조류발전이 해양동물에 미치는 영향 검토 (리뷰)

박정연 · 박영철*

*㈜뉴워터텍

A Review on the Impacts of Tidal Current Power Generation on the Marine animals

Jeong Yeon Park · Young Cheol Park †

*New Water Tec Co. Ltd.., Incheon, Korea

(Received: 4 May 2024, Revised: 24 May 2024, Accepted: 24 May 2024)

요 약

조류발전은 조석 현상에 의해 발생하는 조류를 이용하여 에너지를 생산하는 발전 방식이다. 조석 현상은 지구가 존재하는 한 발생하는 자연적인 현상으로 조류발전을 통하여 지속가능하고, 규칙적인 에너지 생산이 가능하다. 이에 많은 국가에서 조류에너지 개발에 노력을 기울이고 있는 실정이나, 조류발전이 해양 동물에 미치는 영향에 대한 우려도 여전히 존재하고 있다. 이에 본 논문에서는 조류발전이 해양동물에 미치는 다양한 영향을 종합적으로 검토하고, 향후추진해야 하는 과제들에 대하여 고찰하였다.

핵심용어 : 조류발전, 재생에너지, 해양동물, 충돌위험, 생태계영향

Abstract

Tidal current power generation is a power generation method that produces energy using tidal currents generated by tidal phenomena. Tidal current power generation is a sustainable and regular energy production because tidal phenomenon occurs as long as the earth exists. Many countries are focusing on the development of tidal energy, but there are still concerns about the impact of tidal energy on the marine animals. In the present study, we reviewed on the various impacts of tidal power generation on marine animals and the future assignments.

Key words: Tidal current power generation, Renewable energy, Marine animals, Collision risk, Ecosystem impact

^{*}All authors equally contributed

[†]To whom correspondence should be addressed. New Water Tec Co. Ltd., #302, Parang-ro 495, Seo-gu Incheon, Korea E-mail: ypark115@naver.com

[•]Jeong Yeon Park New Water Tec Co. Ltd.., Incheon, Korea (olivavien@naver.com)

[•]Young Cheol Park New Water Tec Co. Ltd.., Incheon, Korea / Ph.D. (ypark115@naver.com)

1. 서 론

전 세계는 지구온난화, 화석연료 고갈 및 환경문제로 인한 규제 강화로 재생에너지 개발에 매진하고 있고, 그 중요성은 나날이 중요해지고 있다. 다양한 재생에너지 자원 중조류에너지는 조석현상에 의해 발생하는 조류로부터 얻을수 있는 해양에너지로 규칙적으로 에너지를 생산할 수 있다는 장점이 있다 (Park et al., 2019). 우리나라의 서남해안은 장죽수도, 맹골수도 및 거차수도에 약 8.3GW 규모의개발 가능한 조류에너지가 부존돼 있다고 평가되고 있다(Park et al., 2019). 이에 조류에너지를 활용하기 위해 적극적이고, 체계적인 연구개발과 함께 조류발전이 해양환경에 미치는 영향에 대해서도 다양한 조사가 필요하다.

조류발전은 크게 수평축 터빈(Horizontal Axis Turbine) 과 수직축 터빈(Vertical Axis Turbine)으로 구분할 수 있다. 수직축 터빈의 로터는 회전 시 입사 유속 대비 블레이드 방 위각에 따라 양력비의 편차가 크기 때문에 토크의 편차가 커 수평축 터빈보다 평균 출력과 효율이 낮은 특성을 나타낸다 (허 외, 2021). 수직축 터빈과 수평축 터빈은 다음과 같은 장 단점이 있다: (1) 수평축 터빈은 조류의 입사각도와 터빈의 정면이 같은 방향일 경우 높은 출력을 기대할 수 있으나 강 한 조류로에 의한 저항이 발생하므로 설계에서 세심한 주의 가 필요하지만, 수직축 터빈은 조류 방향과 무관하게 터빈의 회전과 발전이 가능하기 때문에 터빈 설치가 비교적 용이하 다; (2) 수직축 터빈은 블레이드 설계/제작 시 단일 단면의 압출 형태를 채택하므로 블레이드 제작이 수월하다; (3) 수 직축 터빈은 병렬/직렬 배치에 장점이 있어 복수의 터빈 구 성에 유리하다; (4) 수직축 터빈의 경우 발전기가 수면 위에 배치가 가능하여 발전기 유지보수에 유리하나, 수평축 터빈 의 경우 발전기가 수중에 설치되기 때문에 수밀에 유의해야 하고, 발전기 유지보수에 특수한 선박이 요구되는 등 유지보 수에 어려움이 있다(허 외. 2021, 산업통상자원부. 2022).

조류발전 단지를 통한 대규모 에너지 추출은 조류발전 터 빈 설치에 따른 저항력으로 터빈 주위의 유동장을 변화시 킨다. 일반적으로 조류발전 터빈 설치는 상류의 수위를 상 승시키고, 하류의 유속 감소를 유발한다(De Dominicis et al., 2018). 유속은 설치된 터빈 주변에서 증가하고, 내부에서는 감소한다(Coles et al., 2020). 퇴적물의 이동은 터빈설치로 인해 유속에 작은 변화가 발생해도 퇴적물 역학에상당한 영향을 미칠 수 있다(Neill et al., 2018). 따라서 조류발전 터빈의 설치에 대한 공간 계획은 수리 및 퇴적환경변화가 최소화되도록 수립해야 한다(Coles et al., 2021).

새들이 풍력 터빈과 충돌하는 것과 마찬가지로 조류발전 회전 블레이드와의 충돌로 인해 해양 포유류, 물고기 및 잠 수 바닷새가 다치거나 죽을 수 있다는 걱정과 우려가 있다 (Waggitt et al., 2014).

이에 Hammar et al (2013)은 조류발전 터빈을 설치 후, 수중카메라를 이용하여 충돌 여부를 조사하였고, Gillespie et al (2021)은 실제 조류발전기가 설치된 해역에 수중청음 기를 이용하여 해양 포유류, 특히 돌고래와 조류터빈과의 충돌 관련 연구를 했으며, Williamson et al (2019)은 실제 조류발전기가 설치된 해역에 초음파 장비를 이용하여 물고 기와 조류터빈과의 충돌 관련 연구를 하였다.

국내에서는 유 등(2005)이 울돌목 해역에서 수직축 조류 발전 터빈 가동에 따른 동물 플랑크톤의 피해 영향 조사를 통해 터빈 통과 전후의 동물플랑크톤 사망률은 7.3% 정도로 발전소의 온배수 시스템 통과 플랑크톤의 사망률보다 낮게 나타나, 조류발전 터빈이 동물 플랑크톤에 미치는 영향이 크지 않다고 하였다. 한편, 해외에서는 Schlezinger, et al (2013)이 미국의 Muskeget Channel에서 실증 시험중인 수평축 흐름식 터빈의 통과 전후의 동물플랑크톤의 사망률조사 결과를 통하여 해당 해역에서의 조류발전 추진은 허용할 만하다는 결론을 내린 바 있다. 상기 논문에서는 현미경 사진과 비디오 이미지를 통해 밀도, 크기분포 및 살아있는 유기체 수를 확인하였으나, 통계분석에서 동물플랑크톤 의총수 및 크기 분포에서 차이가 없어 사망률의 유의미한차이가 없음을 보고하였다.

이외에도 조류발전 단지 설치에 따른 해양생물의 서식지 훼손 등으로 해양생물이 서식지를 옮겨가야 하는 영향 등이 있을 수 있으나, 조류발전 장치와 작은 단지 배열로 인

Table 1. Turbine types of tidal current power generation (HAT: Horizontal Axis Turbine; VAT: Vertical Axis Turbine) (https://www.emec.org.uk/)

Туре	НАТ	VAT	
Characteristics	Suitable for large-scale power generation farms High efficiency Installation and Maintenance is difficult and expensive	Suitable for small-scale power plant Cost-effective and easy maintenance Operates regardless current direction	
Concept design	X		

한 서식지 이동은 상대적으로 작은 규모라고 주장한 바 있다(Coles et al., 2021).

본 연구에서는 조류발전 개발 시 가장 우려되는 조류발전 터 빈과 해양 동물(해양 포유류, 물고기 및 잠수 바닷새)과의 충돌 영향에 대해 기존의 조사 사례를 분석하여, 조류발전 터빈과 해양 동물과의 충돌 영향을 대해 종합적으로 고찰 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 조류발전 터빈에 미치는 해양생물의 영향을 고찰하기 위하여 총 24편의 국내외 기존 사례를 조사하였다. 이 사례들로부터 정리한 해양동물에 미치는 영향은 Table 2에 간추려 정리하였다. 이러한 사례들은 조류발전이 해양생물에 미치는 영향을 직접 관찰하거나 측정 장치등을 사용하여 그 영향을 간접적으로 측정한 연구들로써 1) 수중 카메라를 이용한 직접 관찰 연구, 2) 청음기 및 초음파를 이용한 간접적 충돌 연구로 구분할 수 있다. 본 연구의 고찰 들은 향후 개발될 조류발전소의 설치 및 공간계획을 수립하는데 매우 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

3. 결과

3.1. 수중카메라를 이용한 조류발전 터빈과 해양 동물 충돌 조사

Hammar *et al* (2013)은 2012년 3월부터 4월까지 모잠비 크 본토와 인하카 섬과 사이의 좁은 조수 해협인 폰타 토레스

Impact treatment

에서 수중카메라를 이용하여 물고기의 유영 능력에 조류발전 터빈의 영향을 조사하였다. 즉, 조류발전 터빈과 관련된 물고 기 반응, 특히 유영 행동에 대한 이해를 향상 시키는 것을 목 표로 하였다. 해협은 반일주조가 우세하고, 최대 1.5ms/s의 조류가 흐르는 곳이다. 이 지역에서는 낚시가 금지되어 있으 며 맹그로브, 해초 초원, 산호초 및 넓은 바다가 주변 서식지 로 풍부하고 다양한 물고기가 서식하는 해역이다.

사용된 조류발전 로터는 1.5×0.7m 크기의 원통형 모양과 0.1m 너비의 NACA0020 익형을 갖는 3개의 나선형 블레이드이고, 기초 구조물의 베어링에 고정되어 있기 때문에 로터는 부하나 모터를 사용하지 않아 조류에 따라 자유롭게 회전할 수 있다. 로터의 회전 속도는 비디오 모니터링중에 15~70rpm 사이로 나타났다(Figure, 1).

터빈은 해안에서 15m 떨어진 9m 깊이의 암초 바닥에 설치되었고, 터빈의 위치는 암석층 사이의 약 2m 너비의 개구부 중앙에 설치하였다. 암석 사이의 전체 횡단면적은 '갭 (gap)'으로 정의되었고(Fig. 1). 터빈의 단면적(갭 내부)은 '로터 필드'로 정의되었다. 따라서 물고기는 (1) 로터 필드내의 틈새를 통과하거나, (2) 로터 필드 양쪽의 틈새를 통과하거나, (3) 틈새를 통과하기 않는 세 가지 옵션 중 하나를 선택할 수 있다. 원격 스테레오 비디오 시스템을 사용하여 로터가 설치된 경우와 설치되지 않은 상태에서 물고기의 움직임을 샘플링했다.

Hammar et al (2013)의 연구는 수직축 터빈이 낮동안 통상의 조류속도에서는 물고기에 위험하지 않았음을 보여 주었다, 또한, 충돌 억제수준과 터빈 회피의 공간적 범위는 물고기의 분류군마다 달랐지만, 충돌위험이 큰 물고기는 없 었음을 보여주었다.

passing distance

width of gap

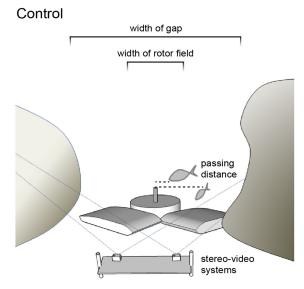


Fig. 1. Experimental set—up for impact and control sampling. Fish movements were recorded by remote stereo—video systems and categorized as 'rotor passages' if swimming through the rotor field (0.7 m wide) and as 'gap passages' if swimming through the gap (2 m wide). The gap included the whole cross—area between the two rock formations, that is, both the rotor field and the space between rotor and rocks. Measurements of fish length and the closest distance (dotted horizontal lines) between passing fish and the rotor centre were computed for fish passing within the camera stereo—field (illustrated as overlapping camera fields of view)(Hammar et al., 2013).

stereo-video

Figure. 2 는 청돔이 0.7m/s의 유속에서 터빈의 22cm 거리에서 회피하는 것을 오른쪽과 왼쪽 카메라 영상의 사례가 보여주고 있다. 이는 통상의 조류에서 물고기가 낮 동안에는 터빈과의 충돌을 피할 수 있다는 것으로 보여주고 있는 것이다. 또한, 큰 육식성 물고기의 경우에는 작은 물고기보다 훨씬 더 먼 거리에서 터빈을 피하는 것으로 나타났으며, 이는 큰 물고기가 일반적으로 가속도와 기동성이 낮기 때문에 많은 어종에서 신중한 행동양상을 보이는 것일수 있다(Hammar et al., 2013).

영국 셰틀랜드의 Bluemull Sound에 있는 조류발전 장치에서는 5년 동안 20,000시간의 비디오 데이터가 수집되었으며 이 영상의 20%를 검사한 결과, 터빈 주변에서 물고기를 적극적으로 쫓는 가마우지가 관찰되었으나 새와 터빈사이의 물리적 접촉은 관찰되지 않았고, 이 데이터에는 터빈 근처에서 목격된 해양 포유류/조류가 30건 미만이었고

충돌의 증거는 없었다(Cooper et al., 2020).

Hemery et al (2022)는 해양에너지 발전 장치 앵커 주변의 물고기 활동을 모니터링 하기 위한 새로운 접근 방식으로 표적(파력에너지 변환기의 앵커)을 카메라의 시야에 유지하기 위한 360도 카메라를 이용하여 해양에너지 장치와동물의 상호 작용을 모니터링하는데 유용한 도구임을 주장하였다(Figure. 3).

3.2 수중청음기를 이용한 조류발전 터빈과 해양 동물 충돌 조사

Gillespie et al (2021)는 조류발전 터빈이 돌고래(Phocoena phocoena)의 행동에 미치는 영향에 대해 18개월 동안 모니터링 하였다. 조사를 위해, 2016년 10월부터 2017년 2월까지 스코틀랜드 북부 해안의 Pentland Firth(58° 39′ N 3° 0 8′ W)에 4개의 수평축 1.5MW 터빈(Meygen, SIMEC





Fig. 2. Example of Rhabdosargus sarba (F.) and (L.) evasion manoeuvre(Hammar et al., 2013).

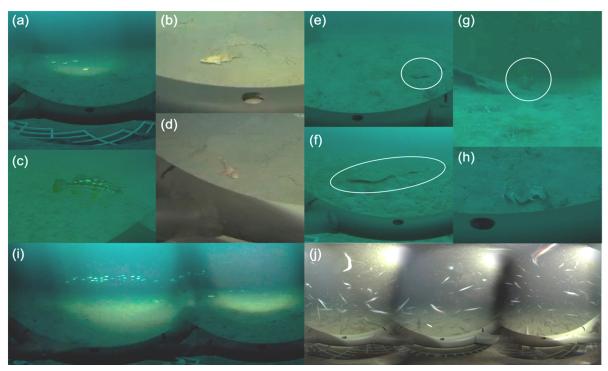


Fig. 3. Screenshots of fish and mega-invertebrates observed on the video footage from La Jolla, CA: (a,b) sand bass; (c) kelp bass; (d) California scorpionfish; (e,f) flatfish, circled in white; (g) Unidentified invertebrate, circled in white; (h) octopus; and (i,j) bait fish schools(Hemery et al., 2022).

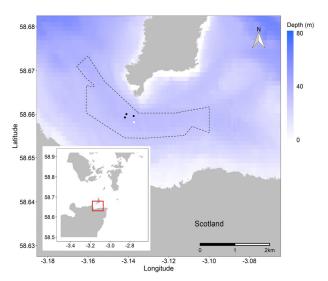


Fig. 4. Map of the Meygen lease area (dashed polygon) and the locations of the four installed turbines. The monitored turbine is the white point. (Inset) Map of north–east Scotland where the red rectangle shows the area depicted in the main figure (Gillespie et al., 2021).

Atlantis Energy Ltd)이 설치되었다(Figure. 4). 조류발전 터빈은 정격 회전 속도가 14rpm이고, 9m 길이 블레이드 3 개로 구성되었다. 터빈은 25 × 19m 길이의 3개 다리가 있는 강철 터빈 지지 구조물에 장착되어 있다. 터빈 허브는 해저 위약 14m, 썰물 때 해수면 아래 23m에 있다. 조류발전 터빈은 2017년 2월에 설치되어 가동을 시작했고, 돌고래 충돌 관련 데이터는 터빈 설치 후 12개월, 터빈 작동 시작 후 8개월이 지난 2017년 10월부터 2019년 10월 사이에수집되었다. 연구기간 동안 터빈은 지속적으로 작동하지 않았으며 터빈이 회전하고 정지한 상태에서도 유속은 관측되었다.

4개의 터빈 중 가장 남동쪽에 있는 터빈구조물 다리의 상부 표면에 12개의 수중청음기가 설치되었고 각 수중청음기시스템 내의 각 수중청음기에서의 청음 도착시간 차이로해당 시스템에서 감지된 신호까지의 정보(수평 및 고도 각도 모두)를 계산할 수 있도록 했다(Gillespie et al., 2020). 344개의 돌고래 통과 상황이 관측되었고, 데이터에 따르면 돌고래는 터빈 블레이드를 효과적으로 피하며, 터빈이

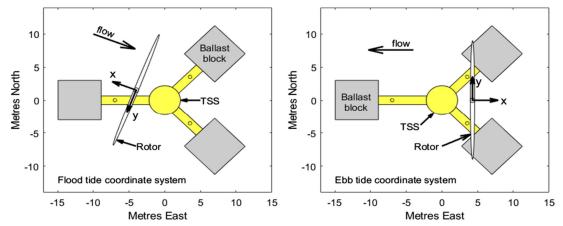


Fig. 5. Plan view of the coordinate system for Flood and Ebb tides. The turbine support structure (TSS) and ballast blocks are stationary on the sea bed. The rotor is turned to always face the tidal flow. The coordinate systems origin is at the centre of the rotor with the x coordinate pointing directly upstream, the y coordinate across the face of the rotor and the z coordinate vertically upward. Open circles on the legs of the TSS show the positions of the hydrophone system(Gillespie et al., 2021).

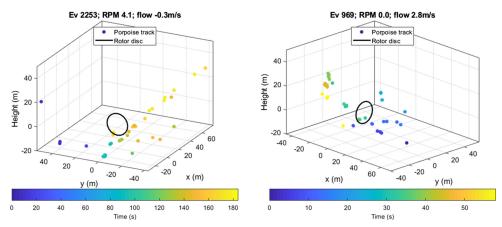


Fig. 6. Examples of tracks close to the turbine. (Left) A porpoise passing beneath the turbine rotor while it was rotating. (Right) The one porpoise track that appears to pass through the rotor swept area(Gillespie et al., 2021).

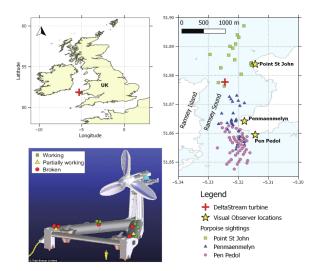


Fig. 7. Delta Stream turbine and map of its deployment location in Ramsey Sound, Wales, UK, with locations of visual observations of porpoises. Hydrophone locations and their operational status are also shown on the turbine. Hydrophones were either operational, partially operational (operational in dolphin frequencies but not in higher porpoise click frequencies) or broken on the turbinemounted passive acoustic monitoring system (Malinka et al., 2018).

정지해 있는 동안 단 한 마리의 동물만이 터빈 회전 영역을 명확하게 통과하고(Figure. 6의 오른쪽), 회전하는 동안은 통과하지 않았다. 이에 모니터링 결과는 조류발전 터빈과 돌고래 사이의 충돌 위험이 매우 낮다는 것을 보여준다.

Palmer *et al* (2021)은 Gillespie et al (2021)가 조사한 자료와 유사한 자료에 의하면 돌고래는 조류 터빈이 작동 중일 때 상당한 회피를 보였고, 회피도는 유속에 따라 증가하여, 평균 돌고래의 출현은 밀물 때 최대 78%, 썰물 때 최대 64%까지 감소했다고 보고했다.

Malinka et al.,(2018)은 영국 램지 사운드에 Tidal Energy

Ltd.(TEL, Cardiff, UK)가 설치한 DeltaStream 조류발전 터빈 인근에서 3개월 동안의 연속 수동 음향 모니터링(PAM, Passive Acoustic Monitoring) 데이터를 조사하여, 운영 중인 터빈에서 PAM 시스템의 성능을 평가하고, 터빈 근처에서 작은 고래류의 3D 움직임과 행동을 조사하였다. 조사결과, 터빈에 대한 근접 접근을 포함하여 돌고래에 대해 총 247회가 모니터링되어 음향 모니터링 시스템의 적용 가능성을 확인하였으나, 충돌과 관련한 유의미한 결과는 확인되지 않았다(Figure 6).

조류발전 터빈으로부터 물고기의 안전에 대한 우려를 바탕으로 캐나다의 펀디 만의 미나스 수로에는 조류발전 터빈의 유용성을 입증하기 위한 지역이 지정되었고 음향 태그가 부착된 물고기 태그 신호를 감지하는 음향 수신기를 사용하여 물고기와 조류발전 터빈과의 충돌 가능성에 대한연구가 시도된 바 있으나 유의한 충돌 위험은 확인되지 않았다(Sanderson, et al., 2023).

Hastie, et al (2016)는 스코틀랜드 서해안의 조류에너지 부존 지역에서 수중청음기를 이용하여 바다표범의 조류발전 터빈에 대한 잠재적인 영향을 조사한 바 있으며 바다 표범과 같은 상위포식자들은 상대적으로 빠른 유속이나 조류에서 먹이가 되는 어류들보다 자유롭게 움직일 수 있어 조류가 빠른 좁은 수로와 같은 지역을 선호하지만 이러한 유영능력은 발전시설을 회피하는데도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 추정하였다.

3.3 초음파 장비를 이용한 조류발전 터빈과 해양 동물 충돌 조사

Bender, et al (2023)은 다중 빔 수중 음파 탐지기로 스웨 덴에 있는 기존 수력 발전소의 하류 약 800m에 배치된 소 규모 수직축 흐름식 터빈 주변에서 연어류의 유영 행동을 조사하였다(Figure 8). 수직축 흐름식 터빈은 삼각대에 장착된 직접 구동 영구자석 발전기에 연결된 다리우스(Darrieus)

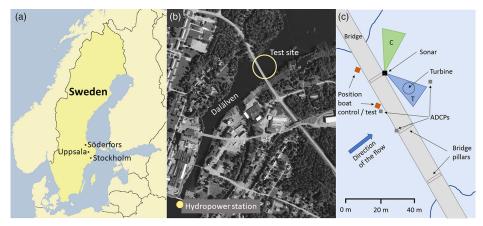


Fig. 8. Location of Söderfors, approximately 140 km north of Stockholm. (b) Bird's eye view of central Söderfors with the location of the hydro power station, the test side with the instream turbine and the measuring cabin, after Lundin et al., (2013). (c) Experimental setup in the river Dalälven. Location of turbine, sonar and ADCP's are indicated. The blue triangle indicates the field of view of the MBS pole arrangement T (test), the sampling conditions turbine on or off and the green triangle indicates the field of view of the control site MBS pole arrangement c (control)(Bender, et al., 2023).

유형 터빈으로 6~7m 깊이의 돌과 바위로 구성된 강바닥에 배치되었고, 터빈의 설치 용량은 7.5kW이었다. 터빈의 핵심 구조는 강철로 만들어졌으며 블레이드는 높이 3.5m, 직경 6m의 탄소 섬유로 만들어졌고, 최대 회전 속도는 20rpm이 었다(Figure 9).

총 264마리의 갈색 송어와 270마리의 대서양 연어를 수 직축 흐름식 터빈의 상류에 방류하여 터빈에 대한 유영 행동과 회피 반응을 조사했고, 연구가 수행되는 동안에 충돌이 감지되지 않았다. 특히, 연어는 분명히 작동 중인 터빈을 피했지만, 터빈이 정지해 있을 때는 피하지 않았으며, 터빈 구역을 똑바로 헤엄치는 것이 종종 관찰되었다. 이는 강에서 이러한 유형의 터빈을 작동시키는 것이 대서양 연어의 유영 행동에 다소 영향을 미치지만 이동 경로에는 영향을 미치지 않음을 나타낸다. 갈색 송어의 경우에도 터빈을 피하는 반응을 나타냈고, 이 종은 매우 탁한 수질 조건에도 불구하고 회전하는 터빈에 물고기가 들어가지 않았기때문에 물고기가 상해를 입을 위험은 거의 없었다.

Fraser, et al (2018)은 2013년 여름 조류발전 설비가 설치된 유럽 해양 에너지 센터(EMEC)에서 현장 조사 동안해저에 장착된 음향측정기를 이용하여 음향자료를 수집하여 물고기 떼의 행동을 밝히기 위한 연구를 수행하였고 이연구에 사용한 음향측정 장비는 38kHz, 120kHz 및 200kHz에서 작동하는 다중 주파수 과학용 음향측정기

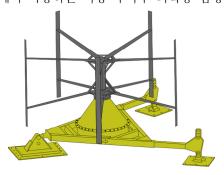


Fig. 9. Image of the vertical axis instream turbine energy conversion unit mounted on a tripod (Bender, et al., 2023).

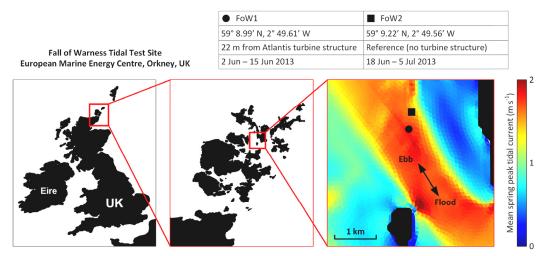


Fig. 11. Two deployments of the FLOWBEC platform are used to compare the predictability of fish school behavioural characteristics around a turbine structure (FoW1) and in the absence of a turbine structure (FoW2) (Williamson et al., 2019).

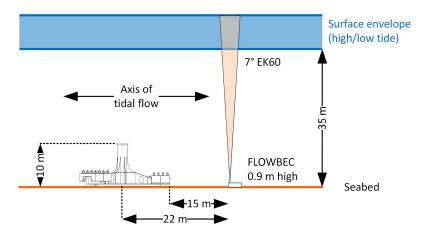


Fig. 12. The FoW1 deployment was downstream of the Atlantis turbine structure during flood flow, approximately 22 m from the centre of the 10-m high piling, and approximately 15 m from 4-m high ballast blocks; no nacelle or blades were present(Williamson et al., 2019).

(Simrad EK60)였다. 조사 결과, 총 523 개의 물고기 떼가 해양에너지 생산 시설에서 관찰되었으며, 396 개의 물고기 떼가 자연환경이 유사한 대조구 위치에서 관찰되었다(Figure. 10). 이러한 어류의 분포 결과는 어류의 밀도가 높은 조류 발전시설 주변으로 해양 포유류 및 바닷새와 같은 상위 포식자들의 포식활동을 유도할 가능성이 높으며, 이들 상위포식자들중 보호종의 충돌 위험에 대한 가능성을 높일 수 있다고 추정하였다. 그러나 실제 충돌이 확인된 사례는 보고되지 않았다.

Williamson et al (2019)은 유럽 해양 에너지센터(EMEC)의 조류발전 시험장소에서 해양에너지 장치의 설치 및 운영이 환경 및 생태학적으로 미치는 영향을 조사하기 위해 Simrad EK60 다중 주파수(38, 120, 200kHz) 과학용 에코 사운더 및 SonTek/YSI ADVOcean 5MHz 음향 도플러 속도계(ADV) 등이 설치된 해저플랫폼식 모니터링 기기 (FLOWBEC)로 어류 분포 및 충돌에 대한 조사를 실시 하였다 (Figure. 11, 12).

Williamson et al (2019)은 조사를 통해 시간당 물고기 때 및 분포 면적의 비율은 터빈 지지구조가 없는 유사한 조건에서 관측한 경우와 비교하여 터빈 지지구조 주변에서 각각 1.74배와 1.75배 증가했음을 보여주었다(Figure. 13). 터빈 주변의 물고기 개체 수 증가 또는 물고기 행동의 예측 가능성 증가는 포식자에 대한 긍정적(예: 예측 가능한 먹이 가용성) 및 부정적(예: 충돌 위험 증가) 효과를 모두 가져

올 수 있다고 분석하였다.

Francisco, et al (2019)은 수중음파탐지기를 이용하여 측정된 정보를 영상처리 소프트웨어를 이용하여 어류 등의크기, 모양 및 유영 행동을 분석하였는데, 청어, 고등어, 대구,물개, 바다표범 및 범고래 등을 분류하는 데 효과적이었다. 관측은 2016년 8월 23일부터 9월 1일까지 스웨덴 서부해안(58.274219°N, 11.450808°E)에 위치한 Lysekil 해양에너지(파력) 테스트 사이트에서 실시되었으며 총311,740개의 음향 이미지를 기반으로 6개 등급의 표적에대한 총 260개의 관찰을 수행하고 관련된 음향 특성을 분석했다 (Figure. 14).

Figure. 15는 물고기 떼의 밀도는 유의한 음향 반사 자료를 보여주고 있으며 전장이 최대 0.4m인 작은 물고기는 직경이 5m부터 20m까지의 크기로 무리를 지어 매우 역동적으로 움직이며 다양한 모양을 형성하는 것을 관찰한 결과이다. 또한, 바다표범과 큰 물고기가 중소형 물고기 떼를 쫓는 것이 여러 번 관찰되기도 하였다.

Figure. 16에 관찰된 큰 물고기의 대부분은 대서양 대구 (Gadus morhua)일 가능성이 높고 평균 체장은 약 0.6m였다. 이러한 표적은 타원체 모양의 형태로 관찰되었다. 대구와 같은 표적은 주로 야간에 발생했으며 천천히 움직였고, 가장 많았을 때 약 50마리 이상의 물고기가 음향 이미지에나타났다.

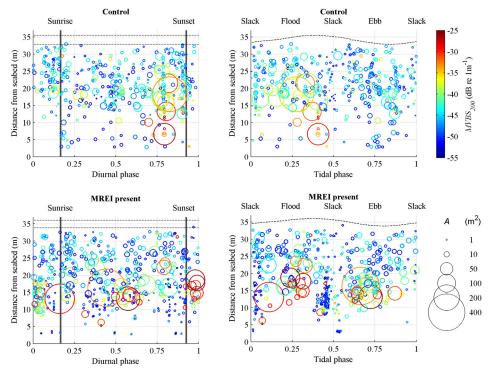


Fig. 10. Vertical distributions of fish schools plotted for diurnal and tidal phases. Marker size is proportional to the observed cross–section area, A, while colour represents the relative density as characterised by the mean volume backscattering strength, MVBS200. The diurnal phase for each observation is defined for the 24 hour daily cycle. The tidal phase for each observation is defined for the approximately 12.5 hour flood–ebb cycle. The dashed lines indicate the maximum and minimum sea surface height above the seabed measured during spring tides(Fraser, et al., 2018).

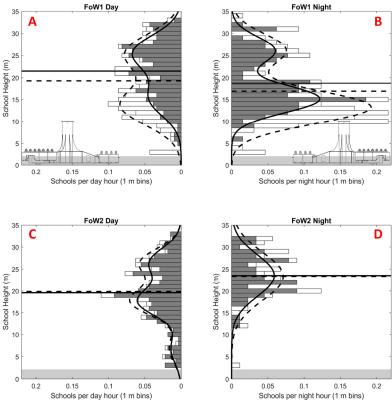


Fig. 13. Fish school vertical distribution across day/night for all schools (open bars) with a mean height (dashed horizontal line) and for schools observed at flow speeds above a nominal turbine cut−in speed of 1 m/s (shaded bars) with mean height (solid horizontal line). The lower extent of EK60 data processing is 2.1 m above the seabed (shaded area). A scaled representation of the turbine structure is shown at FoW1 (A and B). The probability densities of distributions estimated using Gaussian finite mixture models fitted via the expectation−maximisation algorithm are shown (curved solid line for schools at ≥ 1 m/s and dashed curved line for all schools)(Williamson et al., 2019).

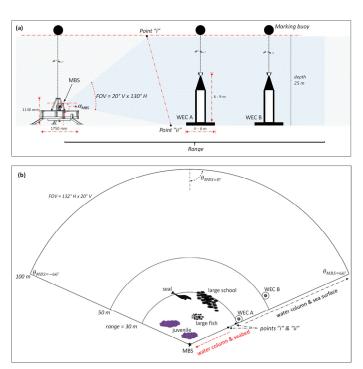


Fig. 14. (a) Lateral and (b) top view—scheme of the acoustic images acquired by the multibeam sonar (MBS) at distances of 30 m and 50 m from WECs A and B, respectively. The field of view (FOV) had a width of 82 m or 130° ($\theta MBS = -66^{\circ}$ to +66°), height of 20° and maximum range of 100 m, the MBS pitch angle (α MBS) was set to 10° (Francisco, et al., 2019).

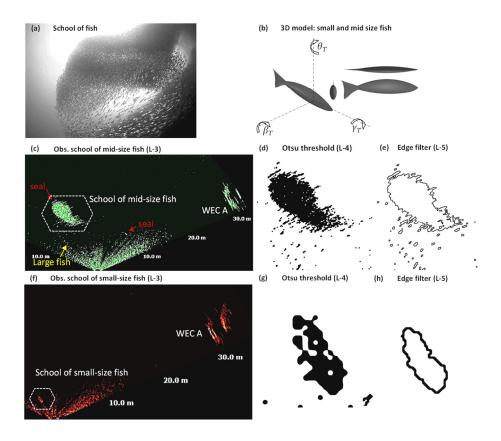


Fig. 15. Visual signatures of schools of fish. (a) Assumed image of school of fish. (b) Computer rendering of a three dimensional (3D) model of small and mid-size fish, including the yaw (θT), pitch (βT), roll (γT) angles. (c and f) Acoustic images processed on ProViewer4 at level 3 (L-3) showing a school of mid-size fish with (c) school with 12 m of diameter at 10-17 m of range; and (f) small-size fish, school with 1.5 m of diameter at 3.5-6 m of range. Shapes and silhouettes of schools of fish processed on FIJI with (d and g) Otsu threshold; (e) Edge filter; (h) outline filter (Francisco, et al., 2019).

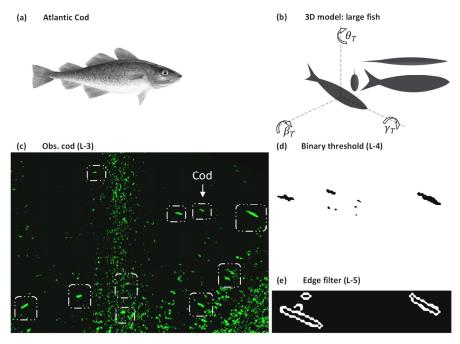


Fig. 16. (a) Image of cod [36]. (b) Three dimensional (3D) model of a cod. (c) Acoustic images at level 3 of a cod with 0.7 – 0.8 m of length, at 10 – 15 m of range; (d and e) Extracted shape and silhouette of a cod from the acoustic image in (c) using FIJI with: (d) binary threshold and (e) edge filter(Francisco, et al., 2019).

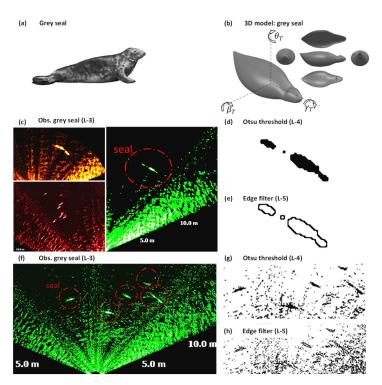


Fig. 17. (a) Image of grey seals. (b) Three dimensional model of a grey seal. (c) Acoustic images of grey seals at level 3, (c) measuring 3 m of length, located at 6 m of range; and (f) measuring 2.2 m, located at 6 m of range. The shape and silhouette of grey seals processed using (d and g) binary thresholds, (e and h) outline filters (Francisco, et al., 2019).

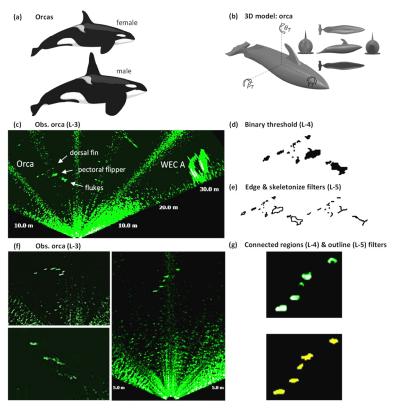


Fig. 18. (a) Image of male and female orcas [38]. (b) Three dimensional model of an orca. (c and f) Acoustic images of an orca processed at level 3: (c) An orca with 7 m of length, located at 16 m of range, (f) Orca with 4.2 m of length, at 15 m of range. The shape and silhouette of orcas processed using (d) binary threshold, (e) outline and skeletonize filters, (g) connected regions, and (h) outline filters (Francisco, et al., 2019).

Figure. 17의 개체들은 관찰된 크기와 모양을 분석하여 바다표법 또는 물개로 예상하였고 측정된 체장은 약 $0.9 \sim 1.4 \text{m}$ 였고 혼자 또는 최대 6 마리의 그룹으로 유영하는 것이 발견되었다.

Figure. 18의 개체는 범고래와 일치하는 모양과 크기를 가진 대형 해양 포유류로 분석되었다. 측정된 체장은 약 4m에서 7m였고, 측정된 등지느러미의 높이는 1.3m였다.

Viehman, et al (2022)는 캐나다에 있는 편디 해양에너지 연구센터(Fundy Ocean Research Center for Energy, FORCE) 조류에너지 시험장에서 음향 관측 장비들로 구성된 FAST-3 platform을 이용하여 어류 분포자료 취득 및 분석을 실시하였고, 이를 통해 음향기술이 어류의 분포를 탐지하고, 나아가 조류발전 터빈에 대한 생태 환경을 모니터링 할 수 있는 가능성이 있음을 보고하였다(Figure. 19, 20).

Staines, et al (2022)는 미국 뉴햄프셔 대학교 조류에너지 시험장과 미국 알래스카주 네나나(Nenana) 시 근처의 타 나나 강의 조류발전 시험장에서 ARIS는 1.8MHz와 3.0MHz 의 두 가지 주파수로 작동하는 초음파 영상 탐지 장치를 이 용하여 물고기를 탐지하였고, 그물을 이용하여 통과하는 물 고기를 포획하여 물고기의 종류, 크기 등을 확인하였다. 이를 통해 고탁도 혹은 어두운 해역에서 물고기를 효과적으로 탐지할 수 있음을 보여주었고, 조류발전 터빈과 어류의 충돌을 효과적으로 모니터링할 수 있다고 보고하였다.

5. 고 찰

조류발전은 다른 해양재생에너지와 비교할 때 기상 조건에 관계없이 지속적인 발전이 가능하고 발전량의 예측이가능하며, 댐처럼 대규모 토목공사가 필요하지 않아 기존의조력발전에 비해 투자비용이 낮다는 장점을 가지고 있다. 또한 댐 건설에 따른 갯벌 생태계 파괴 등 해양생태계 특히해양동물에 큰 영향을 주는 조력발전에 비해 상대적으로친환경적으로 알려져 있다. 하지만 조류발전 사업으로 인한해양 생태계의 영향에 관한 구체적인 연구는 상대적으로많이 부족한 실정이다. 이는 조류발전 에너지 개발이 아직은 초기 단계이기도 하고 조력 발전에 비해 상대적으로 생태계에 미치는 영향이 적기 때문일 수도 있다.

본 논문에서는 조류발전의 환경영향 중에서 가장 중요

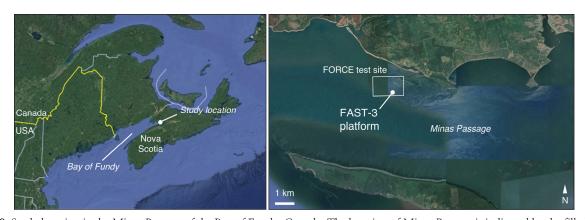


Fig. 19. Study location in the Minas Passage of the Bay of Fundy, Canada. The location of Minas Passage is indicated by the filled circle in the left–hand panel, and the study site is shown on the right (Viehman, et al., 2022).



Fig. 20. FAST-3 platform deployed at the FORCE Tidal energy test site from 30 Mar to 23 May 2018. Equipment included (A) Simrad WBAT EK80 echosounder, (B) Nortek Signature 500 ADCP, (C) Aanderaa SeaGuard RCM(Viehman, et al., 2022).

한 것으로 판단되는 조류발전 터빈과 해양동물의 충돌 위험에 대해 기존의 문헌 결과에 대한 분석을 실시하였다. 본연구에서 분류한 3가지 조사 방법은 1)수중 카메라를 통한 직접적인 관찰 방법과 2)청음기 및 3)초음파 음향탐지기를 통한 간접 측정 방법으로 나눌 수 있었다. 이들 3가지조사 방법들은 또한 수중 카메라 및 청음기 사용하여 지나가는 어류를 조사하는 수동적인 방법 및 조사하고자 하는지역에 직접 범을 주사하는 초음파 음향탐지와 같은 능동적인 방법으로 나눌 수도 있다.

첫 번째, 수중카메라를 이용한 조사는 탁도가 낮은 해역이나 주간에 조사가 가능한 방법이고, 터빈을 실제 해역에설치하여 조사한 결과, 조류터빈과 해양 동물, 특히 물고기와 충돌 사례는 조사되지 않았다. 두 번째, 수중청음기를이용한 조사는 주로 수중에서 소음을 발생하는 해양 포유류, 특히 돌고래, 바다 표범의 탐지에 유용하게 활용할 수있는 방법으로 판단되고, 실 해역 조사를 수행하였던 연구에서는 조류 터빈을 회피하여 충돌한 사례는 보고되지 않았다. 마지막으로 초음파 장비를 이용한 능동적 음향조사는 넓은 범위의 물고기 무리 및 포유류 등에 두루 활용이 가능한 가장 현실적인 측정 방법이다.

본 연구에서 검토된 기존 조사 사례 연구들에서는 조류발전 시설이 어류나 해양 포유류에 직접적으로 위해를 끼치는 사례나 시설과의 유의한 충돌 사례는 보고되지 않았으며 이는 Table 2에 정리 하였다. 따라서 본 리뷰의 결과들을 중합하면 조류발전이 어류 및 해양포유류에 미치는 직접적인 위해성이나 충돌 위험성은 미미할 것으로 사료된다. 다만 조류 발전 시설물이 어류의 밀도증가를 가져오는 사례들은 다수 관찰되고 있으며(Fraser, et al., 2018), 이로인한 생태계 먹이연쇄 상의 파급 효과 등은 추후 좀 더 연구될 필요가 있는 주제들이다. 조류발전 시설물들의 위집효과로 인한 상위 포식자들의 유인효과와 실제적으로 유인된 상위포식자들 중에 보호종 등이 포함될 경우 이들에게미치는 2차적인 위해성 등은 아직까지 연구된 바가 없었다.

조류 발전 기술은 아직까지 시작 단계에 있고 현재까지 전세계적으로 소수의 조류발전 사업만이 추진되었다. 향후 좀 더 많은 조류발전이 시설될 경우 2차적인 생태계 위해 성 사례 연구들을 포함하는 보다 광범위한 생태계 영향 연 구가 가능할 것으로 생각된다.

비록 아직까지 조류발전과 관련된 뚜렷한 해양생태계 위해성이 보고된 적이 없다고 하더라도 조사된 사례가 매우적어 보다 명확한 영향 분석을 위한 생태계 영향연구는 조류 발전 기술 및 시설 확대와 함께 반드시 수반 되어야 할과정이다. 향후, 증가할 조류발전 사업 추진과 함께 보다 많은 객관적인 생태 영향에 대한 모니터링이 이루어진다면 조류발전으로 인해 발생하는 생태계 변화를 보다 생산적이고 지속가능하게 관리할 수 있는 기반이 될 것이다.

감사의 글

바쁘신중에도 세심한 검토와 날카로운 지적으로 본 논문의 완성도를 높여 주신 KIOST 김성 박사님 과 박준석 박사님 한국해양정책학회 명철수 박사님께 존경의 마음을 담아 감 사를 드립니다. 본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업 기술원의 습지생태계 가치평가 및 탄소흡수 가치증진 기술 개발사업의 지원을 받아 이루어졌습니다(2022003630003).

References

산업통상자원부, 한국에너지공단 신·재생에너지 센터. 2022. 신 재생에너지 백서. 2022. p733.

유정규, 남은정, 명철수. 2005. 울돌목 해역에서 조류발전 시설 터 빈 가동에 따른 동물플랑크톤의 피해 영향. 한국신재생에너 지학회 춘계학술대회논문집 507-511

허만응, 김동환, 박진순. 2021. 다리우스와 사보니우스를 결합한 하이브리드 타입의 조류발전 터빈 설계. 한국유체기계학회 학술지 24(6):37 – 46

Table 2. Marine animals collision risk of tidal current turbin
--

Species	Avoidance	Investigation method	Reference
Seabream (<i>Rhabdosargus sarba</i>)	Avoid	Underwater camera	Hammar, <i>et al.</i> (2013)
Harbour porpoises	Avoid	Hydrophone	Coles, <i>et al.</i> (2021) Gillespie, <i>et al.</i> (2021) Palmer, <i>et al.</i> (2021)
Seabirds	Avoid	Hydrophone	Coles, et al. (2021)
Harbour seals	Avoid	Hydrophone	Hastie, <i>et al.</i> (2016)
Brown trout	Avoid	Acoustic equipment	Bender, <i>et al.</i> (2023)
Atlantic salmon	Avoid	Acoustic equipment	Bender, <i>et al.</i> (2023)
Atlantic cod	Avoid	Acoustic equipment	Francisco, et al. (2019)
Seals	Avoid	Acoustic equipment	Francisco, et al. (2019)
Killer whale	Avoid	Acoustic equipment	Francisco, et al. (2019)
Zooplanktons	Partially Collision	Micrograph and Video image	Schlezinger, <i>et al.</i> (2013) Yoo, <i>et al.</i> (2005)

- Bender, A.; Langhamer, O.; Francisco, F.; Forslund, J.; Hammar, L.; Sundberg, J.; Molander, S. 2023. Imaging— Sonar Observations of Salmonid Interactions with a Vertical Axis Instream Turbine. River Res. Appl, 39, 1578— 1589.
- Coles, D.; Angeloudis, A.; Greaves, D.; Hastie, G.; Lewis, M.; Mackie, L.; McNaughton, J.; Miles, J.; Neill, S.; Piggott, M.; et al. 2021. A Review of the UK and British Channel Islands Practical Tidal Stream Energy Resource. Proc. R. Soc. A., 477, 20210469.
- Coles DS, Blunden LS, Bahaj AS. 2020. The energy yield potential of a large tidal stream turbine array in the Alderney Race: energy yield estimate for Alderney Race. Phil. Trans. R. Soc. A 378, 20190502.
- Cooper E, Brocklehurst J, Smith K. 2020. EnFAIT Enabling Future Arrays in Tidal. Technical report. EnFAIT.
- De Dominicis M, Wolf J, O'Hara Murray R, 2018. Comparative effects of climate change and tidal stream energy extraction in a shelf sea. J. Geophys. Res.: Oceans 123, 5041 5067.
- Francisco, F.; Sundberg, J. 2019. Detection of Visual Signatures of Marine Mammals and Fish within Marine Renewable Energy Farms using Multibeam Imaging Sonar. J. Mar. Sci. Eng., 7, 22.
- Fraser, S.; Williamson, B.J.; Nikora, V.; Scott, B.E. 2018. Fish Distributions in a Tidal Channel Indicate the Behavioural Impact of a Marine Renewable Energy Installation. Energy Rep., 4, 65 69.
- Frid C, Andonegi E, Depestele J, Judd A, Rihan D, Rogers SI, Kenchington E. 2012. The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices. Environ Impact Assess Rev.;32(1):133–9.
- Gillespie, D.; Palmer, L.; Macaulay, J.; Sparling, C.; Hastie, G. 2021. Harbour Porpoises Exhibit Localized Evasion of a Tidal Turbine. Aquat. Conserv., 31, 2459 2468.
- Hammar, L.; Andersson, S.; Eggertsen, L.; Haglund, J.; Gullström, M.; Ehnberg, J.; Molander, S. 2013. Hydrokinetic Turbine Effects on Fish Swimming Behaviour. PLoS ONE, 8, e84141.
- Hastie, G.D., Russell, D.J.F., Benjamins, S., et al., 2016. Dynamic habitat corridors for marine predators; intensive use of a coastal channel by harbour seals is modulated by tidal currents. Behav. Ecol. Sociobiol. 70, 2161 2174.
- Hemery LG, Mackereth KF, Gunn CM, Pablo EB. 2022. Use

- of a 360-degree underwater camera to characterize artificial reef and fish aggregating effects around marine energy devices. J Mar Sci Eng.;10(5):555.
- Malinka C. E.; Gillespie D. M.; Macaulay J. D. J.; Joy R. and Sparling C. E. 2018. First in situ passive acoustic monitoring for marine mammals during operation of a tidal turbine in Ramsey Sound, Wales. Mar. Ecol. Prog. Ser., 590, 247–266
- Neill S, Hashemi M. 2018. Fundamentals of ocean renewable energy generating electricity from the sea. New York, NY: Academic Press
- Palmer L, Gillespie D, MacAulay JDJ, Sparling CE, Russell DJF, Hastie GD. 2021. Harbourporpoise (Phocoena phocoena) presence is reduced during tidal turbine operation. AquatConserv Mar Freshwat Ecosyst 31(12):3543 3553
- Park, J. S., Lee, C. Y., Park, J. S., Choi, H. W., Ko, D.H., and Lee, J. L., 2019. "Assessment of Tidal Stream Energy Resources Using a Numerical Model in Southwestern Sea of Korea," Ocean Science Journal, Vol. 54, pp. 529–541.
- Sanderson, B.G.; Karsten, R.H.; Hasselman, D.J. 2023. Towards Estimating Probability of Fish – Turbine Encounter: Using Drifters Equipped with Acoustic Tags to Verify the Efficacy of an Array of Acoustic Receivers. J. Mar. Sci. Eng., 11, 1592
- Schlezinger, D.R., Taylor, C.D., and Howes, B.L., 2013. Assess-ment of zooplankton injury and mortality associated withunderwater turbines for tidal energy production, Mar. Tech-nol. Soc. J., vol. 47, no. 4, p. 142
- Staines, G.J.; Mueller, R.P.; Seitz, A.C.; Evans, M.D.; O'Byrne, P.W.; Wosnik, M. 2022. Capabilities of an Acoustic Camera to Inform Fish Collision Risk with Current Energy Converter Turbines. J. Mar. Sci. Eng., 10, 483.
- Viehman, H.A.; Hasselman, D.J.; Douglas, J.; Boucher, T. 2022. The ups and downs of using active acoustic technologies to study fish at tidal energy sites. Front. Mar. Sci., 9, 851400
- Waggitt JJ, Scott BE. 2014. Using a spatial overlap approach to estimate the risk of collisions between deep diving seabirds and tidal stream turbines: a review of potential methods and approaches. Mar. Policy 44, 90 97.
- Williamson B.; Fraser S.; Williamson L.; Nikora V. and Scott B. 2019. Predictable changes in fish school characteristics due to a tidal turbine support structure. Renewable energy. 141, 1092–1102