

## 해양생물에 대한 전자기장의 영향과 과학기반 영향평가

김병모<sup>1</sup> · 김수진<sup>2</sup> · 문성대<sup>1</sup> · 이정석<sup>3</sup> · 최태섭<sup>3,†</sup><sup>1</sup>(주)네오엔비즈 환경안전연구소 선임연구원<sup>2</sup>(주)네오엔비즈 환경안전연구소 연구원<sup>3</sup>(주)네오엔비즈 환경안전연구소 책임연구원

## Effect of Electromagnetic Fields on Marine Organisms and Effect Assessment Based on Scientific Grounds

Byeong-Mo Gim<sup>1</sup>, Soo Jin Kim<sup>2</sup>, Seong-Dae Moon<sup>1</sup>, Jung-Suk Lee<sup>3</sup>, and Tae Seob Choi<sup>3,†</sup><sup>1</sup>Senior Researcher, Institute of Environmental Protection, NeoEnBiz Co., Bucheon Gyeonggi 14523, Korea<sup>2</sup>Researcher, Institute of Environmental Protection, NeoEnBiz Co., Bucheon Gyeonggi 14523, Korea<sup>3</sup>Principal Researcher, Institute of Environmental Protection, NeoEnBiz Co., Bucheon Gyeonggi 14523, Korea

## 요 약

해양에서 해상풍력과 같은 신재생에너지를 활용하기 위한 시설이 늘어 감에 따라 생산된 전기를 전력계통(grid)에 인입하기 위해 해저에 상당한 길이의 전력케이블이 매설되고 있다. 매설된 전력케이블에서 방출되는 전자기장(EMFs, Electromagnetic Fields)은 해양환경에서 확산되고 서식하는 다양한 생물이 지구자기장(GMF, Geomagnetic Field)을 이용한 이동(migration), 먹이 탐색 등의 활동에 영향을 미칠 것으로 예측된다. 하지만 생물에 대한 잠재적인 전자기장(EMFs)의 영향에 대한 평가는 아직 미흡한 것이 현실이다. 해양환경 및 생물에 대한 영향을 정확하게 평가할 수 있는 과학적 기반이 부족한 상황에서 해양 신재생에너지 개발업자, 어민을 포함한 인근 지역 주민, 정부 정책담당자 등 관련자 사이에서의 개발에 대한 불확실성만 증가하고 있다. 본 연구에서는 해저에 매립된 전력케이블에서 방출되는 전자기장(EMFs)에 전자기장(EMFs)에 노출되는 해양생물에 대한 유의한 생물학적 위해성과 관련하여 문헌을 검토하여 정리하였다. 전자기장(EMFs)의 영향을 평가한 많은 연구들이 표준화된 시험방법을 사용하고 있지 않았으며, 모순된 결과들을 도출하고 있음을 확인하였다. 향후 해양환경 및 생물에 미치는 전자기장(EMFs)의 영향을 정확하게 평가하기 위한 다양한 과학적 기반의 영향평가 기법들이 개발되어야 한다.

**Abstract** – Electromagnetic fields (EMFs) emitted from subsea electricity cables have been becoming a common feature of the marine environment with the expansion of marine renewable energy developments, especially offshore wind farm. And then a considerable length of electricity cable is being buried in the seabed to connect to the grid. EMFs emitted from subsea electricity cables are expected to affect activities such as migration and food search of various marine organisms using the geomagnetic field (GMF). Yet there are very few assessments of potential EMFs effects on the biology of marine organisms. The uncertainty is concerning for stakeholders, such as fishers, developer and government, who are dependent upon the predictability of marine organisms. This paper aimed to critically review the available literature on EMFs to conclude if marine organisms are at a significant biological risk of exposure with electricity subsea cables. In this study, the relevant literature was reviewed and summarized on the significant biological risks to marine organisms that come into exposure with EMFs emitted from electricity subsea cables. It was confirmed that many studies evaluating the effects of EMFs did not use standardized test methods and produced conflicting results. In the future, effect assessment based on scientific grounds should be developed to accurately evaluate the EMFs on the organisms in the marine environment and itself.

**Keywords:** Electromagnetic fields(전자기장), Offshore wind farm(해상풍력발전단지), Electricity subsea cables(해저 전력케이블), Geomagnetic field(지구자기장), Effect assessment(영향평가)

†Corresponding author: tschoi67@gmail.com

## 1. 서 론

### 1.1 해상풍력 발전과 관련된 환경압력요인의 증가

신재생에너지 중에서 가장 경제성 있는 에너지원으로 평가받으며, 육상풍력 위주로 개발되어 왔던 풍력발전이 최근 해양, 특히 연안에 대규모 해상풍력 발전단지를 조성하여 운영되고 있다. 육상풍력은 해상풍력과 비교하여 발전단지의 조성 및 발전을 위한 환경조건이 까다로워 입지가 제한되어 있고, 조성 계획이 수립됨과 동시에 민원이 발생함에 따라 입지 확보가 용이하지 않아 상대적으로 해상풍력 발전단지의 개발이 선호된다(Kim et al.[2009]; Maeng et al.[2013]). 해상풍력은 육상풍력과 비교하여 상대적으로 강한 풍속, 높은 발전 효율, 대규모 단지 조성의 용이성 등 산업적 효율이 우수한 것으로 평가되고 있다. 이러한 이유로 정부의 그린뉴딜 정책 등 정책적 지원 속에서 향후 풍력발전 분야의 주축으로 자리 잡을 전망이다. 하지만 해상풍력의 개발에는 전력 수급과 경제성 논리에 초점이 맞춰짐으로써 개발에 따른 환경문제의 발생 및 지역사회의 주민 수용성 등에 대해서는 뚜렷한 해결책을 제시하고 있지는 못하다.

화석연료의 사용이 지구온난화의 주요한 요인으로 지목되면서 화석연료에 대한 의존도를 줄이기 위해 신재생에너지 자원에 관심이 집중되고, 국내에서도 에너지 정책의 방향 전환을 계획하고 있다(Jointly with related ministries[2020]). 풍력은 신재생에너지 관련 기술 중 기술성숙도가 충분한 것으로 평가되며, 지난 10년 동안 급속히 성장하고 있다. 특히 해양에 부존하는 태양, 바람, 조석 및 생물자원 등 다양한 에너지 자원 중에서 풍력은 가장 선호하는 대체 에너지로 적극적인 상업화가 추진되고 있다.

풍력발전 장치는 바람 에너지를 전기 또는 기계적 에너지로 변환하기 위해 풍력터빈을 사용한다. 터빈의 출력은 공기 밀도, 터빈 블레이드가 회전을 통해 점유하는 면적 및 풍속의 세제곱 함수이다. 풍력발전 장치의 터빈 블레이드 회전에서 비롯되는 소음과 진동이 현재 가장 많이 논의되고 있는 환경 문제이다. 풍력터빈의 회전에 의해 발생하는 소음은 공기역학적 소음과 기계적 소음으로 구성된다. 공기역학적 소음은 공기를 가로지르는 터빈 블레이드로부터 발생하며, 터빈의 크기, 풍속 및 블레이드 회전속도에 따라 변하고, 서로 다른 주파수를 가진 광대역 소음이다. 기계적 소음은 터빈 내부의 기어, 발전기 및 부속 장치로부터 발생하며, 차단이 충분히 되어 있지 않은 풍력터빈에서 두드러지고 인간의 청각 신경을 자극한다. 이 외에도 발전을 위한 터빈 블레이드의 회전 및 풍력발전 설비와 관련된 환경 문제는 비행하는 야생동물(대표적으로 조류)의 안전, 소음, 시각 공해, 전력 케이블에서 발생하는 전자기장에 의한 생물 교란, 전자기 간섭에 의한 통신 교란 및 국지적 기후 변화 등을 들 수 있다. 이러한 이유로 육상에서의 풍력발전이 환경 문제와 함께 주민 수용성 등의 문제로 인하여 해양에서의 풍력발전으로 관심이 옮겨가고 있으나, 육상에서의 풍력발전과 비교하여 해양에서의 풍력발전 또한 환경에 대한 영향을 무시할 수 없으며 아직 현재의 과학으로 밝히지 못하는 더 다양한 환경 영향 요소들이 있을 수 있음을 시사하는 연구 결과들이 있다(Taormina et al.[2018]).

### 1.2 해상풍력에 대한 국내 정책

정부가 발표한 '해상풍력 발전 방안(Jointly with related ministries [2020])'에 따르면, 최근 10년간(2010년~2019년) 연평균 증가율이 육상풍력은 13.7%인 반면, 해상풍력은 28.7%로 세계적으로도 해상풍력 증가가 두드러진 것으로 분석하고 있다. 정부는 해상풍력이 육상풍력과 비교하여 에너지원으로써 높은 잠재량, 대규모 단지 개발 가능성, 상대적으로 낮은 환경 영향 및 높은 발전효율(30~50%)을 이유로 신재생에너지 중 높은 비중을 차지할 것으로 예상하고 있다. 정부가 발표한 정책에서 현재 계획하는 해상풍력은 전국 연안을 대상으로 하며, 전북 서남권 해상풍력 2.5 GW, 전남신안 해상풍력 8.2 GW, 동해연안 울산 및 동남권 각각 1.4 GW 및 4.6 GW, 제주 0.6 GW, 인천 0.6 GW로 총합 17.8 GW + α를 계획하고 있다. 정부는 2030년까지 12 GW, 2034년까지 20 GW 규모의 해상풍력 발전 구축을 목표로 정책을 추진하고 있다. 이를 위해 국내 대규모 프로젝트에 적용할 수 있는 저풍속 환경에 적합한 8 MW 용량의 터빈을 개발 적용하며, 최대 12 MW 용량의 터빈을 개발하여 적용할 계획을 수립하고 있다. 환경 문제와 관련하여 해상풍력으로 인한 해양환경 영향평가를 위해 모니터링을 의무화하고, 관계 법령에 따라 해상풍력 설비 조성 완료 후 최대 3년까지 해양환경에 미치는 영향 조사를 실시하고 피해가 발생할 경우 피해저감 조치를 시행한다는 정책방향을 설정하고 있다. 또한 환경전문기관을 통한 중장기 환경영향분석 연구를 시행하여 해상풍력이 국내 해양환경에 미치는 영향을 분석하는 것으로 계획하고 있다.

### 1.3 해상풍력 발전의 송전을 위한 전력케이블에서 발생하는 전자기장

해상풍력을 이용해 생산된 전기를 육지로 송전하기 위해서는 먼저 개별 풍력발전기(Fig. 1a)를 해저에 매설한 내부 전력케이블(infield cables)로 연결하여야 한다(Fig. 1b). 내부 전력케이블은 다시 해상에 설치된 변전소(Fig. 1e) 또는 주파수 변환을 위한 변전소(Fig. 1d) 등에 연결되어야 한다. 해상풍력 발전을 통해 생산된 전기는 내부 변전소 등을 거쳐 원거리의 육상 연안에 위치한 변전소(Fig. 1g) 등에 연결될 것이다. 이러한 전력망(grid) 구축을 위해 해저에 매설되는 전력케이블(Fig. 1c)의 길이는 상당할 것이다. 예를 들어, 서남해에 조성되는 해상풍력 단지에서 송전을 위해 해저케이블을 매설하는 경우 전북 군산에 위치한 새만금변전소(345 kV)까지 연결한다면 송전 선로의 길이는 약 80 km에 이른다. 상대적으로 가까운 고창 시험센터 변전소(154 kV)까지 연결한다고 해도 송전 선로의 길이는 짧아지지만 상당한 길이의 전력케이블이 해저에 매설될 것이다. 매설된 해저 전력케이블에서는 송전 과정에서 전기가 흐름에 따라 전자기장이 방출될 것이다.

해저에 매립된 전력케이블에서 발생하는 전자기장(Electromagnetic Wave)로 칭하는 전기자기파는 전기장(Electric Fields, EFs)과 자기장(Magnetic Fields, MFs)의 두 가지 성분으로 구성된 파동이며, 공간상에서 빛의 속도로 진행되는 특성을 가지고 있다(EU[2009]). 전기장(EFs)은 전기가 흐르는 물체(즉, 도체, conductor) 주위에 형

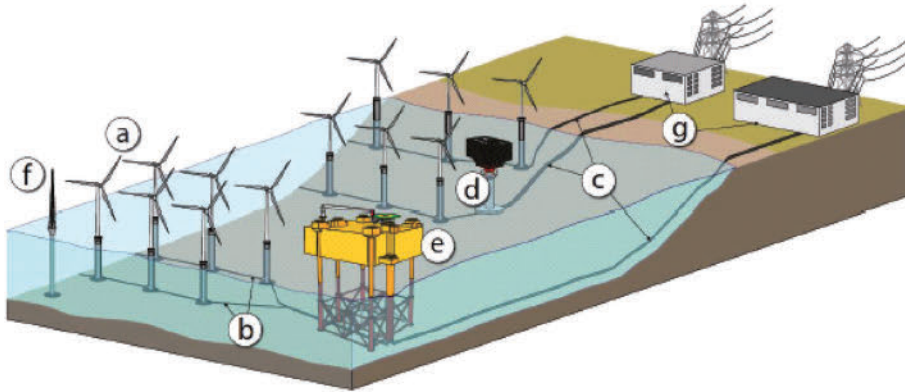


Fig. 1. Typical offshore wind farm lay-out with the main components: (a) Wind turbines; (b) Infield cables; (c) Export cables, (d) Transformer station; (e) Converter station; (f) Meteorological mast; (g) Onshore stations (figure from Rodrigues[2016]).

성된 전기적인 힘이 미치는 공간이다. 또한 전기장은 전선(도체)에 흐르는 전류의 양에 따라 세기와 방향성을 갖는다. 자기장(MFs)은 전류가 흐르는 전선(도체) 주위에 유도되어 자성체 주변에서 힘이 느껴지는 거리 내의 공간을 말하며, 전기가 흐르는 전선 위에 나침반을 가져다 놓았을 때 자침이 움직이는 것으로 알 수 있다. 이러한 전기장과 자기장을 함께 전자기장(Electromagnetic Fields, EMFs)이라 부른다. 전기장은 단위 길이당 전압(V, volt)으로 기본 단위는 V/m로 표시하며, 자기장은 단위 길이당 전류(A, ampere)로 기본단위는 A/m로 표시한다. 자기장은 자속밀도로도 표현할 수 있으며 단위는 테슬라(Tesla, T) 또는 가우스(Gaus, G)로 표시한다. 1 T는  $10^4$  G로 환산된다. 본 연구에서 전자기장의 단위는 테슬라(T)로 통일하여 표시하였다.

해상풍력 발전을 통해 생산된 전기가 전력계통(Grid)으로 연결되기 위해 해저에 매립한 전력케이블은 교류(AC, alternating current) 또는 직류(DC, direct current)방식의 전력케이블을 사용하게 되며, 이러한 전력케이블에 송전을 위해 전기가 흐르는 과정에서 전력케이블 주변으로 전자기장(EMFs)이 발생한다. 연안을 포함하여 해양에 풍력발전 시설이 늘어난다는 것은 복잡하고 촘촘한 전력계통이 구성되고, 많은 해저 면적에 전력케이블이 매설되는 것이다. 이는 전자기장 발생이 지속적이며, 해양환경에 대한 영향이 증가한다는 것을 의미할 것이다(Bochert and Zettler[2006]; Boehlert and Gill[2010]; Balmori[2015]).

해저에 설치되는 케이블은 목적에 따라 전력케이블과 통신케이블 그리고 전력과 통신이 합쳐진 복합케이블로 구분한다(Yi et al.[2017]). 해저케이블의 설치 매설과 비매설 형태로 구분되며, 매설의 경우 해저퇴적물 굴착장비를 이용하여 퇴적층을 굴착한 후 케이블을 매설한다. 케이블이 매설되는 수심에 따라 다양한 공법을 활용하여 매설하게 된다. 비매설은 퇴적층이 단단한 암반인 경우로 매설 깊이를 충분하게 확보하기 어려운 경우에 이용되며 포설되는 케이블을 보호하기 위해 케이블 위에 콘크리트 패드 등을 덮어 케이블을 보호한다. 케이블 매설에는 수심과 퇴적층의 형태에 따라 다양하게 매설 공법이 적용될 수 있다(Yi et al.[2017]). 퇴적층을

굴착하여 매설하든 퇴적물 표면에 전력케이블을 깔고 보호덮개를 덮는 방식이든 전기장의 방출을 일부 방지할 수 있을 것으로 기대 하지만, 전기가 흐르는 케이블에서 생성되는 자기장의 방출은 완전히 차폐할 수 없다. 전기장은 자기장을 가로질러 움직이는 물체 또는 생물에 의해 유도되며, 생물의 크기가 클수록 유도되는 전기장의 세기는 강해지는 것이 일반적이다(Tricas and Gill[2011]; Gill et al.[2011]; Gill et al.[2014]; Gill and Bartlett[2011]). 약 1미터 깊이로 매설된 산업 표준 33 kV 교류(AC) 케이블이 있다면  $1.5 \mu\text{T}$ 의 전자기장이 해저면을 관통하여 방출될 수 있으며, 주변 해수에서 거리에 따라  $0.03 \mu\text{T}$ 까지 줄어드는 것을 관측한 결과가 있다(Gill and Bartlett[2011]). 하지만 직류(DC) 또는 교류(AC)방식의 케이블을 사용하는지, 또는 표준 유니폴라가 아닌 바이폴라 케이블이 사용되는지에 따라 생성되는 자기장에 변화가 있으며, 주요한 차이점은 교류(AC) 케이블의 경우 주파수에 따라 주기적으로 전자기장의 방향이 바뀐다는 것이다(Bochert and Zettler[2006]).

전력케이블 주변에 생성되는 전자기장의 유형과 해양환경에 대한 잠재적 영향은 전기 송전에 적용되는 기술에 따라 다를 것으로 추측된다. 일반적으로, 수중에 매립되는 전력케이블에는 여러 유형이 있지만 정적 자기장(static MF)을 방출하는 고전압 직류(HVDC) 케이블과 시간에 따라 변하는(time-varying) 전자기장을 방출하는 교류(AC) 케이블로 나눌 수 있다(Ohman et al.[2007]). 직류(DC) 방식의 송전 케이블은 정적 자기장을 생성하고 자연 지구자기장을 교란할 수 있으며, 교류(AC) 방식의 경우 저주파(low-frequency, 50 또는 60 Hz) 전자기장(EMFs, 교류 자기장)이 발생하여 환경에 영향을 미치게 된다. 자기 유도로 정의되는 정적 자기장(static MF)과 교번 자기장(alternating MF)의 세기는 전력케이블로부터의 거리, 자기장이 발생하는 전력케이블의 배치(병렬로 배열되거나 특정 각도로 교차하는지 여부)에 따라 달라지고, 흐르는 전류의 세기에 따라 선형적으로 변화한다(Otremba and Andrulewicz[2014]; Otremba et al.[2019]). 1600 A(ampere) 세기의 전류가 흐르는 일반적인 단일 코어 해저 케이블(Ohman et al.[2007])에서 유도되는 최대의 자기장은  $6.4 \text{ mT}$ (Otremba et al.[2019])의 강한 자기장이 케이블 주

위에 생성된다. 지구자기장 수준보다 높은 자기장은 전력케이블 축에서 반경 6m 내에서 측정될 수 있다(Bochert and Zettler[2004]). 지구자기장의 수준은 북유럽에 위치한 발트해 같은 중위도 지역에서는 대략 0.05 mT 정도로 측정되며(Hulot *et al.*[2010]), 우리나라 연안은 약 0.04 mT 정도로 측정된다(Meteorological Administration[2009]). 고전압 직류(HVDC) 방식의 해저 케이블은 장거리 송전에 더 일반적으로 사용되는 반면, 교류(AC) 방식의 전력케이블은 최대 70 km 거리 이내에서 에너지 손실 측면에서 가장 수익성이 높아 선호되는 방식이다(Negra *et al.*[2006]). 특히 교류(AC) 방식의 전력케이블은 송전 용량 및 거리 감쇠의 이유로 풍력발전기 사이 내부전력망(infield cables grid)의 구축 등에 좀 더 자주 사용된다(CMACS[2003]; Meißner *et al.*[2006]; Taormina *et al.*[2018]). 많은 연구에서 교류(AC) 방식의 전력케이블에서 발생하는 저주파(low-frequency) 전자기장이 정적 자기장(static MF)보다 생물에 좀 더 유해할 것으로 추측한다(Zhadin[2001]; Panagopoulos *et al.*[2002]; Suzuki *et al.*[2006]). 인간에 대한 전자기장 노출과 관련하여 인체위해성에 대한 국제기구의 가이드라인 등은 일부 제시되어 있으나(IARC[2002]), 해상풍력 발전을 위한 시설에서 인위적으로 발생하는 전자기장이 해양환경 및 생물에 미치는 영향에 대해서는 아직 정확하게 알려져 있지 않다(Gill[2005]).

## 2. 지구자기장과 해양생물

### 2.1 해양생물의 지구자기장 이용

지구상 모든 곳에서 0.03~0.07 mT 범위 내의 특징적인 배경 자기장이 존재한다. 모든 곳에서 관측되는 자기장은 자연적이며 환경의 필수적인 부분이다. 지구 표면에서 자기장의 세기는 적도 부근에서 0.03 mT 수준이며, 극지방 부근에선 0.07 mT 까지 측정된다(Hulot *et al.*[2010]; Krylov *et al.*[2014]). 육상생물을 비롯하여 해양환경에 서식하는 많은 생물이 방향 및 자기 자신의 위치 확인을 위한 “지도(map)” 및 방향 정보를 얻기 위한 “나침반(compass)”으로 지구자기장 신호를 사용하는 것으로 알려져 있다(Fey *et al.*[2019]). 지구자기장(지구자기장)은 오랜 시간(지구의 역사)동안 생물의 진화와 함께 왔다. 해양환경에서 가장 지배적인 자연 전자기장(natural EMFs)은 지구자기장의 영향을 받는 해수의 움직임으로부터 유도되는 전기장이다(Gill *et al.*[2014]). 또한 지구에 서식하는 모든 생물은 세포 내에서 이루어지는 생화학적 과정과 근육의 움직임으로부터 상대적으로 약하지만 중요한 생체전기장(bioelectric fields)을 방출하는 것으로 알려져 있다(Bedore and Kajiura[2013]).

해양환경에서 지구자기장을 활용하여 방향을 탐색하고 이동 경로를 설정할 수 있는 것은 생물이 지구자기장의 미세한 차이가 만들어 내는 기울기(경사)를 감지할 수 있는 매우 민감한 감각 기관을 생체 내에 가지고 있다는 것을 의미한다(Krylov *et al.*[2014]). 지구자기장은 때론 국지적으로 불규칙하게 변하기도 하며, 태양에 의해 교란이 발생하기도 하는데, 자기장을 이용하는 생물은 이러한 교란을 식별할 수 있는 능력을 필요로 한다(Hulot *et al.*[2010]). 해

양에 서식하는 다양한 분류군의 생물이 지구자기장 지도에 대한 감각을 가지고 있음을 보여주는 증거는 매우 많다(Mouritsen[2018]). 지구자기장은 수중 환경에서 감지될 수 있으며, 생물의 장거리 이동(migration) 등과 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Johnsen and Lohman[2008]). 또한 지구자기장에 대한 감각기능은 다른 환경변화를 감지하는 기능과 함께 사용되는 것으로 보인다(Freake *et al.*[2006]; Muheim *et al.*[2006a]; Muheim *et al.*[2006b]).

지구 어느 곳이나 존재하는 지구자기장은 연체동물, 갑각류, 어류 그리고 해양포유류가 이동을 위해 방향을 탐색하고 바꾸는 등의 행동에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lohmann *et al.*[2007]; Henshaw *et al.*[2008]; Lohmann[2010]; Normandeau *et al.*[2011]; Krylov *et al.*[2014]; Putman *et al.*[2013], Putman *et al.*[2014b]; Brothers and Lohmann[2015]; Brothers and Lohmann[2018]). 지구자기장을 이용해 자신의 위치 확인 또는 진행 방향을 탐색 및 설정할 수 있는 능력을 가진 생물은 육상생물 중에서 포유류인 박쥐를 비롯해 조류, 곤충류인 벌 등이 대표적이며, 해양생물에서는 무척추동물인 연체동물과 바닷가재를 포함하는 갑각류 등이 있고, 척추동물에서는 어류와 거북이 같은 파충류, 고래와 같은 해양포유류 등을 포함한다(Walker *et al.*[1997]; Lohmann *et al.*[2007]; Henshaw *et al.*[2008]; Lohmann[2010]; Krylov *et al.*[2014]; Putman *et al.*[2013]; Putman *et al.*[2014b]; Brothers and Lohmann[2015]; Brothers and Lohmann[2018]). 이 중에서 어류의 지구자기장에 대한 민감도와 행동에 미치는 영향에 대해서는 다른 생물군과 비교하여 포괄적인 연구가 진행된 바 있다(Normandeau *et al.*[2011]; Krylov *et al.*[2014]). 최근 연구인 Naisbett-Jones *et al.*[2017]은 유럽 뱀장어 치어가 북대서양 멕시코만에서 미국 동부 해안을 따라 북쪽으로 흐르는 멕시코 만류에 대한 자기 지도(magnetic map)를 이용하여 이동한다고 보고하였다. 이와 유사하게 연어 중 pacific salmon (Putman *et al.*[2013]), pink salmon과 sockeye salmon(Putman *et al.*[2014b])이 지구자기장을 이용해 서식처로 회귀하는 것이 관찰되었다. Pink salmon과 sockeye salmon의 경우, 서식처 회귀(homing migration)를 위한 장거리 회유에 지구자기장을 활용하는 것이 해류의 순환 및 해수면 온도 차이를 활용하는 방식보다 더 선호되는 것으로 확인되었다(Putman *et al.*[2014b]). 그러나 송어의 일종인 steelhead trout 치어의 경우 자기장이 교란된 환경에서 성장하였다면 지구자기장을 이용해 지도 정보를 활용하는 것은 방해받을 수 있다(Putman *et al.*[2014a]). 지구자기장이 왜곡되거나 교란된 환경에서 성장한 거북이의 알(eggs)도 이와 유사하게 부화한 이후 바다를 찾아가는 과정에서 지도 정보의 활용이 교란받은 결과를 보였다(Fuxjager *et al.*[2014]). 연어의 초기생활사 단계에서 자신의 체장보다 큰 자갈과 같은 물체의 회피 또는 표층 수심으로의 이동 등에도 지구자기장이 영향을 미치는 것으로 보인다(Putman *et al.*[2018]). 어류의 이동 방향 탐색에 있어서 지구자기장의 중요성을 보여주는 흥미로운 예시는 zebrafish의 유영에 대해 정적 자기장(static MF)이 긍정적인 영향(즉, 물의 흐름에 대한 무조건적인 방향 반응)을 미치는 결과를 보여준 Cresci *et al.*[2017]의 연구가 있다.

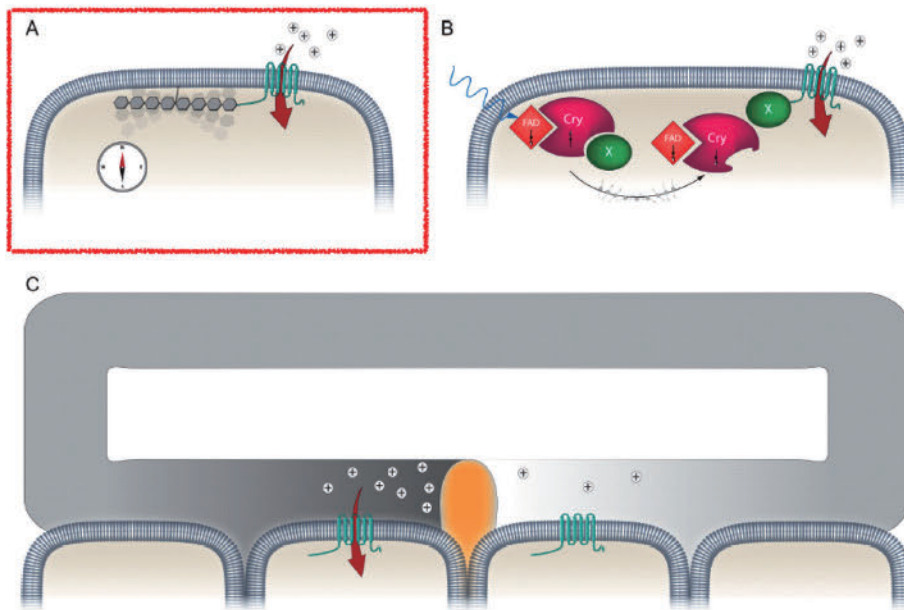
## 2.2 생물의 지구자기장 및 전자기장 감지 기작

생물의 세포, 조직, 기관에서 전자기장과의 상호 반응하는 형태는 개체의 생물학과 전자기장의 물리학과 관계(biophysical interaction)에 작용하는 다양한 요인에 의해서 달라질 수 있다. 자기장 또는 전기장과 같은 장(fields)은 정적(static) 또는 동적(dynamic)일 수 있으며, 장(fields)의 크기, 파장, 주파수, 편광 및 전자파의 방향에 따라 달라질 수 있다. 자기장과 전기장은 전선과 같은 도체에 전기가 흐를 때 유도된다. 생물의 세포와 조직은 주파수가 증가하는 것과 유도 전류가 증가하고 그 세기가 강해지는 것에 의해 영향을 받는다(Kaiser[1996]). 생물의 조직에 강한 유도 전류가 흐르게 되면 강한 전압을 일으켜 신경과 근육세포를 자극하게 되며, 자극에 필요한 장(fields)의 세기는 주파수에 따라 증가하게 된다(Juutilainen and Lang[1997]).

해양생물의 전자기장에 대한 감지 능력은 자철석 기반의 광화학 메커니즘, 측선 및 전류감지 감각(ampullae of Lorenzini)을 포함하여 다양하고 때로는 여러 감각 시스템을 사용하는 것으로 보이며, 다양한 생물군에서 꾸준히 진화해 왔다(Baker *et al.*[2013]; Nordmann *et al.*[2017]). 자성(magnetism)에 민감한 생물은 자기장의 기울기(경사), 강도 및 방향의 작은 변화도 감지할 수 있는 것으로 알려져 있다(Nordmann *et al.*[2017]). 자기장을 감지할 수 있는 생물은 자기 나침반 또는 자기 지도를 사용하여 근거리 또는 원거리에서 원점 복귀 및 이동을 가능하게 한다(Lohmann *et al.*[2008]). 전기(electricity)에 민감한 종은 먹이와 포식자를 감지하고, 개체 간의 의사소통, 짝을 찾고, 국지적으로 방향을 설정하는 데 활용되는 미약한 전기장의 변화를 감지할 수 있다(Tricas and Sinseros[2004]).

또한 전기에 민감한 종은 감각 기작을 사용하여 자기장에 반응할 수 있으며, 일부 종은 전기 및 자기 감지에 대한 감각기관을 모두 가진다(Anderson *et al.*[2017]). 전자기장의 감지와 이와 관련된 상세한 기작에 대한 이해는 부족하지만, 전자기장에 대한 감각과 이의 기능적 역할은 생물의 생태에 있어서 매우 중요한 것으로 추측하고 있다(Nordmann *et al.*[2017]; Anderson *et al.*[2017]).

생물의 지구자기장 또는 전자기장에 대한 감각 기작은 1) 자철석 기반의 자기 수용, 2) 쌍라디칼 기작, 3) 전자기장이 매개된 자기 방향 탐색 등 세 가지 주요 기작으로 나뉜다(Mouritsen[2018]; Johnsen and Lohmann[2005]; Johnsen and Lohmann[2008]). 자철석을 이용하는 지구자기장 감각 기작은 생물의 조직 내에 자철석 결정의 정렬이 지구자기장에 따라 달라지며 신경 세포가 이를 인식하는 방식이다. 쌍라디칼 기작은 자기장에 의존하는 화학 반응을 기반으로 지구자기장 위의 위치를 결정하고 방향을 탐색할 수 있으며, 이러한 기작은 광 여기(photo excitation) 반응과 연결되어 있다. 마지막으로 생물의 유영 방향이나 해류의 흐름이 지구자기장을 가로지를 때 전자기장이 유도되어 전기 감각 기능을 가진 생물이 방향을 탐색할 수 있다(Fig. 2., Gould[2008]; Johnsen and Lohmann[2005]; Mouritsen[2018]; Rommel and McCleave[1973]; Walker *et al.*[2003]). 해양에 서식하는 어류와 거북이는 자철석 기작을 사용하는 반면, 쌍라디칼 기작은 일부 무척추 동물과 조류에서 발견된다(Mouritsen[2018]). 전기를 감지하는 생물(electroreceptive organisms)은 자기장을 가로지르는 해류에 의해 유도된 전기장을 간접적으로 감지한다. 하지만 전자기장의 감지와 관련된 생태학적 영향에 대해서 경험적 증거가 충분하지 않다는 것에 대해 많은 우려가 있다(Gay[2012]).



**Fig. 2.** Three mechanisms proposed to underlie the magnetic sense. (A) Image depicting a mechanically sensitive magnetite-based magnetoreceptor. Magnetite crystals (shown here as a chain) are attached to the plasma membrane via a cytoskeletal linker. (B) Diagram showing a light-sensitive chemical-based magnetoreceptor. Blue light (shown with a blue arrow) induces the formation of long-lived radical pairs between Cry and the cofactor FAD. (C) Magnetoreception based on electromagnetic induction. Cry, cryptochrome; FAD, flavin adenine dinucleotide (figure from Nordmann *et al.*[2017]).

### 2.3 무척추동물의 지구자기장 활용

지구자기장 신호는 무척추동물과 같은 상대적으로 유영능력이 약한 생물들이 적절한 해류에서 머무르며 해류와 함께 이동하거나, 해안으로 접근하거나 또는 해안에서 멀어지는 움직임과 관련하여 활용되기도 한다. 남극 단각류의 일종인 *Gondogeneia antarctica*를 실험실로 가져와 움직임을 관찰한 결과 지구자기장을 이용해 원래 서식지 방향으로 유영하는 현상을 관찰하였다(Tomanova and Vacha[2016]). 또한 갑각류인 spiny lobster(*Panulirus argus*)도 지구자기장의 변화를 감지하고 방향을 설정할 수 있으며, 이동을 위한 자기 지도 감각을 가지고 있는 것으로 보인다(Boles and Lohmann[2003]; Lohmann et al.[1995]). 상업적 가치가 있는 american lobster(*Homarus americanus*)는 서식지에서 연안으로의 이동 및 연안과 외해를 계절에 따라 회유하는 것으로 보아 카리브해에 서식하는 가재인 *Panulirus argus*와 유사한 자기 지도 감각을 가진 것으로 보인다(Packer et al.[2003]; Scopel et al.[2009]; Hoening et al.[2015]; Lohmann et al.[1995]; Boles and Lohmann[2003]). 일반적으로 해양생물 중 무척추동물이 지구자기장을 활용하는 데에 대한 이해는 매우 제한적이다. 하지만 지구자기장을 이용하는 사례에 관한 연구는 실제 관찰된 것보다 훨씬 더 광범위할 가능성이 있다. 해양 무척추동물 중에서 Nudibranchia목에 속하는 바다 민달팽이(sea slugs)는 지구자기장 나침반 방향을 기준으로 활동하며(Lohmann and Willows[1987]), 이 외에도 연체동물이나 갑각류가 지구자기장을 나침반으로 사용하는 사례는 다양하다(Kullnick[2000]). 어류나 포유류에 비해 상대적으로 유영능력이 부족한 생물인 무척추동물도 국지적인 곳에서 방향을 탐색하기 위해 지구자기장을 이용하는 것은 분명하다.

### 2.4 경골어류(Telost)와 연골어류(Elasmobranch)의 지구자기장 활용

경골어류(Telost)가 공간적 방위를 탐색하기 위해 지구자기장을 사용하는 것은 다른 예시와 비교하여 대체로 잘 알려져 있다. 경골어류 대부분이 지구자기장을 감지하기 위해 자철석(magnetite) 결정체를 체내에 가지고 있고 이를 사용하는 것으로 추정된다(Mann et al.[1988]; Walker et al.[1997]). 최근에는 zebrafish의 조직에서 자철석의 발견에 대해서 보고되기도 하였다(Dixon[2012]). 수중에서 상대적으로 낮은 조도(제한된 빛의 양) 때문에 경골어류에서 쌍라디칼 자기수용(radical-pair magnetoreception)은 거의 고려되지 않는다(Ritz et al.[2000]; Maeda et al.[2012]). 경골어류의 여러 분류군(Mormyridae, Gymnotida, Electrophoridae, Sternopygidae, Rhamphichthyidae, Hypopomidae 및 Apterodontidae)에 속하는 종들은 매우 민감한 증폭형 전기수용체(ampullated electroreceptors)를 가지고 있는 것으로 추정되며, 연골어류와 유사하게 경골어류도 전기수용 시스템(electroreception system)을 이용해 지구자기장을 감지하는 것으로 알려져 있다(Kalmijn[1984]). 대구의 일종인 atlantic haddock(*Melanogrammus aeglefinus*)의 자어(larva)는 북해에 설치한 메조코즘과 실험실 실험 모두에서 자기장을 따라 방향을 탐색

하였으며, 이것은 섭식활동 중에 개체간 적절한 거리유지를 위한 기작으로 추정된다(Cresci et al.[2019]). 산호초 주변에 서식하는 어류인 damselfish(*Chromis atripectoralis*)와 cardinalfish(*Ostorhinchus doederleini*)의 자어(larva)는 자기장의 변화에 대응하여 방향을 전환하고 서식처 귀환 또는 압초 정착을 위해서 지구자기장을 활용하는 것으로 보인다(Bottesch et al.[2016]; O'Connor and Muheim[2017]). 유럽 뱀장어(*Anguilla anguilla*)와 일본 뱀장어(*Anguilla japonica*)도 지구자기장에 반응할 수 있다는 것을 실험실 실험을 통해 확인했고, 지구자기장을 활용하여 방향을 탐색하고 해양에서 장거리를 이용할 때 이에 대한 감각을 사용하는 것으로 알려져 있다(Cresci et al.[2017]; Durif et al.[2013]; Nishi and Kawamura[2005]; Nishi et al.[2004]). 장거리를 이동하는 특성을 가진 또 다른 어류인 황다랑어(*Thunnus albacares*)는 사육 상태의 훈련 실험에서 지구자기장 방향의 변화를 식별하였다(Walker[1984]).

가오리류, 상어류 같은 연골어류(Elasmobranch)는 생활사 속에서 장거리를 회유(migration)하는 특성을 가지고 있으며, 이는 지구자기장을 감지할 수 있는 능력을 가지고 있기 때문이다(Putman[2018]; Mouritsen[2018]). 지구자기장을 이용하여 방향을 탐색하고 설정하는 연어의 능력은 성어와 치어(juveniles) 단계에서 모두에서 관찰된다. 산란 시기의 sockeye salmon(*Oncorhynchus nerka*)은 지구자기장을 따라 강 쪽으로 이동 경로를 설정할 수 있다(Putman et al.[2013]). 지구자기장을 활용해 방향을 탐색하여 회유하는 특성을 보이는 연어류와 송어류는 sockeye salmon(*Oncorhynchus nerka*; Quinn[1980]), chum salmon(*Oncorhynchus keta*; Quinn and Groot[1983]), chinook salmon(*Oncorhynchus tshawytscha*; Walker et al.[2003]), atlantic salmon(*Sallan salar*; Scanlan et al.[2018]); brown trout(*Salmo trutta*; Formicki et al.[2002])와 rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss*; Chew and Brown[1989]; Putman et al.[2014a]) 등이 있다. 연골어류는 잠재적으로 지구자기장을 감지하기 위해 전기장에 대한 감지 및 전기장 유도를 사용하는 것으로 보인다(Molteno and Kennedy[2009]). 전기에 민감한 연골어류의 좋은 모델 생물인 little skates(*Leucoraja erinacea*)는 먹이를 찾을 때 사용되는 전기감각 시스템을 갖추고 있다는 것이 알려져 있으며, 근거리의 연안과 외해를 계절적으로 회유할 때 전기장을 이용하는 것으로 알려져 있다(Bodznick et al.[1992]; Duman and Bodznick[1996]; Gillis et al.[2012]). 상어류인 hammerhead sharks는 지구자기장 경사를 감지하여 방향을 탐색하며(Klimley[1993]), 이 외에 다른 여러 종의 상어도 유사하게 지구자기장 신호를 감지하여 오랜 시간 동안 직선으로 유영하는 행동을 보인다고 한다(Meyer et al.[2005]). 실제로, 포획한 hammerhead sharks(*Sphyrna lewini*)와 sandbar sharks(*Carcharhinus plumbeus*)를 대상으로 한 실험실 연구에서 지구자기장을 감지하는 것이 관찰된 바 있다. 상어를 인위적으로 발생시킨 자기장에 노출시키고 먹이를 줌으로써 인위적으로 발생된 자기장에 반응할 수 있도록 훈련시킨 사례도 있으며(Meyer et al.[2005]). 포획한 stingray(*Dasyatis brevicaudata*)는 훈련 실험에서 자기이상(magnetic anomaly)을 식별하였다(Walker et al.[2003]). 그러나 이런 여러 가지 관찰과 실

험에서 연골어류가 지구자기장보다 실험실에서 코일을 감아 발생시킨 인위적인 전자기장에 반응할 수 있다는 사실은 확신할 수 없는 것으로 판단된다(Johnsen and Lohmann[2005]).

생물이 지구자기장(GMF)를 이용하여 방위(방향)를 탐지할 때, 흔히 한 방향만을 선택한다(Wiltschko and Wiltschko[2005]; Mouritsen[2013]). 그러나 경골어류들은 서로 다른 자기장에서 두 개의 반대 방향을 선택한다는 예시가 있다. 1년생 sockeye salmon(*Oncorhynchus nerka*)은 방향을 탐지하고 선택할 때 이중모드 분포를 사용한다는 것이 관찰된 사례가 있다(Quinn and Brannon[1982]). 또한 송어류의 일종인 bull trout(*Salmo trutta*)와 rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss*)의 유생은 이동하기 전에 포자를 담은 후 자연 지구자기장(natural 홀)에서 부화할 때 일반적으로 북서쪽-남동쪽을 향하는 것으로 관찰되었다(Formicki et al.[1997]). 연어과 어류의 1년생 치어와 유생에서 관찰된 결과로 보면 성어로 충분히 발달되지 않은 상태에서 이미 지구자기장 탐지 시스템을 가지고 있는 것으로 추측된다. 경골어류가 서로 반대되는 두 방향을 선택하고 특정 방향으로 이동하는 것은 자기장 수용체의 발달에 기인하는 것으로 보인다(Osipova et al.[2016]). Zebrafish는 다른 어류와 유사하게 낮은 환경에서 원래 서식처로 돌아가려는 귀소 행동(homing migration)을 보이는 것으로 알려져 있다. 어류는 환경의 특정 영역을 선택하고 이를 시작점으로 주변 환경의 다른 부분을 탐색하고 다른 곳보다 더 자주 그곳으로 돌아간다(Stewart et al.[2010]). 이것은 다른 요인과 함께 지구자기장 수평 벡터의 방향이 새로운 환경에서 본거지 영역의 선택에 영향을 미칠 수 있다는 가설로 연결된다. Osipova et al.[2016]의 연구에서 zebrafish의 운동 활동 증가는 지구자기장 수평 구성 요소의 90° 시계 방향 회전에 노출된 경우에 관찰되었다. 이는 지구자기장 축의 변화를 인식할 수 있으며, zebrafish의 운동 활동 증가는 스트레스 반응일 것으로 추정하고 있다.

## 2.5 파충류(거북)와 해양포유류의 지구자기장 활용

어린 바다거북(loggerhead turtles, *Caretta caretta*)은 섭식활동에 선호하는 지역인 북대서양 환류(gyre) 지역에 머물기 위해서 서로 다른 위치에서 지구자기장의 경사와 세기를 파악하여 방향을 설정할 수 있다(Lohmann et al.[2001]; Lohmann and Lohmann[1996]). 또한 부화한 어린 바다거북(loggerhead turtles)이 해안을 떠나 바닷물과 접촉한 후 해안과 반대 방향으로의 이동을 유지하기 위해 지구자기장 신호를 활용한다(Goff et al.[1998]). 서식지로부터 멀리 이동해온 green turtles(*Chelonia mydas*) 중에서 자기장 감각이 교란된 개체가 교란되지 않은 개체와 비교해 더 긴 귀환(homing migration) 경로를 보여 자기장에 대한 감각이 서식처 회귀를 더 용이하게 할 수 있음을 보여주었다(Luschi et al.[2007]). 돌고래와 같은 해양포유류도 이동하는 동안 지구자기장 신호를 사용하여 방향을 탐색한다. 상대적으로 낮은 지구자기장 수준을 보여주는 미국 북동부에서 발견된 fin whales(*Balaenoptera physalus*)이 장거리를 이동할 때 지구자기장의 경사 또는 낮은 수준의 지구자기장이 이동에

영향을 미치는 것으로 보이지만 수심 등 다른 환경요인과는 관계가 없었음을 보여주었다(Walker et al.[1992]). 포획된 bottlenose dolphins(*Tursiops truncatus*)는 자성을 갖지 않는 물체보다 자성을 가진 물체에 더 빨리 접근하는 행동을 보임으로써 자기에 대한 감각이 있다는 것을 확인하였다(Kremers et al.[2014]).

## 3. 해양환경에서 전자기장의 발생과 지구자기장에 대한 교란

### 3.1 전자기파(전자기장)의 해양환경 영향

최근 과학기술의 발전에 따라 전자기 에너지(electromagnetic energy)를 포함해서 다양한 형태의 에너지가 환경으로 유입되고 있으며, GESAMP[1991]는 이것을 화학적, 생물학적 오염과 함께 오염의 한 유형으로 분류하고 있다. 해상풍력 발전이 성장성 있는 신재생에너지로 개발에 대한 수요가 증가하고 있고, 연안에 대규모 조성되는 발전단지에는 많은 양의 해저케이블이 매설될 것이다. 해저에 매립되는 전력케이블에서 발생하는 전자기장의 해양환경 및 생물에 대한 영향에 대해서 많은 연구가 필요한 것으로 보인다. 해양환경에 서식하는 생물에 대한 전자기장(EMFs)의 잠재적인 영향은 주파수와 전자기장의 세기에 따라 다양하고 광범위하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Hutchison et al.[2020]). 일부 연구에서는 해저에 매설되는 전력케이블에서 발생하는 전자기장의 해양생물에 대한 영향이 분명하지 않다고 보고하는 연구도 있다(Taormina et al.[2018]). 자기장과 전기장 두 가지 유형의 장(fields)이 보이는 물리적 특성은 상당히 다르므로 생물에 대한 잠재적 영향도 다를 것으로 추측된다. 또한 해상풍력을 이용해 생산된 전기를 송전하기 위해 선택되는 직류(DC) 또는 교류(AC) 방식의 전력케이블은 유럽의 경우 50 Hz, 국내와 미국의 경우 60 Hz의 주파수를 이용해 송전되며, 이러한 저주파(low-frequency)에서 발생하는 전자기장의 영향은 정적 자기장(static MF)보다 생물학적 구조에 훨씬 더 유해한 것으로 추정된다(Panagopoulos et al.[2002]; Suzuki et al.[2006]). 인위적으로 발생하는 전자기장(EMFs)에 대해서 충분한 연구가 이루어지고 있지는 않지만 최근 생태적으로 중요한 생물종에 대한 연구들에서 인위적으로 발생된 전자기장(EMFs)이 전자기에 민감한 종에게 중요한 환경 신호(지구자기장)를 방해하거나 가릴 수 있음을 보여주고 있다(Taormina et al.[2018]).

해양환경에서 인위적으로 발생하는 전자기장(EMFs)의 발생원은 선박, 교량 및 해저 케이블이 포함하여 광범위하게 존재한다(Gill et al.[2014]; Klimley et al.[2017]). 특히 해상풍력 발전의 경제사회적 중요성이 증가함에 따라 해저에 매립되는 케이블은 송전, 스마트 전력망(grid) 및 통신에 대한 요구로 전 세계적으로 수량, 용량 및 매설 범위가 증가하고 있다(Gill et al.[2014]; Ardelean and Minnebo[2015]). 이 중에서 해상 고정식 또는 부유식 풍력, 파력, 조력 등과 같은 해양 신재생에너지에 대한 전 세계적인 수요와 새로운 기술발전을 고려할 때 송전을 위한 전력케이블이 인위적인 전자기장을 발생시키는 주요 발생원이 되고 있다(Kota et al.[2015]);

WindEurope[2019]). 직류(DC) 또는 교류(AC) 케이블을 이용한 전기 송전은 상당한 수준의 전자기장(EMFs)을 방출하는 것으로 알려져 있다(Stratton[2007]). 현대적인 케이블 피복은 방출되는 전기장을 일부 차폐할 수 있지만, 자기장은 주변 환경으로 방출되며 이로부터 교류(AC) 자기장의 회전 특성 또는 직류(DC)/교류(AC) 자기장을 가로질러 움직이는 해류 또는 생물로부터 운동적으로 유도되는 전기장이 발생한다(Slater *et al.*[2010]; Gill *et al.*[2012]). 교류(AC) 방식의 케이블에서 와전류(eddy current)에 의해 발생하는 자기장의 유도에 의한 강한 세기의 전기장이 발생한다. 어류가 수중 전력케이블에 근접한 범위 내에서 노출될 수 있는 유도된 전기장의 세기는 주로 흐르는 전류의 세기와 케이블의 위치, 즉 케이블의 매설 여부 등과 같은 요소에 따라 달라질 수 있다(MeiBner[2006]; Ohman *et al.*[2007]; Normandeau *et al.*[2011]). 해저에 매립되는 전력케이블은 퇴적물을 굴착하여 매설되거나, 해저면에 케이블을 놓고 해류에 의한 움직임을 방지하기 위해 케이블 위에 보호용 덮개를 덮는 방식으로 설치되지만(Taormina *et al.*[2018]), 전력케이블로부터 방출되는 전자기장(EMFs)을 완전하게 차폐하지 못한다(Szyrowski *et al.*[2013]). 해양 저서환경에 서식하며 전자기에 민감한 생물의 경우 해저에 매설된 전력케이블이 방출하는 전자기장(EMFs)의 영향을 받을 가능성이 크며, 따라서 생태학적 관점에서 정확한 영향평가를 수행해야 할 필요가 있다(Gill[2005]). 어류의 근거리 또는 장거리 회유(migration)에 대한 지구자기장의 중요성에 대한 예는 앞서 충분히 언급하였다(Putman *et al.*[2013]; Putman *et al.*[2014b]; Naisbett-Jones *et al.*[2017]). 그러나 자연에 존재하는 지구자기장의 수준은 개별 해상풍력 발전기를 연결하기 위해 복잡하게 매설되는 전력케이블과 장거리에 송전하기 위해 매설되는 전력케이블과 같은 인위적인 구조물의 영향으로 교란될 수 있다(Andrulewicz *et al.*[2003]; Cada[2009]; Lin and Yu[2012]).

### 3.2 자기장 교란에 의한 생물 행동 영향

지구자기장을 이용하는 생물은 지구자기장의 방향, 세기 및 기울기(경사)의 변화를 감지할 수 있다. 단순하게 지구자기장의 방향을 따라 이동할 수도 있지만 세기와 경사를 기반으로 하는 '자기 지도(magnetic map)'를 사용하여 먹이 또는 이동 방향을 탐색할 수도 있다(Johnsen and Lohmann[2005]; Mouritsen[2018]). 따라서 주변 지구자기장과 비교하여 발생하는 자기 교란에 관한 연구에서 교란의 정도(심각도)는 생물이 이용하는 자기장의 구성 요소에 따라 다를 수 있다. 예를 들어, 생물이 2차원 나침반과 같이 수평면에서 방향을 감지하는 경우 교란의 수평 요소가 핵심이며, 수직 요소나 경사(기울기)를 감지하는 경우는 영향의 정도가 달라질 수 있다. 자기 교란에 의한 영향은 자연적으로 형성된 장(field)과 비교하여 인위적으로 형성된 교란하는 장(field)의 크기와 방향이 모두 중요하며 기하학적 구조에 따라 달라진다. 교란은 세기의 변화보다 기울기(경사)의 변화가 더 큰 영향을 미칠 수 있다. 방향 탐색을 위한 나침반에 대한 감각과 지도에 대한 감각은 서로 다르게 영향을 받을 수 있으며, 장거리를 이동하는 생물의 경우는 지도 감각보다는 방향

탐색에 대한 교란이 문제일 수 있다(Johnsen and Lohmann[2005]; Mouritsen[2018]). 생물이 자기장을 감지하는 생리적 기작은 인위적 교란의 영향을 조절할 수 있을 것으로 추측된다. 예를 들어, 강하고 짧은 전자기 펄스는 자철석 기반 자기 감각을 교란하는 데 영향을 미치지만, 무선 주파수에 의해 발생하는 전자기장은 쌍라디칼 기작을 교란한다(Johnsen and Lohman[2005]; Mouritsen[2018]). 따라서 인위적으로 발생하는 자기장의 영향을 평가할 때 생물이 주변 장(field)과 비교하여 인위적으로 생성된 장(field)의 방향뿐만 아니라 장(field)을 감지하는 기작을 고려하는 것이 중요하다.

해양생물이 교란된 자기장에 어떻게 반응하는가를 연구하기 위해 인위적으로 자기장의 변화를 줄 수 있는 실험방법들이 고안되어 활용되었다. 이런 종류의 실험에서 사용하는 방법은 코일시스템을 활용하여 인위적으로 발생시킨 자기장에 생물을 노출시켜 방향 탐색의 변화를 관찰하는 방식이다. 이렇게 진행된 실험의 결과를 보면, atlantic salmon은 자기장의 세기가 3.4  $\mu\text{T}$ , 6.4° 만큼의 변위 변화와 같은 작은 변화에서도 뚜렷한 방향 전환을 보여 주었으며(Scanlan *et al.*[2018]), spiny lobsters와 바다거북(loggerhead turtles)은 둘 다 5  $\mu\text{T}$  및 8° 수준, rainbow trout는 11  $\mu\text{T}$  및 17°의 변위 변화에서 다른 방향으로 방향을 전환하는 행동을 보였다(Boles and Lohmann[2003]; Fuxjager *et al.*[2011]; Putman *et al.*[2014b]). 자기장의 변화에 노출된 생물이 방향을 전환하는 행동으로 반응을 보이는 것은 교란의 정도에 따라 차이가 있음을 보여주고 있으며, 이는 자기장 세기의 차이와 방위 변화의 영향을 의미한다. 그러나 이러한 수준의 변화가 인위적으로 조절된 자기장의 세기 및 방위의 변화에 기인한 것이 아니라 본질적으로 다른 유형의 신호에 의한 것일 가능성을 고려해야 한다(Freake *et al.*[2006]; Muheim *et al.*[2006a]; Muheim *et al.*[2006b]; Mouritsen[2018]). 해저에 매설된 전력케이블에서 발생하는 전자기장은 자연 지구자기장의 극소적인 편차를 유발할 수 있다(Taormina *et al.*[2018]). 북유럽의 발트해에서 유럽 뱀장어가 이동 중에 전력케이블 위를 지나며 60 m 거리에서 5  $\mu\text{T}$  정도의 자기장 강도에 노출되었을 때 이동 경로를 이탈했으나, 30 분 정도의 짧은 지연 후에 이동 방향을 바로잡았다(Westerberg and Begout-Anras[2000]; Ohman *et al.*[2007]). 폐쇄적인 조건의 실험에서 작은 크기의 skates(*Leucoraja erinacea*)가 수중 전력케이블이 발생하는 전자기장에 노출되었을 때 속도가 감소하고 거리, 이동 속도 및 방향 전환 빈도가 증가했다. 이때 skates가 노출된 자기장의 강도는 51.6~65.3  $\mu\text{T}$  정도였으며, 지구자기장과 0.3~14  $\mu\text{T}$  정도의 편차가 발생한 것으로 보였다(Hutchison *et al.*[2018]). Rainbow trout는 심장 박동 조절 실험에서 30  $\mu\text{T}$ , 10° 변위 이상의 자기이상(magnetic anomaly)을 감지했으며(Hellinger and Hoffmann[2009]), 일본 뱀장어는 12  $\mu\text{T}$  수준의 변화에 대해서 반응을 보였다(Nishi *et al.*[2004]). 갑각류를 이용한 실험에서 24시간 동안 2.8~40 mT에 노출된 식용 게(*Cancer pagaurus*)는 은신처에서 보내는 시간이 증가하는 것으로 보아 자기장 노출로부터 보호될 수 있는 은신처를 선호하는 것으로 보인다(Scott *et al.*[2018]). 그러나 다른 실험에서 최대 강도 0.2 mT의 인공 자기장에 노출된 어린 바닷가



재(*Homarus gammarus*)는 은신처를 탐색하는 행동에 영향을 받지 않았다(Taormina *et al.*[2018]).

해양생물은 수일에서 수 주 동안 비교적 높은 강도의 자기장에 노출되면 발생생리학적 영향을 받을 것으로 추측한다. Formicki *et al.*[2019]는 다양한 종류의 어류에서 전자기장이 정자 이동, 수정률 및 부화에 소요되는 시간 등에 미치는 영향을 검토했으며, Juutilainen[2005]은 0.1~10 mT 범위의 자기장에 노출된 어류와 성체의 배아 발생에 대한 저해영향을 관찰하였다. Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)의 경우, 3~4주의 긴 잠복기를 갖는 demersal eggs를 생산하고, 부화 후 처음 1~2주 동안 기질이 자갈인 바닥에 자어(larva)인 상태로 남아 있었다(Horbowa and Fey[2013]). 수중에서 인위적으로 발생하는 자기장은 어류의 배아 또는 유생 단계에서 상대적으로 긴 시간 동안 바닥에 정착하는 개체에 영향을 미칠 가능성이 높다(Fey *et al.*[2019]). 어류 배아가 발달하는 시간 동안 자기장 또는 전자기장 노출에 의한 영향에 대한 연구 결과가 일치하지 않는 경우도 있다. 일부 연구에서 trout(*Salmo trutta*)와 rainbow trout(*Oncorhynchus mykiss*)의 자기장에 의한 부화 지연이 1~13 mT 수준에서 발생하며(Formicki and Winnicki[1998]), 다른 연구에서는 자기장이 1 mT에서 5 mT로 증가함에 따라 trout(*S. trutta*) 배아의 부화기간이 감소하였다고 보고했다. 부화시간이 길어지는 연구결과는 northern pike(*Esox lucius*)의 배아가 10 mT 자기장에 노출되었을 때 관찰되었다(Fey *et al.*[2019]). 전자기장 1 mT 수준에 zebrafish(*Danio rerio*) 배아를 수정 2시간 후 노출했을 때 영향은 관찰되지 않았다. 그러나 수정 후 48시간 후에 자기장에 노출되면 부화는 지연되었다(Skauli *et al.*[2000]). 이러한 상반된 연구 결과들로 인해 어류 유생의 부화기간에 미치는 자기장 또는 전자기장의 영향을 명확하게 결론 내리기 어렵다. 상반된 연구결과들이 도출되는 것은 다양한 생물, 특히 자기장에 민감하다고 알려진 연골어류를 이용해서 자기장 또는 전기장의 변화에 반응하는지 여부를 구별하기 위해 적용한 실험 설계가 적절하지 않았을 가능성이 있다. 조석 등으로 인하여 해류(조류)의 흐름과 이동 방향이 항상 변화하는 수심이 얇은 해저에 매립된 전력케이블에서는 자기장과 전기장이 동시에 발생한다. 즉, 생물의 관점에서는 자기장과 전기장에 동시에 노출되는 것을 의미하고, 이를 함께 전자기장이라 부른다. 하지만 생물의 지각 능력에 따라 이론상 둘 다 감지하지 못하거나 둘 다 감지할 수 있다(Skiles[1985]). 따라서 전자기장의 영향을 평가하기 위한 실험 설계에서 비자기 효과(non-magnetic effect)가 발생할 수 있다는 것에 유의해야 한다. 전자기장을 발생시키기 위해 코일시스템을 사용하는 경우 코일을 감는 방법에 따라 자기장이 상쇄되어 발생되지 않을 수도 있다(Kirschvink[1992]).

### 3.3 전기장 교란에 의한 생물 행동 영향

대부분의 생물이 생활사 동안 전력(electricity)을 활용하지만, 일부 생물은 주변 환경으로부터 약한 전기장을 감지할 수 있는 능력을 진화시켜 왔다(Crampton[2019]). 연골어류는 ampullae of Lorenzini라 불리는 몸의 중심부에서 피부까지 세포막을 가로질러 배열되어 있는

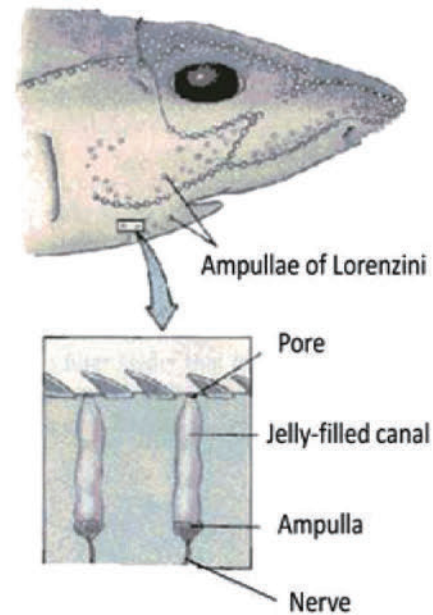


Fig. 3. Diagram of the ampullae of Lorenzini, responding to weak electric fields, and possibly to temperature, water pressure, and salinity (from Hickman *et al.*[1994]).

감각기관을 이용해 매우 약한 전기장의 전위차를 감지할 수 있다(Fig. 3). Ampullae of Lorenzini는 상어의 머리 부분에, 홍어와 가오리류에서는 머리와 가슴지느러미에 분포되어 있다. 이러한 ampullae of Lorenzini에 대한 불균형한 자극은 전기를 발생시키는 발생원의 방향과 공간적인 위치를 감지할 수 있게 한다(Adair *et al.*[1998]; Collin and Whitehead[2004]).

연골어류의 전기에 대한 감각은 먹이 탐색, 포식자 회피, 다른 개체와의 동종 인식, 의사소통, 공간적인 위치 파악을 비롯해 지구자기장 방향 탐색 등에 이용된다(Bratton and Ayers[1987]; Collin and Whitehead[2004]). 실험실 조건에서 홍어와 상어가 먹이생물인 광어(plaice)를 자극하는 전극이 설치된 방향으로 이동하여 퇴적층 바닥에 굴착하여 숨어있던 광어(plaice)를 찾아내고, 건드리기까지 하였다. 하지만 전기적인 신호(전극)가 없을 때는 그러지 못했다(Kalmijn[1971]; Kalmijn[1982]). 홍어류와 상어류의 배아는 포식자의 ventilation pulses를 유도하는 전기장에 노출되었을 때 모든 ventilation을 중지했으며, 이것은 포식을 회피하기 위한 행동으로 보인다(Kempster *et al.*[2013]; Sisneros *et al.*[1998]). 노랑가오리(stingray) 수컷은 전기적인 단서를 이용해서 퇴적물 속에 숨어있는 암컷을 감지할 수 있으며, 이들의 전기에 대한 감각은 번식시기(reproductive season) 동안에 더욱 예민해진다(Bodznick *et al.*[2003]; Sisneros *et al.*[1998]; Sisneros and Tricas[2000]). 어류 중에서 표영성 섭식 어류(pelagic feeding fish)와 저서성 섭식 어류(benthic feeding fish)를 비교하면 저서성 연골어류가 상대적으로 진화된 전기 감각(electroreception) 능력을 갖는 것으로 보인다(Collin and Whitehead[2004]; Raschi[1986]).

전기에 민감하다고 알려진 연골어류는 0.005~1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  범위의

전기장에 끌리고, 10  $\mu\text{V}/\text{cm}$  이상의 전기장을 회피할 수 있다 (Emma[2016]; Collin and Whitehead[2004]; Peters *et al.*[2007]). 연골어류를 제외한 어종 중에서 russian sturgeon(*Acipenser gueldenstaedtii*)과 sterlet (*Acipenser ruthenus*)은 500  $\mu\text{V}/\text{cm}$  수준의 전기장 강도에서 행동학적 반응을 보였다(Basov[1999]), 반면에 실험실 조건에서 칠성장어류와 뱀장어류는 각각 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 와 0.67  $\mu\text{V}/\text{cm}$  수준까지 전기장 세기가 줄어들어도 감지할 수 있다는 것을 보였다(Chung-Davidson *et al.*[2004]; Kullnick[2000]). 칠성장어류의 유영능력과 활동성은 전기장 세기에 따라 다르게 영향을 미친다(Chung-Davidson *et al.*[2004]). Guiana 돌고래는 혼련과 관련된 연구에서 4.6  $\mu\text{V}/\text{cm}$  수준의 전기장을 감지할 수 있다는 것을 보였다(Czech-Damal *et al.*[2011]). 전기장의 교란이 어류의 행동에 미치는 영향에 대한 흥미로운 사례는 민물고기인 paddlefish의 치어(체장 0.5~1 cm 정도)가 최대 9 cm 거리에서 전기에 대한 감각을 사용하여 플랑크톤 먹이를 찾는 것을 보여준 것이었다. Paddlefish를 대상으로 인위적으로 전기장의 세기를 조절한 실험에서 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  미만의 전기장에서는 섭식 속도에 거의 영향을 미치지 않았던 반면, 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  이상에서 어류의 주둥이에 인접한 먹이를 섭식하지 못했고, 50  $\mu\text{V}/\text{cm}$  정도에서는 섭식활동이 완전히 중지되었다(Wilkens *et al.*[2002]). 또한 paddlefish는 전기에 대한 감각이 지나치게 민감할 때, 금속성 물체를 회피하는 반응을 보였다(Wilkens and Hofmann[2007]).

전기장의 세기가 증가하면 어류는 먼저 전기장의 양극 쪽으로 강제로 끌려간 다음(electrotaxis) 기절하거나 마비(electronarcosis)된다(Bary[1956]). 이러한 현상을 이용해 연구를 위한 과학적인 어획 활동이 이루어지기도 한다. 50 Hz, 3.3 V/cm 전기장에 1초 정도 노출되는 것은 청어를 기절시키기에 충분하다. Atlantic salmon은 6~12초 정도 2.5 V/cm 전기장에 노출되거나, 또는 0.8 초 정도 20 V/cm 전기장에 노출되면 기절한다(Nordgreen *et al.*[2008]; Roth *et al.*[2003]; Snyder[2003]). 일반적으로 어류를 기절시키기 위한 전기장의 세기는 어류의 크기에 비례한다. 60 mV/cm 정도의 전기장 세기는 75 cm 크기의 상어를 마비시키기에 충분한 반면, 400 mV/cm 세기의 전기장이 20 cm 길이의 송어과 어류를 마비시킬 때 필요한 것으로 보아 항상 어류의 크기와 비례하는 것은 아닌 것으로 보인다(Bary[1956]; Smith[1974]). 부상률(injury rate)도 어류의 크기에 따라 달라진다. 전기장을 이용한 트롤 어업과 관련된 실험에서 대구 치어(12~16 cm 크기)는 가시적인 손상 없이 2.5~3 V/cm 정도 세기의 전기장에서 생존한 반면, 큰 대구(41~55 cm 크기)는 0.4~1 V/cm의 전기장에서 척추 손상이 관찰되었다(Soetaert *et al.*, 2015). 무척추 동물도 전기장을 사용하여 어획할 수 있는데 razor clams(*Ensis* spp.)이 퇴적물에서 나오게 하는 데는 0.5 V/cm의 전기장 세기면 충분하고, 5초 동안 0.2~0.4 V/cm의 전기장의 세기는 norway lobsters(*Nephrops norvegicus*)를 은신처에서 나오게 할 수 있다(Soetaert *et al.*[2015]). 전기장을 이용하여 한정된 지역으로 어류의 이동을 제한할 수 있는 전기적 장벽을 활용한 사례도 있다(Noatch and Suski[2012]). 인간에 대한 상어 공격이 많이 발생하

는 해역에서는 전기장이 상어 활동을 억제할 수 있는 방법으로 이용되기도 하였다. 섭식활동에 대해 자극을 준 scalloped hammerhead shark와 leopard shark(*Triakis semifasciata*)에 대한 실험에서 평균 410~430 mV/cm 정도의 전기장 세기는 어류의 두뇌에 경련을 일으킨 반면, 이것보다 강한 960~1850 mV/cm 정도의 전기장 세기는 상어를 후퇴시키는 결과를 보였다(Marcotte and Lowe[2008]). 또 다른 연구에서는 30 mV/cm 정도 세기의 전기장 장벽이 상어의 접근을 제한하는 결과를 보였다(Smith[1974]).

전기장에 반응하는 어류의 특성에서 중요한 부분은 주파수에 따라 달라질 수 있다는 것이다. 연골어류는 직류(DC) 전기장의 변화 또는 0.1~10 Hz 사이의 저주파 교류(AC) 전기장에 반응한다(Bodznick *et al.*[2003]; Collin and Whitehead[2004]; Kalmijn[1999]). 하지만 이러한 반응이 5 Hz 이상의 주파수에서는 상당히 감소하는 것으로 보인다(Adair *et al.*[1998]). 이와 유사하게 담수어종인 paddlefish는 주로 5~15 Hz 사이의 전기장에 반응하고, 유럽 뱀장어는 주파수가 0.5 Hz에서 50 Hz로 증가했을 때 감지할 수 있는 전기장의 세기가 약 20배 정도 민감해졌다(Berge[1979]). 수조 실험에서 russian sturgeon과 sterlet은 교류(AC) 전기장의 주파수에 따라 회피, 먹이 탐색, 섭식 활동 등 다양한 행동 변화를 보였다(Basov[1999]). 정류(stationary) 전기장의 방향성이 일부 어종에서 중요하다고 판단되는 근거는 미국 장어를 대상으로 한 심장 박동 조절 실험에서 전기장이 어류의 몸체와 평행하게 발생했을 때와 비교하여 몸체에 수직으로 전기장이 가해질 때 심박이 줄어들었으나(Rommel and McCleave[1972]), 유럽 뱀장어의 반응은 이와 유사하지 않았다(Berge[1979]).

전기에 민감한 생물은 해저에 매립된 전력케이블에서 생성된 전기장에 의해 끌리거나 회피할 수 있다. 하지만 환경변화에는 민감하지만 변화된 환경을 회피하기 어려운 저서환경에서 서식하는 생물의 경우 번식, 섭식 활동에 더 민감한 영향을 미칠 수 있으므로 저서생물이 서식하는 지역과 같은 곳에서는 특별한 주의가 필요하다(Gill[2005]). 다양한 생물 종들이 인위적으로 발생된 전자기장을 감지하고 반응할 수 있다는 것에 대한 연구 결과는 상대적으로 충분하지만, 인위적으로 발생된 전자기장(EMFs)이 해양생물에 미치는 부정적인 생물학적 영향을 보여주는 연구 결과는 아직 부족한 것으로 보인다(Porsmoguer *et al.*[2015]; Westerberg and Lagenfelt[2008]; Formicki *et al.*[2004]). 일반적으로 먹이 탐색을 위해 전자기장을 사용할 수 있는 연골어류를 제외하고 해상풍력 발전을 위해 매립된 해저케이블의 영향을 받을 가능성이 가장 큰 저서 군집의 대부분에 대해서는 상대적으로 위험도(risk)가 낮은 것으로 추정하고 있다(Gill[2005]; Gay[2012]; Porsmoguer *et al.*[2015]; Gill and Kimber[2005]; Bergstrom *et al.*[2013]; Bergstrom *et al.*[2014]). 일부 연구에서 보고된 제한된 사례에서 무척추동물이 전력케이블 인근에서 측정되는 전자기장보다 높은 임계치(thresholds)를 가지고 있을 것이라 추측하고 있으나 여전히 무척추동물에 대한 충분한 연구는 부족한 것으로 판단된다(Gay[2012]).

**Table 1.** Summary of the observed impacts to marine species groups from EMFs emissions

Species Group	Observed Effect	Impact Severity
Elasmobranchs (sharks, skates, rays)	Behavioral (e.g., alterations in swimming pattern, lingering over cables, slight attraction to cabled areas)	Minimal (innocuous, non lethal)
Fish (pelagic and demersal, eels)	Behavioral (e.g., slight alterations of migration pathways in smolts, lingering over cables)	Minimal (innocuous, non lethal)
Benthics (molluscs, crustaceans, corals, sponges, polychaetes)	Behavioral (e.g., attraction to cabled areas) Physiological (e.g., reduced ammonia excretion in polychaetes)	Minimal (non lethal)
Marine Mammals	None (underdetermined)	Negligible (underdetermined)
Sea Turtles	None (underdetermined)	Negligible (underdetermined)

#### 4. 해상풍력 발전에 대한 과학기반 영향평가의 필요성

해상풍력은 육상풍력과 비교하여 발전단지의 조성 및 유지보수 비용이 많을 것으로 예측되어 현재는 경제성이 다소 낮다고 평가된다. 하지만, 해상은 대형 발전단지를 조성하기가 용이하고 육상풍력 단지 조성과 비교하여 상대적으로 민원이 적을 것으로 추측한다. 발전단지 설계 및 건설, 유지보수 등과 같은 관련 기술의 개발로 향후 풍력발전 분야의 주축은 해상풍력이 될 것으로 전망하고 있다(Kim *et al.*[2012]; Kim *et al.*[2009]). 그러나 전력 수급과 연관 산업의 경쟁력 강화를 목표로 해상풍력에 대한 긍정적인 측면을 강조함으로써 해상풍력과 연관된 새로운 환경 문제들로 인해 주변 지역사회의 갈등이 발생하는 실정에 대해서는 적극적으로 고려하고 있지 않다. 해상풍력 발전단지 조성을 위한 계획 수립 시 사전에 입지가 갖는 장·단점과 문제점 등에 대해 깊이 있는 검토가 필요하며, 특히 과거에 예측하지 못했던 새로운 환경 영향에 대해서 과학기반의 영향평가와 적절한 관리 대책을 미리 마련하는 것이 중요할 것이다(Kim *et al.*[2012]; Lee *et al.*[2010]). 하지만 현재는 해상풍력의 사업특성을 반영하는 과학기반의 영향평가가 미흡한 상태에서 해양환경 영향평가가 이루어지고 있는 것이 현실이다. 해상풍력 발전단지를 조성하는 공사 시에는 구조물 설치에 따른 부유사의 확산, 해저면 변화, 어장환경 영향 등에 대한 평가가 중요하고, 운영단계에서는 전자기장 발생에 따른 해양생물의 반응과 소음, 진동 등으로 인한 조류의 영향, 시설물 설치로 인한 해양경관의 훼손, 해상항로의 방해 및 각종 해양보호구역 훼손과 대책 등에 대해 충분히 고려되어 평가되어야 한다.

해상풍력 발전시설의 운영 중에 발생할 수 있는 해양환경 압력요인 중 지금까지 고려하지 않았던 요인은 전력계통(grid)에 인입하는 전력케이블에서 발생하는 전자기장과 열에 의한 영향이다. 해상풍력 발전을 통해 생산된 전기는 전력케이블을 이용해 육지까지 송전되어야 한다. 송전을 위해 매립된 전력케이블에 흐르는 전류는 송전방식에 따라 자기장(MFs)과 전기장(EFs)을 생성한다. 인위적으로 발생하는 정적 자기장(static MFs)과 전기장(EFs)은 논란의 여지는 있지만 해양생물에 영향을 미치는 것은 확실하다. 하지만 대부분의 연구가 실험 대조군과의 비교했을 때 매우 작은 차이만을 확인하는 수준이었으며, 인위적으로 생성된 전자기장이 해양환경

및 생태계를 교란하는 수준은 상대적으로 작을 것으로 추측하고 있다.

해상풍력 발전은 수심이 얇은 연근해에 풍력터빈을 설치하여 바람 에너지를 기계적 에너지로 변환시키고, 이 에너지를 이용하여 발전기를 돌려 전기를 생산하는 것이다. 터빈 블레이드의 형상, 기계적 마찰, 발전기의 효율 등에 따른 손실요인으로 인하여 바람 에너지가 전기로 전환되는 실제 발전효율은 20~40% 수준인 것으로 알려져 있다(Jakubowska *et al.*[2019]). 발전효율을 고려한 해상풍력 발전단지 조성을 위한 적지는 풍속 6 m/s 이상, 수심 50 m 미만인 곳으로 대부분 연안어업 적지(한류·난류 교차해역 또는 얇은 수심 등)와 중복될 수 있을 것으로 판단되며, 또한 상대적으로 얇은 수심의 경우 깊은 수심에 비해 해양생물의 다양도가 높은 곳이다. 해상풍력 발전단지를 추진 중인 후보지 대부분은 어업 활동이 활발한 해역으로 발전소 건설 시 조업 구역의 상실로 인한 수산업에 대한 영향 또한 분명할 것이다. 그러므로 해상풍력 발전단지 조성 시에 해양환경 및 생물에 대한 영향에 대해 과학기반의 영향평가가 반드시 뒷받침되어야 한다.

해상풍력에 의한 환경 영향과 유사한 사례로 해저케이블 설치 사업을 들 수 있다. 해저케이블은 짧은 것은 도서 사이의 통신 또는 전력을 공급하기 위해 설치되고 길게는 국가 사이의 통신을 위해서 설치된다(Yi *et al.*[2017]). 특히, 해상풍력과 같은 신재생에너지 개발이 정부 주도의 체계적 개발을 추진하고 있음을 감안할 때(Kim *et al.*[2012]), 향후 해저 전력케이블의 매설 면적은 확대될 것으로 예상된다. 해저전력케이블 매설의 경우 과거에는 고려하지 않았던 전자기장 방출과 같은 새로운 환경영향 문제로 인해 해양환경 영향평가에서 다른 접근 방법이 필요함에도 불구하고 여전히 기존의 평가방식을 유지하고 있다. 해저 전력케이블에 의한 해양환경 및 생태계 영향에 대한 연구는 해외에서는 일부 진행되었지만(Andrulewicz *et al.*[2003]; Dunham *et al.*[2015]; Kavet *et al.*[2016]; Kogan *et al.*[2006]; Krylov *et al.*[2014]; Lucca[2013]), 국내 환경 및 서식생물을 고려한 연구는 거의 없었다. 해저에 전력케이블을 매설하는 사업과 관련하여 해양환경에 미칠 수 있는 영향은 매설, 운영 및 수리/복구, 해체하는 단계에서 발생할 수 있을 것이다. 해저 전력케이블의 매설, 운영, 제거하는 과정에서는 퇴적층의 교란, 부유물질의 확산에 의한 오염물질의 재부유, 소음, 전자기장, 열복사가 발생하게 되며, 이는 환경에 서식하는 다양한 수용체(생물)에

영향을 미칠 것이다(NIRAS[2015]).

**4.1 인위적으로 발생하는 전자기장에 대한 과학적 기반의 영향 예측**

해저에 매설된 전기 송전을 위한 전력케이블에서 발생하는 전자기장(EMFs)의 인위적 방출 범위와 세기는 실제 측정 및 모델을 이용하여 정량화할 수 있으며, 자연 지구자기장과 유사한 세기로 측정된다(Hutchison *et al.*[2020]). 인위적으로 발생하는 전자기장(EMFs)은 해양환경에서 생태적, 상업적으로 중요한 생물을 포함하여 전기 또는 자기에 민감한 종에 의해 감지될 수 있다. 전기 또는 자기에 민감한 생물인 갑각류, 연골어류, 해양포유류 등이 전자기장의 영향에 의해 생태적으로 중요한 행동이상(behavioural abnormality)을 보이는 것을 많은 연구에서 확인하였다(Table 1, Gill and Kimber[2005]). 따라서 전자기장 발생 범위와 세기 및 생물의 긍정적 또는 부정적 반응에 대한 정량화 등은 인위적인 영향에 의한 해양환경과 생물에 대한 평가에 있어서 매우 중요하다.

인위적으로 발생하는 전자기장(EMFs)은 해양환경과 서식하는 생물의 행동과 생리에 어떤 영향을 미치는가? 이러한 전자기장(EMFs)의 영향은 생물학적 또는 생태학적 효과로 분류될 만큼 충분히 유효한가? 마지막으로, 전자기장(EMFs)에 대한 과학기반의 영향평가와 관련된 중요한 지식의 겹은 무엇인가? 이러한 질문에 대한 답은 향후 신재생에너지, 특히 해상풍력 발전의 환경성, 주민 수용성 등을 확보하는데 매우 중요할 것이다.

**후 기**

본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발, 20210427)의 지원을 받아 수행하였습니다.

**References**

[1] Adair, R.K., Astumian, R.D. and Weaver, J.C., 1998, Detection of weak electric fields by sharks, rays, and skates, *Chaos: Interdiscipl. J. Nonlinear Sci.*, 8(3), 576-587.  
 [2] Anderson, J.M., Clegg, T.M., Veras, L.V.M.V.Q. and Holland, K.N., 2017, Insight into shark magnetic field perception from empirical observations, *Scientific Reports*, 7(1), 11042. doi:10.1038/s41598-017-11459-8  
 [3] Andruliewicz, E., Napierska, D. and Otremba, Z., 2003, The environmental effects of the installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: a case study of the Polish Marine Area of the Baltic Sea., *J. Sea Res*, 49(4), 337-345.  
 [4] Ardelean, M. and Minnebo, P., 2015, HVDC submarine power cables in the world, European Union.  
 [5] Baker, C.V.H., Modrell, M.S. and Gillis, J.A., 2013, The evo-

lution and development of vertebrate lateral line electroreceptors, *J. Exp. Biol.*, 216, 2515-2522.  
 [6] Balmori A., 2015, Anthropogenic radio-frequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation, *Science of the Total Environment*, 518, 58-60.  
 [7] Bary, B. McK., 1956, The effect of electric fields on marine fishes. *Marine Research Scotland*, 1.  
 [8] Basov, B., 1999, Behavior of sterlet *Acipenser ruthenus* and Russian sturgeon *A. gueldenstaedtii* in low-frequency electric fields, *J. Ichthyol.*, 39(9), 782-787.  
 [9] Bedore, C.N. and Kajiura, S.M., 2013, Bioelectric fields of marine organisms: voltage and frequency contributions to detectability by electroreceptive predators, *Physiological and Biochemical Zoology*, 86, 298-311.  
 [10] Berge, J.A., 1979, The perception of weak electric AC currents by the European eel, *Anguilla anguilla*, *Comp. Biochem. Physiol. Physiol.*, 62(4), 915-919.  
 [11] Bergstrom, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Capetillo, N.A. and Wilhelmsson, D., 2014, Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment, *Environmental Research Letters*, 9. doi:10.1088/1748-9326/9/3/034012.  
 [12] Bergstrom, L., Sundqvist, F. and Bergstrom, U., 2013, Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community, *Marine Ecology Progress Series*, 485, 199-210.  
 [13] Bochert, R. and Zettler, M.L., 2006, Effect of electromagnetic fields on marine organisms, in: J. Koller, J. Koppel, W. Peters, *Offshore Wind Energy, Research on Environmental Impacts*, Springer, Germany, 223-234.  
 [14] Bochert, R., and Zettler, M.L., 2004, Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields, *Bioelectromagnetics*, 25(7), 498-502.  
 [15] Bodznick, D., Montgomery, J.C. and Bradley, D.J., 1992, Suppression of common mode signals within the electrosensory system of the little skate *Raja erinacea*, *J. Exp. Biol.*, 171, 107-125.  
 [16] Bodznick, D., Montgomery, J.C. and Tricas, T.C., 2003, Electroreception: extracting behaviorally important signals from noise. in: S.P. Collin and N.J. Marshall, *Sensory Processing in Aquatic Environments*, 389-403, Springer-Verlag, New York.  
 [17] Boehlert, G.W. and Gill, A., 2010, Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis, *Oceanography*, 23(2), 68-81.  
 [18] Boles, L.C. and Lohmann, K.J., 2003, True navigation and magnetic maps in spiny lobsters, *Nature*, 421, 60-63.  
 [19] Bottesch, M., Gerlach, G., Halbach, M., Bally, A., Kingsford, M.J. and Mouritsen, H., 2016, A magnetic compass that might help coral reef fish larvae return to their natal reef. *Current Biology*, 26(24), 1266-1267.  
 [20] Bratton, B.O. and Ayers, J.L., 1987, Observations on the electric organ discharge of two skate species (*Chondrichthyes: Rajidae*)

- and its relationship to behaviour, *Environmental Biology of Fishes*, 20(4), 241-254.
- [21] Brothers, J.R. and Lohmann, K.J., 2015, Evidence for geomagnetic imprinting and magnetic navigation in the Natal Homing of Sea Turtles, *Curr. Biol.*, 25(3), 392-396.
- [22] Brothers, J.R. and Lohmann, K.J., 2018, Evidence that magnetic navigation and geomagnetic imprinting shape spatial genetic variation in Sea Turtles, *Curr. Biol.*, 28(8), 1325-1329.
- [23] Cada, G.F., 2009, Report to Congress on the Potential Environmental Effects of Marine and Hydrokinetic Energy Technologies (No. DOE/GO-102009-2955), Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 1-93.
- [24] Chew, G.L. and Brown, G.E., 1989, Orientation of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) in normal and null magnetic fields, *Canadian J. Zool.*, 67(3), 641-643.
- [25] Chung-Davidson, Y.-W., Yun, S.-S., Teeter, J. and Li, W., 2004, Brain pathways and behavioral responses to weak electric fields in parasitic sea lampreys (*Petromyzon marinus*), *Behav. Neurosci.*, 118(3), 611-619.
- [26] CMACS, 2003, A baseline assessment of electromagnetic fields generated by offshore wind farm cables. University of Liverpool, Centre for Marine and Coastal Studies. Rep. No. COWRIE EMF-01-2002 66. 71.
- [27] Collin, S. and Whitehead, D., 2004, The functional roles of passive electroreception in non-electric fishes, *Animal Biology*, 54(1), doi:10.1163/157075604323010024
- [28] Crampton, W.G., 2019, Electroreception, electrogenesis and electric signal evolution, *J. Fish. Biol.* doi:10.1111/jfb.13922
- [29] Cresci, A., Paris, C.B., Foretich, M.A., Durif, C.M., Shema, S.D., O'Brien, C.E., Vikebø, F. B., Skiftesvik, A.B. and Browman, H.I., 2019, Atlantic haddock (*melanogrammus aeglefinus*) larvae have a magnetic compass that guides their orientation, *iScience* 19, 1173-1178.
- [30] Cresci, A., Rosa, R.De., Putman, N.F. and Agnisola, C., 2017, Earth-strength magnetic field affects the rheotactic threshold of zebrafish swimming in shoals, *Comp. Biochem. Physiol. Part A*, 204, 169-176.
- [31] Czech-Damal, N.U., Liebschner, A., Miersch, L., Klauer, G., Hanke, F.D., Marshall, C., Dehnhardt, G. and Hanke, W., 2011, Electroreception in the Guiana dolphin (*Sotalia guianensis*), *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1729), 663-668.
- [32] Dixon, A., 2012, Zebrafish magnetite and long-lived Rohon-Beard Neurons : expanding our view of two zebrafish sensory systems in development and adulthood, California Institute of Technology.
- [33] Duman, C.H. and Bodznick, D., 1996, A role for GABAergic inhibition in electrosensory processing and common mode rejection in the dorsal nucleus of the little skate, *Raja erinacea*, *Journal of Comparative Physiology A*, 179, 797-807.
- [34] Dunham, A., Pegg, J., Carolsfeld, W., Davies, S., Murfitt, I. and Boutillier, J., 2015, Effects of submarine power transmission cables on a glass sponge reef and associated megafaunal community, *Marine environmental research*. 107, 50-60.
- [35] Durif, C., Browman, H., Phillips, J. and Skiftesvik, A.B., 2013, Magnetic Compass Orientation in the European Eel, *PLoS ONE*, 8(3), e59212.
- [36] Emma, B., 2016, A Review of the Evidence of Electromagnetic Field (EMF) Effects on Marine Organisms, *Research and Reviews: J. Ecol. Environ. Sci.*, 4, 22-26.
- [37] EU, 2009, Health effects of exposure to EMF, SCENIHR, 83.
- [38] Fey, D.P., Greszkiewicz, M., Otremba, Z. and Andrulewicz, E., 2019, Effect of static magnetic field on the hatching success, growth, mortality, and yolk-sac absorption of larval northern pike *Esox lucius*, *Sci. Total Environ.*, 647, 1239-1244.
- [39] Formicki, K., Tanski, A. and Winnicki, A., 2004, Effects of magnetic fields on fyke net performance. *J. Appl. Ichthyol.*, 20, 402-406.
- [40] Formicki, K., Bonistawska, M. and Jasinski, M., 1997, Spatial orientation of trout (*Salmo trutta L.*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss Walb.*) embryos in natural and artificial magnetic fields, *Acta Ichthyologica Et Piscatoria*, 27(2), 29-40.
- [41] Formicki, K., Korzelecka-Orkisz, A. and Tański, A., 2019, Magnetoreception in fish. *J. Fish Biol.*, 95, 73-91.
- [42] Formicki, K., Tanski, A. and Winnicki, A., 2002, Effects of magnetic field on the direction of fish movement under natural conditions.
- [43] Formicki, K. and Winnicki, A. 1998, Reactions of fish embryos and larvae to constant magnetic fields. *Italian Journal of Zoology*, 65(sup1), 479-482. doi:10.1080/11250009809386870
- [44] Freake, M.J., Muheim, R. and Phillips, J.B., 2006, Magnetic maps in animals: a theory comes of age?, *Q. Rev. Biol.*, 81(4), 327-347.
- [45] Fuxjager, M.J., Davidoff, K.R., Mangiamele, L.A. and Lohmann, K.J., 2014, The geomagnetic environment in which sea turtle eggs incubate affects subsequent magnetic navigation behavior of hatchlings, *Proc. R. Soc. B*, 281(1791), 20141218. doi:10.1098/rspb.2014.1218
- [46] Fuxjager, M.J., Eastwood, B.S. and Lohmann, K.J., 2011, Orientation of hatchling loggerhead sea turtles to regional magnetic fields along a transoceanic migratory pathway, *J. Exp. Biol.*, 214(15), 2504-2508.
- [47] Gay ME, 2012, Spatial analysis of fish distribution in relation to offshore wind farm developments, MSc thesis, Cranfield University.
- [48] GESAMP, 1991, 'Reducing environmental impacts of coastal aquaculture, Reports and studies No 47 of the joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP) Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [49] Gill, A.B. and Bartlett, M., 2011, Literature review on the potential effects of electromagnetic fields and subsea noise

- from marine renewable energy developments on Atlantic salmon, sea trout and European Eel, Scottish Natural Heritage Commissioned Report.
- [50] Gill, A.B., Bartlett, M. and Thomsen, F., 2011, Potential interactions between diadromous fishes of UK conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments, *Journal of fish biology*, 81, 664-695.
- [51] Gill, A.B. and Kimber, J.A., 2005, The potential for cooperative management of elasmobranchs and offshore renewable energy development in UK waters, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 85, 1075-1081.
- [52] Gill, A.B., 2005, Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone, *Journal of Applied Ecology*, 42, 605-615.
- [53] Gill, A.B., Gloyne-Philips, I., Kimber, J. and Sigray, P., 2014, Marine renewable energy, electromagnetic (EM) fields and EM-sensitive animals in Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions, in: Mark A. Shields and Andrew I. L., Springer, Netherlands, 61-79.
- [54] Gillis, J.A., Modrell, M.S., Northcutt, R.G., Catania, K.C., Luer, C.A. and Baker, C.V.H., 2012, Electrosensory ampullary organs are derived from lateral line placodes in cartilaginous fishes, *Development*, 139, 3142-3146.
- [55] Goff, M., Salmon, M. and Lohmann, K.J., 1998, Hatchling sea turtles use surface waves to establish a magnetic compass direction, *Anim. Behav.*, 55(1), 69-77.
- [56] Gould, J.L., 2008, Animal navigation: the evolution of magnetic orientation, *Curr. Biol.*, 18(11), 482-484.
- [57] Hellinger, J. and Hoffmann, K.-P., 2009, Magnetic field perception in the Rainbow Trout, *Oncorhynchus mykiss*, *Journal of Comparative Physiology A*, 195(9), 873-879.
- [58] Henshaw, I., Fransson, T., Jakobsson, S., Lind, J., Vallin, A. and Kullberg, C., 2008, Food intake and fuel deposition in a migratory bird is affected by multiple as well as single step changes in the magnetic field, *J. Exp. Biol.*, 211, 649-653.
- [59] Hickman, Fig 28-10 ampullae of Lorenzini. Memorial University Biology, [http://www.mun.ca/biology/scarr/Fig28-10\\_ampullae\\_of\\_Lorenzini.gif](http://www.mun.ca/biology/scarr/Fig28-10_ampullae_of_Lorenzini.gif), 1994(accessed 2021.07.22.).
- [60] Hoenig, J., Muller, R. and Tremblay, J., 2015, American lobster benchmark stock assessment and peer review report. 493 (Woods Hole, MA).
- [61] Horbowa, K. and Fey, D.P., 2013, Atlas of Early Life Stages of Fish - 34 Species of the Southern Baltic Sea, MIR-PIB, Gdynia.
- [62] Hulot, G., Finlay, C.C., Constable, C.G., Olsen, N. and Manda, M., 2010, The magnetic field of planet Earth, *Space Sci. Rev.*, 152(14), 159-222.
- [63] Hutchison, Z., Sigray, P., He, H., Gill, A.B., King, J. and Gibson, C., 2018, Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (Shark, Rays, and Skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables. US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Sterling (VA). OCS Study BOEM 3.
- [64] Hutchison, Z.L., Gill, A.B., Sigray, P., He, H. and King, J.W., 2020, Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species, *Science Reports*, 10, 4219, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>.
- [65] IARC, 2002, Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80.
- [66] Jakubowska, M., Urban-Malinga, B., Otremba, Z. and Andruliewicz, E., 2019, Effect of low frequency electromagnetic field on the behavior and bioenergetics of the polychaete *Hediste diversicolor*, *Marine Environmental Research*, 150, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104766>
- [67] Johnsen, S. and Lohmann, K.J., 2005, The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(9), 703-712.
- [68] Johnsen, S. and Lohmann, K., 2008, Magnetoreception in animals, *Physics Today*, 61(3), 29-35.
- [69] Jointly with related ministries, 2020, A plan for offshore wind power generation that co-exists with related ministries, South Korea. (관계부처합동, 2020, 주민과 함께하고, 수산업과 상생하는 해상풍력 발전 방안.)
- [70] Juutilainen, J. and Lang, S., 1997, Genotoxic, carcinogenic and teratogenic effects of electromagnetic fields, *Mutat Res.*, 387, 165-171.
- [71] Juutilainen, J., 2005, Developmental effects of electromagnetic fields, *Bioelectromagnetics*, 26(S7), 107-115.
- [72] Kaiser, F., 1996, External signals and internal oscillation dynamics: biophysical aspects and modelling approaches for interactions of weak electromagnetic fields at the cellular level, *Bioelectrochem*, 41, 3-18.
- [73] Kalmijn, A.J., 1971, The Electric Sense of Sharks and Rays, *J. Exp. Biol.*, 55(2), 371-383.
- [74] Kalmijn, A.J., 1982, Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, *Science*, 218, 916-918.
- [75] Kalmijn, A.J., 1984, Theory of electromagnetic orientation: a further analysis, in: Bolis, L., Keynes, R.D., Maddrell, S.H.P., *Comparative Physiology of Sensory Systems*, Cambridge University Press, 525-560.
- [76] Kalmijn, A.J., 1999, Detection and Biological Significance of Electric and Magnetic Fields in Microorganisms and Fish, 4-5.
- [77] Mouritsen, 2018, Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals, *Nature*, 558, 50-59.
- [78] Kavet, R., Wyman, M.T. and Klimley, A.P., 2016, Modeling Magnetic Fields from a DC Power Cable Buried Beneath San Francisco Bay Based on Empirical Measurements, *PLOS ONE*, 11(2), e0148543. doi:10.1371/journal.pone.0148543
- [79] Kempster, R.M., Hart, N.S., and Collin, S.P., 2013, Survival of the Stillest: Predator Avoidance in Shark Embryos, *PLoS ONE*,

- 8(1), e52551. doi:10.1371/journal.pone.0052551
- [80] Kim, G.-Y., Lee, D.-I., Jeon, K.-A. and Yu, J., 2012, Improvement for marine environmental impact assessment on the development of offshore wind power, *Korean Society of Environmental Impact Assessment*, 21(1), 1-13.
- [81] Kim, J.-Y., Kang, K.-S., Oh, K.-Y., Lee, J.-S. and Ryu, M.-S., 2009, Assessment of possible resources and selection of preparatory sites for offshore wind farm around Korean Peninsula, *The Korean Society for New and Renewable Energy*, 5(2), 39-48.
- [82] Kirschvink, J.L., 1992, Comments on "Constraints on biological effects of weak extremely-low-frequency electromagnetic fields", *Phys. Rev. A.*, 46, 2178-2184.
- [83] Klimley, A.P., 1993, Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, *Sphyrna lewini*, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field, *Mar. Biol.*, 117, 1-22.
- [84] Klimley, A.P., Wyman, M.T. and Kavet, R., 2017, Chinook salmon and green sturgeon migrate through San Francisco Estuary despite large distortions in the local magnetic field produced by bridges, *PLOS ONE*, 12(6), e0169031. doi:10.1371/journal.pone.0169031
- [85] Kogan, I. Paull, C.K. Kuhnz, L.A. Burton, E.J. Von Thun, S. Gary Greene, H. and Barry, J.P., 2006, ATOC/Pioneer Seamount cable after 8 years on the seafloor: Observations, environmental impact. *Continental Shelf Research*, 26(6), 771-787.
- [86] Kota, S., Bayne, S.B. and Nimmagadda, S., 2015, Offshore wind energy: a comparative analysis of UK, USA and India, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 685-694.
- [87] Kremers, D., Marulanda, J.L., Hausberger, M. and Lemasson, A., 2014, Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields, *Naturwissenschaften*, 101(11), 907-911.
- [88] Krylov, V.V., Izyumov, Y.G., Izekov, E.I. and Nepomnyashchikh, V.A., 2014, Magnetic fields and fish behavior, *Biol. Bull. Rev.*, 4(3), 222-231.
- [89] Kullnick, 2000, Influences of electric and magnetic fields on aquatic ecosystems, *ICNIRP: Effects of Electromagnetic Fields on the Living Environment*, 113-132.
- [90] Lee, D.-I., Eom, K.-H., Jeon, K.-A. and Kim, G.-Y., 2010, Scoping for environmental impact and system improvement of marine sand mining in Korea, *Korean Society of Environmental Impact Assessment*, 19(3), 335-345.
- [91] Lin, L. and Yu, H., 2012, Offshore wave energy generation devices: impacts on ocean bioenvironment, *Acta Ecol. Sin.*, 32(3), 117-122.
- [92] Lohmann and Willows, 1987, Luna modulated geomagnetic orientation by marine mollusk, *Science*, 235, 331-334.
- [93] Lohmann, K.J., Cain, S.D., Dodge, S.A. and Lohmann, C.M., 2001, Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles, *Science*, 294(5541), 364-366.
- [94] Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F. and Endres, C.S., 2008, The sensory ecology of ocean navigation, *J. Exp. Biol.*, 211, 1719-1728.
- [95] Lohmann, K., Pentcheff, N., Nevitt, G., Stetten, G., Zimmerfaust, R., Jarrard, H. and Boles, L., 1995, Magnetic orientation of spiny lobsters in the ocean: experiments with undersea coil systems, *J. Exp. Biol.*, 198, 2041-2048.
- [96] Lohmann, K.J., 2010, Magnetic-field perception. *Nature*, 464(7292), 1140-1142.
- [97] Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F. and Putman, N.F., 2007, Magnetic maps in animals: nature's GPS, *J. Exp. Biol.*, 210(21), 3697-3705.
- [98] Lucca, G., 2013, Analytical Evaluation of Sub-Sea ELF Electromagnetic Field Generated by Submarine Power Cables. *Progress In Electromagnetics Research B*, 56, 309-326.
- [99] Luschi, P., Benhamou, S., Girard, C., Ciccione, S., Roos, D., Sudre, J. and Benvenuti, S., 2007, Marine turtles use geomagnetic cues during open-sea homing, *Curr. Biol*, 23, 126-133.
- [100] Maeda, K., Robinson, A.J., Henbest, K.B., Hogben, H.J., Biskup, T., Ahmad, M., Schleicher, E., Weber, S., Timmel, C.R. and Hore, P.J., 2012, Magnetically sensitive light-induced reactions in cryptochrome are consistent with its proposed role as a magnetoreceptor, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 109, 4774-4779.
- [101] Maeng, J.-H., Cho, B.-J., Lim, O.-J. and Seo, J., 2013, A study on the environmental impact of offshore wind farms through monitoring case in overseas country, *J. Korean Soc. Mar. Environ.*, 16(4), 276-289.
- [102] Mann, S., Sparks, N.H., Walker, M.M. and Kirschvink, J.L., 1988, Ultrastructure, morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon, *Onchorhynchus nerka*: implications for magnetoreception, *J. Exp. Biol.*, 140, 35-49.
- [103] Marcotte, M.M. and Lowe, C.G., 2008, Behavioral Responses of Two Species of Sharks to Pulsed, Direct Current Electrical Fields: Testing a Potential Shark Deterrent, *Marine Technology Society Journal*, 42(2), 53-61.
- [104] Meißner, K., Schabelon, H., Bellebaum, J. and Sordyl, H., 2006, Impacts of submarine cables on the marine environment – a literature review, *Institut für Angewandte Ökosystemforschung, Neu Broderstorf 88, Germany*.
- [105] Meteorological Administration, 2009, A study on the characteristics of changes in global magnetic fields in South Korea. 36. (기상청, 2009, 한국의 지구자기장 변화특성에 관한 연구. 36.)
- [106] Meyer, C.G., Holland, K.N. and Papastamatiou, Y.P., 2005, Sharks can detect changes in the geomagnetic field, *J. R. Soc. Interface*, 2(2), 129-130.
- [107] Molteno, T.C.A. and Kennedy, W.L., 2009, Navigation by Induction-Based Magnetoreception in Elasmobranch Fishes, *J. Biophys.*, 1-6.
- [108] Mouritsen, 2018, Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals, *Nature*, 558, 50-59.
- [109] Muheim, R., Moore, F.R. and Phillips, J.B., 2006a, Calibration of magnetic and celestial compass cues in migratory birds—a review of cue conflict experiments, *J Exp Biol.*, 209, 2-17.
- [110] Muheim, R., Phillips, J.B. and Akesson, S., 2006b, Polarized

- light cues underlie compass cue integration in migratory songbirds, *Science*, 313, 837-839.
- [111] Naisbett-Jones, L.C., Putman, N.F., Stephenson, J.F., Ladak, S. and Young, K.A., 2017, A magnetic map leads juvenile European eels to the Gulf Stream, *Curr. Biol.*, 27, 1236-1240.
- [112] Negra, N.B., Todorovic, J. and Ackermann, T., 2006, Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms, *Electr. Power Syst. Res.*, 76(11), 916-927.
- [113] NIRAS, 2015, Subsea Cable Interactions with the Marine Environment, Expert review and Recommendations, 1-58.
- [114] Nishi, T. and Kawamura, G., 2005, *Anguilla japonica* is already magnetosensitive at the glass eel phase, *J. Fish Biol.*, 67, 1213-1224.
- [115] Nishi, T., Kawamura, G. and Matsumoto, K., 2004, Magnetic sense in the Japanese eel, *Anguilla japonica* as determined by conditioning and electrocardiography. *J. Exp. Biol.*, 207, 2965-2970.
- [116] Noatch, M.R. and Suski, C.D., 2012, Non-physical barriers to deter fish movements. *Environmental Reviews*, 20(1), 71-82.
- [117] Nordgreen, A.H., Slinde, E., Møller, D. and Roth, B., 2008, Effect of various electric field strengths and current durations on stunning and spinal injuries of Atlantic herring, *J. Aquat. Anim. Health*, 20(2), 110-115.
- [118] Nordmann, G.C., Hochstoeger, T. and Keays, D.A., 2017, Magnetoreception—A sense without a receptor, *PLOS Biology*, 15(10), e2003234. doi:10.1371/journal.pbio.2003234
- [119] Normandeu Associates Inc., Exponent Inc., Tricas, T. and Gill, A.B., 2011, Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species, 1-426.
- [120] O'Connor, J. and Muheim, R. 2017, Pre-settlement coral-reef fish larvae respond to magnetic field changes during the day, *The Journal of Experimental Biology*, 220(16), 2874-2877.
- [121] Ohman, M.C., Peter, S. and Hakan, W., 2007, Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish, *A J. Hum. Environ.*, 36, 630-633.
- [122] Osipova, E.A., Pavlova, V.V., Nepomnyashchikh, V.A. and Krylov, V.V., 2016, Influence of magnetic field on zebrafish activity and orientation in a plus maze, *Behavioural Processes*, 122, 80-86.
- [123] Otremba, Z. and Andrulewicz, E., 2014, Physical fields raised during construction and exploitation of wind farms – example of the Polish Marine Areas, *Pol. Mar. Res.*, 21(4), 113-122.
- [124] Otremba, Z., Jakubowska, M., Urban-Malinga, B. and Andrulewicz, E., 2019, Potential effects of electrical energy transmission – the case study from the Polish Marine Areas (southern Baltic Sea), *Oceanol. Hydrobiol. Stud.*, 48(2), 196-208.
- [125] Packer, D.B., Zetlin, C.A. and Vitaliano, J.J., 2003, Essential fish habitat source document: Little skate, *Leucoraja erinacea*, life history and habitat characteristics, National Oceanic and Atmospheric Administration, 76.
- [126] Panagopoulos, J., Karabarbounis, A. and Margaritis, L.H., 2002, Mechanism for action of electromagnetic fields on cells, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 298, 95-102.
- [127] Peters, R.C., Eeuwes, L. and Bretschneider, F., 2007, On the electroreception threshold of aquatic vertebrates with ampullary or mucous gland electroreceptor organs, *Biol. Rev.*, 82(3), 361-373.
- [128] Porsmoguer, S.B., Banaru, D., Boudouresque, C.F., Dekeyser, I. and Almarcha, C., 2015, Hooks equipped with magnets can increase catches of blue shark (*Prionace glauca*) by longline fishery, *Fisheries Research*, 172, 345-351.
- [129] Putman, N.F., Meinke, A.M., Noakes, L.G., 2014a, Rearing in a distorted magnetic field disrupts the 'map sense' of juvenile steelhead trout, *Biological Letters*, 10(6), 20140169.
- [130] Putman, N.F., Jenkins, E.S., Michielsens, C.G.J. and Noakes, D.L.G., 2014b, Geomagnetic imprinting predicts spatio-temporal variation in homing migration of pink and sockeye salmon, *J. R. Soc. Interface*, 11(99). doi:10.1098/rsif.2014.0542
- [131] Putman, N.F., Lohmann, K.J., Putman, E.M., Quinn, T.P., Klimley, A.P. and Noakes, D.L.G., 2013, Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism in Pacific Salmon, *Curr. Biol.*, 23(4), 312-316.
- [132] Putman, N.F., Goni, G.J., Gramer, L.J., Hu, C., Johns, E.M., Trinanes, J. and Wang, M., 2018, Simulating transport pathways of pelagic *Sargassum* from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Prog Oceanogr*, 165, 205-214.
- [133] Quinn, T.P. and Brannon, E.L., 1982, The use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts, *J. comp. Physiol.*, 147, 547-552.
- [134] Quinn, T.P. and Groot, C., 1983, Orientation of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) after internal and external magnetic field alteration, *Canadian J. Fish. Aquat. Sci.*, 40, 1598-1606.
- [135] Quinn, T.P., 1980, Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry, *J. Comp. Physiol.*, 137, 243-248.
- [136] Raschi, W., 1986, A morphological analysis of the ampullae of Lorenzini in selected skates (Pisces, Rajoidei), *J. Morphol.*, 189, 225-247.
- [137] Ritz, T., Adem, S., Schulten, K., 2000, A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds, *Biophys. J.*, 78, 707-718.
- [138] Rodrigues, S., Restrepo, C., Katsouris, G., Teixeira P.R., Soleimanzadeh, M., Bosman, P. and Bauer, P., 2016, A Multi-Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Infrastructures. *Energies*, 9(3), 216.
- [139] Rommel, S.A. and McCleave, J.D., 1973, Sensitivity of American eels (*Anguilla rostrata*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) to weak electric and magnetic fields, *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, 30, 657-663.
- [140] Rommel, S.A. Jr, and McCleave, J.D., 1972, Oceanic electric



- fields: perception by american eels?, *Science*, 176(4040), 1233-1235.
- [141] Roth, B., Imsland, A., Moeller, D. and Slinde, E., 2003, Effect of electric field strength and current duration on stunning and injuries in market-sized Atlantic salmon held in seawater, *N. Am. J. Aquacult.*, 65(1), 8-13.
- [142] Scanlan, M.M., Putman, N.F., Pollock, A.M. and Noakes, D.L., 2018, Magnetic map in nonanadromous Atlantic salmon, *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.*, 115(43), 10995-10999.
- [143] Scopel, D.A., Golet, W.J. and Watson, W.H. III, 2009, Home range dynamics of the American lobster, *Homarus americanus*. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 42, 63-80.
- [144] Scott, K., Harsanyi, P. and Lyndon, A.R., 2018, Understanding the effects of electromagnetic field emissions from Marine Renewable Energy Devices (MREDs) on the commercially important edible crab, *Cancer pagurus* (L.), *Marine Pollution Bulletin*, 131, 580-588.
- [145] Sisneros, J.A. and Tricas, T.C., 2000, Androgen-induced changes in the response dynamics of ampullary electrosensory primary afferent neurons, *J. Neurosci.*, 20, 8586-8595.
- [146] Sisneros, J.A., Tricas, T. and Luer, C., 1998, Response properties and biological function of the skate electrosensory system during ontogeny, *J. Comp. Physiol. A.*, 183, 87-99. ps://doi.org/10.1007/s003590050237
- [147] Skauli, K.S., Reitan, J.B. and Walther, B.T., 2000, Hatching in zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to a 50 Hz magnetic field, *Bioelectromagnetics*, 21(5), 407-410.
- [148] Skiles, D.D., 1985, Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms, Springer, 43-102.
- [149] Slater, M., Jones, R. and Schultz, A., 2010, The prediction of electromagnetic fields generated by submarine power cables, Oregon Wave Energy Trust (OWET), 47.
- [150] Smith, E.D., 1974, Electro-physiology of the electrical shark-repellant. Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers, 65(8), 166-181.
- [151] Snyder, D.E., 2003, Invited overview: conclusions from a review of electrofishing and its harmful effects on fish, *Rev. Fish Biol. Fish*, 13(4), 445-453.
- [152] Soetaert, M., 2015, Electrofishing: exploring the safety range of electric pulses for marine species and its potential for further innovation, Doctoral thesis. Faculty of Veterinary Medicine, Department of Pathology, Bacteriology and Avian Diseases, Ghent.
- [153] Stewart, A., Cachat, J., Wong, K., Gaikwad, S., Gilder, T., DiLeo, J., Chang, K., Utterback, E. and Kalueff, A.V., 2010, Home-base behavior of zebrafish in novelty-based paradigms, *Behav. Processes*, 85, 198-203.
- [154] Stratton, J.A., 2007, *Electromagnetic Field Theory*, Wiley.
- [155] Suzuki, Y., Toyama, Y., Miyakoshi, Y., Ikehata, M., Yoshioka, H. and Shimizu, H., 2006, Effect of static magnetic field on the induction of micronuclei by some mutagens, *Environ. Health Prev. Med.*, 11(5), 228-232.
- [156] Szyrowski, T., Sharma, S.K., Sutton, R. and Kennedy, G.A., 2013, Developments in subsea power and telecommunication cables detection: part 2 – electromagnetic detection, *International Underw. Technol.*, 31, 133-143.
- [157] Taormina, B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart, M. and Desroy, N. and Carlier, A., 2018, A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 380-391.
- [158] Tomanova and Vacha, 2016, The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields, *J. Exp. Biol.*, 219, 1717-1724.
- [159] Tricas, T. and Gill, A.B., 2011, Effects of EMFs From Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species, U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement, Pacific OCS Region, Camarillo, CA., OCS Study BOEMRE 2011-09.
- [160] Tricas, T.C. and Sinseros, J.A., 2004, Ecological functions and adaptations of the elasmobranch electrosense, in: G. Emde, Mogdans, J., Kapoor, B. G., *The Senses of Fish*, Springer, Dordrecht, 308-329.
- [161] Walker, M.M., 1984, Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, *J. Comp. Physiol.: Neuroethology, Sensory, Neural, Behav. Physiol.*, 155(5), 673-679.
- [162] Walker, M.M., Diebel, C.E., Haugh, C.V., Pankhurst, P.M., Montgomery, J.C. and Green, C.R., 1997, Structure and function of the vertebrate magnetic sense, *Nature*, 390, 371-376.
- [163] Walker, M.M., Diebel, C.E. and Kirschvink, J.L., 2003, *Sensory Processing in Aquatic Environments*, Springer, 53-74.
- [164] Walker, M.M., Kirschvink, J.L., Ahmed, G. and Dizon, A.E., 1992, Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration, *J. Exp. Biol.*, 171(1), 67-78.
- [165] Westerberg, H. and Lagenfelt, I., 2008, Sub-sea power cables and the migration behaviour of the European eel, *Fisheries Management and Ecology*, 15, 369-375.
- [166] Westerberg, H. and Begout-Anras, M., 2000, Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field, *Adv. Fish Telemetry*, 149-158.
- [167] Wilkens, L.A. and Hofmann, M.H., 2007, The Paddlefish Rostrum as an Electrosensory Organ: A Novel Adaptation for Plankton Feeding, *BioScience*, 57(5), 399-407.
- [168] Wilkens, L.A., Hofmann, M.H. and Wojtenek, W., 2002, The electric sense of the paddlefish: a passive system for the detection and capture of zooplankton prey, *J. Physiol. Paris*, 96(5-6), 363-377.
- [169] Wiltschko, W. and Wiltschko, R., 2005, Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals, *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol.*, 191(8), 675-693.

- [170] WindEurope, 2019, Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2018.
- [171] Yi, Y.-M., Oh, H.-T. and Kim, S.E., 2017, Improvement of marine environmental impact assessment for submarine cable project, JFMSE, 29(4), 1139-1146.
- [172] Zhadin, M. N. 2001, Review of Russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields.

Bioelectromagnetics, 22(1), 27-45. doi:10.1002/1521-186x(200101)22:1<27::aid-bem4>3.0.co;2-2

---

Received 8 October 2021

Revised 22 November 2021

Accepted 24 November 2021