

해상풍력에 대한 해양환경영향평가 리뷰: 과학기술 분야 현황, 이슈, 개선방안

이창근¹ · 노준성¹ · 권봉오² · 김종성^{3,†}¹서울대학교 해양환경영향평가연구단 박사²군산대학교 해양생물자원학과 교수³서울대학교 지구환경과학부 교수

A Review on Marine Environmental Impact Assessment for Offshore Wind Farm: Status, Issue, and Future Direction

Changkeun Lee¹, Junsung Noh¹, Bong-Oh Kwon², and Jong Seong Kim^{3,†}¹Ph.D, Marine Environmental Impact Statement Institute, Seoul National University, Seoul 08826, Korea²Professor, Department of Marine Biotechnology, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea³Professor, School of Earth and Environmental Sciences & Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요 약

전 세계가 탄소중립을 달성하기 위해 친환경 에너지로의 전환에 힘쓰고 있다. 우리나라도 저탄소 경제 전환을 위한 신 재생에너지 보급계획을 발표한 바, 대규모 해상풍력단지 조성이 현안으로 등장하면서 체계적인 과학적, 기술적, 정책적 관리 지원·방안이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 학술연구논문을 중심으로 지난 40년간 전세계 해양환경영향평가 연구의 흐름을 살펴보았다. 또한 해상풍력 개발사업의 주요 선진국 사례를 중심으로 해상풍력단지 조성에 따른 해역이용 영향평가 사례를 다양한 각도로 분석하여, 해양환경영향평가의 과학적, 기술적, 정책적 시사점을 제시하였다. 종합적으로 향후 해양환경영향평가에 대한 정책방향으로 1) 과학기술 기반의 한국형 해양환경영향평가 제도 실현을 위한 해양 환경 진단평가기술 개발, 2) 현장관측 자료에 기반한 해양환경 영향예측기술 고도화, 3) 해양환경을 유지하는 저감방안 수립에 필요한 영향기준 마련, 4) 해역이용영향평가에 활용 가능한 통합 DB 시스템 개발, 5) 해상풍력 특화 해역이용 영향평가 지침 및 가이드라인 마련을 고려해야 할 사항으로 제안한다.

Abstract – Carbon neutrality by 2050, is the world’s most urgent mission. To achieve the Net-zero mission, many developed countries announced representing varying strategies for the decrease of greenhouse gas emission by the middle of the century. The Korean government also declared a renewable energy supply plan for the transition to a low-carbon economy, so it is time to support and plan systematic scientific, technical, and policy management on the construction of a large-scale offshore wind farm. In this study, the flow of global marine environmental impact assessment research over the past 40 years was confirmed using bibliometric analysis. In addition, scientific, technical, and policy implications of marine environmental impact assessment were presented by analyzing marine environmental impact assessment (MEIA) for offshore wind farms in cases of major advanced countries. Altogether, we proposed the future directions of Korean MEIA considering to 1) develop techniques on MEIA, 2) advance prediction techniques for impact assessment, 3) establish impact assessment standards necessary for suggesting alternatives to reduce environmental impact and maintain marine ecological integrity, 4) develop and maintain a comprehensive database system utilized in an entire MEIA procedure, and 5) prepare a national authentic guide to MEIAs of offshore wind farms.

Keywords: Offshore wind farm(해상풍력), Net-zero(탄소중립), Green energy(재생에너지), Marine spatial planning(해양공간계획), Sustainable development(지속가능한 개발)

[†]Corresponding author: jskocean@snu.ac.kr

1. 서 론

기후변화 대응을 위한 신재생에너지원으로 해상풍력이 각광받고 있다(Lee[2021]). 바다는 육상보다 풍속이 높고 균일한 바람을 확보할 수 있으며 산림파괴와 소음문제로부터 자유롭다는 장점에, 전세계 많은 국가들이 적극적인 정책적인 지원을 통해 해상풍력 단지를 조성하고 있다(Oh and Yeo[2019]). 지난해 우리나라도 저탄소 경제 전환을 위한 재생에너지 3020 이행계획을 발표하고 2030년까지 8.2 GW 규모의 세계 최대 해상풍력발전단지를 전남 신안에 조성할 것을 밝혔다.

이처럼 우리나라 해양환경관리 정책에서 대규모 해상풍력단지 조성이 현안으로 등장하면서 체계적인 관리체계 정비의 필요성이 제기되었다. 해양 이용에 대한 적정성과 해양환경에 미치는 영향을 검토하기 위해 1991년 『해양오염방지법』이 개정되었고, 이후 도입된 해역이용영향평가는 해양환경관리법 상 해역이용협의, 해역이용영향평가, 환경영향평가 중 해양에서 이루어지는 환경성평가 제도를 총칭한다. 2007년 해양환경관리법 제정 이래 사전적 관리체계 강화 목적으로 시행되고 있다.

그럼에도 불구하고, 해상풍력에 대한 해양환경영향평가제도는 부정확한 영향 예측에 따른 영향평가서의 신뢰성 저하 문제로 많은 갈등을 야기하고 있다. 특히 해양환경관리법 제85조(해역이용영향평가) 제1항 8의2호(「전원개발촉진법」 및 관계 법령에 따른 전원개발사업 중 해상풍력 발전소 또는 「전기사업법」 및 관계 법령에 따른 전기설비 중 해상풍력 발전소를 설치하는 행위)에 의거 해양의 전문성이 반영된 과학적인 평가가 수행이 되어야 함에도 불구하고, 설치 지역의 생태적 특성을 반영된 과학적인 평가가 미흡한 실정이다(Lee et al.[2015]). 그리고 해역환경영향평가가 환경보존 및 관리에 치중될 경우 해역이용에 대한 적정성 확보가 어려울 수 있으며, 반대로 이용과 개발에 치중될 경우 환경훼손에 대한 갈등이 증가할 수 있다. 증가하는 연안개발 계획 및 사업에 따른 환경영향 문제와 어업인을 포함한 사회적 갈등을 해소할 수 있는 협의수단으로써 현재 제도는 한계가 분명하다. 더불어 환경영향평가법 제9조상의 전략환경영향평가의 대상(3. 에너지 개발에 관한 계획)으로 해상풍력 발전이 “에너지 개발에 관한 계획”의 일환으로 볼 수 있기 때문에 추후 에너지개발에 관한 계획 수립 시 해상풍력 발전에 대한 논의도 반드시 이뤄져야 할 것이다.

이처럼 해역환경영향평가는 해양환경보전과 함께 수산자원, 생태계 보호, 연안관리, 친환경 항만-어항개발, 해양자원의 효율적 이용-개발, 해양공간계획의 실시 등 해양수산분야와 연계되기 때문에 해양환경의 통합관리 측면에서 실효성 강화가 요구된다. 해역의 이용과 개발 행위에 대해 일괄적으로 적용되고 있는 평가항목 및 내용을 개선하여 해역 및 사업 유형 별로 진단평가가 가능한 과학 기술 기반의 해양환경영향평가가 기준 마련이 절실하다. 예를 들면 해양환경관리법 제 95조에 의거, 해역이용사업자가 면허 받은 후 행하는 사업으로 인하여 발생할 수 있는 해양환경에 대한 영향의 조사를 실시하도록 의무화 하고 있는 바, 해상풍력 단지 건설 이후

발생될 수 있는 생태계영향에 대한 조사가 필요할 것이다. 이처럼 어민, 사업자, 지역주민, 환경단체, 지자체, 중앙정부에 이르기 까지 다양한 이해당사자의 신뢰도를 회복하고, 갈등을 관리·조정할 수 있는 과학적 해양환경영향평가가 과거 어느때보다 절실히 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 해상풍력 개발사업의 주요 선진국 사례를 비교분석하여 해양환경영향평가의 과학적, 사회적, 정책적 시사점을 찾아내고 우리나라 해양환경영향평가의 제도적 발전 방안을 제시하는데 있다. 전반적인 과학기술 연구의 동향을 파악하기 위해 지난 40년간 전세계 해양환경영향평가에 대한 학술연구논문을 분석하였다. 그리고 해상풍력산업 선도국가인 영국과 미국의 사례를 중심으로 해상풍력단지 조성에 따른 해역이용영향평가 사례를 다양한 각도로 분석하였으며, 더불어 우리나라 해상풍력 관리체계의 발전 방향을 제도·기술·사회적 관점에서 고찰하였다. 이를 토대로 우리나라 해역이용영향평가를 효과적으로 활용하기 위한 방향을 3가지의 평가기법(진단, 예측, 평가기준)과 1가지의 활용방법(DB시스템)으로 구분하여 도출하였다.

2. 연구방법

해역의 이용과 개발에 앞서 대상지역의 환경을 정확히 진단, 평가, 예측하기 위한 기술개발이 선행되어야 한다. 이를 위해 국내외 기술연구 수준, 자원, 정책 방향성 등을 확인하여 현재의 여건에 맞는 해양환경영향평가의 방향을 도출하고자 하였다. 본 연구에서는 Scopus의 과거 40년 데이터베이스를 활용하여 과거 선진국 사례를 중심으로 학술연구문헌을 검색하였으며, 분석에 필요한 논문을 선별하였다.

2.1 메타데이터 수집

본 연구를 위해 1980년부터 2020년 까지 출간된 문헌 중 peer review된 논문 및 문헌(book chapter, conference proceeding, policy report, and consulting report)를 Scopus 검색(키워드: “marine environment”, “wind farm”, “offshore wind”, “anthropogenic noise”, “marine noise”, “noise pollution”, “offshore industry”, “pile driving”, “underwater noise”, “electromagnetic field”, “electrosensitive”, “magnetsensitive”, “submarine cable”, “dredging”, “aggregate dredging”, “aggregate extraction”, “gravel extraction”, “sand extraction”, “sand mining”, “suspended solid”, “suspended particulate matter”, “suspended organic matter”, “flocculation”, “turbidity”)을 통해 총 4,077개의 문헌을 수집하였다. 해당 메타데이터는 저자, 저널, 제목, 출판연도, 저자의 소속 및 전문분야가 포함되었으며, 통계적 방법을 통해 시대, 중심국가 별 주요 주제어와 연구 흐름의 변화를 평가하는데 활용하였다.

2.2 자료 분석

해양환경영향평가의 시대적 흐름과 분야별 상호관계를 분석하기

위해 VOSviewer software (Van Eck and Waltman[2014])를 이용하여 키워드 네트워크 분석(또는 계량서지학 분석, Bibliometric analyses)을 수행하였다. 해당 분석방법은 특정키워드가 출간된 문서 라이브러리 안(문서의 제목, 초록, 키워드 목록을 포함)에서 복수 검색 되었을 때 상대적으로 큰 심벌로 표기된다. 또한 특정 키워드들이 함께 중복 검색될 수록 각 키워드들 간의 관계(네트워크)가 굵은 선으로 표시되어, 키워드 간 상대적 연결성을 정량적으로 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양 분야 환경영향평가의 국내·외 연구 동향분석

과거 40년 간 해양분야 환경영향평가 관련 연구논문 수는 총 4,077건으로 집계되었다. 상위 5개국(미국, 영국, 중국, 호주 및 캐나다 순)의 연구논문 수는 2,578건으로 전체 연구의 63% 차지하였다(Fig. 1). 우리나라의 경우 81건으로 전세계 21위 수준이었으며, 인접국가인 중국(357건, 3위), 일본(126건, 12위)에 비해 상대적으로 매우 부족한 수준으로 확인되었다(Fig. 1).

주요 연구의 흐름은 2000년대 초반부터 무분별한 해역이용에 의한 환경문제를 관리하기 위한 방안으로 해양환경영향평가가 대두되었으며, 초기에는 해양 퇴적물과 수질오염이 주된 평가 대상이었다(Fig. 2A). 이후 2000년대 후반에는 해양환경영향 평가를 위한 항목으로 해양생물과 해양생태계 관련 연구가 증가하면서 환경변화에 따른 서식생물과 생태계의 건강성 평가가 연구의 주류로 자리잡았다. 해상풍력과 같은 재생에너지의 활용에 따른 환경영향평가 연구는 2010년대 후반이 되면서 활발하게 진행된다. 특히, 해양공간계획(marine spatial planning) 연구는 해양에서 발생하는 분쟁이 급격하게 늘어남에 따라 지속가능한 해역이용 및 개발을 화두로 최근 선진국 중심으로 증가하고 있었다(Fig. 2A). 해상풍력 단

지 조성에 따른 잠재적 환경변화 요인 관점에서 살펴보면 환경영향평가연구에서 가장 우선시되는 키워드는 ‘수중소음’이었으며, 2010년대 후반 들어 ‘전자기장’ 연구가 활발히 진행되고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2B).

해상풍력과 해양환경영향평가로 검색어(키워드: “marine environment impact assessment”, “offshore windfarm”)를 한정하여 확인한 결과(n=101), ‘소음’(키워드: “noise”, n=55, 55%), ‘전자기장’(키워드: “electromagnetic field”, n=19, 19%), ‘해저교란’(키워드: “bottom disturbance”, n=13, 13%) 및 ‘부유사’(키워드: “suspended sediment”, n=7, 7%) 순으로 연구가 많이 수행된 것으로 확인되었다. 해양환경영향평가 생물은 ‘어류’(키워드: “fish”, n=63, 63%), ‘포유류’(키워드: “mammal”, n=57, 57%), ‘바닷새’(키워드: “bird”, n=48, 48%)가 주요 대상으로 선택되었으며, 상대적으로 ‘저서생물’(키워드: “benthos”, n=18, 18%), ‘갑각류’(키워드: “crustacean”, n=10, 10%), ‘플랑크톤’(키워드: “plankton”, n=5, 5%), ‘이매패류’(키워드: “bivalve”, n=3, 3%)에 대해서는 비교적 연구가 적게 수행되었다(Fig. 3).

종합해보면, 해상풍력 해양환경영향평가를 위한 다양한 요소 중 전자기장에 의한 해양생물 영향 연구 및 해저교란에 의한 해양생물 영향 연구 수준이 가장 취약한 것으로 확인되었다. 특히 자기장은 어류, 무척추동물 및 해양포유류 등 해양생물의 유영 능력 및 방향설정에 영향을 주는 것으로 알려져 있지만(Öhman *et al.*[2007]; Woodruff *et al.*[2012]; Bailey *et al.*[2014]; Bergström *et al.*[2014]; Albert *et al.*[2020]), 이에 관한 국내 연구는 전무한 실정이다. 더불어 국내 해상풍력 설치 대상 지역이 대부분 서·남해에 집중될 것으로 예상되는 바, 해저교란(세굴)에 의한 갯벌생태계 위해 영향 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 이외에도 군사작전이 빈번하게 이뤄지는 동해의 경우, 해상풍력단지 조성으로 인한 레이더 간섭 피해 등의 문제도 함께 고려되어야 할 것이다(Kim *et al.*[2014]).

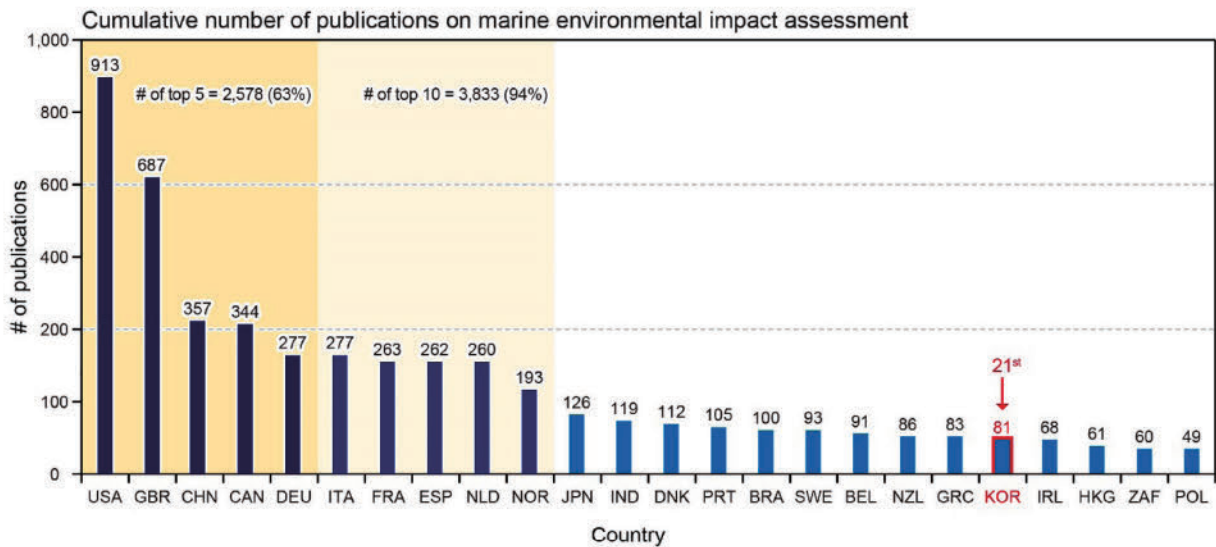


Fig. 1. Cumulative number of publications on marine environmental impact assessment from 1980 to 2020.

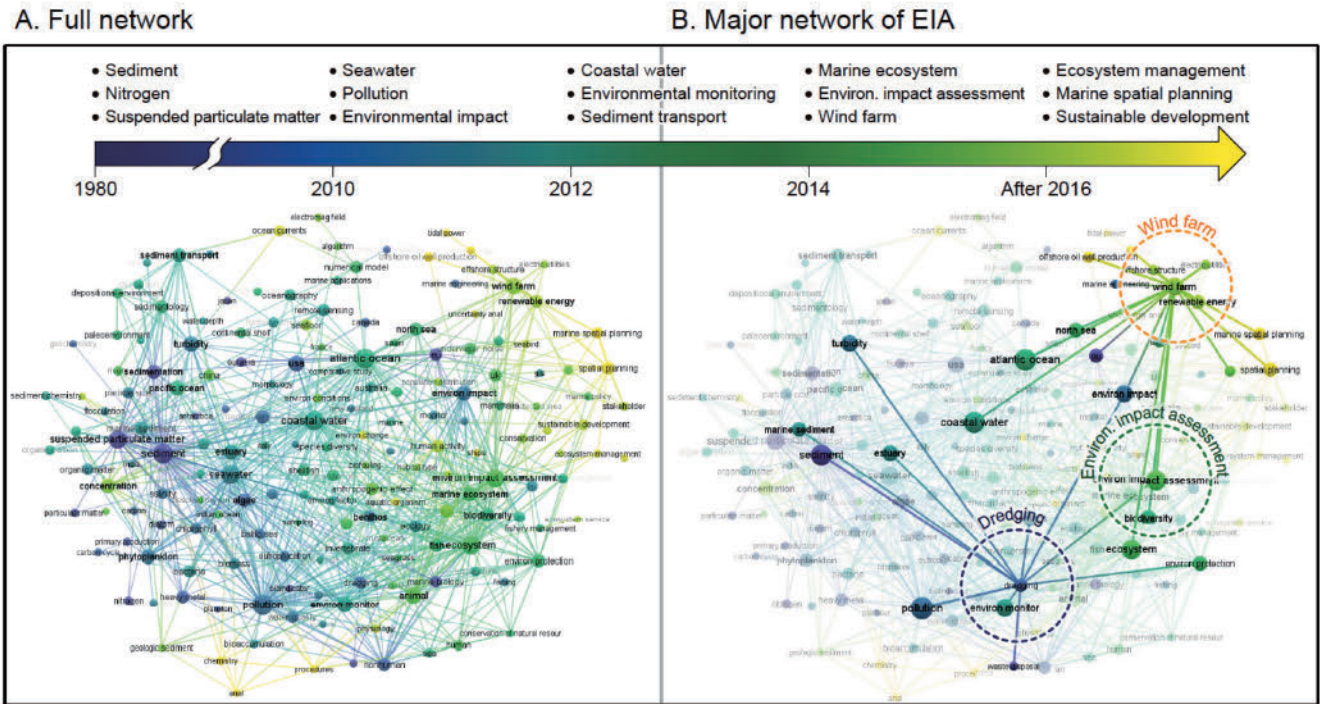


Fig. 2. Keyword network based on co-occurrence analysis. A) Size of node shows to frequency of occurrences in the literature based on full network analysis, B) Network showing top 25 keywords (link strength) linked to “Dredging”, “Environmental impact assessment”, and “Wind farm” highlighted.

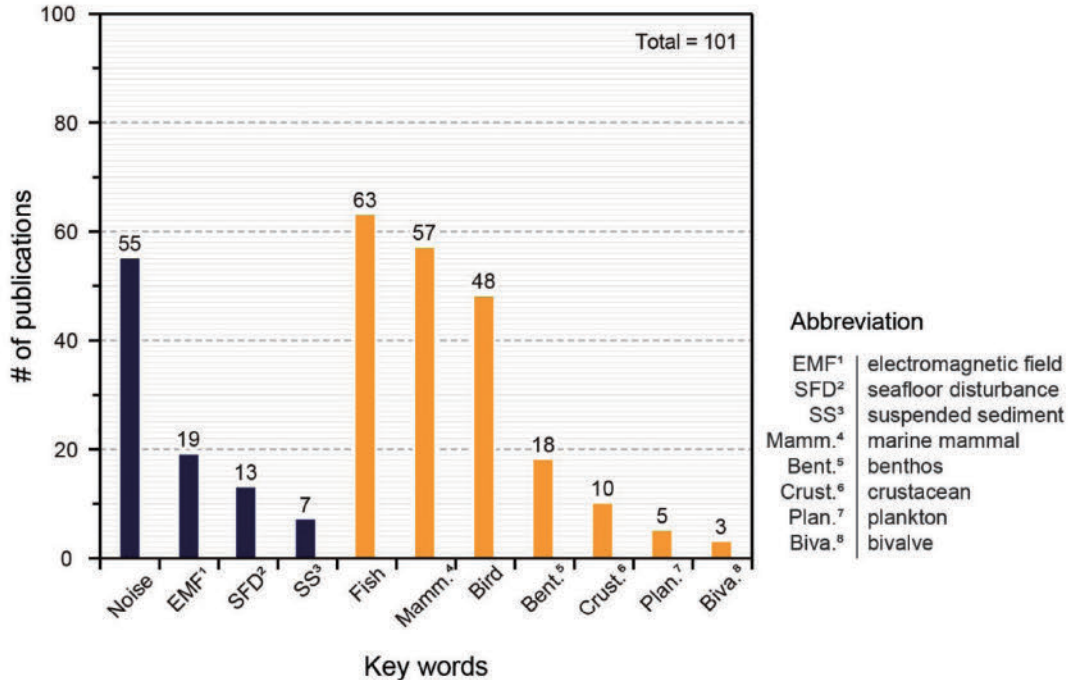


Fig. 3. Cumulative number of publications related to offshore wind farm and marine environmental impact assessment from 1980 to 2020.

상기 연구결과는 해상풍력에 특화된 평가항목 설정 및 환경변화에 의한 생태계 반응을 종합적으로 파악하기 위한 진단-예측기술 고도화의 필요성을 시사한다. 더불어 해양환경 변화를 진단-예측하기 위한 기초조사 자료의 축적 및 통합이 매우 중요하며 이를 위해 기

존 조사자료를 통합하고 관련 연구의 기초자료를 지속적으로 업데이트 할 수 있는 시스템 체계도 마련되어야 할 것이다. 법정조사와 같은 기초조사 결과(예, 국가 해양생태계 종합조사)의 통합을 통해 해양환경 변화를 평가하기 위한 배경농도 및 자연상태의 임계값을

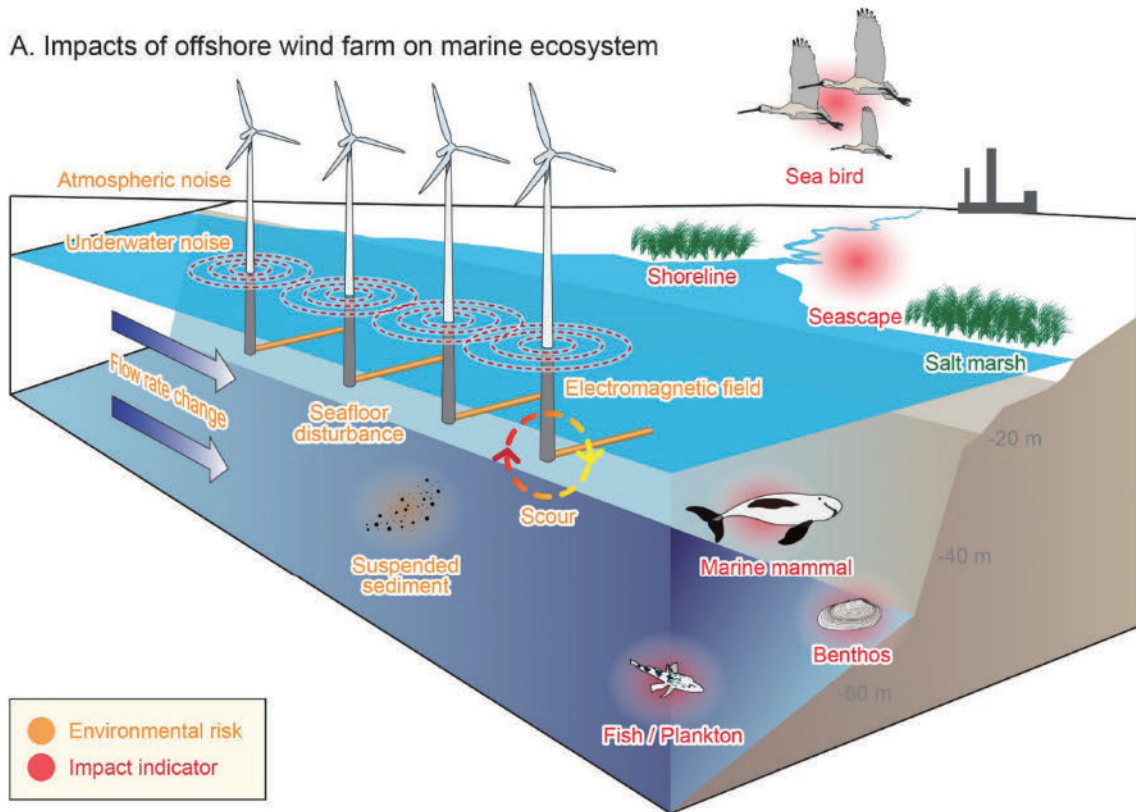
산정 가능할 것 이다. 해당 결과를 토대로 본 연구에서는 과학적인 해역이용영향평가를 위한 기술동향을 4개 범주(진단, 예측, 평가기준, DB시스템)에서 분석 후, 이에 대한 시사점을 아래에 기술하였다.

3.2 진단 분야 기술동향 및 발전방향

해상풍력 선진국인 유럽(영국, 벨기에, 스웨덴 등)의 경우, 해상풍력단지 공사 중 발생하는 부유사 및 유속 변화에 의한 수질영향과 더불어, 퇴적물 침퇴적 특성 변화에 따른 생태계 영향평가도 종합적으로 실시하고 있다. 과거 Baeye and Fettweis[2015] 연구에 의하면 해상풍력에 세굴현상을 방지하기 위해 보호시설을 설치하였음에도 불구하고 운영에 의해 구조물 주변 부유사 농도가 배경

농도(3 mg/L) 보다 최대 5배까지 증가하였으며, 이로 인한 장기 생태계영향의 모니터링이 필요함을 시사한 바 있다. 뿐만 아니라, 건설 후 해저케이블 주변에서 발생하는 전자기장의 어류, 갑각류, 다모류 등에 대한 장기 모니터링 결과, 행동-내분비장애에 의한 누적영향을 확인한 바 있다(Scott *et al.*[2018]; Jakubowska *et al.*[2019]; Hutchison *et al.*[2020]). 이는 해상풍력에 의해 발생가능한 생태계 위해 요소는 풍력단지 건설 전, 중, 후로 구분되며, 피해 양상 또한 상이할 수 있음을 시사한다(Fig. 4). 하지만 국내 해역이용협의 제도는 획일적인 조사항목과 구체성이 결여되어 있어 해양생태계 영향에 대한 과학적 평가체계가 어려운 실정이다. 기존 해역이용협의 제도의 평가항목의 경우 해양물리, 해양화학, 해양지형지질, 해양

A. Impacts of offshore wind farm on marine ecosystem



B. Environmental issues on offshore wind farm construction

Stage of wind farm	Major cause	Environmental risk	Environmental impact
Construction period	Piling work, Cabling	Suspended sediment	Fish, Plankton
	Piling work	Underwater noise	Fish, marine mammal
	Electric cabling	Seafloor disturbance	Benthos
Operation period	Underwater structure	Scour	Benthos, Plankton
	Ground structure	Atmospheric / underwater noise	Sea bird, Mammal, Seascape
	Electric cable	Electromagnetic field	Fish, Benthos
Decommissioning period	Structure	Seafloor disturbance	Benthos
	Electric cable	Suspended sediment	Fish, Benthos

Fig. 4. A) Impacts of offshore wind farm on marine ecosystem and B) Environmental issues on offshore wind farm construction.

Table 1. Comparison of evaluation targets for sea area utilization consultation and marine environmental impact assessment

#	Sea area utilization consultation	#	Marine environmental impact assessment
1	Marine physics	1	Meteorology
2	Marine chemistry	2	Marine physics (currents)
3	Marine topography & geology	3	Marine chemistry (water quality)
4	Marine sediment	4	Marine topography & geology
5	Pelagic ecosystem	5	Marine sediment
6	Benthic ecosystem (marine intertidal organisms)	6	Pelagic ecosystem
7	Fish & fishery resources (egg, larvae, & juvenile)	7	Benthic ecosystem
		8	Fish & fishery resources
		9	Fish egg, larvae, & juvenile
		10	Marine flora
8	Sea scape & recreation	11	Marine intertidal fauna
		12	Sea scape & recreation
		13	Industry
9	Protected species & area	14	Protected species & area

퇴적물, 부유생태계, 저서생태계, 어류/수산자원, 경관/위락, 보호종 및 보호구역의 9개로 나누어져 있으며, 해역이용영향평가의 경우 기존 해역이용협의 제도 평가항목(9개) 외 기상, 어란 및 자치어, 해양식물, 조간대동물, 산업을 포함하는 총 14개의 평가항목이 존재한다(Table 1). 선진국들의 경우에는 해역이용이 이루어지는 해역에 따라 특정 해양생물에 중요도를 두고 영향평가가 이루어지는 것이 특징적이다. 미국은 생물학적 중요도가 높은 구역을 선별하여 멸종위기종, 특별관심종, 주요 어류서식지에 대해 별도로 조사하고 있다. 덴마크의 경우에는 해상풍력에 가장 큰 영향을 받는 것으로 알려진 어류, 고래, 조류와 같은 민감종에 대해 최소 2년 이상의 장기 연구를 시행하고 있다는 점은 주목할 만 하다. 특히, 고래나 물범과 같은 대형포유류의 경우 국내 해역에도 넓게 상당수가 서식하고 있는 것으로 알려져 있으나(Sohn *et al.*[2012]) 해역이용영향 평가에 제대로 반영이 되지 않고 있다(Table 2).

3.3 예측 분야 기술동향 및 발전방향

예측 분야 기술동향을 살펴보면 해상풍력 설치 지역의 수리환경 및 생태계 변화를 예측하기 위해서 기계학습 기반의 예측 모델 개발이 활발하게 연구되고 있다. 미국(NOPP) 및 유럽(HYCOM)의 경우 3차원 해양수치모델을 활용한 예측방법과 더불어 Sentinel, MODIS, Landsat 등 다분광, 초분광 위성을 활용한 기계학습 모델을 연구가 활발히 수행되고 있다(Jung *et al.*[2020]). 이는 국지적인 모니터링을 통해 축적된 현장자료가 가지는 공간적 분포 한계를 극복하기 위한 방안으로, 수시로 현장자료를 통해 데이터를 검보정을 함으로써 예측정확도를 향상을 목적인다. 최근에는 다양한 환경인자들을 광학 신호를 구분하고, 환경 변수 간의 비선형성을 효과적으로 예측하기 위해 차원축소법(PCA)이나 인공지능 기법들을 활용한 알고리즘 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이외에도 미국의 경우 해상풍력 발전지구 건설 및 운영에 따른 영향을 예측하기 위한 환경 민감도 연구를 수행하여 생물학적 중요도가 높은 구역을 도출한 바 있다. 반면 우리나라의 경우 물리, 수리 및 퇴적분

야의 경우 예측 모의는 시행하고 있지만 실제 영향의 대상인 생태계에 대한 예측 모의는 시행하지 않고 있다. 이는 생태계의 복잡한 인과관계(물질순환, 무생물-생물 및 생물-생물 간의 상호작용 등)를 수치화하여 정확한 예측이 어렵기 때문인데, 이를 극복하기 위한 로지스틱회귀모델(logistic regression model) 및 인공위성 자료와 해양생물(식물 플랑크톤) 간의 관계를 추정하는 신경망 기법 등이 활발히 연구되고 있다(Kim *et al.*[2015]). 향후 정확한 환경영향 예측을 위해서는 기존 격자체계를 통일하고 장기 관측을 통한 빅데이터 구축과 함께 관측기반의 현장자료를 활용한 입력계수 산정이 반드시 고려해야할 중요 요소이다(Table 2).

3.4 평가기준 분야 기술동향 및 발전방향

선진국(영국, 독일, 스페인, 스웨덴 등)의 경우, 과학적 평가기준안을 도출하기 위해 실제해역에서 영향받을 것으로 예상되는 해양생물을 대상으로 메조코즘 실험 등을 적극적으로 활용하여 수중소음, 전자기장, 부유사, 해저교란에 대한 과학적인 평가기준안을 도출하고 있다. 해상풍력 건설과 운영 중에 발생하는 전자기장-소음은 최대 80 km 거리에서도 해양생물의 영향을 줄 수 있는 것으로 알려져 있지만(Betke *et al.*[2004]; Mueller-Blenkle *et al.*[2010]; Duarte *et al.*[2021]), 국내 관련연구는 전무한 실정이다. 더불어 국내 해안에 광범위 하게 서식하는 바닷새나 해양포유류에 대한 기준안 마련도 시급하다. 특히 해상풍력 신규 입지 예정지역은 상괭이(*Neophocaena phocaenoides*), 남방큰돌고래(*Tursiops aduncus*) 등의 고래가 서식하는 지역이고, 해상풍력 터빈이 해상 100 m 이상 높이에 설치되었을 때 바닷새에 직접적인 영향을 줄 수 있음에도 이에 대한 평가기준은 마련되어 있지 않다(Oh *et al.*[2020]) (Table 2). 뿐만 아니라 수중소음, 전자기장, 부유사, 해저교란은 해상풍력단지 건설, 운영 중에 동시에 복합적으로 일어날 수 있기 때문에 이에 관한 연구도 필요하다. 더불어 생물-생물 간 상호작용에 따른 개체군 영향은 단일 종에 대한 영향기준과 매우 다를 수 있기 때문에 이를 확인하기 위한 메조코즘 연구 등도 시급할 것이다(Lee *et al.*[2020]).

Table 2. Contents of targets and subjects in marine environmental impact assessment for offshore wind farm between South Korea and advanced countries

Category	Subjects	South Korea	Advanced countries ^a
Diagnosis & assessment	Monitoring period	1 year	Over 2 years
	Noise and EMF ^b monitoring	None	Implementing
	SS ^c monitoring	n.d. ^d	n.d.
	Protected species monitoring	Limited	Over 2 years (2-week intervals)
	Noise and EMF impacts	Limited	Implementing
	SS impact and seafloor disturbance	n.d.	n.d.
Prediction	Accuracy on flow rate & sedimentation changes	Low (limited QA/QC ^e)	High (high QA/QC)
	Noise and EMF modeling	Partially (noise only)	Implementing
	SS dispersion modeling	Very limited (no domestic coefficient)	Implementing
	Scoring modeling	Very limited	Implementing
	Ecosystem modeling	None	Implementing
Integrated criteria	Impact on marine environment	None	Set (by sea area & construction processes)
	Impact on marine organism	None	Set
Database system	Marine meta-data analyses	Partially established	Well established (e.g., AI-based analysis)

^acountries including U.S., U.K., E.U., Canada, and Japan

^belectromagnetic field

^csuspended sediment

^dno data

^equality assurance and quality control

평가기준과 더불어 해양환경 영향을 정확히 평가할 수 있는 평가항목 설정도 중요한 이슈이다. 관련 선행연구를 살펴보면 미국이나 일본의 경우 대기, 수질, 소음, 해양생물, 문화자원뿐만 아니라 사회·경제적 영향을 포함한 인간환경(human environment)까지 고려하여 환경영향평가를 수행하고 있는 추세이다(Yoon and Park [2013]). 특히 평가항목을 법률로 미리 규정하지 않고 스크핑 절차를 통해 사업의 특성에 맞게 평가항목을 유동적으로 정하고 있는데, 이는 정부와 주민 등 이해관계자를 참여시킴으로써 상호간의 갈등을 최소화하기 위함이다. 우리나라도 과학적 평가기준 및 평가항목 설정을 통해 해양환경영향평가제도를 체계화하기 위한 노력을 하고 있는 바, 추후 우리나라의 해역별, 유형별 특성을 적절하게 평가할 수 있는 제도개선이 이루어질 것으로 보인다.

3.5 DB시스템 분야 기술동향 및 개선방향

선진국(독일, 아일랜드 등)의 경우 해양환경영향평가의 지속성을 위해 DB시스템 구축이 핵심임을 과거부터 인지하고 이를 위한 개발에 힘써왔다. 독일의 경우 지리 객체 관계형 DB 시스템(독일 연방 해양수로국 제공)을 구축하여 사용자가 필요할 때 모든 지리 데이터를 검색할 수 있다(Stelzenmüller *et al.*[2017]). 아일랜드는 해양 부표, 조위계 및 선박에서 수집한 데이터를 관측 후 한 시간 내에 중앙 저장소로 보내어 실시간으로 공유할 수 있는 해양환경 모니터링 서비스를 제공하고 있다. 해당시스템은 예측 모델에 의해 생성된 일부 매개 변수에는 해양 온도, 염도, 해류 및 파도가 포함되며 활동 영역별(해양환경, 어업 및 생태계, 어류 건강, 해산물 안전, 양식업, 해저매핑, 해양학, 해운, 해상 및 항공 등) 정보까지도 조회 가능하다(Table 2).

우리나라도 이처럼 해양환경영향평가를 통해 얻어진 해양정보를 수집·제공할 수 있는 해역이용정보 시스템이 조속히 구축되어야 할 것이다. 국내 해상풍력 해양환경영향평가 역사가 선진국에 비해 짧고 진행된 사업의 규모가 작기 때문에 관련 DB를 구축하는데 어려움이 있지만, 기존 활용 가능한 국가해양생태계종합조사 등의 법정조사 자료를 디지털화 및 통합한다면 추후 이용자들의 편의성도 증대될 것이다. 이를 통해 정보 제공의 신속성, 평가절차의 투명성 및 공정성도 확보할 수 있어 평가과정에서 야기되는 이용자간의 갈등도 완화할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

해역이용영향평가는 해양개발·이용행위 시 해양환경에 대한 영향을 예측하고 저감방안을 마련하기 위해 사전에 검토 협의하는 제도로서 기존 환경부의 환경영향평가를 토대로 1991년 해양오염방지법이 개정됨으로써 도입된 제도이다. 2007년 이후 해양환경관리법이 제정되면서 해양환경의 특수성을 반영하기 위한 해역이용협의제도가 시행되고 있지만 해상풍력으로부터 해양환경을 보전하기 위한 제도로서의 역할은 여전히 미흡하다.

해상풍력 관련 해역이용협의제도의 운용의 문제점 및 한계를 체계적으로 정리한 『해역이용협의제도의 문제점 및 개선방안』(Yoon and Park[2013])의 연구는 시사하는 바가 크다. 해당 연구에서는 해역이용협의가 1) 해역이용의 갈등을 사전에 예방하고 해양의 이용을 극대화하기 위한 것인지 혹은 2) 해양환경의 영향을 저감을 위한 것인지에 대한 개념적 혼란이 여러가지 문제를 야기함을 지적하고 있다. 따라서 과학적이며 실질적인 관리 체계의 구현으로 해

양환경 유지를 위한 저감 방안 마련과 더불어 적절한 해역이용을 가능하게 하는 해역이용영향평가 체계 마련이 필요하며, 이를 토대로 과학적인 해역이용영향평가 제도를 수립하여 주민 수용성 및 신뢰성 확보가 무엇보다도 중요한 시점이다.

본 연구에서는 과학적인 해역이용영향평가를 위한 시사점을 도출하기 위해 4개 기술분야로 범주를 구분하여 살펴보았다. 요약하자면, 진단분야에서는 해양환경 전반에 대한 체계적 진단과 더불어 보호중, 경관 등 일반시민의 관심이 높은 이슈까지 종합적으로 진단대상에 포함시켜야 한다. 예측분야는 관측자료 실증을 통해 수리환경 및 생태계 변화를 보다 정확하게 예측할 필요가 있다. 평가기준분야에서는 해역, 유형, 단계별 특성을 반영할 수 있는 평가기준이 도출되어야 하며, 특히 수중소음·전자기장과 같은 신규항목의 적절한 생태계 영향기준 설정이 필요하다. DB시스템분야에서는 진단·예측·평가기준 등 전자료의 디지털화로 해역이용영향 평가 및 검토에의 활용도 재고가 요구된다. 특히 사용자 맞춤형 정보전자열람이 가능하도록 구축해야 할 것이다. 종합하자면, 해양생태계 중심의 영향평가가 가능하도록 지침 및 가이드라인 설계와 함께, 이를 적극적으로 지원할 수 있는 법·제도 개선안 마련이 필요함을 시사한다.

후 기

본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발, 202110427)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] Albert, L., Deschamps, F., Jolivet, A., Olivier, F., Chauvaud, L. and Chauvaud, S., 2020, A current synthesis on the effects of electric and magnetic fields emitted by submarine power cables on invertebrates. *Marine Environmental Research*, 159, 104958.
- [2] Bailey, H., Brookes, K.L. and Thompson, P.M., 2014, Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. *Aquat. Biosyst.* 10(1), 1-13.
- [3] Baeye, M. and Fettweis, M., 2015, In situ observations of suspended particulate matter plumes at an offshore wind farm, southern North Sea, *Geo-Mar. Lett.*, 35, 247-255.
- [4] Betke, K., Glahn, M.S., Matuschek, R., 2004, Underwater noise emissions from offshore wind turbines, in: *Proc CFA/DAGA*.
- [5] Bergström, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Capetillo, N.Á. and Wilhelmsson, D., 2014, Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment. *Environ. Res. Lett.* 9(3), 034012.
- [6] Duarte, C.M., Chapuis, L., Collin, S.P., Costa, D.P., Devassy, R.P., Eguiluz, V.M., Erbe, C., Gordon, T.A.C., Halpern, B.S., Harding, H.R., Havlik, M.N., Meekan, M., Merchant, N.D., Miksis-Olds, J.L., Parsons, M., Predragovic, M., Radford, A.N., Radford, C.A., Simpson, S.D., Slabbekoorn, H., Staaterman, E., Van Opzeeland, I.C., Winderen, J., Zhang, X. and Juanes, F., 2021, The soundscape of the Anthropocene ocean, *Science*, 371(6529).
- [7] Hutchison, Z.L., Gill, A.B., Sigray, P., He, H. and King, J.W., 2020, Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behavior of bottom-dwelling marine species, *Sci. Rep.*, 10:4219.
- [8] 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*, *Mar. Environ. Res.*, 150, 104766.
- [9] Jung, S., Kim, Y.J., Park, S. and Im, J., 2020, Prediction of sea surface temperature and detection of ocean heat wave in the South sea of Korea using time-series deep-learning approaches, *Korean J. Remote Sens.*, 36(5-3), 1077-1093.
- [10] Kim, Y.-D., Jeong, Y.-M. and Lee, D.-D., 2014, Technical trend of radar radio interference reduction relating to construction of the offshore wind farm, *J. Korean Inst. Electr. Electron.*, 27(4), 250-256.
- [11] Kim, H.-C., Kim, Y.H., Chang, W.-K. and Ryu, J., 2015, Technical reviews on ecosystem modeling approach and its applicability in ecosystem-based coastal management in Saemangeum offshore and Geum river estuary, *J. Korean Soc. Mar. Environ.*, 18(3), 233-244.
- [12] Lee, D.I., Kim, G.Y., Tac, D.H., Yi, Y.M., Choi, J.H., Kim, H.J., Lee, J.H. and Yoon, S.S., 2015, Diagnosis of scoping and type of review on the marine environmental impact assessment for ocean energy development project. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 18(3), 179-188.
- [13] Lee, C., 2020, A study on ecotoxicological effects and recoveries for the benthic invertebrates and fish exposed to multiple stressors in marine environment: In vivo and in situ assessment, Ph.D. dissertation, Sch. Earth Environ. Sci., Seoul National Univ., Seoul, Korea.
- [14] Lee, C.Y., 2021, Estimation of the economic ripple effect of the new and renewable energy industry according to the energy conversion, *Korea Soc. Innovation*, 16(3), 247-274.
- [15] Mueller-Blenkle, C., McGregor, P.K., Gill, A.B., Andersson, M.H., Metcalfe, J., Bendall, V., Sigray, P., Wood, D. and Thomsen, F., 2010, Effects of pile-driving noise on the behaviour of marine fish, in: COWRIE Ref: Fish 06-08, Technical Report 31th March 2010.
- [16] Öhman, M.C., Sigray, P. and Westerberg, H. 2007, Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish. *AMBIO* 36(8), 630-633.
- [17] Oh, H. and Yeo, M., 2019, Status and improvement of marine environmental impact assessment for offshore windfarm Project, *J. Kor.Soc. Fish Mar. Edu.*, 31(5), 1470-1481.
- [18] Oh, H., Yeo, M., Jung, H. and Shim, J., 2020, Status and improvement of environmental impacts assessment on the

- marine endangered species around the coastal area of offshore wind energy: Case study of the marine mammals and sea bird. J. Kor. Soc. Fish Mar. Edu., 31(5), 1470-1481.
- [19] Sohn, H., Park, K.J., An, Y.R., Choi, S.G., Kim, Z.G., Kim, H.W., An, D.H., Lee, Y.R., and Park, T.G., 2012, Distribution of whales and dolphins in Korean waters based on a sighting survey from 2000 to 2010. Kor. J. Fish. Aquat. Sci. 45(5), 486-492.
- [20] 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.), Mar. Pollut. Bull., 131, 580-588.
- [21] Stelzenmüller, V., Gimpel, A., Gopnik, M., Gee, K., 2017, Aquaculture site-selection and marine spatial planning: the roles of GIS-based tools and models. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean. Springer, Cham, pp. 131-148.
- [22] Van Eck, N.J. and Waltman, L., 2014, Visualizing bibliometric networks. in: Ding, Y., Rousseau, R., Wolfram, D. (Eds.), Measuring Scholarly Impact. Springer, Berlin, 285-320.
- [23] Woodruff, D.L., Schultz, I., Marshall, K., Ward, J. and Cullinan, V., 2012, Effects of electromagnetic fields on fish and invertebrates. US Department of Energy.
- [24] Yoon, S.S. and Park, S.J., 2013, A study on the status and improvement for sea area utilization conference System, in: Korea Maritime Institute.

Received 6 October 2021

Revised 5 November 2021

Accepted 19 November 2021