

Original Article

해상풍력단지의 해저 전력케이블에서 방출되는 전자기장: 측정, 거리에 따른 감쇄 및 잠재적 생물영향

권은미¹ · 김재영¹ · 주영준³ · 김병모² · 이정석² · 최태섭^{2,†}

¹주엔이비 환경안전연구소 선임연구원

²주엔이비 환경안전연구소 책임연구원

³주이레테크 기업부설연구소 연구소장

Electromagnetic Fields Emitted from Submarine Power Cables of Offshore Wind Farms; Measurements, Attenuation with Distances, and Potential Biological Impact

Eun-Mi Kwon¹, Jae-Young Kim¹, Young-Jun Ju³, Byeong-Mo Gim²,
Jung-Suk Lee², and Tae Seob Choi^{2,†}

¹Senior Researcher, Institute of Environmental Protection, NEB Co., Seoul 08504, Korea

²Principal Researcher, Institute of Environmental Protection, NEB Co., Seoul 08504, Korea

³Director of Research, Corporate Research Institute, ERETEC Inc., Gunpo-si, Gyeonggi-do 15880, Korea

요 약

바다의 바람자원을 이용한 신재생에너지의 생산을 위해 연안에 해상풍력단지의 조성이 활발해지고 있다. 해상풍력발전을 통해 생산된 전기를 육지로 송전하기 위해 상당한 길이의 전력케이블이 해저에 포설되어 있다. 해저에 포설된 전력케이블에서는 전류가 흐름에 따라 전자기장(Electromagnetic Fields, EMFs)이 환경으로 방출되어 확산하게 된다. 인위적으로 방출되는 전자기장은 지구자기장(Geomagnetic Field, GMF)을 교란시키며, 지구자기장을 활용하여 방향 탐색, 이동(migration), 먹이 탐색 등 상어류와 같은 연골어류의 생태 활동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예측된다. 해저 전력케이블에서 인위적으로 방출되는 전자기장의 세기를 제주 한경면 인근과 전북 고창군 인근 서남해 해역에 설치, 운영 중인 해상풍력단지에서 측정하였다. 전자기장의 세기는 15-100 Hz 주파수 범위에서 측정하였으며, 두 곳 모두 60 Hz에서 최고값이 측정되었다. 최고값은 제주 한경면 인근 단지에서 $0.0378 \pm 0.0039 \mu\text{T}$ 였으며, 전북 고창군 인근 서남해 해역의 단지에서는 $2.4168 \pm 0.0478 \mu\text{T}$ 였다. 두 곳의 전자기장 세기의 차이는 약 63.6배 정도였으며, 이는 전력케이블 해저 포설 방식과 측정 당시 전력케이블에 흐르는 전류 세기의 차이에 기인한 것으로 추정된다. 전자기장을 감지할 수 있는 생물의 민감도와 비교한다면, 상당한 수준의 세기인 것으로 판단된다. 인위적으로 방출되는 전자기장은 제주해역에서 흔하게 출현하는 두툽상어류(Scyliorhinidae), 붕장어류(Congridae) 등, 서남해 해역에서는 홍어류(Rajidae) 등과 같은 연골어류가 직·간접적으로 영향을 받을 수 있을 것으로 예측된다. 본 연구에서는 해저에 포설된 전력케이블에서 방출되는 전자기장의 세기를 수중환경에서 측정할 수 있는 기술을 소개하고, 그 결과를 제시하였으며, 전자기장에 노출되는 해양생물에 미치는 유의한 생물/생태적 영향에 대해 고찰하였다. 인위적으로 방출되는 전자기장이 미치는 잠재적 영향을 적절하게 평가하기 위해서는 해양환경으로 방출되는 전자기장에 대한 정확한 측정과 서식 생물의 생리, 생태적 특성이 함께 고려되어야 할 것이다. 본 연구 결과는 해저 전력케이블에서 해양환경으로 방출되는 전자기장 모니터링 결과를 활용한 환경기준의 마련 및 해양생물 영향평가의 기초자료 등으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Offshore wind farms are increasingly being built along the coast to generate renewable energy from the wind resources of the sea. To feed the electricity generated from offshore wind power to land, a considerable length of submarine power cables are buried on the seabed. As electric current flows through the cables, electromagnetic fields (EMFs) are emitted and spread into the marine environment. It is predicted that artificially emitted EMFs can

[†]Corresponding author: neb.tschoi@gmail.com

disrupt the geomagnetic field (GMF), and affect the ecological behavior of cartilaginous fish such as sharks, which utilize the GMF for navigation, migration, and foraging. We measured the strength of EMFs emitted from submarine power cables of offshore wind farms in the sea near Hankyeong-myeon, Jeju Island and Southwestern Sea of Gochang-gun, Jeollabuk-do. The EMFs was measured in the frequency range of 15 to 100 Hz, with a peak value at 60 Hz in both locations. The peak values of EMFs were $0.0378 \pm 0.0039 \mu\text{T}$ at the Hankyeong-myeon, Jeju Island, and $2.4168 \pm 0.0478 \mu\text{T}$ at the Southwest Sea near Gochang-gun, Jeollabuk-do, respectively. The difference in the strength of EMFs between the two locations was about 63.6 times, which is presumed to be due to differences in the way of laying the power cables on the seabed and the current intensity flowing in the cables at the time of measurement. Compared to the sensitivity of marine organisms that can detect electromagnetic fields, this is considered to be a significant level of strength. It is predicted that cartilaginous fish such as the cloudy catshark (Scyliorhinidae) and conger eel (Congridae) in the Sea of Jeju Island and the skates (Rajidae) in the Southwestern Sea of Gochang-gun, Jeollabuk-do might be affected. In this study, we presented a technique and measurement results for measuring the strength of EMFs emitted from submarine power cables buried on the seabed in the underwater environment, and discuss the significant biological and ecological effects on marine organisms exposed to EMFs. In order to properly assess the potential effects of anthropogenic EMFs, accurate measurements of EMFs emitted into the marine environment and the physiological characteristics of the organisms inhabiting there should be considered. The results of this study are expected to be utilized as a basis for establishing environmental quality standards and assessing the impact on marine life using the results of monitoring EMFs emitted from submarine power cables into the marine environment.

Keywords: Offshore wind farms(해상풍력단지), Submarine power cables(해저 전력케이블), Electromagnetic fields(전자기장), Biological impact(생물영향), Environmental risk assessment(환경위해성평가)

1. 서 론

해양환경에서 신재생에너지의 개발은 바람, 조석, 파도, 해수 온도차 등 다양한 에너지를 활용하는 발전 사업이 더욱 중요해지고 있다(Taveira-Pinto *et al.*[2020]). 특히 해상풍력발전 사업은 육상과 비교하여 설치와 운영이 상대적으로 용이하다는 장점으로 인해 대규모 단지 조성이 활발히 추진되고 있으며, 해양의 강한 풍속으로 인해 높은 발전효율을 기대할 수 있다. 국내에서는 정부의 '재생에너지 3020' 이행계획에 따라 해상풍력발전 규모가 2030년까지 12 GW까지 확장될 것으로 예상된다(MOTIE, Korea[2017]; Oh *et al.* [2021]). 육상에서 풍력발전과 연관된 대표적인 환경문제는 터빈 블레이드에서 발생하는 저주파 소음, 철새의 비행 방해, 경관 훼손 등이 있다. 또한, 여러 기의 풍력터빈의 설치로 인한 지형 훼손, 생태계 교란 등이 주요한 부정적 영향으로 보고되고 있다(Jeong[2022]; Hahm[2016]). 해상풍력발전에서도 육상과 유사하게 조류에 대한 충돌 위험(Drewitt and Langston[2006]; Furness *et al.*[2013]) 및 해양 포유류에 대한 수중 소음 위험(Nedwell and Howell[2004]) 등에 대해서 우려되고 있으며, 이 외에도 대규모 단지 조성으로 인한 서식지 훼손으로 유발되는 생태계 파괴, 송전을 위해 설치되는 해저 전력케이블에서 환경으로 방출되는 인위적인 전자기장의 영향 등이 중요한 문제로 제기되고 있다. 따라서 이에 대한 영향을 면밀하게 검토하기 위한 과학적 연구들이 최근에 활발하게 수행되고 있다(Gim *et al.*[2021]; Lee and Lee[2023]).

해상풍력발전단지는 수 기에서 수십 기의 풍력터빈으로 구성되며, 개별 터빈들은 전력케이블로 연결되어 내부 전력망(grid)을 구성하고, 발전된 전기를 육지로 송전하기 위해 해상변전소 또는 육상변전소로 전력케이블을 연결하여 외부 전력망을 구성한다. 송전을

위한 전력망 구축을 위해서는 상당한 길이의 전력케이블을 해저에 포설하게 된다. 포설되는 해저케이블의 길이는 해상풍력단지의 위치와 전력망 설계에 따라 단지별로 수십에서 수백 km에 이르며, 현재 운영 중이거나 계획 중인 해상풍력발전단지를 고려하면, 향후 그 길이가 수천 km까지 확장될 것으로 예상된다. 해저에 포설된 전력케이블은 용량에 따라 다소 차이가 있겠지만, 전류가 흐를 때 전자기장(Electromagnetic fields, EMFs)이 발생하여 주변 환경으로 방출될 것이다. 이는 인위적인 전자기장이 지속적으로 발생하며, 해양환경에 미치는 영향이 증가한다는 것을 의미한다(Boehlert and Gill[2010]; Balmori[2015]). 따라서 해상풍력발전단지의 조성과 운영은 해양환경 및 생물에게 영향을 미치는 대규모 활동으로 간주된다(Li *et al.*[2023]). 그러나 해저 전력케이블로 인한 국지적 전기 및 자기 환경의 변화에 노출되는 해양 생물에 대한 영향에 대해서는 거의 연구되지 않았다(Martinez *et al.*[2021]).

해상풍력발전의 전력 송전을 위한 해저 전력케이블은 직류(DC) 또는 교류(AC) 방식 모두를 사용할 수 있다. 직류방식의 케이블에 의해 생성된 자기장은 정적(static) 특성을 가지며, 방출되는 자기장의 방향이 바뀌지 않고 같은 위치를 유지한다. 반면에 교류방식의 케이블에서 방출되는 전자기장은 직류방식과 비교하여 다소 약한 전자기장을 생성하지만 주파수로 인해 방향이 바뀌며 회전하는 특성을 갖는다(Hermans and Schilt[2022]). 회전하는 특성을 보여주는 자기장은 전력케이블 자체에 의해 생성된 전기장 외에 해양환경에서 추가적인 전기장을 유도할 수 있다. 따라서 교류방식의 케이블은 전기장과 자기장, 그리고 회전하는 자기장에 의해 유도되는 유도전기장을 생성하며, 이처럼 특정 위치의 전체 전자기장(EMFs)의 세기는 여러 전기 및 자기 구성 요소에 의해 결정된다. 현재 우리나라 해상풍력 발전단지에서는 주로 60 Hz 주파수의 교류방식의 전

력 케이블을 사용한다. 전력케이블에 전류가 흐르므로써 발생하는 전자기장은 전기장(Electric Fields, EFs)과 자기장(Magnetic Fields, MFs)으로 구성된다. 전기장은 전하에 의해 생성되며, 전하가 움직이게 되면 자기장이 생성된다. 자기장의 세기는 자속밀도(Magnetic Flux Density, B)로 표현되며, 단위 전류(I)를 전달하는 케이블에 단위 길이당 작용하는 힘으로 정의된다. 자속밀도(B)는 전력케이블에 흐르는 전류에 비례하며, 케이블 주변에 동심원 모양으로 형성되는 자기장의 자속밀도는 거리에 반비례한다. 직선 도선 환경에서의 자속밀도 또는 자기장의 세기는 전류에 따라 자기 강도가 증가하는 한 전류값에 따라 달라지며, 자기장의 세기는 케이블로부터의 거리가 멀어짐에 따라 감소하는 특성을 갖는다. 해저에 포설된 고전압의 전력케이블은 전체 길이에 걸쳐 전자기장을 방출한다. 전자기장은 자연적으로 또는 인위적으로 발생할 수 있으며, 자연적으로 발생하는 전자기장은 지구자기장(Geomagnetic Field, GMF)과 생물체 내에서 다양한 과정(생화학적, 생리학적, 신경학적)을 통해 생성된다. 지구자기장의 범위는 25~70 μT 수준이며(Nyqvist *et al.*[2020]), 우리나라 주변의 지구자기장의 수준은 45 μT 정도인 것으로 알려져 있다(Gim *et al.*[2021]). 지구자기장을 이용하여 방향 탐색, 이동, 섭식 등을 하는 생물이 감지하는 변화 수준은 0.002~0.005 $\mu\text{T}/\text{km}$ 정도로 매우 낮으며, 따라서 지구자기장을 이용하는 생물종의 자기 민감도는 나노테슬라(nT) 범위에 있다(Anderson *et al.*[2017]; Hodson[2020]). 특히 이러한 생물종들은 자기 신호에 반응하고 지구자기장의 방향, 크기 또는 기울기에 매우 민감한 것으로 알려져 있다(Mouritsen[2018]; Nyqvist *et al.*[2020]).

해양생물은 지구자기장을 통과해 이동하는 해류로 인해 발생하는 자연 전자기장에 노출되어 있으며, 해양환경에서 인위적인 전자기장의 방출은 해저 통신(광섬유 또는 동축케이블)과 해저 전력케이블에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Gill and Desender[2020]). 자연 발생 지구자기장(GMF)과 해저 전력케이블에서 방출되는 인위적인 전자기장 사이의 상호 작용은 잠재적으로 해양생물의 회피 또는 유인 행동 등을 변경시킬 수 있을 것으로 추정된다. 전류 유형(DC 또는 AC), 케이블 특성, 송전되는 전력량, 국소적인 지구자기장(GMF)의 분포와 더불어 전력케이블에서 방출되는 전자기장의 세기를 이는 것은 해상풍력발전단지에 포설되는 해저 전력케이블이 해양환경과 생물, 생태계에 미치는 영향을 평가하는 데 있어서 매우 중요한 것이다. 전자기장이 해양에 서식하는 생물에게 미치는 잠재적인 영향은 세기와 주파수 특성에 따라 다양하고 광범위한 생태 및 행동 특성의 변화를 초래하는 것으로 알려져 있다(Hutchison *et al.*[2020]). 하지만 일부 연구에서는 해저에 포설된 전력케이블에서 발생하는 전자기장이 해양생물에 미치는 영향이 분명하지 않다고 보고하고 있다(Taormina *et al.*[2018]). 인위적으로 발생된 전자기장의 생물영향에 대해서 충분한 연구는 아직 이루어지지 않았지만, 최근 일부 연구에서 전자기장이 자기장에 민감한 생물종에게 방향 탐색, 이동(migration), 먹이 탐색 등 생태 활동에 중요한 환경신호(지구자기장)를 교란하거나 방해할 수 있음을 보여주고 있다(Hutchison *et al.*[2020]). 전자기장은 상어와 홍

어를 포함한 연골어류, 녹색 철갑상어(*Acipenser medirostris*), 연어류(*Oncorhynchus* sp.), 게류(*Dungeness crab, Cancer magister*)를 포함한 해양생물에 잠재적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hermans and Schilt[2022]; Gill[2005]). 특히, 전기수용 기관을 가진 상어나 가오리는 매우 낮은 자기장 세기에도 민감하게 반응하여 영향을 받을 수 있다(Bochert and Zettler[2006]). 연체동물인 가시 랍스터(*Panulirus argus*)는 방향탐지를 위해 지구자기장(GMF)을 사용하며, 인공적인 자기장 환경을 조성했을 때, 수평적인 자극에 대해 진행 경로를 변경하는 것을 확인한 연구가 있었다(Boles and Lohmann[2003]; Lohmann *et al.*[1995]). 전자기장에 대한 생물의 반응은 보유한 감각 시스템의 민감도에 의해 결정되게 된다(Baker *et al.*[2013]). 전하에 의해 유도된 자기장을 가로질러 움직이는 생물이 있다면 이차적인 전자기장이 유도되며, 이 때 전자기장의 세기는 생물의 크기가 클수록 강해진다(Tricas and Gill[2011]; Gill *et al.*[2014]). 전자기장은 생물체 표면에서 차폐가 가능하지만 자기장은 그대로 투과되기 때문에 자기장 노출에 의한 생물의 반응 또는 영향은 중요하다. 생물의 움직임과 분포도 전자기장이 발생할 확률에 영향을 미치며, 생물의 생활사 단계뿐 아니라 전자기장이 발생하는 환경의 공간적, 시간적 이용에 따라 달라질 수 있다. 즉, 전자기장에 의한 생물영향과 강도는 발생하는 위치 및 장소의 특성과 민감한 생물의 존재, 분포 및 행동 특성에 따라 달라질 수 있다. 전자기장의 세기는 발생원으로부터의 거리가 멀어짐에 따라 감소하기 때문에 해저면을 굴착하여 포설된 경우, 케이블 상부 수층에 서식하는 종보다 해저면 퇴적물에 서식하는 저서생물에 더 많은 영향을 미칠 수 있다(Bochert and Zettler[2006]). 저서성 연골어류는 전기 및 자기에 매우 민감한 것으로 알려져 있으며(Collin *et al.*[2015]), 해저 전력케이블과 직접 접촉할 가능성이 높다. 저서성 연골어류에 대해 제기되는 전자기장의 잠재적 영향은 1) 배아 발달 또는 생식과 관련된 행동 특성 및 주기의 교란, 2) 유인 또는 회피와 같은 행동 변화를 유발하며(Gill *et al.*[2014]; Hutchison *et al.*[2020]), 이는 포식자-피식자 관계, 동종 간의 관계 또는 서식지 변화를 초래할 수 있으며, 3) 방향 탐색 및 이동에 대한 영향이다(Ohman *et al.*[2007]).

따라서 본 연구에서는 해상풍력발전단지에 포설되어 있는 해저 전력케이블에서 방출되는 인위적인 전자기장의 세기를 측정하고, 현장 측정 결과를 이용하여 거리에 따른 감쇄 특성을 분석하였다. 전자기장은 케이블 배치, 전류량, 송전량 등과 같은 여러 가지 요소에 의해 달라지고 시간에 따라 지속적으로 변하기 때문에 현지 실측자료의 확보가 중요하다. 하지만 우리나라는 육상에서의 전자기장 측정에 대한 가이드라인은 존재하지만(NRRA, Korea[2023]), 해양환경에서 발생하는 인위적 전자기장에 대한 측정방법과 실측 결과에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구는 수중환경에서 전자기장 측정을 위한 기술 및 결과를 분석하고, 인위적으로 발생된 전자기장에 노출되는 해양생물에게 미치는 잠재적 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 해저 전력케이블에서 방출되는 전자기장의 측정

해상풍력발전단지에 포설된 해저 전력케이블에서 방출되는 인위적인 전자기장의 세기는 제주도 한경면 두모리, 금동리 인근 공유수면에 위치한 단지과 전라북도 고창군 상하면 자룡리 인근 해상에 위치한 단지에서 측정하였으며, 두 곳 모두 단지 조성이 완료되어 현재 운영 중인 곳이다. 제주도 한경면 인근 해역의 단지는 육지로부터 약 500~1,200 m 이격된 해상에 10기의 풍력터빈이 일렬로 설치되어 있으며, 개별 풍력터빈을 연결하는 내부망과 발전된 전기를 육지로 송전하기 위한 외부망이 단지의 중심에 위치한 풍력터빈으로부터 육지 쪽으로 전력케이블이 해저에 포설되어 있다. 전라북도 고창군 인근 해상에 조성된 서남해 해상풍력단지는 육지로부터 10여 km 떨어져 20기의 풍력터빈이 격자형으로 설치되어 있다. 이 단지에는 개별 풍력터빈을 연결하는 내부망과 해상변전소(Offshore substation)에서 육상변전소(Onshore substation)로 연결되는 외부망의 전력케이블이 해저에 포설되어 있다(Fig. 1과 Table 1).

제주 한경면과 전북 고창군 인근 해역에 조성된 해상풍력단지의 내·외부 전력망에는 대용량 전력 송전을 위한 고밀도·장조장 특성을 갖는 전력케이블이 해저에 매설되어 있다. 전북의 경우 개별 풍력터빈을 연결하는 내부망은 22.9 kV의 케이블이 설치되어 있으며, 해상변전소에서 육지로 송전하는 외부망에는 154 kV 용량의 압출 플라스틱(XLPE) 절연방식의 케이블이 사용되었다(Table 1). 전력케이블이 해저에 포설되어 있는 방식은 제주의 경우 퇴적층을 일정한 깊이로 굴착하여 포설하고 사석 등으로 덮어놓은 방식이며, 전북은 퇴적층을 일정한 깊이로 굴착하여 포설하였으나 자연스럽게 퇴적물이 덮여 있는 방식으로 두 곳이 약간 차이가 있다.

해저 전력케이블에서 방출되는 전자기장의 측정은 제주 풍력단지에서는 중심부에 위치한 풍력터빈에서 육상으로 연결된 전력케이블의 직상부에서, 전북 풍력단지에서는 해상변전소에서 육상으로 연결되는 전력케이블의 직상부에서 각각 측정하였다. 두 곳 모두에서 환경 중 배경수준의 전자기장을 측정하기 위해 해저 전력케이블이 매설된 위치로부터 충분한 거리를 이격하여 해역 저층의 퇴적물에 인접한 위치에서 전자기장의 세기를 측정하였고, 전력케

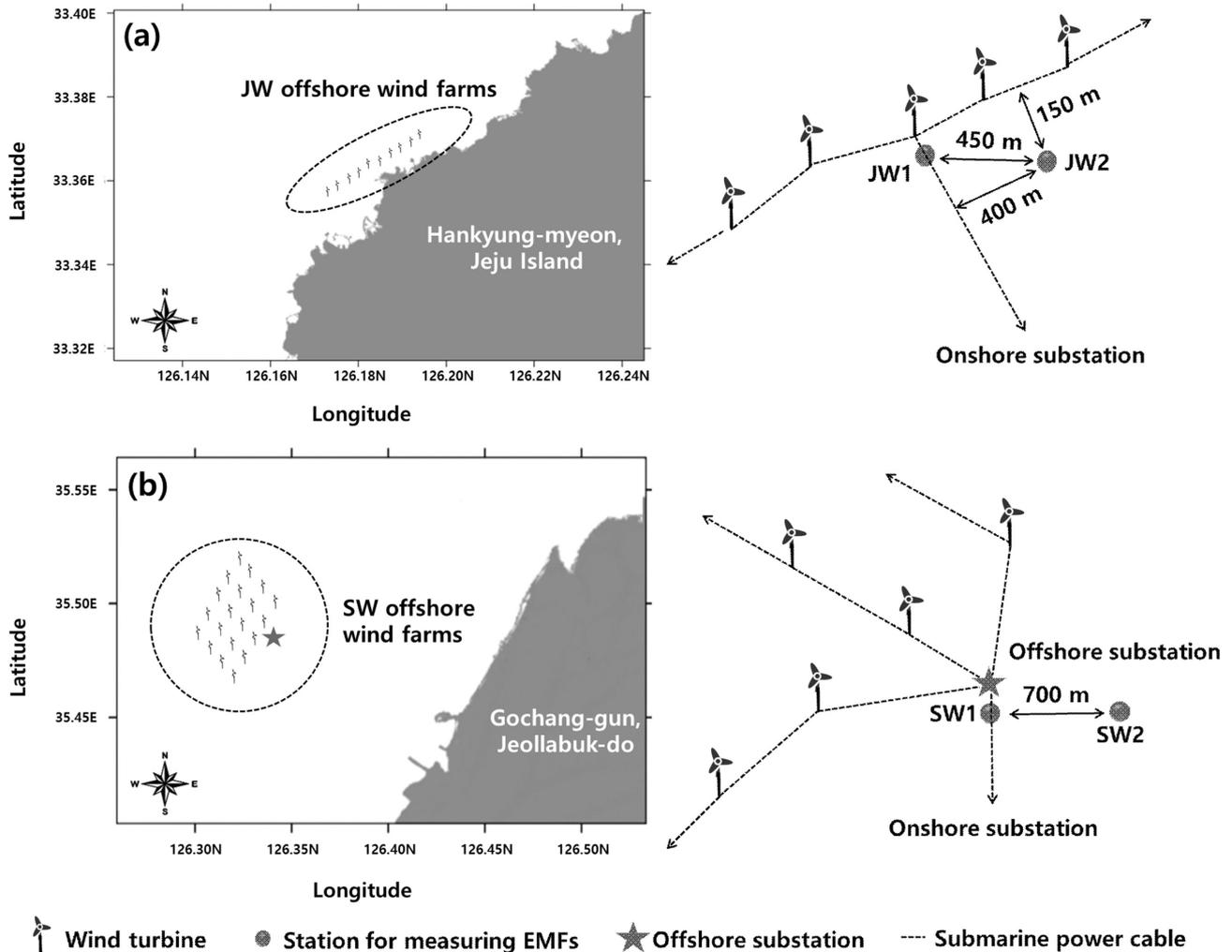


Fig. 1. Location of electromagnetic fields (EMFs) strength measurement in the offshore wind farms (a) in the sea near Hankyung-myeon, Jeju Island (JW1 and 2, solid circle), and (b) in the southwestern sea near Gochang-gun, Jeollabuk-do (SW1 and 2, solid circle).

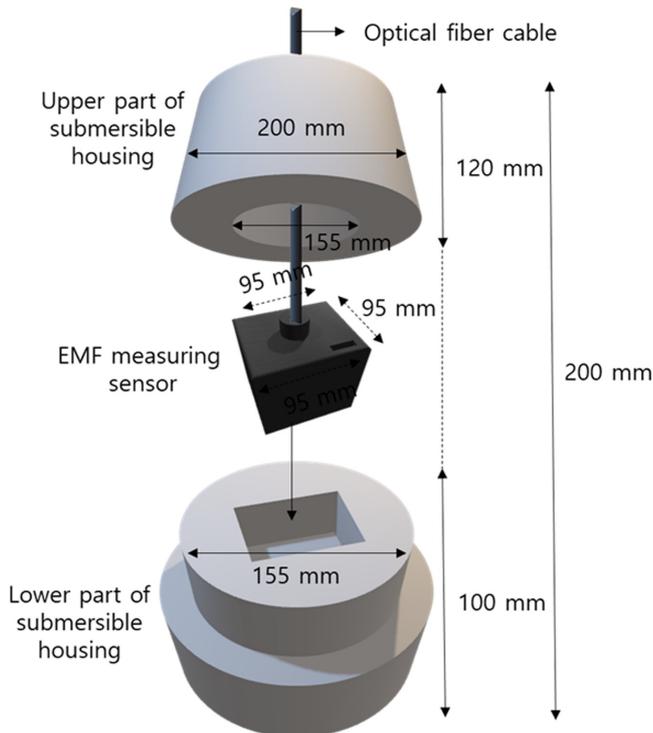
Table 1. Overview of the facilities of the offshore wind farms for this study

| Site Location | No. of Wind Turbine | Capacity (MW) | Transmission type of electricity | Type of Submarine power cable | Voltage of electric cable |
|---|---------------------|---------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Hankyung-myeon, Jeju Island | 10 | 30 | Alternating Current (AC) | XLPE 3 core | 154 kV |
| Southwestern sea near Gochang-gun, Jeollabuk-do | 20 | 60 | Alternating Current (AC) | XLPE 3 core | 154 kV/22.9 kV |

이블 직상부에서 방출되는 전자기장의 세기와 비교하였다(Fig. 1). 배경수준의 전자기장에 대한 측정은 제주의 경우 해저 전력케이블 측정지점(JW1)으로부터 약 450 m 떨어진 지점(JW2)이었으며, 전북 풍력단지에서는 해저 전력케이블 측정지점(SW1)으로부터 약 700 m 떨어진 지점(SW2)이었다(Fig. 1). 수중환경에서 전자기장의 측정은 제주 풍력단지(JW1, JW2)에서는 2021년 10월에, 전북 풍력단지(SW1, SW2)에서는 2022년 8월에 각 1회씩 수행하였다.

2.2 전자기장 측정을 위한 센서 및 방수하우징(submersible housing)

수중환경에서 해저 전력케이블로부터 방출되는 전자기장의 측정을 위해 사용된 센서는 EHP-50F(NARDA-STTS, Germany)로 대기환경에서 전자기장을 측정하는 장비이다. 이 장비를 수중환경에서 활용하기 위해 별도의 방수하우징을 설계, 제작하였다(Fig. 2). 센서는 광대역 주파수 범위(1 Hz ~ 400 kHz)에서 등방성(3축 방향)의 전기장 및 자기장을 측정할 수 있다. 자기장에 대한 분해능은 주파수 범위에 관계없이 0.1 μ T 수준이고, 측정범위는 30 nT~10 mT까지 가능

**Fig. 2.** Designing a submersible (waterproof) housing for the EMFs sensor.

하다. 센서는 휴대용 디지털 신호 처리기인 NBM-550(NARDA-STTS, Germany)과 광케이블로 연결하여 수치를 즉각적으로 확인하거나, 주파수 스펙트럼에 따른 변화양상을 살펴보고 저장할 수 있다.

수중환경에서 전자기장의 측정을 위해 제작한 방수하우징은 음성 부력을 가져 수중에서 가라앉을 수 있도록 비중 1.42의 플라스틱 재질인 아세탈을 이용하여 제작하였다. 아세탈 소재는 공학용 열가소성 수지로서 내충격성, 치수안정성 등 다양한 이점이 있어 수중에서 운용되는 센서류의 보호 및 방수를 위한 널리 사용된다. 아세탈의 표면 저항값(surface resistivity)은 10^{15} ~ 10^{17} Ω -sq 정도로 저주파 대역에서의 낮은 유전율과 유전손실을 보이는 특성을 갖는다(Margolis[2006]). 따라서 아세탈이 전자기장을 흡수하여 열로 전환하는 에너지 손실이 거의 없으며, 전원 주파수 60 Hz에서 전자기장을 측정할 때, 왜곡이나 신호감쇄 문제가 발생할 가능성이 매우 낮을 것으로 판단하였다. 아세탈을 이용한 방수하우징의 설계는 측정을 교란할 수 있는 불필요한 차폐와 간섭이 발생하지 않도록 두께와 형태가 고려되었다. 방수하우징을 결합한 상태에서 전자기장 측정값이 유의한 차이가 있는지를 확인하기 위하여 전자기장을 발생시키는 헬름홀츠 코일(helmholtz coil)을 이용하여 전자기장의 세기를 비교하였다. 전자기장의 세기는 방수하우징 결합 전과 후에 각각 10회 반복 측정하였으며, 평균은 각각 51.65, 51.66 μ T 이었으며, 대응표본 t검정하였을 때 유의한 차이가 없었다($p=0.852$).

방수하우징의 형태는 평평한 타원형으로 조류에 의한 움직임을 방지하여 안전성을 제공하고, 측정방향을 고정시키는 역할을 한다. 센서와 연결된 광케이블 보호를 위한 튜빙(tubing)은 폴리우레탄 재질로 제작하였으며, 내수성이 뛰어나고 50 m 수심에서 발생하는 수압에도 충분히 견딜 수 있다(Fig. 2). 센서는 방수하우징 내부에 결합되고, 50 m 길이의 광케이블이 연결되어 실시간으로 전자기장의 세기를 확인할 수 있도록 하였다. 센서는 전기장과 자기장을 구분하여 측정하고, 전기장의 단위는 V/m으로 단위 길이당 전압(Volt, V)이며, 자기장의 단위는 A/m으로 단위 길이당 전류(Ampere, A)이다. 자기장은 자속밀도 단위인 테슬라(Tesla, T) 또는 가우스(Gaus, G)로 사용할 수 있으며, 10^4 G가 1 T로 환산된다. 본 연구에서는 전자기장(EMFs) 세기의 단위로 테슬라(T)를 사용하였다.

2.3 수중환경에서 전자기장의 감쇄 평가를 위한 측정 및 모델링

해상풍력발전단지의 해저에 포설된 전력케이블에서 방출되는 전자기장을 측정하기 위해 전문잠수부를 활용하였다. 잠수부가 해저에 포설된 전력케이블의 직상부에 도달하면, 수중청음기(Hydrophone, Teledyne RESON, Denmark)를 사용하여 미리 정한 신호를 선박에 대기 중인 연구원에게 보내고, 그 시점부터 선박 위에서 광케이블로 연

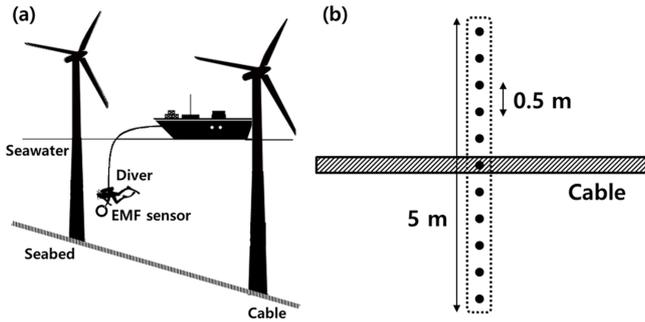


Fig. 3. (a) Conceptual diagram for measuring the strength of EMFs in underwater environment, and (b) points for measuring over distance from submarine power cables.

결된 휴대용 디지털 신호 처리기인 NBM-550(NARDA-STTS, Germany)을 이용해 측정을 시작하였다. 수중에서 대기 중인 잠수부는 전자기장 측정 센서가 결합된 방수하우징의 위치를 이동할 때마다 수중청음기를 이용하여 신호를 반복적으로 보내는 방식으로 포설된 케이블을 기준으로 좌·우 0.5 m 간격으로 각각 10회씩 반복해서 측정하였다(Fig. 3). 환경 중 배경수준의 전자기장 측정은 해저 전력케이블에서 방출되는 전자기장 측정과 달리 케이블이 포설되어 있지 않은 곳이므로 센서가 결합된 방수하우징을 해저면까지 내려 해저 전력케이블의 직상부에서 측정하는 방식과 동일하게 각각 10회씩 측정하였다.

전자기장 측정을 위한 주파수의 범위는 15 Hz에서 100 Hz까지 설정하여 측정하였다. 측정된 자료는 전자기장 측정 센서 제조사에서 제공하는 NBM-TS(v. 4.2.0) 소프트웨어를 사용하여 분석하였다. 전력케이블을 기준으로 좌, 우로 멀어질수록 감쇄되는 전자기장의 세기를 모의하기 위하여 Maxwell 프로그램(Ansys Inc. USA)을 이용하였다. Maxwell 프로그램은 전기모터 등과 같은 전력기기에서 발생하는 전자기장, 열, 응력, 진동 등을 모의할 수 있다. 또한 직류(DC) 또는 교류(AC)가 인가되는 모델에서 전기장 또는 자기장을 2D, 3D 방식의 전계 해석이 가능하며, 자유공간을 전파하는 전자파에 대한 파동방정식인 Maxwell 방정식을 활용하여 공간을 진행하는 전자파의 전파속도, 에너지 등에 대해서도 모의할 수 있는 프로그램이다.

2.4 통계처리

측정결과에서 그룹 간 유의성과 거리별 전자기장 변화의 통계적 유의한 차이를 확인하기 위해 SPSS(ver. 18.0, IBM, USA)를 이용하여 분석하였으며, 유의 수준은 $p < 0.05$ 에서 대응표본 t검정(paired t-test)을 통해 검증하였다.

3. 결 과

3.1 해저에 포설된 전력케이블에서 방출되는 전자기장의 세기 제주 환경면과 전북 고창군 인근 서남해 해역에 조성된 해상풍

력단지의 해저에 포설된 전력케이블의 시작점 인근 직상부에서 전자기장의 세기를 측정하였다(Fig. 1). 전자기장의 세기는 15~100 Hz 주파수 범위에서 측정하였으며, 두 곳 모두 60 Hz에서 최고값이 측정되었다. 측정된 최고값은 제주 환경면 인근 단지에서는 $0.0378 \pm 0.0039 \mu\text{T}$ 였으며, 전북 고창군 인근 서남해 해역의 단지에서는 $2.4168 \pm 0.0478 \mu\text{T}$ 이었다. 두 지역 간 전자기장 세기의 차이는 약 63.6배 였으며, 이는 전력케이블 해저 포설 방식과 측정 당시 전력케이블에 흐르는 전류 세기의 차이에 기인한 것으로 추정된다. 환경 중 배경수준의 전자기장 세기를 측정하기 위해 제주 환경면과 전북 고창군 인근 서남해 해역에서 측정한 위치로부터 각각 450 m와 700 m를 이격하여 전력케이블이 포설되어 있지 않은 해저 퇴적층 위에서 측정한 전자기장의 세기는 각각 $0.0006 \pm 0.0001 \mu\text{T}$ 와 $0.0002 \pm 0.0001 \mu\text{T}$ 이었다. 해저 전력케이블의 직상부에서 측정한 전자기장 세기와 비교하면 매우 낮은 수준으로 확인하였다(Fig. 4).

3.2 거리에 따른 전자기장 세기의 감쇄

해저 전력케이블에서 환경으로 방출되는 전자기장은 발생원으로부터 거리가 멀어질수록 감쇄되는 특성을 보인다. 따라서 해저에 포설되어 있는 전력케이블로부터 좌우로 0.5 m의 간격으로 수평거리 최대 2.5 m까지 주파수 60 Hz에서 전자기장 세기를 각각 10회씩

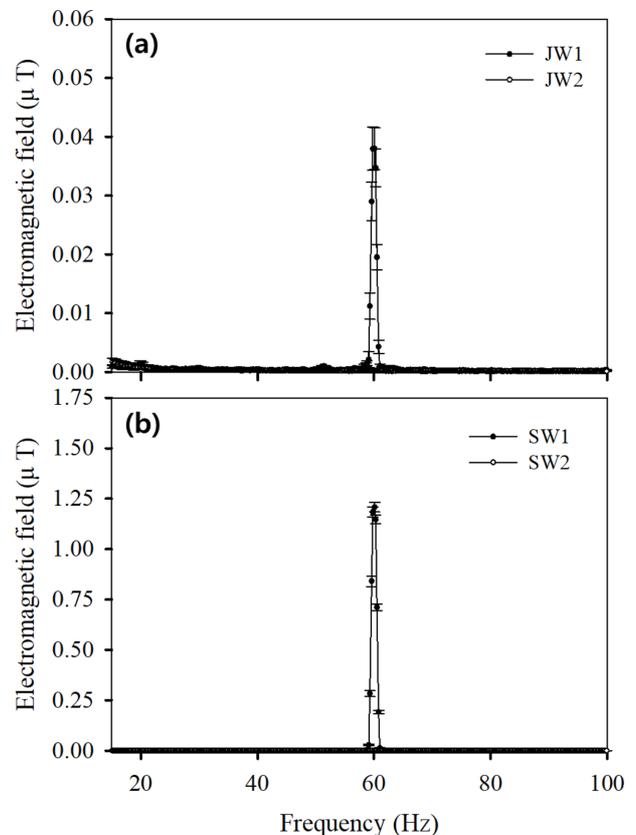


Fig. 4. Average strength (μT) of EMFs (frequency range, 15~100 Hz) (a) in the sea near Hankyung-myeon, Jeju Island, and (b) in the southwestern sea near Gochang-gun, Jeollabuk-do.

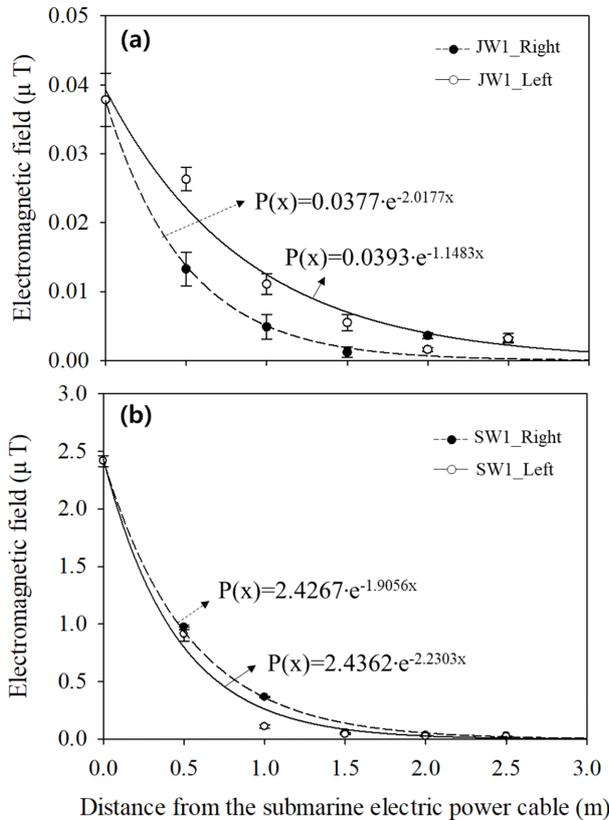


Fig. 5. Comparison of EMFs (μT) attenuation according to distance (m) on the right and left sides of submarine power cables (a) in the sea near Hankyung-myeon, Jeju Island, and (b) in the southwestern sea near Gochang-gun, Jeollabuk-do.

반복 측정하였다. 거리에 따른 전자기장 세기를 측정된 결과, 왼쪽과 오른쪽이 동일한 비율로 감소되지는 않았다(Fig. 5와 Table 2). 제주 환경면 인근 단지의 경우, 해저 전력케이블 직상부 중심의 전자기장 세기를 100%로 기준했을 때, 0.5 m 이격된 거리에서 좌측의 전자기장 세기는 69.5%로 줄어든 반면, 우측은 35.1% 수준으로 우측이 약 2배 정도 더 많이 감소되었다. 전반적으로 좌측의 감소 정도가 우측보다 적었으나, 2.5 m 정도 이격하여 측정된 결과는 좌측이 8.5%, 우측이 8.0% 수준으로 유사한 수준을 보였다. 거리에 따른 전자기장 세기의 감소에 대한 측정 결과를 멱함수로 도시하면, 좌측의 감소계수(attenuation coefficient)는 -1.1483 , 우측은 -2.0177 로 우측이 약 1.8배 정도 빠르게 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 전북 고창군 인근 서남해 해역의 단지의 경우, 제주 환경면 인근 단지와 비교하여 상대적으로 더 빠른 속도로 전자기장이

Table 2. Attenuation rate (%) of EMFs at 60 Hz according to the distance (m) to the left and right sides from center of submarine power cables

| Distance (m) from center of submarine power cable | Attenuation level (%) | |
|---|-------------------------|--------------------------|
| | JW1 of Jeju Island site | SW1 of Jeollabuk-do site |
| Left-hand side | 2.5 | 0.9 |
| | 2.0 | 1.0 |
| | 1.5 | 1.7 |
| | 1 | 4.5 |
| | 0.5 | 37.8 |
| Center | 0 | 100 |
| Right-hand side | 0.5 | 40.3 |
| | 1 | 15.1 |
| | 1.5 | 2.3 |
| | 2 | 1.4 |
| | 2.5 | 1.2 |

감쇄하였다. 해저케이블에서 0.5 m 이격하여 측정된 결과, 중심부와 비교하여 약 60% 정도 감소하여 좌측은 37.8%, 우측은 40.3% 수준이었다. 감소정도를 멱함수를 이용하여 도시하면, 좌측의 감소계수는 -2.2303 , 우측은 -1.9056 으로 약 1.2배 정도의 차이를 보였다. 전북 고창군 인근 서남해 해역의 단지에서 측정된 좌·우측 거리에 따른 전자기장 감소계수는 제주 환경면 인근 단지의 우측과 유사한 수준이었다(Fig. 5).

해저 전력케이블을 중심으로 좌·우측 전자기장 감소 정도를 반복 측정하여 거리에 따른 유의한 차이를 분석한 결과, 거리가 가까울수록 좌측과 우측 측정값 간에 통계적으로 유의한 차이가 있었지만, 2.5 m 거리에서는 유의한 차이가 없었다(Table 3). 즉, 거리에 따른 전자기장 세기의 감소 정도는 해저 전력케이블의 좌우 위치에 따라 차이가 있었으나, 일정 거리 이상이 멀어지게 되면 위치에 상관없이 일정한 수준까지 감소하였다. 따라서 전자기장 감소 속도의 차이는 해상풍력터빈에서 생산되는 전력이 해저 전력케이블을 통해 송전되는 전류의 세기와 포설 해역의 퇴적환경 차이에 따른 것으로 판단된다.

3.3 거리에 따른 전자기장 세기의 감소에 대한 모델 예측

해저 전력케이블에서 방출되는 전자기장이 케이블의 중심부로부터 거리가 멀어짐에 따라 감소되는 양상을 MAXWELL 모델을 이용하여 모의하였다. 거리에 따른 전자기장 세기의 감소 모의를 위해 포설된 전력케이블의 유형, 예상 전류량, 주파수, 포설 깊이 등

Table 3. Statistical results of EMFs attenuation level between left- and right-hand sides of submarine power cables

| Distance (m) | No. of measurement on each sides (n) | df | t | p |
|--------------|--------------------------------------|----|---------|---------|
| 0.5 | 10 | 18 | 13.934 | < 0.001 |
| 1 | 10 | 18 | 8.357 | < 0.001 |
| 1.5 | 10 | 18 | 9.395 | < 0.001 |
| 2.0 | 10 | 18 | -12.740 | < 0.001 |
| 2.5 | 10 | 18 | 0.648 | 0.525 |

Table 4. Results of EMFs (μT) attenuation modeling according to burial characteristics of submarine power cable in the sea near Hankyung-myeon, Jeju Island

| Distance (m) | Case_1 of EMFs (μT) | Attenuation level (%) | Case_2 of EMFs (μT) | Attenuation level (%) |
|--------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 0 | 2.75 | - | 2.61 | - |
| 1 | 2.39 | 13.1 | 2.29 | 12.3 |
| 2 | 1.73 | 37.1 | 1.67 | 36.0 |
| 3 | 1.18 | 57.1 | 1.16 | 55.6 |
| 4 | 0.82 | 70.2 | 0.81 | 69.0 |
| 5 | 0.59 | 78.5 | 0.59 | 77.4 |
| 6 | 0.44 | 84.0 | 0.44 | 83.1 |
| 7 | 0.34 | 87.6 | 0.34 | 87.0 |
| 8 | 0.27 | 90.2 | 0.27 | 89.7 |
| 9 | 0.22 | 92.0 | 0.21 | 92.0 |
| 10 | 0.18 | 93.5 | 0.18 | 93.1 |
| 11 | 0.15 | 94.5 | 0.15 | 94.3 |
| 12 | 0.13 | 95.3 | 0.13 | 95.0 |
| 13 | 0.11 | 96.0 | 0.11 | 95.8 |
| 14 | 0.09 | 96.7 | 0.09 | 96.6 |
| 15 | 0.08 | 97.1 | 0.08 | 96.9 |

에 대한 정보가 필요하다. 해당 정보는 제주 한경면 인근 해상풍력 단지를 대상으로 수집하였으며, 필요한 정보가 확인되지 않은 경우에는 모델의 초기값을 이용하였다. 또한 모델링에 앞서 HVAC 케이블의 실제 크기 및 구성을 고려한 설계와 케이블을 기준으로 포설 깊이 및 수심을 고려한 종합 예측 모델 설계를 진행하였다. 전력케이블은 XLPE 케이블의 154 kV, 3-core, 해저면에서의 전력케이블(Case_1)과 해저면에서 0.5 m 깊이로 포설(Case_2)되어 있는 2가지의 경우를 가정하여 거리에 따른 전자기장 감쇄 정도를 모의하였다. 모의 결과, 전력케이블로부터 거리가 멀어짐에 따라 전자기장이 감쇄되는 정도는 3 m 이상부터 50% 이상 낮아지는 것으로 나타났다(Table 4). 전자기장 세기가 50% 정도 감쇄되는 거리는 2.5~3 m 정도였으며, 최대 15 m 정도 거리가 이격되는 경우 약

97% 정도까지 감쇄되는 것으로 예측되었다. 감쇄되는 전자기장 세기를 멱함수를 이용하여 분석한 결과, Case 1과 Case 2의 감쇄계수는 각각 -0.2911 과 -0.2835 로 유사한 수준이었다. 제주 인근 해역에서 실측한 결과와 비교하면 약 7배 정도 느린 속도로 감쇄하는 것으로 예측되었다(Fig. 6).

4. 고찰

해상에서의 풍력발전은 육상과 달리 발전단지의 조성과 운영 등이 상대적으로 용이하고, 바람이 균일하고 풍속이 빨라 에너지 생산 효율이 높다는 장점이 있다. 이러한 이유로 최근 국내 연안 해역 여러 곳에서 해상풍력단지의 조성이 활발히 추진되고 있다(Jeong[2022]; Taveira-Pinto *et al.*[2020]). 해상풍력발전을 통해 생산된 전력을 육지로 송전하기 위해 해양 저층에 포설된 전력케이블에서 방출되는 인위적인 전자기장은 전기 또는 자기에 민감한 생물종에 의해 감지될 수 있으며, 이러한 생물종에는 생태적으로 또는 경제적으로 중요한 수산생물이 포함되어 있다(Walker *et al.*[2003]; Meyer *et al.*[2005]). 인위적으로 발생된 전자기장은 전기 또는 자기에 민감한 생물이 활용하는 지구자기장을 교란하여 행동이상(behavioral abnormality) 등과 같은 생태 반응을 초래할 수 있음이 밝혀졌다(Gill and Kimber[2005]). 제주와 전북 해역의 해상풍력단지에 매설된 해저 전력케이블에서 측정된 전자기장 세기는 최고값이 $0.0378 \sim 2.4168 \mu\text{T}$ 수준으로 전자기장을 감지하는 생물의 민감도와 비교한다면 상당한 수준의 세기로 판단된다(Fig. 4). 제주해역의 경우, 흔하게 출현하는 두툽상어류(Scyliorhinidae), 봉장어류(Congridae) 등, 서남해 해역에서는 홍어류(Rajidae) 등과 같은 연골어류가 영향을 받을 수 있을 것으로 예측된다(Kim *et al.*[2024]).

전자기장에 민감한 해양생물의 전자기장 감지는 자철석을 기반

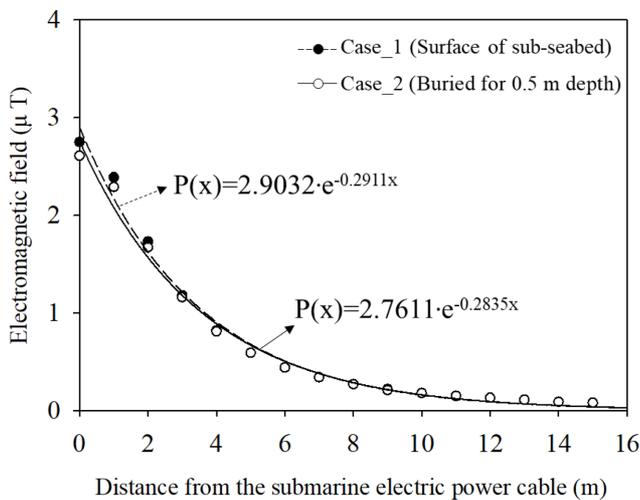


Fig. 6. Modeling results for EMFs (μT) attenuation with distance (m) in submarine power cables.

으로 한 감각 시스템을 이용하는 것으로 알려져 있다(Nordmann *et al.*[2017]). 연골어류의 경우 로렌치니 앰플라(Ampullae of Lorenzini)라는 감각기관이 몸의 중심부터 피부까지 세포막을 가로질러 배열되어 이를 이용해 매우 약한 전기장의 전위차를 감지할 수 있다(Gim *et al.*[2021]). 상어류에는 머리 부분에, 홍어와 가오리류는 머리와 가슴지느러미에 이와 유사한 감각기관이 분포되어 있는 것으로 알려져 있다(Kalmijn [1966]). 로렌치니 앰플라(Ampullae of Lorenzini)라는 감각기관이 전자기장을 발생시키는 발생원의 방향과 공간적인 위치를 감지할 수 있는 것은 불균형한 자극에 의한 것이다(Adair *et al.*[1998]; Collin and Whitehead[2004]). 전기장에 민감한 생물의 경우, 0.5 $\mu\text{V}/\text{m}$ 정도의 낮은 세기를 감지할 수 있으며, 먹이 탐색 및 이동을 위해 이러한 감각기능을 이용하는 것으로 알려져 있다(Adair *et al.*[1998]). 상어류 또는 가오리류와 같은 연골어류 중 일부는 먹이생물의 호흡 또는 움직이는 과정에서 사용되는 근육과 신경에서 나오는 매우 약한 전기장을 감지할 수 있다(Gill and Kimber [2005]). 전기장을 감지할 수 있는 생물은 매우 미약한 변화를 감지하여 먹이와 포식자를 식별하거나 국지적인 진행 방향의 설정, 개체 간의 의사소통을 통한 짝의 탐색 등 다양한 생태 반응을 보인다(Tricas and Sinseros[2004]). 전기에 대해 민감한 생물의 경우, 전기장 뿐만 아니라 자기장 또한 민감하게 감지할 수 있으며, 전기장과 자기장 모두 감지할 수 있는 감각기관을 가진 생물 또한 있는 것으로 알려져 있다(Anderson *et al.*[2017]). 해양생물이 전자기장을 감지할 수 있는 감각기관의 존재 여부와 작동하는 상세한 기작에 대한 이해는 부족하지만, 생물의 생태에 있어서 이러한 감각기관의 역할은 매우 중요할 것이다(Nordmann *et al.*[2017]). 연골어류는 0.5~1000 $\mu\text{V}/\text{m}$ 범위의 전기장에 민감도를 가지며, 전기장 발생원을 탐색하는 행동을 보이기도 한다. 일반적으로 연골어류는 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 이상의 전기장에 대해 회피 행동을 보이며(Kalmijn[1982]; Gill and Taylor[2002]), 전기장에 대한 민감도 임계치의 하한은 연구에 따라 차이가 있다. 예를 들어, Gill and Taylor(2002)은 0.5 $\mu\text{V}/\text{m}$ 를 임계치로 보고한 반면, Kalmijn[1982]의 연구에서는 0.005 $\mu\text{V}/\text{m}$ 로 더욱 민감하다고 보고하였다. 상어류는 일반적으로 1/8~8 Hz 주파수 사이의 전자기장을 감지할 수 있는 감각기관을 가지고 있으며,

이를 통해 방향 탐색이 가능하다고 알려져 있다(Kalmijn[2000]). 또한, 지구자기장을 이용해 방향 탐색과 이동 등이 가능하다는 연구도 있다(Walker *et al.*[2003]). 일부 연구에 따르면, 상어와 유사한 주파수 범위에서 가오리류(*Raja clavata*)는 0.01 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전압 구배에서 5 Hz의 균일한 구형파장에 노출되었을 때 심장 박동수가 달라지는 생물 반응을 보였으며, 1 $\mu\text{V}/\text{m}$ 의 전압 구배에서는 호흡 리듬에도 영향을 받는다고 한다. 같은 연구에서는 5 Hz 구형파의 40 $\mu\text{V}/\text{m}$ 수준일 때 심장 박동이 느려지는 현상도 관찰되었다(Kalmijn[1982]). 감각류인 가재와 바다거북 등 일부 해양생물은 탐색과 위치 확인을 위해 지구자기장을 활용할 수 있는 것으로 알려져 있으며(Lohmann *et al.*[2001]; Boles and Lohmann[2003]), 또한 홍어, 가오리, 돛발상어류(dogfish) 등은 먹이를 찾는 주요 감각으로 전기장을 활용한다고 한다.

환경 중 자기장의 분포를 감지하여 세기, 방향 및 기울기(경사) 등의 미세한 변화를 감지할 수 있는 자성(magnetism)에 민감한 생물이 있으며(Nordmann *et al.*[2017]), 이러한 생물들은 서식지로의 복귀를 위한 방향 탐색 및 이동을 가능하게 하는 자기 나침반 또는 자기 지도를 사용할 수 있는 것으로 보인다(Lohmann *et al.*[2008]). 전자기장에 민감한 생물의 방향 및 먹이 탐색을 위해서는 퇴적물에 분포한 자철석 성분이 중요한 역할을 한다고 알려져 있다(Boles and Lohmann[2003]; Gill *et al.*[2014]). 지구자기장과 같은 전자기장을 감지할 수 있는 해양생물로 거북이(Light *et al.*[1993]), 연어류(Mann *et al.*[1988]), 연골어류(Walker *et al.*[2003]; Meyer *et al.*[2005]), 고래(Klinowska[1985]; Kirschvink *et al.*[1986]) 등이 있으며, 이들이 전자기장을 이용하여 보여주는 독특한 생태적 행동이 있다. 먹이의 위치, 해류의 방향과 속도를 감지하는데 전자기장을 이용하는 생물들은 감지하지 못하는 생물들과 비교하여 인위적으로 발생하는 전자기장에 생태 또는 생리 특성이 교란될 가능성이 높을 것이다(Table 5). 해양생물이 전자기장(EMFs)을 감지하는 능력은 배아 또는 유생발달 시기에 형성되는 것으로 알려져 있다(Formicki *et al.*[2021]). 연구에 따르면, 전자기장은 성체와 어류의 배아 발달을 지연시킬 수 있으며, 또 다른 연구에서는 전자기장이 생물의 순환계, 가스 교환 및 배아 발달 등 세포 발달에 영향을 미

Table 5. Summary of studies on the biological, physiological and behavioral effects of EMFs emitted from the submarine power cables

| Organisms | Strength of EMFs for exposure | Effect | Reference |
|--|-------------------------------|---|--------------------------------|
| <i>Anguila japonica</i> (Japanese eel) | ~12.7 to 192.5 μT | - significantly slowed heartbeat | Nishi <i>et al.</i> [2004] |
| <i>Mytilus edulis</i> (Blue mussel) | | | |
| <i>Crangon crangon</i> (North Sea prawn) | | | |
| <i>Rhithropanopeus harrisi</i> (Round crab) | 3.7 mT | - no effect on survival rates | Bochert and Zettler [2004] |
| <i>Saduria entomon</i> (Glacial relict isopod) | | | |
| <i>Plathichthys flesus</i> (Flounder) | | | |
| <i>Leucoraja erinacea</i> (Little skate) | | - increasing exploratory and/or area restricted foraging behaviour | |
| <i>Homarus americanus</i> (American lobster) | 18.7 ~ 20.7 μT | - increasing distance travelled, large turns, and time spent closer to the seabed | Hutchison <i>et al.</i> [2020] |
| | 250 μT | - minimal physiological and behavioral changes | |
| <i>Cancer pagurus</i> (Edible crab) | 500 and 1000 μT | - significantly reduced in time spent roaming - increasing stress-related parameters | Scott <i>et al.</i> [2021] |

치는 것으로 보고되었다(Krzystolik *et al.*[2024]). 성계를 대상으로 한 연구에서는 10 μ T-0.1 T 수준의 정적(static) 자기장이 성계의 초기 배아 발생 과정에서 체세포 분열주기를 지연시키거나, 낭배의 형성에 영향을 미치는 것을 확인하였다(Levin and Ernst[1997]). 따개비 유생을 이용한 연구에서는 고주파 직류(DC) 전자기장을 방출하는 두 전극 사이를 통과시키면 유생에 심각한 세포 손상을 초래하고, 유생의 더듬이를 수축시켜 정착을 방해할 수 있다는 연구 결과가 있다(Leya *et al.*[1999]). Formicki and Perkowski[1998]는 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)의 배아를 대상으로 한 연구에서 지구자기장과 유사한 세기(5와 10 μ T)의 인위적으로 발생시킨 전자기장이 발달 단계의 배아에게 산소 흡수를 증가시키는 등 호흡 미치는 영향이 형태 형성 과정에서 더욱 두드러진다는 것을 확인하였다. 또한, 갈색 송어(*Salmo trutta*)를 낮은 수준의 전자기장(0~13 mG)에 노출한 실험에서는 배아 발달이 지연되는 것으로 나타났다. 무지개 송어와 갈색 송어에 대해 전자기장의 영향을 평가한 다른 연구에서 배아시기에 이미 전자기장을 이용한 방향 탐색 감각이 활성화되는 것을 확인한 연구가 있었다(Tanski *et al.*[2005]).

5. 결 론

해상풍력발전에서 생산된 전기를 송전하기 위해 해저에 포설된 전력케이블에서 발생하는 인위적인 전자기장의 세기를 제주와 전북 두 곳에서 측정하고, 거리에 따른 감쇄 예측을 위한 모델링을 수행하였다. 전자기장 세기에 대한 실측값과 모델링 결과 모두 전력케이블로부터 거리가 멀어질수록 전자기장의 세기가 감소하는 경향을 확인하였으며, 전자기장의 세기는 최고값이 0.0378~2.4168 μ T 범위였다.

장기적으로 대규모 해상풍력발전단지의 조성으로 대용량 케이블의 사용 및 장거리 송전을 위한 상당한 길이의 케이블이 해저에 매설될 것이다. 이에 따라 매설된 해저 전력케이블의 길이와 면적은 현재보다 수 백배 증가할 것이며, 길이와 면적에 비례하는 상당한 수준의 인위적인 전자기장 방출이 우려된다. 특정 위치에서 전체 전자기장의 세기는 송전 시스템(AC/DC), 전력케이블을 통해 송전되는 전력, 케이블 특성 및 설계, 매설 깊이, 환경 요인 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 전자기장의 잠재적 영향을 적절하게 평가하려면, 전자기장의 세기와 서식생물의 생태계 특성이 함께 고려되어야 한다. 일부 해양생물은 전자기장의 작은 변화도 감지할 수 있을 정도로 민감하기 때문에 전자기장 방출 저감을 위한 기술적 방안이 반드시 방출된 전자기장의 잠재적 효과도 감소시킬 수 있다는 것을 의미하지는 않는다.

본 연구의 결과는 해상풍력 건설 예정지의 배경 전자기장을 측정하여 사업 시행 전·후에 따른 전자기장 세기 변화를 추적하는데 활용할 수 있으며, 해역별 저서 퇴적환경 특성에 따른 전자기장의 방출 및 영향을 예측하는데 활용될 수 있을 것이다. 인위적인 전자기장 세기에 대한 정확한 측정은 해양생물의 노출량 산정과 생물/생태계에 대한 환경위해성평가, 이를 기반으로 한 환경기준의 마련 등에 매우 중요하다.

후 기

본 연구는 2024년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과학기술기반 해양환경영향평가 기술개발, 20210427)과 한국에너지공단(해상풍력 생태계 영향 조사 및 분석 기반 구축, 21243174000)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.
- [3] Baker, C.V.H., Modrell, M.S., and Gillis, J.A., 2013, The evolution and development of vertebrate lateral line electroreceptors, *J. Exp. Biol.*, 216, 2515-2522.
- [4] Balmori A., 2015, Anthropogenic radio-frequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation, *Science of the Total Environment*, 518, 58-60.
- [5] Bochert, R. and Zettler, M.L., 2004. Long-term exposure of several marine benthic animals to static magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 25, 498-502.
- [6] Bochert, R. and Zettler, M.L., 2006, Effect of electromagnetic fields on marine organisms. In: Köller, J., Köppel, J. and Peters, W. (Eds.) *Offshore Wind Energy, Research on Environmental Impacts*. Springer, Germany, 223-234.
- [7] Boehlert G.W. and Gill A., 2010, Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis, *Oceanography*, 23(2), 68-81.
- [8] Boles, L.C. and Lohmann, K.J., 2003, True navigation and magnetic maps in spiny lobsters, *Nature*, 421, 60-63.
- [9] Collin, S. and Whitehead, D., 2004, The functional roles of passive electroreception in non-electric fishes, *Animal Biology*, 54(1), 1-25.
- [10] Collin, S.P., Kempster, R.M., and Yopak, K.E., 2015, How elasmobranchs sense their environment, Vol. 34, Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801289-5.00002-X>
- [11] Drewitt, A.L. and Langston, R.H.W., 2006, Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148, 29-42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>. Mar.
- [12] Formicki, K. and Perkowski, P., 1998, The effect of magnetic field on the gas exchange in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* embryos (Salmonidae). *Ital. J. Zool.* 65, 475-477.
- [13] Formicki, K., Korzelecka-Orkisz, A., and Tański, A., 2021, The Effect of an Anthropogenic Magnetic Field on the Early Developmental Stages of Fishes-A Review. *Int. J. Mol. Sci.*, 22(3), 1210. <https://doi.org/10.3390/ijms22031210>.
- [14] Furness, R.W., Wade, H.M., and Masden, E.A., 2013, Assessing

- vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *J. Environ. Manag.* 119, 56-66.
- [15] 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.
- [16] Gill A.B. and Taylor, H., 2002, The potential effects of electromagnetic field generated by cabling between offshore wind turbines upon elasmobranch fishes, Report to the Countryside Council for Wales (CCW Contract Science Report No 488).
- [17] Gill, A.B. and Desender, M., 2020, Risk to Animals from Electromagnetic Fields Emitted by Electric Cables and Marine Renewable Energy Devices. In: Copping, A.E.; Hemery, L.G. (Eds.), OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. Report for Ocean Energy Systems (OES), p. 86-103.
- [18] Gill, A.B., 2005, Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. *Journal of applied ecology*, 605-615.
- [19] 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.
- [20] Gim, B.-M., Kim, S.J., Moon, S.-D., Lee, J.-S., and Choi, T.S., 2021, Effect of electromagnetic fields on marine organisms and effect assessment based on scientific grounds. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy*, 24(4), 282-299.
- [21] Hahm, T., 2016, Consideration of environmental impact assessment of onshore wind farms-Focusing on the cases of Korea and Japan. Thesis for the Master's Degree, 106pp.
- [22] Hermans, A. and Schilt, B., 2022, Current state of knowledge electromagnetic fields. Utrecht, the Netherlands.
- [23] Hodson, R.B., 2020, Magnetoreception in the short-tailed stingray, *Dasyatis brevicaudata*. University of Auckland, NZ.
- [24] Hutchison, Z.L., Gill, A.B., Sigray, P., He, H., and King, J.W., 2020, Anthropogenic electromagnetic fields (EMFs) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species, *Science Reports*, 10, 4219, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>
- [25] Jeong, E., 2022, Analysis of environmental sustainability in South Korean inland windfarms. *J. Environ. Impact Assess.* 31(1), 47-62. <https://doi.org/10.14249/eia.2022.31.1.47>
- [26] Kalmijn A.J., 1982, Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes, *Science*, 218, 916-918.
- [27] Kalmijn, A.J., 1966, Electro-perception in Sharks and Rays. *Nature* 212, 1232-1233. <https://doi.org/10.1038/2121232b0>
- [28] Kalmijn, A.J., 2000, Detection and processing of electromagnetic and near-field acoustic signals in elasmobranch fishes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 355(1401), 1135-1141.
- [29] Kim, J.-Y., Eom, S.-M., Gim, B.-M., and Choi, T.S., 2024, Optimal selection of fish assemblage survey method through comparing the result. *J. Korean Soc. Fish. Ocean Technol.*, 60, 128-141.
- [30] Kirschvink, J.L., Dizon, A.E., and Westphal, J.A., 1986, Evidence from Strandings for Geomagnetic Sensitivity in Cetaceans. *J. Exp. Biol.*, 120(1), 1-24.
- [31] Klinowska, M., 1985, Cetacean live stranding sites relate to geomagnetic topography. *Aquatic Mammals*, 1(1), 27-32.
- [32] Krzystolik, J., Tański, A., Piesiewicz, R., and Formicki, K., 2024, The impact of electromagnetic fields generated by high-voltage power lines on the spatial arrangement of pike (*Esox Lucius* Linnaeus 1758) embryos. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 31(34), 47291-47297. <https://doi: 10.1007/s11356-024-34300-y>.
- [33] Lee, S. and Lee, W.-S., 2023, A Review on environmental impact assessment of offshore wind farms related to the life-history of marine birds on the Korean Peninsula. *J. Wind Energy*, 14(3), 69-82.
- [34] Levin, M. and Ernst, S.G., 1997, Applied DC magnetic fields cause alterations in the time of cell divisions and developmental abnormalities in early sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics* 18, 255-263.
- [35] Leya, T., Rother, A., Muller, T., Fuhr, G., Gropius, M., and Watermann, B., 1999, Electromagnetic antifouling shield (EMAS)—a promising novel antifouling technique for optical systems, 10th International Congress on Marine Corrosion and Fouling, University of Melbourne, February 1999.
- [36] Li, C., et al., 2023. Offshore wind energy and marine biodiversity in the North Sea: life cycle impact assessment for benthic communities. *Environ. Sci. Technol.* 57(16), 6455-6464.
- [37] Light, P., Salmon, M., and Lohmann, K.L., 1993, Geomagnetic orientation of loggerhead turtles: evidence for an inclination compass. *Journal of Experimental Biology*, 182, 1-10.
- [38] Lohmann, K., Pentcheff, N., Nevitt, G., Stetten, G., Zimmer-Faust, 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.
- [39] Lohmann, K.J., Cain, S.D., Dodge, S.A., and Lohmann, C.M.F., 2001, Regional magnetic fields as navigational markers for sea turtles. *Science*, 294, 364-366.
- [40] Lohmann, K.J., Lohmann, C.M.F., and Endres, C.S., 2008, The sensory ecology of ocean navigation, *J. Exp. Biol.*, 211, 1719-1728.
- [41] 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.
- [42] Margolis, J.M., 2006, Polyacetals. In: Margolis J.M. (Eds.) *Engineering Plastics Handbook*. McGraw-Hill, 77-100.
- [43] Martinez, M.L., Vazquez, G., Perez-Maqueo, O., Silva, R., Moreno-Casasola, P., Mendoza-Gonzalez, G., and Lara-Dominguez,

- A.L., 2021, A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111332.
- [44] 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.
- [45] Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), Korea, 2017, Implementation plans for Renewable Energy by 3020.
- [46] Mouritsen, H., 2018, Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals, *Nature*, 558(7708), 50-59.
- [47] National Radio Research Agency (NRRA), Korea, 2023, Technical requirements for measurement of electromagnetic field strength, No. 2023-11.
- [48] Nedwell, J. and Howell, D., 2004. A Review of Offshore Wind-farm Related Underwater Noise Sources. *Cowrie Rep*, 544, 1-57.
- [49] Nishi, T., Kawamura, G., and Matsumoto, K., 2004. Magnetic sense in the Japanese Eel, *Anguilla japonica*, as determined by conditioning and electrocardiography. *The Journal of Experimental Biology*, 207, 2965-2970.
- [50] Nordmann, G.C., Hochstoeger, T., and Keays, D.A., 2017, Magnetoreception—A sense without a receptor, *PLOS Biology*, 15(10), e2003234.
- [51] Nyqvist, D., Durif, C., Johnsen, M.G., De Jong, K., Forland, T.N., and Sivle, L.D., 2020, Electric and magnetic senses in marine animals, and potential behavioral effects of electromagnetic surveys. *Mar. Environ. Res.* 155, 104888.
- [52] Oh, H.T., Chung, Y., Jeon, G., and Shim, J., 2021, Review of the marine environmental impact assessment reports regarding offshore wind farm. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 24(11), 341-350.
- [53] Ohman, M.C., Sigra, P., and Westerberg, H., 2007, Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish, *Ambio*, 36(8), 630-633.
- [54] Scott, K., Harsanyi, P., Easton, B.A., Piper, A.J.R., Rochas, C.M.V., and Lyndon, A.R., 2021. Exposure to Electromagnetic Fields (EMFs) from Submarine Power Cables Can Trigger Strength-Dependent Behavioural and Physiological Responses in Edible Crab, *Cancer pagurus* (L.). *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 777.
- [55] Tanski, A., Formicki, K., Korzelecka-Orkisz, A., and Winnicki, A., 2005, Spatial orientation of fish embryos in magnetic field. *Electron. J. Ichthyol.* 1, 21-34.
- [56] Taormina, B., Bald J., Want A., Thouzeau G., Lejart, M. 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.
- [57] Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., and Fazeres-Ferradosa, T., 2020, Marine renewable energy, *Renewable Energy*, 150, 1160-1164.
- [58] 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.
- [59] Tricas, T.C. and Sinseros, J.A., 2004, Ecological functions and adaptations of the elasmobranch electrosense, in: G Emde, Mogsdons, J., Kapoor, B. G., *The Senses of Fish*, Springer, Dordrecht, 308-329.
- [60] Walker, M.M., Diebel, C.E., and Kirschvink, J.L., 2003, Detection and use of the earth's magnetic field by aquatic vertebrates. in: *Sensory Processing in Aquatic Environments*, New York, NY: Springer New York, 53-74.

Received 24 September 2024

1st Revised 31 October 2024, 2nd Revised 17 November 2024,

3rd Revised 26 November 2024

Accepted 18 December 2024