, 미끼 등에 바닷새가 걸려 익사하는 혼획 사례가 증가하고 있으며, 이에 따라 어업 도구의 훼손으로 인한 경제적 손실도 빈번히 발생하고 있다. 이는 어업활동과 바닷새 모두 해양어류의 밀도가 높은 지역을 선호하는 것으로 인하여 나타나는 현상으로 여겨지고 있다. 간접적인 예로, Phillips *et al.* (2006)은 슴새류의 일종인 white-chinned petrels (*Procellaria aequinoctialis*)의 주요 취식지와 주요 어업구역이 동소적인 관계를 갖는다는 연구 결과를 보고하였다(Fig. 3). 이처럼 바닷새와 해양어류는 서로의

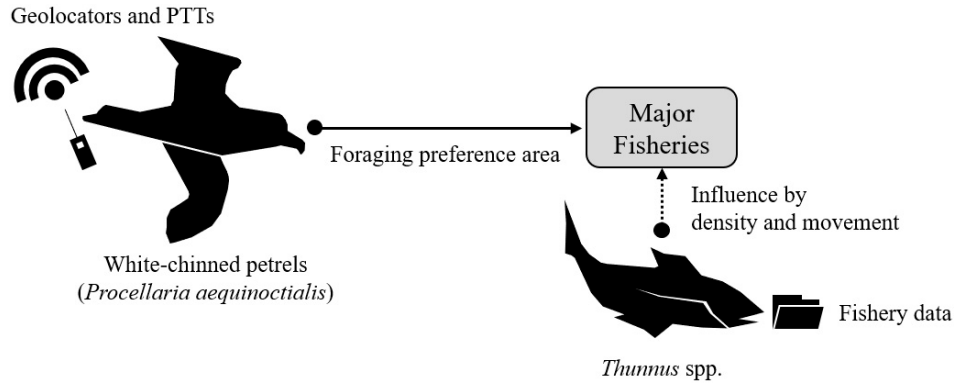


Fig. 3. Relationship between distribution of seabirds and major habitat of marine fish can be inferred indirectly by estimating overlap between seabird foraging area and fisheries. Redrawn from Phillips *et al.* 2005.

시공간적 분포에 영향을 미칠 뿐 아니라 인간의 경제활동과도 직결되어 있는 현안이기도 한 만큼, 앞으로는 단일 분류군에 집중된 연구보다는 조류와 어류의 공간생태를 모두 포괄할 수 있는 융합적인 연구의 필요성이 대두된다.

5. 국내 해양 환경 동향 및 이슈에 따른 바닷새와 해양어류 이동 연구 제언

우리나라에서는 정부의 ‘재생에너지 3020 이행계획’에 따라 신재생에너지 중 기술의 완성도 및 경제성 측면에서 가장 우수하다고 평가받는 풍력발전(Lee *et al.* 2011)이 각광을 받아 왔다. 특히 해상풍력은 육상풍력보다 입지적 제약이 적어 대규모 단지의 건설이 수월할 뿐 아니라, 소음공해로부터 자유롭고 발전 효율이 높다는 장점으로 인하여 현재 우리나라 서남해안에 대규모의 해상풍력단지가 건설되고 있다(Korea Energy Economics Institute 2010). 해상풍력단지 건설 공사 시에는 해양 저질이 훼손되고 부유물 및 부유토사가 발생하며 시설물이나 바람의 변화에 따라 퇴적물의 이동과 퇴적 과정이 변화하여 서식지에 교란이 일어날 수 있을 뿐만 아니라, 공사 중 발생하는 소음과 진동은 해양어류를 비롯한 해양생물의 서식과 분포에도 영향을 미친다(Shin and Yook 2011). 또한 상공을 비행하여 이동하는 바닷새는 풍력발전기 날개의 회전으로 인해 발생하는 와류에 의하여 터빈이나 타워와 직접 충돌할 수 있으며, 장벽효과로 인하여 취식 또는 이동 시 해상풍력단지를 회피함으로써(Johnston *et al.* 2014; Cleasby *et al.* 2015) 비행거리가 늘어나고 이에 따라 에너지를 더 많이 소비하게 된다(Tingley 2003). 이와 같이 다양한 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 국내에서는 해상풍력 개발이 본격화된지

얼마 되지 않은 만큼 아직까지 해상풍력이 바닷새와 해양어류에 미칠 수 있는 잠재적 영향에 대한 연구가 미비하며, 현재까지는 영향평가 시 이를 반영 및 개선하는 방안에 대한 연구 정도에 그치고 있다.

조사 시점의 정적인 현황 분석 측면의 성격이 강한 개체군 조사(모니터링)에 비하여, 위치추적 기법을 활용하는 이동 조사는 시간의 변화에 따른 바닷새와 해양어류의 공간 이용 변화를 실시간으로 파악할 수 있으며, 이때 기기에 따라 부착 개체의 이동 속성이나 행동, 환경변수의 측정도 가능하므로(Chung *et al.* 2021) 상대적으로 더 방대한 정보를 획득할 수 있다. 뿐만 아니라, 바닷새의 공간 이용은 이들의 먹이원인 해양어류의 공간이용과 밀접한 관련이 있을 수 있기 때문에, 바닷새는 해상풍력단지 건설로 인한 직접적인 영향 외에 해양어류에게 미치는 영향도 간접적으로 함께 받게 된다. 오늘날 국내 바닷새의 공간 이용은 위성 및 검출을 통한 해양어류의 이동과 간접적으로 관련이 있는 해양 엽록소 농도나 해수 온도 등에 견주어 비교·평가되어 왔다. 하지만 두 분류군에 동시다발적으로 미치는 인위적 영향에 대한 평가와 이들 사이의 공간 이용에 대한 인과적 영향 평가를 위해서는 바닷새와 해양어류에 대한 동일 시공간적 조건에서의 위치추적 기법을 이용한 융합 연구가 필요할 것으로 판단된다.

한편, 국내에서도 바다쇠오리(*Synthliboramphus antiquus*) 등 바다오리류를 비롯하여 아비(*Gavia stellata*), 큰회색머리아비(*G. arctica*) 등의 아비류, 그리고 바다비오리(*Mergus serrator*), 논병아리류, 가마우지류 등의 잠수성 바닷새들이 어구에 의하여 혼획되는 경우가 빈번히 발생하고 있다(Park *et al.* 2012). 이러한 바닷새 혼획의 발생 빈도는 어류

의 시공간적 이동 및 밀도 변화에 따른 영향을 받을 것으로 판단되지만, 현재까지 국내에서는 바닷새 혼획과 어업활동 및 해양어류 사이의 관계에 대하여 심도 있게 다루어진 연구가 미비하다. 따라서 바닷새 및 해양어류의 위치추적 연구와 더불어, 지역별 바닷새 혼획률과 어획량 평가를 겸하여 이들의 연주기적 공간 이용 패턴 및 이주 경향, 그리고 혼획을 저감하기 위한 보호·관리방안까지 제시할 수 있는 융합연구 또한 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구에서는 오늘날 바닷새 및 해양어류의 이동 연구 방법 및 내용의 동향을 고찰하고, 기존 동물 이동 연구의 기본 틀에 의거하여 향후 연구방향에 관하여 제안하였다. 연구방법론적 측면에서는 과학기술의 발달에 따라 전파추적 기법, 음향추적 기법, RFID, 위성추적 기법, 지오로케이터 등을 이용한 위치추적 기법이 바닷새 및 해양어류의 이동 연구에 널리 활용되고 있으며, 개체군의 분포 및 밀도 조사, 안정성 동위원소 등 체내 물질 분석을 통한 연구도 이루어진다. 연구내용의 경우, 크게 환경요인이나 종간 경쟁 등의 외적 요인, 호르몬을 비롯한 체내 물질과 같은 내적 요인, 어업활동이나 해상풍력단지 건설 등의 인위적인 활동, 그리고 기후변화가 바닷새와 해양어류의 이동에 미치는 영향 등이 다루어지고 있다. 추후 연구에서는 내적 요인과 관련하여 이동과 분산에 영향을 주거나 유발하는 요인이 되는 체내 생리적 요인이나 변화를 규명하고, 이동 능력 분석을 위하여 자기장의 변화가 조류 및 어류의 이주 능력에 미치는 영향이나 종별 시공간적 이주 능력의 차이, 이주 정확성 및 성공률에 영향을 미치는 요인에 관한 연구가 필요할 것으로 제안한다. 또한 외부 환경적 요인과 관련해서는 어업활동이나 해상풍력 등의 방해요인과 기후변화가 해양동물들의 이주 및 분산 패턴에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 대두되며, 마지막으로 여러 생태적 측면에서 서로에게 직·간접적인 영향을 미치는 바닷새와 해양어류에 대한 융합적인 연구가 요구된다.

사 사

논문에 대해 많은 시간을 들여 심사와 의견을 주신 편집위원과 익명의 심사위원들께 진심으로 감사드립니다.

본 연구는 산업통상자원부 (MOTIE)와 한국에너지기술평가원 (KETEP) ‘신재생에너지핵심기술개발사업(NO. 20203030020080)’의 지원을 받아 한국환경연구원이 수행한 “해양풍력 단지 해양공간 환경 영향 분석 및 데이터베이스 구축(2022-007(R))” 사업의 연구결과로 작성되었습니다.

REFERENCES

- Aarestrup K, F Økland, MM Hansen, D Righton, P Gargan, M Castonguay, L Bernatchez, P Howey, H Sparholt, MI Pedersen and RS McKinley. 2009. Oceanic spawning migration of the European eel (*Anguilla anguilla*). *Science* 325:1660.
- Afán I, J Navarro, D Grémillet, M Coll and MG Forero. 2019. Maiden voyage into death: are fisheries affecting seabird juvenile survival during the first days at sea? *R. Soc. Open Sci.* 6:181151.
- Agardy T. 2000. Effects of fisheries on marine ecosystems: a conservationist's perspective. *ICES J. Mar. Sci.* 57:761-765.
- Ainley DG, LB Spear, CT Tynan, JA Barth, SD Pierce, RG Ford and TJ Cowles. 2005. Physical and biological variables affecting seabird distributions during the upwelling season of the northern California Current. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.* 52:123-143.
- Ainsworth C, J Samhoury, D Busch, WW Cheung, J Dunne and TA Okey. 2011. Potential impacts of climate change on North-east Pacific marine foodwebs and fisheries. *ICES J. Mar. Sci.* 68:1217-1229.
- Alexander LV, X Zhang, TC Peterson, J Caesar, B Gleason, AMG Klein Tank, M Haylock, D Collins, B Trewin, F Rahimzadeh, A Tagipour, K Rupa Kumar, J Revadekar, G Griffiths, L Vincent, DB Stephenson, J Burn, E Aguilar, M Brunet, M Taylor, M New, P Zhai, M Rusticucci and JL Vazquez-Aguirre. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.-Atmos.* 111:D05109.
- Allen AM and NJ Singh. 2016. Linking movement ecology with wildlife management and conservation. *Front. Ecol. Evol.* 3:155.
- Amorim P, M Figueiredo, M Machete, T Morato, A Martins and R. Serrão Santos 2009. Spatial variability of seabird distribution associated with environmental factors: a case study of marine important bird areas in the Azores. *ICES J. Mar. Sci.* 66:29-40.
- Anderson WB and GA Polis. 1999. Nutrient fluxes from water to land: seabirds affect plant nutrient status on Gulf of California islands. *Oecologia* 118:324-332.

- Angelier F, H Weimerskirch, S Dano and O Chastel. 2007. Age, experience and reproductive performance in a long-lived bird: a hormonal perspective. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 61:611–621.
- Araújo MB, RG Pearson, W Thuiller and M Erhard. 2005. Validation of species-climate impact models under climate change. *Glob. Change Biol.* 11:1504–1513.
- Arneill GE, CM Perrins, MJ Wood, D Murphy, L Pisani, MJ Jessopp and JL Quinn. 2019. Sampling strategies for species with high breeding-site fidelity: a case study in burrow-nesting seabirds. *PLoS One* 14:e0221625.
- Arrizabalaga H, JG Pereira, F Royer, B Galuardi, N Goñi, I Artetxe, I Arregi and M Lutcavage. 2008. Bigeye tuna (*Thunnus obesus*) vertical movements in the Azores Islands determined with pop-up satellite archival tags. *Fish. Oceanogr.* 17:74–83.
- Asch RG. 2015. Climate change and decadal shifts in the phenology of larval fishes in the California Current ecosystem. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 112:E4065–E4074.
- Ashmole NP, D Farner and J King. 1971. Seabird ecology and the marine environment. pp. 223–286. In: *Avian Biology*, vol. 1 (Farner DS, JR King and KG Parkes eds.). Academy Press, New York.
- Atkinson PW, AJ Baker, RM Bevan, NA Clark, KB Cole, PM Gonzalez, J Newton, LJ Niles and RA Robinson. 2005. Unravelling the migration and moult strategies of a long distance migrant using stable isotopes: red knot *Calidris canutus* movements in the Americas. *Ibis* 147:738–749.
- Auger-Méthé M, CM Albertsen, ID Jonsen, AE Derocher, DC Lidgard, KR Studholme, WD Bowen, GT Crossin and JM Flemming. 2017. Spatiotemporal modelling of marine movement data using template model builder (TMB). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 565:237–249.
- Avalos MR, JA Ramos, M Soares, FG Ceia, AI Fagundes, C Gouveia, D Menezes and VH Paiva. 2017. Comparing the foraging strategies of a seabird predator when recovering from a drastic climatic event. *Mar. Biol.* 164:48.
- Avilés JM, M Molina-Morales and JG Martínez. 2014. Climatic effects and phenological mismatch in cuckoo-host interactions: a role for host phenotypic plasticity in laying date? *Oikos* 123:993–1002.
- Bae SE and JK Kim. 2020. Otolith microchemistry reveals the migration patterns of the flathead grey mullet *Mugil cephalus* (Pisces: Mugilidae) in Korean waters. *J. Ecol. Environ.* 44:21.
- Barrera-Oro E. 2002. The role of fish in the Antarctic marine food web: differences between inshore and offshore waters in the southern Scotia Arc and west Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.* 14:293–309.
- Beaugrand G, PC Reid, F Ibanez, JA Lindley and M Edwards. 2002. Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate. *Science* 296:1692–1694.
- Bégout ML, F Bau, A Acou and ML Acolas. 2016. Methodologies for investigating diadromous fish movements: conventional, PIT, acoustic and radio tagging and tracking. pp. 214–250. In: *An introduction to fish migration* (Morais P and F Daverat, eds.). CRC Press, Boca Raton, FL.
- Benstead JP, JG March, CM Pringle and FN Scatena. 1999. Effects of a low head dam and water abstraction on migratory tropical stream biota. *Ecol. Appl.* 9:656–668.
- Bergström L, F Sundqvist and U Bergström. 2013. Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 485:199–210.
- Birnie-Gauvin K, H Flávio, ML Kristensen, S Walton-Rabideau, SJ Cooke, WG Willmore, A Koed and K Aarestrup. 2019. Cortisol predicts migration timing and success in both Atlantic salmon and sea trout kelts. *Sci. Rep.* 9:2422.
- Bodey TW, MJ Jessopp, SC Votier, HD Gerritsen, IR Cleasby, KC Hamer, SC Patrick, ED Wakefield and S Bearhop. 2014. Seabird movement reveals the ecological footprint of fishing vessels. *Curr. Biol.* 24:R514–R515.
- Bost CA, JB Charrassin, Y Clerquin, Y Ropert-Coudert and Y Le Maho. 2004. Exploitation of distant marginal ice zones by king penguins during winter. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 283:293–297.
- Bost CA, C Cotté, P Terray, C Barbraud, C Bon, K Delord, O Gimenez, Y Handrich, Y Naito, C Guinet and H Weimerskirch. 2015. Large-scale climatic anomalies affect marine predator foraging behaviour and demography. *Nat. Commun.* 6:8220.
- Brabant R, N Vanermen, EWM Stienen and S Degraer. 2015. Towards a cumulative collision risk assessment of local and migrating birds in North Sea offshore wind farms. *Hydrobiologia* 756:63–74.
- Bradshaw WE and CM Holzapfel. 2007. Evolution of animal photoperiodism. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 38:1–25.
- Brown JM, EE van Loon, W Bouten, KCJ Camphuysen, L Lens, W Müller, CB Thaxter and J Shamoun-Baranes. 2021. Long distance migrants vary migratory behaviour as much as short distance migrants: an individual level comparison from a seabird species with diverse migration strategies. *J. Anim. Ecol.* 90:1058–1070.
- Bruge A, P Alvarez, A Fontán, U Cotano and G Chust. 2016. Thermal niche tracking and future distribution of Atlantic mackerel spawning in response to ocean warming. *Front. Mar. Sci.* 3:86.
- Bugoni L, L D'Alba and RW Furness. 2009. Marine habitat use of wintering spectacled petrels *Procellaria conspicillata*, and overlap with longline fishery. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 374:273–285.

- Burger C, A Schubert, S Heinänen, M Dorsch, B Kleinschmidt, R Žydelis, J Morkūnas, P Quillfeldt and G Nehls. 2019. A novel approach for assessing effects of ship traffic on distributions and movements of seabirds. *J. Environ. Manage.* 251:109511.
- Burke BJ, MC Liermann, DJ Teel and JJ Anderson. 2013. Environmental and geospatial factors drive juvenile chinook salmon distribution during early ocean migration. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 70:1167–1177.
- Campana SE. 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 188:263–297.
- Campioni L, MP Dias, JP Granadeiro and P Catry. 2020. An ontogenetic perspective on migratory strategy of a long lived pelagic seabird: timings and destinations change progressively during maturation. *J. Anim. Ecol.* 89:29–43.
- Carneiro AP, EJ Pearmain, S Opper, TA Clay, RA Phillips, AS Bonnet-Lebrun, RM Wanless, E Abraham, Y Richard, J Rice, J Handley, TE Davies, BJ Dilley, PG Ryan, C Small, J Arata, JPY Arnould, E Bell, L Bugoni, L Campioni, P Catry, J Cleeland, L Deppe, G Elliot, A Freeman, J González-Solís, JP Granadeiro, D Grémillet, TJ Landers, A Makhado, D Nel, DG Nicholls, K Rexer-Huber, CJR Robertson, PM Sagar, P Scofield, JC Stahl, A Stanworth, KL Stevens, PN Trathan, DR Thompson, L Torres, K Walker, SM Waugh, H Weimerskirch and MP Dias. 2020. A framework for mapping the distribution of seabirds by integrating tracking, demography and phenology. *J. Appl. Ecol.* 57:514–525.
- Chen IC, JK Hill, R Ohlemüller, DB Roy and CD Thomas. 2011. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333:1024–1026.
- Cherel Y, H Weimerskirch and G Duhamel. 1996. Interactions between longline vessels and seabirds in Kerguelen waters and a method to reduce seabird mortality. *Biol. Conserv.* 75:63–70.
- Chittenden CM, B Ådlandsvik, OP Pedersen, D Righton and AH Rikardsen. 2013. Testing a model to track fish migrations in polar regions using pop up satellite archival tags. *Fish. Oceanogr.* 22:1–13.
- Choi BH, HB Cho, KY Park and IS Kwak. 2020. Isotopic evidence for ontogenetic shift in food resource utilization during the migration of the slipmouth *Leiognathus nuchalis* in Gwangyang Bay, Korea. *Korean J. Ichthyol.* 32:84–90.
- Choi CY, GP Hong, JG Park, GC Bing and HY Chae. 2009. Migration of streaked shearwaters (*Calonectris leucomelas*) bred in Chilbaldo Islet, Korea. pp. 41–42. In: Proceedings of the Korean Society of Environment and Ecology Conference. Korean Society of Environment and Ecology.
- Chung HJ, JC Lee and WY Lee. 2021. A review: marine bio-logging of animal behaviour and ocean environments. *Ocean Sci. J.* 56:117–131.
- Clarke LM, SB Munch, SR Thorrold and DO Conover. 2010. High connectivity among locally adapted populations of a marine fish (*Menidia menidia*). *Ecology* 91:3526–3537.
- Clay TA, C Small, GN Tuck, D Pardo, APB Carneiro, AG Wood, JP Croxall, GT Crossin and RA Phillips. 2019. A comprehensive large scale assessment of fisheries bycatch risk to threatened seabird populations. *J. Appl. Ecol.* 56:1882–1893.
- Cleasby IR, ED Wakefield, S Bearhop, TW Bodey, SC Votier and KC Hamer. 2015. Three-dimensional tracking of a wide-ranging marine predator: flight heights and vulnerability to offshore wind farms. *J. Appl. Ecol.* 52:1474–1482.
- Clewlow HL, A Takahashi, S Watanabe, SC Votier, R Downie and N Ratcliffe. 2019. Niche partitioning of sympatric penguins by leapfrog foraging appears to be resilient to climate change. *J. Anim. Ecol.* 88:223–235.
- Cochran WW. 1980. Wildlife telemetry. pp. 507–520. In: Wildlife Management Techniques Manual (Schemnitz SD, ed.). The Wildlife Society, Washington, DC.
- Comte L and JD Olden. 2018. Fish dispersal in flowing waters: a synthesis of movement- and genetic-based studies. *Fish Fish.* 19:1063–1077.
- Copello S and F Quintana. 2009. Spatio-temporal overlap between the at-sea distribution of southern giant petrels and fisheries at the Patagonian Shelf. *Polar Biol.* 32:1211–1220.
- Corbeau A, J Collet, M Fontenille and H Weimerskirch. 2019. How do seabirds modify their search behaviour when encountering fishing boats? *PLoS One* 14:e0222615.
- Corman AM and S Garthe. 2014. What flight heights tell us about foraging and potential conflicts with wind farms: a case study in lesser black-backed gulls (*Larus fuscus*). *J. Ornithol.* 155:1037–1043.
- Cornejo-Donoso J, B Einarsson, B Birnir and SD Gaines. 2017. Effects of fish movement assumptions on the design of a marine protected area to protect an overfished stock. *PLoS One* 12:e0186309.
- Craig H. 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta* 12:133–149.
- Cranmer A, JR Smetzer, L Welch and E Baker. 2017. A Markov model for planning and permitting offshore wind energy: A case study of radio-tracked terns in the Gulf of Maine, USA. *J. Environ. Manage.* 193:400–409.
- Crawford RJM and PA Shelton. 1978. Pelagic fish and seabird interrelationships off the coasts of South West and South Africa. *Biol. Conserv.* 14:85–109.
- Crawford RJM, AJ Tree, PA Whittington, J Visagie, L Upfold, KJ Roxburg, AP Martin and BM Dyer. 2008. Recent distributional changes of seabirds in South Africa: is climate having an

- impact? *Afr. J. Mar. Sci.* 30:189–193.
- Crossin GT, MR Heupel, CM Holbrook, NE Hussey, SK Lowerre-Barbieri, VM Nguyen, GD Raby and SJ Cooke. 2017. Acoustic telemetry and fisheries management. *Ecol. Appl.* 27:1031–1049.
- Dagorn L, P Bach and E Josse. 2000. Movement patterns of large bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the open ocean, determined using ultrasonic telemetry. *Mar. Biol.* 136:361–371.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436–468.
- Dayton PK, SF Thrush, MT Agardy and RJ Hofman. 1995. Environmental effects of marine fishing. *Aquat. Conserv.-Mar. Freshw. Ecosyst.* 5:205–232.
- Deacy WWW, WB Leacock, JA Stanford and JB Armstrong. 2019. Variation in spawning phenology within salmon populations influences landscape level patterns of brown bear activity. *Ecosphere* 10:e02575.
- De Grissac S, L Borger, A Guitteaud and H Weimerskirch. 2016. Contrasting movement strategies among juvenile albatrosses and petrels. *Sci. Rep.* 6:26103.
- Delord K, C Barbraud, D Pinaud, S Ruault, SC Patrick and H Weimerskirch. 2019. Individual consistency in the non-breeding behavior of a long-distance migrant seabird, the grey petrel *Procellaria cinerea*. *Mar. Ornithol.* 47:93–103.
- Domalik AD, JM Hipfner, KR Studholme, GT Crossin and DJ Green. 2018. At-sea distribution and fine-scale habitat use patterns of zooplanktivorous cassin's auklets during the chick-rearing period. *Mar. Biol.* 165:177.
- Doucett RR, W Hooper and G Power. 1999. Identification of anadromous and nonanadromous adult brook trout and their progeny in the Tabusintac River, New Brunswick, by means of multiple-stable-isotope analysis. *Trans. Am. Fish. Soc.* 128:278–288.
- Dulvy NK, SI Rogers, S Jennings, V Stelzenmüller, SR Dye and HR Skjoldal. 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *J. Appl. Ecol.* 45:1029–1039.
- Durif CMF, HI Browman, JB Phillips, AB Skiftesvik, LA Vøllestad and HH Stockhausen. 2013. Magnetic compass orientation in the European eel. *PLoS One* 8:e59212.
- Edelaar P, R Jovani and I Gomez-Mestre. 2017. Should I change or should I go? Phenotypic plasticity and matching habitat choice in the adaptation to environmental heterogeneity. *Am. Nat.* 190:506–520.
- Erismán B, O Aburto-Oropeza, C Gonzalez-Abraham, I Mascareñas-Osorio, M Moreno-Báez and PA Hastings. 2012. Spatio-temporal dynamics of a fish spawning aggregation and its fishery in the Gulf of California. *Sci. Rep.* 2:284.
- Fedak M. 2004. Marine animals as platforms for oceanographic sampling: a “win/win” situation for biology and operational oceanography. *Mem. Natl. Inst. Polar Res.* 58:133–147.
- Filous A, AM Friedlander, H Koike, M Lammers, A Wong, K Stone and RT Sparks. 2017. Displacement effects of heavy human use on coral reef predators within the Molokini Marine Life Conservation District. *Mar. Pollut. Bull.* 121:274–281.
- Fry B. 1988. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions. *Limnol. Oceanogr.* 33:1182–1190.
- Furness RW, HM Wade and EA Masden. 2013. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *J. Environ. Manage.* 119:56–66.
- Garthe S and O Hüppop. 2004. Scaling possible adverse effects of marine wind farms on seabirds: developing and applying a vulnerability index. *J. Appl. Ecol.* 41:724–734.
- Garthe S, N Markones and AM Corman. 2017. Possible impacts of offshore wind farms on seabirds: a pilot study in northern gannets in the southern North Sea. *J. Ornithol.* 158:345–349.
- Gaunt AS, LW Oring, KP Albe, DW Anderson, LE Baptista, JC Barlow and JC Wingfield. 1997. Guidelines to the Use of Wild Birds in Research. The Ornithological Council. Washington, DC.
- González-Solís J, JP Croxall, D Oro and X Ruiz. 2007. Trans-equatorial migration and mixing in the wintering areas of a pelagic seabird. *Front. Ecol. Environ.* 5:297–301.
- Graham BS, PL Koch, SD Newsome, KW McMahon and D Aurioles. 2010. Using isoscapes to trace the movements and foraging behavior of top predators in oceanic ecosystems. pp. 299–318. In: *Isoscapes: Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth through Isotope Mapping* (West JB, GJ Bowen, TE Dawson and KP Tu, eds.). Springer, New York.
- Graham RT, MJ Witt, DW Castellanos, F Remolina, S Maxwell, BJ Godley and LA Hawkes. 2012. Satellite tracking of manta rays highlights challenges to their conservation. *PLoS One* 7:e36834.
- Grecian WJ, GA Taylor, G Loh, RAR McGill, CM Miskelly, RA Phillips, DR Thompson and RW Furness. 2016. Contrasting migratory responses of two closely related seabirds to long-term climate change. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 559:231–242.
- Greenstreet SPR and SI Rogers. 2006. Indicators of the health of the North Sea fish community: identifying reference levels for an ecosystem approach to management. *ICES J. Mar. Sci.* 63:573–593.
- Grémillet D, S Lewis, L Drapeau, CD van Der Lingen, JA Huggert, JC Coetzee, HM Verheye, F Daunt, S Wanless and PG Ryan. 2008. Spatial match-mismatch in the Benguela upwelling zone: should we expect chlorophyll and sea surface temperature to predict marine predator distributions? *J. Appl. Ecol.* 45:610–621.

- Guy TJ, SL Jennings, RM Suryan, EF Melvin, MA Bellman, LT Ballance, BA Blackie, DA Croll, T Deguchi, TO Geernaert, RW Henry, M Hester, KD Hyrenbach, J Jahncke, MA Kappes, K Ozaki, J Roletto, F Sato, WJ Sydeman and JE Zamon. 2013. Overlap of North Pacific albatrosses with the US west coast groundfish and shrimp fisheries. *Fish. Res.* 147:222–234.
- Hansson S, JE Hobbie, R Elmgren, U Larsson, B Fry and S Johansson. 1997. The stable nitrogen isotope ratio as a marker of food web interactions and fish migration. *Ecology* 78:2249–2257.
- Harley CDG, A Randall Hughes, KM Hultgren, BG Miner, CJB Sorte, CS Thornber, LF Rodriguez, L Tomanek and SL Williams. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol. Lett.* 9:228–241.
- Heath MR, FC Neat, JK Pinnegar, DG Reid, DW Sims and PJ Wright. 2012. Review of climate change impacts on marine fish and shellfish around the UK and Ireland. *Aquat. Conserv. - Mar. Freshw. Ecosyst.* 22:337–367.
- Hellström G, J Klaminder, F Finn, L Persson, A Alanärä, M Jansson, J Fick and T Brodin. 2016. GABAergic anxiolytic drug in water increases migration behaviour in salmon. *Nat. Commun.* 7:13460.
- Hentati-Sundberg J, T Evans, H Osterblom, J Hjelm, N Larson, V Bakken, A Svenson and O Olsson. 2018. Fish and seabird spatial distribution and abundance at the largest seabird colony in the Baltic Sea. *Mar. Ornithol.* 46:61–68.
- Hentati-Sundberg J, C Raymond, M Sköld, O Svensson, B Gustafsson and S Bonaglia. 2020. Fueling of a marine-terrestrial ecosystem by a major seabird colony. *Sci. Rep.* 10:15455.
- Heo G, DJ Hwang, EB Min, SY Oh, JW Park and HO Shin. 2019. Analysis of the behavior of gray rockfish (*Sebastes schlegelii* Hilgendorf) on the construction of wind power generators in the sea area around Byeonsan Peninsula, Korea. *J. Korean Soc. Fish. Ocean. Technol.* 55:129–137.
- Hoegh-Guldberg O and JF Bruno. 2010. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* 328:1523–1528.
- Hong MJ, MR Kim, H Lee and SM Cho. 2019. First report of annual habitat ranges in black-tailed gulls (*Larus crassirostris*) breeding on Dokdo Island. *Ocean Polar Res.* 41:99–105.
- Hussey NE, SFJ Dudley, ID McCarthy, G Cliff and AT Fisk. 2011. Stable isotope profiles of large marine predators: viable indicators of trophic position, diet, and movement in sharks? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 68:2029–2045.
- Im YJ and HS Jo. 2015. Migration and growth rate of Mottled skate, *Beringraja pulchra* by the tagging release program in the Yellow Sea, Korea. *J. Kor. Soc. Fish. Technol.* 51:227–234.
- Jacobs SS, CF Giulivi and PA Mele. 2002. Freshening of the Ross Sea during the late 20th century. *Science* 297:386–389.
- Jepsen N, C Schreck, S Clements and E Thorstad. 2005. A brief discussion on the 2% tag/bodymass rule of thumb. pp. 255–259. In: *Aquatic Telemetry: Advances and Applications*. Proceedings of the Fifth Conference on Fish Telemetry held in Europe (Spedicato MT, G Lembo and G Marmulla, eds). FAO/COISPA. Rome.
- Johnston A, ASCP Cook, LJ Wright, EM Humphreys and NHK Burton. 2014. Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. *J. Appl. Ecol.* 51:31–41.
- Johnston CM, CG Turnbull and ML Tasker. 2002. Natura 2000 in UK Offshore Waters: advice to support the implementation of the EC habitats and birds directives in UK offshore waters. Joint Nature Conservation Committee. Peterborough, UK.
- Jørgensen C, ES Dunlop, AF Opdal and Ø Fiksen. 2008. The evolution of spawning migrations: state dependence and fishing induced changes. *Ecology* 89:3436–3448.
- Kang KM, HO Shin, DH Kang and MS KIM. 2008. Comparison of behavior characteristics between wild and cultured black seabream *Acanthopagrus schlegelii* using acoustic telemetry. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.* 44:141–147.
- Keatley BE, MSV Douglas, JM Blais, ML Mallory and JP Smol. 2009. Impacts of seabird-derived nutrients on water quality and diatom assemblages from Cape Vera, Devon Island, Canadian High Arctic. *Hydrobiologia* 621:191–205.
- Kim CS, JG Yang, SJ Kang, SJ Lee and SK Kang. 2021. Tracking of yellowtail *Seriola quinqueradiata* migration using pop-up satellite archival tag (PSAT) and oceanic environments data. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 54:787–797.
- Kim MR, YS Kwon, KB Nam, H Lee, HH Myeong and HS Noh. 2017. Breeding population and habitat of black-tailed gulls (*Larus crassirostris*) on Nando Island, Natural Monument. *Korean J. Environ. Biol.* 35:134–142.
- Kline TC, WJ Wilson and JJ Goering. 1998. Natural isotope indicators of fish migration at Prudhoe Bay, Alaska. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55:1494–1502.
- Korea Energy Economics Institute. 2010. A Study on Offshore Wind Power Policy in Europe - Denmark, Germany and UK. Ministry of Trade, Industry and Energy. Sejong, Korea.
- Kraus RT, CM Holbrook, CS Vandergoot, TR Stewart, MD Faust, DA Watkinson, C Charles, M Pegg, EC Enders and CC Krueger. 2018. Evaluation of acoustic telemetry grids for determining aquatic animal movement and survival. *Methods Ecol. Evol.* 9:1489–1502.
- Krüger L, JA Ramos, JC Xavier, D Grémillet, J González-Solís, MV Petry, RA Phillips, RM Wanless and VH Paiva. 2018. Projected distributions of Southern Ocean albatrosses, petrels and fisheries as a consequence of climatic change. *Ecography* 41:195–208.

- Lafrance P, M Castonguay, D Chabot and C Audet. 2005. Ontogenetic changes in temperature preference of Atlantic cod. *J. Fish Biol.* 66:553–567.
- Larsen JK and M Guillemette. 2007. Effects of wind turbines on flight behaviour of wintering common eiders: implications for habitat use and collision risk. *J. Appl. Ecol.* 44:516–522.
- Lea JSE, BM Wetherbee, LL Sousa, C Aming, N Burnie, NE Humphries, N Queiroz, GM Harvey, DW Sims and MS Shivji. 2018. Ontogenetic partial migration is associated with environmental drivers and influences fisheries interactions in a marine predator. *ICES J. Mar. Sci.* 75:1383–1392.
- Lee JS, KS Kang, BM Park, YJ Won, BG Kim and NS Ahn. 2011. A study on current status and outlook of offshore wind development in Korea. *J. Wind Energy* 2:6–14.
- Lee KG and JC Yoo. 2002. Breeding population of streaked shearwaters (*Calonectris leucomelas*) and the effect of Norway rat (*Rattus norvegicus*) predation on Sasudo Island. *J. Yama-shina Inst. Ornithol.* 33:142–147.
- Lennox RJ, CP Paukert, K Aarestrup, M Auger-Méthé, L Baumgartner, K Birnie-Gauvin, K Bøe, K Brink, JW Brownscombe, Y Chen, JG Davidsen, EJ Eliason, A Filous, BM Gillanders, IP Helland, AZ Horodysky, SR Januchowski-Hartley, SK Low-erre-Barbieri, MC Lucas, EG Martins, KJ Murchie, PS Pompeu, M Power, R Raghavan, FJ Rahel, D Secor, JD Thiem, EB Thorstad, H Ueda, FG Whoriskey and SJ Cooke. 2019. One hundred pressing questions on the future of global fish migration science, conservation, and policy. *Front. Ecol. Evol.* 7:286.
- Leum LL and JH Choat. 1980. Density and distribution patterns of the temperate marine fish *Cheilodactylus spectabilis* (Cheilodactylidae) in a reef environment. *Mar. Biol.* 57:327–337.
- Longcore T and C Rich. 2004. Ecological light pollution. *Front. Ecol. Environ.* 2:191–198.
- Longmore C, CN Trueman, F Neat, EJ O’Gorman, JA Milton and S Mariani. 2011. Otolith geochemistry indicates life-long spatial population structuring in a deep-sea fish, *Coryphaenoides rupestris*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 435:209–224.
- Louzao M, P Fernandez-Martin, N Weidberg, MB Santos and R Gonzalez-Quiros. 2020. Spatio-temporal patterns of northern gannet abundance in a migratory and wintering area. *Zoology* 140:125776.
- Lutcavage ME, RW Brill, GB Skomal, BC Chase and PW Howey. 1999. Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine: do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56:173–177.
- Lynch AJ, BJE Myers, C Chu, LA Eby, JA Falke, RP Kovach, TJ Krabbenhoft, TJ Kwak, J Lyons, CP Paukert and JE Whitney. 2016. Climate change effects on North American inland fish populations and assemblages. *Fisheries* 41:346–361.
- Mabey SES. 2004. Avian migration and implications for wind power development in the Eastern United States. p. 66. In: *Proceedings of the Wind Energy and Birds/Bats Workshop: Understanding and Resolving Bird and Bat Impacts*. The American Wind Energy Association and The American Bird Conservancy. Washington, DC.
- MacAvoy SE, SA Macko and GC Garman. 1998. Tracing marine biomass into tidal freshwater ecosystems using stable sulfur isotopes. *Sci. Nat.* 85:544–546.
- MacAvoy SE, SA Macko, SP McIninch and GC Garman. 2000. Marine nutrient contributions to freshwater apex predators. *Oecologia* 122:568–573.
- Magnusdottir E, EHK Leat, S Bourgeon, H Strøm, A Petersen, RA Phillips, SA Hanssen, JO Bustnes, P Hersteinsson and RW Furness. 2012. Wintering areas of great skuas *Stercorarius skua* breeding in Scotland, Iceland and Norway. *Bird Stud.* 59: 1–9.
- Markham A. 2008. On a wildlife tracking and telemetry system: a wireless network approach. Ph.D. Thesis, University of Cape Town. Cape Town.
- Masden EA, DT Haydon, AD Fox, RW Furness, R Bullman and M Desholm. 2009. Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds. *ICES J. Mar. Sci.* 66:746–753.
- Masello JF, R Mundry, M Poisbleau, L Demongin, CC Voigt, M Wikelski and P Quillfeldt. 2010. Diving seabirds share foraging space and time within and among species. *Ecosphere* 1:19.
- Matsumoto S, T Yamamoto, R Kawabe, S Ohshimo and K Yoda. 2016. The Changjiang River discharge affects the distribution of foraging seabirds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 555:273–277.
- Meatley DE, SR McWilliams, PWC Paton, C Lepage, SG Gilliland, L Savoy, GH Olsen and JE Osenkowski. 2019. Resource selection and wintering phenology of white-winged scoters in southern New England: implications for offshore wind energy development. *Condor* 121:duy014.
- Mendel B, P Schwemmer, V Peschko, S Muller, H Schwemmer, M Mercker and S Garthe. 2019. Operational offshore wind farms and associated ship traffic cause profound changes in distribution patterns of loons (*Gavia* spp.). *J. Environ. Manage.* 231:429–438.
- Mueter FJ and MA Litzow. 2008. Sea ice retreat alters the biogeography of the Bering Sea continental shelf. *Ecol. Appl.* 18:309–320.
- Miller KM, A Teffer, S Tucker, S Li, AD Schulze, M Trudel, F Juanes, A Tabata, KH Kaukinen, NG Ginther, TJ Ming, SJ Cooke, JM Hipfner, DA Patterson and SG Hinch. 2014. Infectious disease, shifting climates, and opportunistic predators: cumulative factors potentially impacting wild salmon declines.

- Evol. Appl. 7:812–855.
- Min BY and PO Won. 1976. An offshore winter seabird survey on the south coast of Korean Peninsula (Mogpo-Wando-Yeosu area). *J. Yamashina Inst. Ornithol.* 8:53–67.
- Montevocchi W, D Fifield, C Burke, S Garthe, A Hedde, JF Rail and G Robertson. 2012. Tracking long-distance migration to assess marine pollution impact. *Biol. Lett.* 8:218–221.
- Nasby-Lucas N, H Dewar, CH Lam, KJ Goldman and ML Domeier. 2009. White shark offshore habitat: a behavioral and environmental characterization of the eastern Pacific shared offshore foraging area. *PLoS One* 4:e8163.
- Nathan R, WM Getz, E Revilla, M Holyoak, R Kadmon, D Saltz and PE Smouse. 2008. A movement ecology paradigm for unifying organismal movement research. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:19052–19059.
- Navarro J and J González-Solís. 2009. Environmental determinants of foraging strategies in cory's shearwaters *Calonectris diomedea*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 378:259–267.
- Navarro J, SC Votier, J Aguzzi, JJ Chiesa, MG Forero and RA Phillips. 2013. Ecological segregation in space, time and trophic niche of sympatric planktivorous petrels. *PLoS One* 8:e62897.
- Newton I. 2007. Weather related mass mortality events in migrants. *Ibis* 149:453–467.
- Nye JA, JS Link, JA Hare and WJ Overholtz. 2009. Changing spatial distribution of fish stocks in relation to climate and population size on the Northeast United States continental shelf. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 393:111–129.
- Oedekoven CS, DG Ainley and LB Spear. 2001. Variable responses of seabirds to change in marine climate: California Current, 1985–1994. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 212:265–281.
- Park HO, SK Choi, JM Jung, JH Kim and HC Kim. 2012. An assessment of seabird bycatch in coastal fisheries in the East Sea. *Korean J. Orni.* 19:151–161.
- Park JY and PO Won. 1993. Survey of seabird breeding in Korea. *Bull. Kor. Inst. Orni.* 4:101–105.
- Pecl GT, MB Araújo, JD Bell, J Blanchard, TC Bonebrake, IC Chen, TD Clark, RK Colwell, F Danielsen, B Evengård, L Falconi, S Ferrier, S Frusher, RA Garcia, RB Griffis, AJ Hobday, C Janion-Scheepers, MA Jarzyna, S Jennings, J Lenoir, HI Linnetved, VY Martin, PC McCormack, J McDonald, NJ Mitchell, T Mustonen, JM Pandolfi, N Pettorelli, E Popova, SA Robinson, BR Scheffers, JD Shaw, CJB Sorte, JM Strugnell, JM Sunday, MN Tuanmu, A Vergés, C Villanueva, TWernberg, E Wapstra and SE Williams. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355:eaai9214.
- Péron C, M Authier, C Barbraud, K Delord, D Besson and H Weimerskirch. 2010. Interdecadal changes in at-sea distribution and abundance of subantarctic seabirds along a latitudinal gradient in the southern Indian Ocean. *Glob. Change Biol.* 16:1895–1909.
- Péron C and D Grémillet. 2013. Tracking through life stages: adult, immature and juvenile autumn migration in a long-lived seabird. *PLoS One* 8:e72713.
- Péron C, H Weimerskirch and CA Bost. 2012. Projected poleward shift of king penguins' (*Aptenodytes patagonicus*) foraging range at the Crozet Islands, southern Indian Ocean. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B-Biol. Sci.* 279:2515–2523.
- Perrow MR, ER Skeate, P Lines, D Brown and ML Tomlinson. 2006. Radio telemetry as a tool for impact assessment of wind farms: the case of little terns *Sterna albifrons* at Scroby Sands, Norfolk, UK. *Ibis* 148:57–75.
- Perry AL, PJ Low, JR Ellis and JD Reynolds. 2005. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308:1912–1915.
- Petalas C, T Lazarus, RA Lavoie, KH Elliott and MF Guigueno. 2021. Foraging niche partitioning in sympatric seabird populations. *Sci. Rep.* 11:2493.
- Petersen SL, RA Phillips, PG Ryan and LG Underhill. 2008. Albatross overlap with fisheries in the Benguela upwelling system: implications for conservation and management. *Endanger. Species Res.* 5:117–127.
- Phillips RA, JRD Silk and JP Croxall. 2005. Foraging and provisioning strategies of the light-mantled sooty albatross at South Georgia: competition and co-existence with sympatric pelagic predators. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 285:259–270.
- Phillips RA, JRD Silk, JP Croxall and V Afanasyev. 2006. Year-round distribution of white-chinned petrels from South Georgia: relationships with oceanography and fisheries. *Biol. Conserv.* 129:336–347.
- Phillips RA, JC Xavier and JP Croxall. 2003. Effects of satellite transmitters on albatrosses and petrels. *Auk* 120:1082–1090.
- Pichegru L, PG Ryan, C Le Bohec, CD van der Lingen, R Navarro, S Petersen, S Lewis, J van der Westhuizen and D Grémillet. 2009. Overlap between vulnerable top predators and fisheries in the Benguela upwelling system: implications for marine protected areas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 391:199–208.
- Pickett EP, WR Fraser, DL Patterson-Fraser, MA Cimino, LG Torres and AS Friedlaender. 2018. Spatial niche partitioning may promote coexistence of *Pygoscelis* penguins as climate induced sympatry occurs. *Ecol. Evol.* 8:9764–9778.
- Pinter-Wollman N and K Mabry. 2010. Remote-sensing of behavior. pp. 33–40. In: *Encyclopedia of Animal Behavior*, vol. 3 (Breed MD and J Moore, eds.). Academic Press, Oxford.
- Polte P, P Kotterba, D Moll and L von Nordheim. 2017. Ontogenetic loops in habitat use highlight the importance of littoral habitats for early life-stages of oceanic fishes in temperate waters. *Sci. Rep.* 7:42709.

- Priede IG and J French. 1991. Tracking of marine animals by satellite. *Int. J. Remote Sens.* 12:667–680.
- Putman NF, MM Scanlan, EJ Billman, JP O'Neil, RB Couture, TP Quinn, KJ Lohmann and DLG Noakes. 2014. An inherited magnetic map guides ocean navigation in juvenile Pacific salmon. *Curr. Biol.* 24:446–450.
- Quillfeldt P, Y Cherel, K Delord and H Weimerkirch. 2015. Cool, cold or colder? Spatial segregation of prions and blue petrels is explained by differences in preferred sea surface temperatures. *Biol. Lett.* 11:20141090.
- Rahel FJ and RL McLaughlin. 2018. Selective fragmentation and the management of fish movement across anthropogenic barriers. *Ecol. Appl.* 28:2066–2081.
- Ramos R, J González-Solis and X Ruiz. 2009. Linking isotopic and migratory patterns in a pelagic seabird. *Oecologia* 160: 97–105.
- Ramos R, V Morera-Pujol, M Cruz-Flores, S López-Souto, M Brothers and J González-Solis. 2019. A geolocator-tagged fledgling provides first evidence on juvenile movements of cory's shearwater *Calonectris borealis*. *Bird Stud.* 66:283–288.
- Rau GH, RE Sweeney and IR Kaplan. 1982. Plankton ^{13}C : ^{12}C ratio changes with latitude: differences between northern and southern oceans. *Deep-Sea Res. A* 29:1035–1039.
- Reid AJ, AK Carlson, IF Creed, EJ Eliason, PA Gell, PTJ Johnson, KA Kidd, TJ MacCormack, JD Olden, SJ Ormerod, JP Smol, WW Taylor, K Tockner, JC Vermaire, D Dudgeon and SJ Cooke. 2019. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. *Biol. Rev.* 94:849–873.
- Reisinger RR, T Carpenter-Kling, M Connan, Y Cherel and PA Pistorius. 2020. Foraging behaviour and habitat-use drives niche segregation in sibling seabird species. *R. Soc. Open Sci.* 7:200649.
- Reubens JT, F Pasotti, SD Degraer and M Vincx. 2013. Residency, site fidelity and habitat use of Atlantic cod (*Gadus morhua*) at an offshore wind farm using acoustic telemetry. *Mar. Environ. Res.* 90:128–135.
- Röckmann C, M Dickey-Collas, MR Payne and R van Hal. 2011. Realized habitats of early-stage North Sea herring: looking for signals of environmental change. *ICES J. Mar. Sci.* 68:537–546.
- Rodríguez A, B Rodríguez and JJ Negro. 2015. GPS tracking for mapping seabird mortality induced by light pollution. *Sci. Rep.* 5:10670.
- Rogers LA and AB Dougherty. 2019. Effects of climate and demography on reproductive phenology of a harvested marine fish population. *Glob. Change Biol.* 25:708–720.
- Ronconi RA and AE Burger. 2011. Foraging space as a limited resource: inter- and intra-specific competition among sympatric pursuit-diving seabirds. *Can. J. Zool.* 89:356–368.
- Ropert-Coudert Y and RP Wilson. 2005. Trends and perspectives in animal attached remote sensing. *Front. Ecol. Environ.* 3:437–444.
- Rutz C and GC Hays. 2009. New frontiers in biologging science. *Biol. Lett.* 5: 289–292.
- Sauser C, K Delord and C Barbraud. 2021. Sea ice and local weather affect reproductive phenology of a polar seabird with breeding consequences. *Condor* 123:duab032.
- Schwemmer P, B Mendel, N Sonntag, V Dierschke and S Garthe. 2011. Effects of ship traffic on seabirds in offshore waters: implications for marine conservation and spatial planning. *Ecol. Appl.* 21:1851–1860.
- Shin CO and GH Yook. 2011. Environmental and economic impacts of offshore wind power. Korea Maritime Institute. Busan.
- Shin HO, G Heo, MA Heo and KM Kang. 2019. Behavioral analysis of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) released to the entrance of Jinhae Bay, Korea. *J Korean Soc. Fish. Ocean Technol.* 55:29–38.
- Shin HO, JW Tae and KM Kang. 2004. Acoustic telemetry tracking of the response behavior of red seabream (*Chrysophrys major*) to artificial reefs. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 37:433–439.
- Shin HO, JW Tae and KM Kang. 2005. Acoustic telemetry measurement of the movement range and diurnal behavior of rockfish (*Sebastes schlegelii*) at the artificial reef. *Korean J. Fish. Aquat. Sci.* 38:129–136.
- Shulman MJ. 1985. Coral reef fish assemblages: intra- and inter-specific competition for shelter sites. *Environ. Biol. Fish.* 13: 81–92.
- Sillett TS and RT Holmes. 2002. Variation in survivorship of a migratory songbird throughout its annual cycle. *J. Anim. Ecol.* 71:296–308.
- Sims DW, N Queiroz, NE Humphries, FP Lima and GC Hays. 2009. Long-term GPS tracking of ocean sunfish *Mola mola* offers a new direction in fish monitoring. *PLoS One* 4:e7351.
- Sims DW, VJ Wearmouth, MJ Genner, AJ Southward and SJ Hawkins. 2004. Low temperature driven early spawning migration of a temperate marine fish. *J. Anim. Ecol.* 73:333–341.
- Solomon DJ and ECE Potter. 1988. First results with a new estuarine fish tracking system. *J. Fish Biol.* 33:127–132.
- Sommerfeld J, B Mendel, HO Fock and S Garthe. 2016. Combining bird-borne tracking and vessel monitoring system data to assess discard use by a scavenging marine predator, the lesser black-backed gull *Larus fuscus*. *Mar. Biol.* 163:116.
- Somveille M, MP Dias, H Weimerskirch and TE Davies. 2020.

- Projected migrations of southern Indian Ocean albatrosses as a response to climate change. *Ecography* 43:1683–1691.
- Spencer PD. 2008. Density-independent and density-dependent factors affecting temporal changes in spatial distributions of eastern Bering Sea flatfish. *Fish. Oceanogr.* 17:396–410.
- Stenhouse IJ, C Egevang and RA Phillips. 2012. Trans-equatorial migration, staging sites and wintering area of sabin's gulls *Larus sabini* in the Atlantic Ocean. *Ibis* 154:42–51.
- Straty RR and RE Haight. 1979. Interactions among marine birds and commercial fish in the eastern Bering Sea. pp. 201–219. In: *Conservation of Marine Birds of Northern North America* (Bartonek JC and DN Nettleship, eds.). US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, DC.
- Sztukowski LA, ML van Toor, H Weimerskirch, DR Thompson, LG Torres, PM Sagar, PA Cotton and SC Votier 2017. Tracking reveals limited interactions between Campbell albatross and fisheries during the breeding season. *J. Ornithol.* 158:725–735.
- Takahashi A, D Ochi, Y Watanuki, T Deguchi, N Oka, V Afanasyev, JW Fox and PN Trathan. 2008. Post-breeding movement and activities of two streaked shearwaters in the north-western Pacific. *Ornithol. Sci.* 7:29–35.
- Taranger GL, C Haux, SO Stefansson, BT Björnsson, BT Walther and T Hansen. 1998. Abrupt changes in photoperiod affect age at maturity, timing of ovulation and plasma testosterone and oestradiol-17 β profiles in Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Aquaculture* 162:85–98.
- Thaxter CB, VH Ross-Smith, W Bouten, NA Clark, GJ Conway, EA Masden, GD Clewley, LJ Barber and NHK Burton. 2019. Avian vulnerability to wind farm collision through the year: insights from lesser black backed gulls (*Larus fuscus*) tracked from multiple breeding colonies. *J. Appl. Ecol.* 56:2410–2422.
- Thaxter CB, VH Ross-Smith, W Bouten, NA Clark, GJ Conway, MM Rehfish and NHK Burton. 2015. Seabird-wind farm interactions during the breeding season vary within and between years: a case study of lesser black-backed gull *Larus fuscus* in the UK. *Biol. Conserv.* 186:347–358.
- Thompson SA, WJ Sydeman, JA Santora, KH Morgan, W Crawford and MT Burrows. 2012. Phenology of pelagic seabird abundance relative to marine climate change in the Alaska Gyre. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 454:159–170.
- Thorne LH, MG Connors, EL Hazen, SJ Bograd, M Antolos, DP Costa and SA Shaffer. 2016. Effects of El Niño-driven changes in wind patterns on North Pacific albatrosses. *J. R. Soc. Interface* 13:20160196.
- Thorrold SR, C Latkoczy, PK Swart and CM Jones. 2001. Natal homing in a marine fish metapopulation. *Science* 291:297–299.
- Torres LG, DR Thompson, S Bearhop, S Votier, GA Taylor, PM Sagar and BC Robertson. 2011. White-capped albatrosses alter fine-scale foraging behavior patterns when associated with fishing vessels. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 428:289–301.
- Tseng CT, CL Sun, SZ Yeh, SC Chen, WC Su and DC Liu. 2011. Influence of climate-driven sea surface temperature increase on potential habitats of the Pacific saury (*Cololabis saira*). *ICES J. Mar. Sci.* 68:1105–1113.
- Ueda H. 2018. Migration and navigation in fish. pp. 84–89. In: *Encyclopedia of Reproduction*, 2nd ed. (Skinner MK, ed.). Academic Press, Oxford.
- Ueda H, M Kaeriyama, K Mukasa, A Urano, H Kudo, T Shoji, Y Tokumitsu, K Yamauchi and K Kurihara. 1998. Lacustrine sockeye salmon return straight to their natal area from open water using both visual and olfactory cues. *Chem. Senses* 23:207–212.
- Uusi-Heikkilä S, C Wolter, T Klefoth and R Arlinghaus. 2008. A behavioral perspective on fishing-induced evolution. *Trends Ecol. Evol.* 23:419–421.
- Vanermen N, W Courtens, R Daelemans, L Lens, W Müller, M van de Walle, H Verstraete and EWM Stienen. 2020. Attracted to the outside: a meso-scale response pattern of lesser black-backed gulls at an offshore wind farm revealed by GPS telemetry. *ICES J. Mar. Sci.* 77:701–710.
- Varpe Ø and Ø Fiksen. 2010. Seasonal plankton-fish interactions: light regime, prey phenology, and herring foraging. *Ecology* 91:311–318.
- Veit RR, P Pyle and JA McGowan. 1996. Ocean warming and long-term change in pelagic bird abundance within the California Current system. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 139:11–18.
- Vollset KW, RI Krontveit, PA Jansen, B Finstad, BT Barlaup, OT Skilbrei, M Krkošek, P Romunstad, A Aunsmo, AJ Jensen and I Dohoo. 2016. Impacts of parasites on marine survival of Atlantic salmon: a meta analysis. *Fish Fish.* 17:714–730.
- Votier SC, S Bearhop, MJ Witt, R Inger, D Thompson and J Newton. 2010. Individual responses of seabirds to commercial fisheries revealed using GPS tracking, stable isotopes and vessel monitoring systems. *J. Appl. Ecol.* 47:487–497.
- Votier SC, A Bicknell, SL Cox, KL Scales and SC Patrick. 2013. A bird's eye view of discard reforms: bird-borne cameras reveal seabird/fishery interactions. *PLoS One* 8:e57376.
- Votier SC, BJ Hatchwell, M Mears and TR Birkhead. 2009. Changes in the timing of egg-laying of a colonial seabird in relation to population size and environmental conditions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 393:225–233.
- Wade HM, EA Masden, AC Jackson, CB Thaxter, NHK Burton, W Bouten and RW Furness. 2014. Great skua (*Stercorarius skua*) movements at sea in relation to marine renewable energy developments. *Mar. Environ. Res.* 101:69–80.

- Walters LJ and DS Wethey. 1996. Settlement and early post-settlement survival of sessile marine invertebrates on topographically complex surfaces: the importance of refuge dimensions and adult morphology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 137:161–171.
- Walther GR, E Post, P Convey, A Menzel, C Parmesan, TJC Beebee, JM Fromentin, O Hoegh-Guldberg and F Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416:389–395.
- Watts EG, H Copp and LJ Deftos. 1975. Changes in plasma calcitonin and calcium during the migration of salmon. *Endocrinology* 96:214–218.
- Waugh SM, JW Griffiths, TA Poupart, DP Filippi, K Rogers and JYP Arnould. 2018. Environmental factors and fisheries influence the foraging patterns of a subtropical seabird, the westland petrel (*Procellaria westlandica*), in the Tasman Sea. *Condor* 120:371–387.
- Weimerskirch H, Y Cherel, K Delord, A Jaeger, SC Patrick and L Riotte-Lambert. 2014. Lifetime foraging patterns of the wandering albatross: life on the move! *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 450:68–78.
- Weimerskirch H, M Louzao, S de Grissac and K Delord. 2012. Changes in wind pattern alter albatross distribution and life-history traits. *Science* 335:211–214.
- Weimerskirch H and A Prudor. 2019. Cyclone avoidance behaviour by foraging seabirds. *Sci. Rep.* 9:5400.
- Welch DW, BR Ward and SD Batten. 2004. Early ocean survival and marine movements of hatchery and wild steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) determined by an acoustic array: Queen Charlotte Strait, British Columbia. *Deep-Sea Res. Part II-Top. Stud. Oceanogr.* 51:897–909.
- Welcker J and G Nehls. 2016. Displacement of seabirds by an offshore wind farm in the North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 554:173–182.
- Wells BK, JA Santora, MJ Henderson, P Warzybok, J Jahncke, RW Bradley, DD Huff, ID Schroeder, P Nelson, JC Field and DG Ainley. 2017. Environmental conditions and prey-switching by a seabird predator impact juvenile salmon survival. *J. Mar. Syst.* 174:54–63.
- Wickliffe LC and PGR Jodice. 2010. Seabird attendance at shrimp trawlers in nearshore waters of South Carolina. *Mar. Ornithol.* 38:31–39.
- Wilcove DS, D Rothstein, J Dubow, A Phillips and E Losos. 1998. Quantifying threats to imperiled species in the United States. *BioScience* 48:607–615.
- Winter JD, VB Kuechle, DB Siniff and JR Tester. 1978. Equipment and methods for radio tracking freshwater fish. University of Minnesota. Minneapolis, MN.
- Xue DX, QL Yang, YL Li, SB Zong, TX Gao and JX Liu. 2019. Comprehensive assessment of population genetic structure of the overexploited Japanese grenadier anchovy (*Coilia nasus*): implications for fisheries management and conservation. *Fish. Res.* 213:113–120.
- Zangmeister JL, MF Haussmann, J Cerchiara and RA Mauck. 2009. Incubation failure and nest abandonment by leach's storm-petrels detected using PIT tags and temperature loggers. *J. Field Ornithol.* 80:373–379.