



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

노후된 해상풍력 하부 구조물의
인공어초로의 재활용
방안 및 효과 연구

A study on ways to recycle aged
bottom-fixed offshore wind substructures
into artificial reefs and the effects

울산대학교 산업대학원
환경공학과
최 의 경

노후된 해상풍력 하부 구조물의
인공어초로의 재활용
방안 및 효과 연구

지도교수 경대승

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024년 2월

울산대학교 산업대학원
환경공학과
최 의 경

최의경의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원 이 병 규 인

심사위원 오 석 영 인

심사위원 경 대 승 인

울산대학교 산업대학원

2024년 2월

국문 요약

본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 방안을 검토하고 및 그에 따른 인공어초의 증설·활성화로 인해 촉진되는 환경적, 경제적, 사회적 효과 등을 종합적으로 고찰하기 위해 수행되었다. 전 세계는 2020년을 시작으로 COVID-19라는 강력하고 암울했던 팬데믹을 보냈지만, 세계 경제는 2022년 중반부터 서서히 그리고 힘겹게 재개되면서 에너지 수요도 차츰 반등되었다. 이에 따라, 온실가스 감축 및 기후변화 적응과 관련한 2016년 파리협정 이후, 2022년에는 우리정부도 ‘2050 탄소중립 선언’을 발표하며 풍력 및 태양광을 바탕으로 하는 신재생에너지를 통한 전력 공급을 통해 저탄소화를 계획하는 등의 신재생에너지의 중요성을 점차 확대시켜 나가고 있으며, 특히, 해상풍력 발전의 비중은 가파르게 성장할 것으로 전망되고 있다. 현재, 국내에서 상용 운전중인 해상풍력 발전단지는 제주 탐라 해상풍력, 전남 영광 해상풍력 그리고 서남해 해상풍력 발전단지가 있으며, 이미 건설 중이거나 신규 개발을 위해 사업 타당성 조사를 마친 곳이 대략 40단지 이상을 웃돌고 있다. 이에, 빠르면 향후 15년 내 노후화되어 해체시기에 돌입하는 해상풍력 발전단지도 상당히 생겨나게 될 것으로 전망된다.

한편, 20세기 중반부터 글로벌 환경문제 중 하나로 부각된 전통적인 해양 플랫폼의 폐기와 해체에 투입되는 기술적, 사회적 비용을 절감하면서 ‘자원의 순환적 활용’을 달성하기 위해 노후화된 해양 플랫폼의 재활용 방안이 다양하게 논의되었다. 그간에 주로 논의된 재활용 방안은 해양 관광 자원으로서의 재활용, 외해 양식장으로서의 재개발, 연안 양식용 구조물인 인공어초로의 재활용 등이었는데, 이 중에서도 다방면으로 높은 효율성 및 실효성이 예측된 동시에, 지속 가능한 방안으로 주목된 것이 인공어초로의 재활용이었다.

이에, 본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용으로 인한 인공어초 증설과 활성화를 전제로, 인공어초 재활용의 환경적, 경제적, 사회적 효과를 문헌 고찰을

통해 분석함으로써, 노후화된 해양 자원 또는 해양 산업 폐기물의 ‘지속 가능한 순환적 활용’에 도움이 되는 실무적, 산업적 시사점을 도출하였다. 본 연구의 고찰 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

첫째, 노후화된 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용은 수중·해양 환경 보호, 인공어초 시설 지역을 중심으로 수중 생물의 종(種) 다양성과 위집도 증가, 평균 생체량 증가, 시설해역의 생태계 복원과 개선, 인공어초에 위집된 수초·해조류의 블루 카본 기능으로 인한 탄소 저감 효과 등 다양하고도 중요한 환경적 효과를 창출한다는 사실을 파악하였고, 이를 통해, 인공어초로의 재활용은 ‘자원의 순환적 활용’, ‘지속 가능한 양식업’, ‘자연 기반 해법’의 탄소 절감 솔루션 등에 두루 기여하는 사실을 확인하였다. 이런 고찰 결과를 토대로, 노후화된 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 프로세스의 친환경적 기법 개발과 상용화, 시설된 인공어초의 지속 가능한 활용과 관리를 위한 자연 기반 해법 강화(블루 카본 등 미래지향적 기능의 집중 육성), 첨단 스마트·인공지능 양식 기술 접목 등 창의적, 진보적 솔루션을 지속적으로 개발하고 축적해야 할 것이다.

둘째, 노후화된 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용은 시설해역의 어획량 증가, 연안해역의 어업 생산성과 수산 자원 증가 등 바람직한 경제적 효과를 창출하는 것으로 파악되었다. 이런 효과에 주목하면서, 1980년대 이래로 꾸준히 감소·쇠퇴하고 있는 국내 어업의 경쟁력과 불안정성을 해소·완화할 수 있는 미래적 대안 중 하나로 인공어초의 활용도를 높이는 방안을 지속적으로 강구하고 모색해야 할 것이다.

셋째, 인공어초로의 재활용은 해양 리조트, 다이빙 플랫폼, 수중 생물 체험 플랫폼 등 해상 관광 자원 및 인프라 활성화에 기여하는 동시에, 불법 조업 예방을 통한 해양 주권 보호에도 기여하는 등 의미 있는 사회적 효과까지 함께 창출하는 것으로 분석되었다. 이에 주목하면서, 인공어초를 매개로 국내 해양 문화와 해양 자원의 사회적, 교육적 활용도를 높일 수 있는 방안과 참신한 아이디어를 지속적으로 발굴할 필요가 있을 것이다.

주제어 : 고정식 해상풍력 하부구조물, 해양 플랫폼, 해체, 인공어초,
지속 가능한 재활용, 탄소 저감, 자연 기반 해법

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 필요성과 목적	1
2. 연구의 구성과 방법	6
II. 해양 플랫폼 해체 및 재활용	10
1. 해양 플랫폼 해체의 개념 및 현황	10
가. 해양 플랫폼 해체의 개념 및 방법	10
나. 해양 플랫폼 해체 산업 현황	14
다. 해상풍력 발전설비의 개요 및 전망	18
2. 해양 플랫폼 재활용의 개념 및 현황	21
가. 해양 플랫폼 재활용의 개념과 기대 효과	21
나. 해양 플랫폼 재활용의 현황과 전망	22
III. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용	27
1. 인공어초의 개념 및 운용	27
가. 인공어초의 개념과 기능	27
나. 인공어초 적지 선정 및 고려 사항	28
2. 인공어초 활용 현황	30
가. 국내 사례 고찰	30
나. 해외 사례 고찰	40
3. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 현황	43
가. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 이점	43
나. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 방법	44
IV. 인공어초로의 재활용의 환경적, 경제적, 사회적 효과	48

1. 환경적 효과	48
가. 수산·해양 생태계 개선·복원 효과	48
나. 이산화탄소 저감 효과	53
2. 경제적 효과	58
3. 사회적 효과	64
V. 결론	66
참고문헌	69
Abstract	83

표 목 차

<표 1> 해양 플랫폼 해체 절차(Decommissioning process)	12
<표 2> 전국 인공어초 시설 현황	32
<표 3> 강제 재질의 인공어초	35
<표 4> 인공어초 조성효과 (CPUE)	61
<표 5> 인공어초 조성효과 (수익)	62

그 립 목 차

[그림 1] 연구의 구성	8
[그림 2] 해양 플랫폼	11
[그림 3] 생산 중단 연도별 총 해체 비용	16
[그림 4] Types of Offshore Wind Turbine Platforms	19
[그림 5] Scuba Dive Resort, 보르네오 관광 홈페이지	23
[그림 6] Tourism project offshore oil platforms in Saudi Arabia	24
[그림 7] 인공어초 적지 조사 및 판정 절차	29
[그림 8] 1971~2020년 전국 인공어초 시설 현황	33
[그림 9] 1971~2020년 전국 인공어초 시설 현황 (재질별)	33
[그림 10] Fish habitat a reefed oil platform	42
[그림 11] Rigs-to-Reefs 중 전체 전복 방식	45
[그림 12] Rigs-to-Reefs 중 부분 전복 방식	45
[그림 13] Rigs-to-Reefs 중 운송 방식	46
[그림 14] 해상풍력 하부구조물에 서식하는 생태 군락 삽화	49
[그림 15] 인공어초 세부 경관	51
[그림 16] 인공어초의 운반 및 수중 투하	52
[그림 17] 울릉도 남양리 앞 바다에 조성된 인공어초의 바다 숲	56
[그림 18] 잘피숲 조성 전 전경(상)과 잘피숲 조성 후 전경(하)	59
[그림 19] Oil rig를 활용한 레크레이션 스쿠버 다이빙	65

I. 서론

1. 연구의 필요성과 목적

심각한 기후변화는 화석연료를 에너지원으로 하는 모든 설비에서 나오는 탄소배출과 밀접한 관계가 있으며, 해외 선진국들은 이러한 ‘기후위기’에 신규 발전설비를 태양광과 풍력 등 ‘친환경’에 신규투자를 집중하고 있고, 이는 곧 탄소중립을 통한 온실가스 감축을 달성하기 위한 핵심 방안으로 자리매김 하고 있다. 지난 2022년에는 덴마크에 소재한 세계 최고의 해상 풍력 발전 개발사인 Ørsted는 산호초의 부활을 위해 대만 해역(Greater Changhua Offshore Windfarm)에 설치한 4개의 해상풍력 하부구조물에 산호를 인공적으로 양육시키고 성공적으로 자랄 수 있는지 여부를 테스트하고 이러한 시도의 확장이 생물다양성에 미칠 잠재적 긍정요소를 평가하고 있다. (offshorewind.biz, 2022)

2023년 10월 기준 국내 상용 운전중인 해상풍력 발전단지 가운데, 모노파일(monopile) 및 자켓(jacket) 타입으로 구성된 고정식(bottom-fixed) 하부구조물(substructure)을 갖는 해상풍력 발전단지는 제주 탐라 해상풍력, 전남 영광 해상풍력 및 서남해 해상풍력 발전단지가 있으며, 특히 해상풍력 발전설비는 고정식 발전설비 외 다른 형태의 발전설비는 아직 없다. 제주 탐라 해상풍력 발전단지는 자켓 타입의 하부구조물로 총 10기 (2018. 1월 상용운전, 30MW), 전남 영광 해상풍력 발전단지는 모노파일 타입으로 총 15기 (2019. 4월 상용운전, 34.5MW) 그리고, 서남해 해상 풍력 발전단지는 자켓 타입으로 총 20기 (2019. 7월 상용운전, 60MW)로 구성되어 운영중이다. 또한, 오는 2024년 10월 부터 상용운전(100MW)을 목표로 하는 제주 한림 해상풍력 발전단지와 현재 건설중인 전남 신안 해상풍력 발전단지 등이 그 뒤를 잇고 있다. 현재 상용 운영중인 상기 세 곳의 설계 및 운영 연한은 약 20년으로 대략 오는 2038년으로 예상되는 바, 향후 15년 내 해체시기가 도래하게 된다.

한편, 전통적인 해양 플랫폼(offshore platform)는 해저·해양 개발 사

업의 주류를 이루는 해저·해양 석유·가스 탐사 및 개발을 위한 설비, 즉 ‘해저·해양 에너지 발전 설비’라는 협의의 의미가 가장 널리 사용되며(Ferrandis et. al., 2020), 해저 석유·가스의 시추(試錐)를 위한 설비, 해저 석유·가스 생산 설비, 해상 공장과 공항, 해상 선박 관리 설비, 해양 관측 설비, 심해 자원 개발·관리 설비, 해저 심층수 개발 설비 등 다양한 용도와 목적을 지닌 해양 플랫폼들이 20세기 중후반에 경쟁적으로 설치되었다(박광서, 2012).

일반적으로 이러한 전통적인 해양 플랫폼은 타당성 조사, 시추·탐사, 건조·제작, 운반·설치, 유지·관리, 해체·철거 등의 표준적인 단계를 거치면서 일정 기간 운영되다가 소멸되며, 평균 수명은 30~40년 정도로 간주된다(양무석, 2020). 이 중에서도 해양 플랫폼의 해체는 해양 자원 개발 활동의 최종 단계로써, 플랫폼의 경제적 기한이 다 되어 노후화 되었거나, 해상 화재, 해저 지진, 태풍 등 자연재해로 인해 더 이상 설비를 가동할 수 없게 되었을 경우, 관련 시설들을 적절하게 철거하거나 혹은 다른 방식으로 처리하는 프로세스를 지칭하며(한국해양수산개발원, 2011), 수명을 다한 해양 플랫폼은 해양 환경 오염을 방지하고 선박들의 안전 향해를 보장하며 해양 탐사, 해양 관측, 어업 활동 등 각종 해상 활동들을 방해하지 않기 위해 반드시 해체되어야 한다(Macreadie et. al. 2011). 이미 1990년대 초부터 노후화된 해양 플랫폼 해체가 국제적인 문제로 제기되어, 북동 대서양 해양환경 보호협약 기구(OSPAR), 발트해 해양환경 보호협약 기구(HELCOM), 국제 해사 기구(International Maritime Organization. IMO) 등 다수의 국제기구들이 해체 관련 국제 법규와 절차 등을 논의하고 관리하기 시작하였으며, 해당 분야의 국제 논의 및 협약은 한 동안 지속될 것으로 예측된다(차지은, 2022). 이미 상당히 많은 수의 해양 플랫폼들이 해체 되었음에도 불구하고, 이후에도 전 세계적으로 해양 플랫폼 해체는 더욱 빈번하게 이루어질 수밖에 없다. 이에 따라 해양 플랫폼 해체 시장 규모도 갈수록 증가하여 2027년에는 전 세계적으로 89억 달러에 달할 것으로 전망된다(한국해양수산개발원, 2019). 지역별, 대륙별로 살펴보면, 영국, 노르웨이, 네덜란드 등 해상 강국을 보유한 유럽이 전 세계 해양 플랫폼 해체 시장에서 가장 큰 비중

을 차지하고 있고, 멕시코灣(Gulf of Mexico)을 중심으로 한 북미 지역이 그 다음에 위치한다(Hall et. al., 2022). 이에 반해 한국은 석유·천연가스 등 천연 에너지 자원의 부족으로 인한 해양 플랫폼의 설계·조달·설치 등의 기술 및 운영의 경험을 펼치고자, 동해 가스전과 이어도, 가거초, 소청초의 해양 과학 기지 등 네 곳의 해양 플랫폼을 시공 및 운영함과 동시에 수많은 R&D과제들을 통해 관련 노하우를 쌓아 왔고, 이 가운데 2004년부터 생산을 시작한 동해 가스전은 2021년 12월에 생산을 종료하고, 국제해사기구(國制海事機構, IMO; International Maritime Organization)의 규정에 따라 구조물 폐기 작업에 착수하였다. 이 과정에서 시민 단체 및 관련 기구의 노력으로 인해, 해양 환경에 부담을 줄 수 있는 해체 작업 대신 해양 과학 기지로 전환하여 재활용하는 방안이 적극 검토되었으며, 그 결과 부유식 해상 풍력 발전 단지로의 재조성이 추진되고 있고(윤재현, 2018), 동해 가스전뿐 아니라, 다른 나머지 세 곳의 해양 과학기지 플랫폼들의 기한도 거의 소진되어 간다고 볼 수 있다.

이런 맥락에서, 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 방안과 그 환경적, 경제적 효과를 탐색하고자 하는 본 연구의 문제의식은 시의적절 하다고 볼 수 있다.

아울러, 한국과 인접한 동남아시아(태국, 인도네시아, 말레이시아 등) 지역에서도 해양 석유·가스 개발을 위해 장기간 운영된 다수의 해양 플랫폼들이 대부분 노후화되어 역시 가까운 미래에 해체 작업이 연달아 진행될 것으로 전망된다(안요한, 김민수, 2012). 동남아시아를 비롯한 아시아·태평양 지역의 해양 플랫폼 해체 산업은 최근에서야 초기 단계로 진입하였지만, 단기간에 1억 달러 규모로 급성장함으로써, 빠른 시일 안에 유럽, 북미 지역의 규모를 능가할 수도 있을 것으로 전망된다(전병민, 2014). 따라서, 한국 기업들이 해체시장에 발빠르게 진출하여 관련 시장을 선점할 경제적·산업적 가치가 뚜렷해 보일 뿐 아니라, 해체 이후 인공어초로의 재활용이 해양 생태계 환경에 도움을 줄 수 있는 노하우와 관련 데이터베이스를 연속성 있게 축적하고, 이에 따른 투자 생태계를 활성화 하는 것 또한 중요한 미래 과제이자 전도유망한 사업 아이템임을 알 수 있다.

해양 플랫폼의 전체 철거를 위해서는 막대한 비용과 첨단 기술, 전문 인력 등이 필요한 데다, 관련 국가나 지역 정부의 승인을 획득하고 상호 협력을 이끌어내는 법제적 절차도 복잡하기 때문에, 해양 플랫폼 해체 작업은 평균적으로 리스크가 크다고 볼 수 있다(김중배, 2008). 이로 인해, 최근에는 전 세계적으로 노후 해양 플랫폼의 모든 구조물들을 완전히 철거하는 대신, 구조물의 일부 또는 전체를 재활용하여 해상 리조트, 해상 LNG 터미널, 외해 양식장, 인공어초(人工魚礁, artificial reef) 등으로 재탄생시키는 방안들이 적극 검토되고 있다(Meyer-Gutbrod et. al., 2019).

특히, 2010년 이후부터 전 세계적으로 환경 문제가 긴급 이슈로 대두됨에 따라, 해양 환경 오염의 위험성이 있는 해양 플랫폼의 전체 철거 대신 재활용이 강력한 대안으로 부각되고 있다(곽민영, 2018; Adedipe & Shafiee, 2021). 20세기 중후반 동안 수십 년에 걸쳐 전통적인 해양 플랫폼이 전 세계적으로 집중 건설되는 과정을 통해 자연스럽게 기술 발전이 이루어지면서 용도 확장과 유형 개발이 이루어진 것처럼, 해양 플랫폼 해체도 신기술 개발과 글로벌 환경·경제 이슈의 반영, 국제 여론의 영향 등으로 인해 계속 새로운 아이디어나 대안들이 모색되고 있다. 그 중에서도 비교적 최근에 주목되고 있는 미래적 대안 중 하나가 인공어초로의 재활용·재정비이다.

인공어초는 해양 생물 보호 및 배양을 목적으로 해저나 해중에 설치되는 인공 어장 시설로서, 해양 생물들의 다양한 생활 환경과 특성을 최대한 활용하는 효과적인 수산 자원 배양·조성 방법 중 하나이다(이지현, 2009; Meyer-Gutbrod et. al., 2019). 해양 플랫폼 해체 산업의 초기 단계에서는 대안으로 주목받지 못하였지만, 해체 기술이 갈수록 발전하고 대안 관련 논의들이 진전됨에 따라, 인공어초로 재구성하는 방안도 적극 검토되고 있다. 무엇보다도 21세기 초반부터 환경 문제가 심각한 글로벌 이슈로 부각됨에 따라(Trenberth et. al., 2007), 해양 환경 오염을 최소화하는 것은 물론, 더 나아가 해양 환경 개선과 생태계 복원 등에도 두루 기여할 수 있는 미래 지향적 대안이 적극 탐색되었고, 이에 따라, 인공어초가 최적의 대안으로 부각되었다(Higgins et. al., 2022). 이는 최근 10여

년 간 모든 글로벌 산업과 비즈니스, 정책 방면에서 친환경적 전략과 지속 가능한 발전이 핵심적, 최우선적 고려 대상이 된 것과 맥락을 같이 한다. 이런 점에서 본 연구가 전통적인 해양 플랫폼의 해체에 따른 재활용 뿐 아니라, 노후화된 해상풍력 하부구조물을 해체하여 인공어초로의 재활용 및 재구성 방안에 주목한 것은 의미 있는 시도일 것이다.

본래 인공어초는 해양 플랫폼과는 무관하게 독자적인 해양 사업으로서 20세기 중반부터 활성화되고, 국내에서도 1971년부터 인공어초 사업이 개시되어 1980년까지는 소규모 시범사업으로 추진되었다. 한국수산자원관리공단(FIRA)에서 보고한 2022년도 인공어초 관련 통계에 따르면, 1971~2021년 동안 국내에서 총 231,645ha에 달하는 인공어초가 설치되어 여러 목적으로 운용되고 있으며, 인공어초 산업이 본격화됨에 따라 ‘바다 목장’과 ‘바다 숲’[해중림(海中林)]의 기능을 결합시킨 복합형 구조물로서의 진화된 운영 방식이 주류를 이루게 되었고, 이로 인해 수산 동식물의 종합적인 산란·서식 설비인 인공어초의 환경적, 생태적, 경제적 효용성과 활용도는 갈수록 높아질 것으로 전망된다.

이런 속에서 해상풍력 발전설비를 구성하는 하부 구조물의 세부 유형 중 자켓(jacket) 타입과 같은 고정식 하부 구조물이 인공어초로의 재개발·재활용에 보다 적합하고도 용이하다는 사실이 새롭게 규명됨에 따라 (곽민영, 2018), 유사한 유형의 구조물을 인공어초로 재활용하는 방안이 주목되고 있다. 이에 본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 방안과 국내외 현황 및 그것이 해양 생태 환경 개선, 해양 산업 성장, 탄소 저감 등에 미치는 효과를 고찰·규명하고자 한다. 이는 글로벌 환경 개선 및 ‘인류의 지속 가능한 발전’이라는 미래 지향적 트렌드에도 부합되는 작업일 것이다.

원론적, 원칙적인 의미만이 아니라, 상기에 적요한 국내 네 곳의 해양 플랫폼 해체 뿐 아니라, 미래 노후화가 도래되는 고정식 해상풍력 발전설비의 하부구조물을 해체 후 재활용 및 재구성의 대안을 마련하는 데에도 인공어초로의 재활용 방안 및 효과를 고찰하는 작업은 실질적으로 도움이 될 것이다. 아울러, 최근 급성장 중인 동남아시아 해역에서의 해양 플랫폼 해체 시장에 대한 국내 기업들의 진출 전략을 국가적 차원에서

모색하고 있다는 사실도 본 연구의 당위성과 필요성을 지지한다. 이에 본 연구는 최근에 노후된 해양 플랫폼이 해체 후 재활용으로 대체되어 가는 글로벌 흐름에 주목하면서, 그중에서도 환경적, 경제적 이점과 혜택이 더욱 높은 것으로 평가되고 있는 인공어초로의 재활용 방안을 탐색하고 그 환경적, 경제적, 사회적 효과를 고찰할 것이다. 그를 통해 해양 자원 활용 및 해양 생태계 보호에 모두 도움이 되는 유효한 산업적, 실무적 시사점을 도출하고자 한다.

2. 연구의 구성과 방법

이와 같은 주요 내용과 문제의식 등을 기반으로, 본 연구는 총 5개의 장으로 구성된다.

제1장은 서론으로 제1절 : 연구의 필요성과 목적, 제2절 : 연구내용의 구성과 연구방법 등에 관하여 설명한 것이다.

제2장은 1990년대 후반부터 글로벌적으로 이슈가 되고 있는 전통적인 해양 플랫폼의 해체 및 재활용에 대해 고찰한다. 세부적으로는 제1절 : 해양 플랫폼 해체의 개념 및 현황, 제2절 : 해양 플랫폼 재활용의 개념 및 현황, 제3절 : 해상풍력 발전설비의 개념 등으로 구성된다. 제1절에서는 해양 플랫폼 해체의 개념, 해양 플랫폼 해체 산업 현황, 해양 플랫폼 해체의 환경적 요인 등을 살펴보고, 제2절에서는 해양 플랫폼 재활용의 개념과 유형, 해양 플랫폼 재활용 산업 현황 등을 고찰한다. 제3절에서는 해상풍력 발전설비의 형태와 개념에 관해 설명하였으며, 이러한 고찰 내용을 토대로, 해양 플랫폼을 해체하여 폐기하는 대신 인공어초로 재활용하는 방안 및 의의를 논의함으로써, 제3장에서 인공어초로의 재활용 방안을 본격적으로 고찰해야 하는 당위성, 필요성의 근거를 제시한다.

제3장은 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용에 대해 고찰하는 부분이다. 세부적으로는 제1절 : 인공어초의 개념 및 운용, 제2절 : 인공어초 활용 현황, 제3절 : 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 등으로 구성된다. 제1절에서는 인공어초의 개념과 유형, 인공어초 적지 선정 및 고려 사항 등을 살펴보고, 제2절에서는 인공어초의 활용 현황을 국내외 사례 비교

를 통해 파악하고 장점과 문제점, 개선점 등을 논의한다. 제3절에서는 해양 플랫폼을 해체하는 대신 인공어초로 재활용하는 이점과 재활을 위한 세부 방법 등을 분석함으로써, 우리나라의 미래 과제일 뿐 아니라, 향후 20~30년 간 정점에 달할 전 세계의 해양 플랫폼 재활용에 대한 유효한 해법을 이론적으로 제시한다.

제4장은 인공어초로의 재활용의 환경적, 경제적, 사회적 효과를 고찰하는 부분으로서, 연구의 궁극적 목표인 동시에, 선행 연구들과의 차별화를 확보할 수 있는 내용이 될 것이다. 세부적으로는 제1절 : 환경적 효과, 제2절 : 경제적 효과, 제3절 : 사회적 효과 등으로 구성된다. 제1절에서는 해양 생태계 복원 등 해양 환경에 미치는 효과를 중점적으로 고찰하고, 제2절에서는 해양 산업 성장, 해양 플랫폼 해체 비용 절감 등 다양한 경제적, 산업적 효과를 분석한다. 제3절에서는 이산화탄소 저감, 기후 변화에 대한 능동적 대응 등 사회적, 국제적 효과를 논의한다. 이를 통해, 해양 플랫폼 해체의 대안으로 주목되고 있는 인공어초로의 재활용 방안의 실효성과 타당성을 이론적으로 논증하는 동시에, 인공어초의 지속 가능한 발전 전략을 제안한다.

제5장은 결과 요약 및 본 연구에서 시사하는 바를 기술한 결론으로 구성된다.

이상과 같은 내용을 고찰하고 규명하기 위해, 해양 플랫폼 및 인공어초에 관련된 국내외 선행 연구들과 학술 단행본 등을 중심으로 이론적, 문헌적 고찰을 수행한다. 아울러, 국내외 관련 사이트, 담당 기관 및 국제 기구의 홈페이지 등에서도 최신 자료들을 수집하여 분석한다. 전통적인 해양 플랫폼과 신재생 에너지의 한 부류인 해상풍력 발전설비의 경제수명이 다 된 노후와 이후, 인공어초로의 재활용에 대한 국내외 자료들을 통해 관련 문제들에 대한 국내외 인식과 동향 등도 함께 파악한다.

본 연구 내용의 구성과 체계를 정리하면 다음과 같다.

- 연구 주제 설정



- 연구의 필요성과 목적 제시
- 연구의 내용과 방법 제시



■ 해양 플랫폼 해체 및 재활용 ■

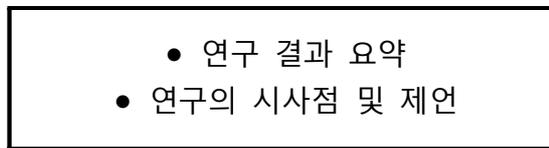
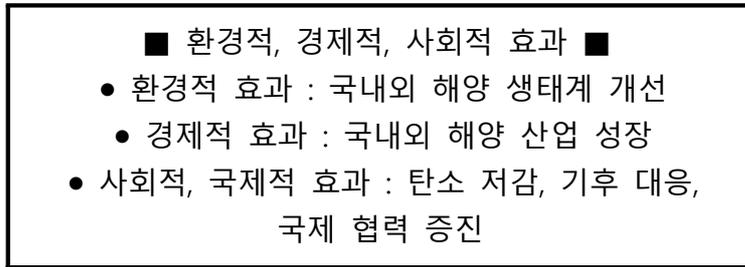
- 해양 플랫폼 해체의 개념, 유형, 연혁, 현황, 경제적·사회적 영향
- 해양 플랫폼 재활용의 국제 공통 과제에 대한 해법적 역할
 - 해상풍력 발전설비의 개념과 현황
- 인공어초로의 재활용, 의의, 당위성, 해체 대신 재활용에 주목하게 된 외부적·환경적 요인



■ 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 ■

- 인공어초의 개념, 유형, 운용 절차
- 인공어초 활용 현황 : 국내외 사례 비교
 - 인공어초로의 재활용 이점
 - 인공어초로의 재활용 방법





[그림 1] 연구의 구성

II. 해양 플랫폼 해체 및 재활용

1. 해양 플랫폼 해체의 개념 및 현황

가. 해양 플랫폼 해체의 개념 및 방법

인류는 생존을 위한 중대 에너지원인 석유·가스 등의 확보를 위해 육상으로부터 해양으로 나아갔고, 최근에는 심해와 해저로까지 개발 영역을 확장하였다. 해양·해저 개발을 위해, 이미 20세기 초반부터 전 세계 해역에 고정식 및 부유식의 해양 플랫폼들이 경쟁적으로 설치되기 시작하였고, 이후 그 수는 가파르게 증가하였다(Higgins et. al., 2022). 이를 통해 인류는 상당한 규모의 해양 석유·가스를 확보하였고, 그를 통해 인류 전체의 생존을 위해 필요한 에너지 자원을 유용하게 보충할 수 있었다. 해양 플랫폼의 주류를 차지하는 고정식 해양 플랫폼의 평균 수명은 약 30년으로, 이 기간이 경과하면 본래의 기능을 제대로 수행하기 어려운 ‘노후화’ 상태가 된다. 전 세계적으로 이미 50% 정도의 고정식 해양 플랫폼의 수명이 소진되었고, 나머지 50%도 가까운 미래에 수명이 다하여 해양 폐기물이 될 것으로 전망된다. 이에, 해양 환경·생태계 파괴·오염 등에 따른 환경 규제가 강화됨에 따라 적절한 시점에서 노후 해양플랫폼을 해체하고 처리해야 하는 것이 국제적 과제로 대두되었고, 이후 해체 절차 관련 법적 요구사항, 프로세스 및 관련 인허가 등의 여러 규정과 정책이 논의되고 수립되었다.

이와 관련한 대표적인 국제 규범으로는 제네바조약 (1958년), UNCLOS (United Nations Convention on the Law of the Sea)규정 (1982년)과 IMO (International Maritime Organization, 국제해사기구)규정 (1989년)들이 있다. IMO에서는 설치 후 25년 된 해양 플랫폼 구조물에 대해 해양 환경 보존 및 안전한 항해를 위해 해체를 권고하고 있으며, 1998년 이후 수심 100m 이하에 설치된 모든 해상구조물과 4,000톤 이하 하부 구조물은 완전 철거 대상으로 규정하고 있다. 런던의정서

(1975년)에서는 해양을 오염시킬 수 있는 가능성이 존재할 경우 해상 구조물의 불완전한 철거를 금지하고 있다. 또한, 대표적인 지역적 차원에서 규범인 OSPAR Decision 98/3 (OSPAR Convention)(1992년)은, 10,000톤 이하의 고정식 철제 구조물은 육상으로 완전철거를 규정하고 있으며, 10,000톤 이상의 고정식 철제 구조물은 육상에서의 완전철거 및 부분철거를 허용하고 있다.

이들 협약에서는 해양 폐기물이 더 이상 양산되는 것을 최대한 예방하기 위해, 고의적 폐기를 목적으로 해양 플랫폼 및 기타 인공 구조물들을 무분별하게 방치하는 행위를 ‘투기(dumping)’로 규정하였다. 또한, 더 이상 제 기능을 하지 못하여 운용이 어려운 해상 설비들에 대해 전체적 또는 부분적으로 ‘제거(removal)’하는 것을 국가와 지역의 의무로 규정하였다.



[그림 2] 해양플랫폼

*출처 : <https://www.wartsila.com/>

해양 플랫폼 해체(decommissioning)는 고정식 해양 플랫폼(topside, jacket 등), 해상 파이프라인, 해저 장비, 컨덕터(conductor) 등이 주요 철거 및 해체 대상이 되며, 해상에서 해체·제거된 구조물들은 인근 육지로 운송되어 폐기물 처리되거나 일부는 고철로도 판매된다(Genuine & Olaide, 2019). 최근에는 해체 비용 절감을 위해 구조물의 일부분을 다른 목적이나 용도의 시설물로 재활용·재구성하는 사례도 증가하는 추세이다(Chandler et. al., 2017). 미국 내무부 산하 해양 에너지 관리, 규제 및 집행국(BOEMRE, US Department of the Interior Bureau of Ocean Energy Management, Regulation, and Enforcement)에서 권장하는 일반적인 해체 프로세스에는 다음의 10단계로 구분된다.

①	프로젝트 관리, 엔지니어링 분석 및 종합 운영계획
②	승인 및 관련 규제 준수사항 여부: 환경영향평가 및 현장조사 보고서 등
③	플랫폼 해체 사전준비: 탱크, 프로세스 장비 및 배관 세척, 탑사이드 해체를 위한 구조물 보강 및 자켓부분의 해양생물 제거
④	Well Plugging and Abandonment(해저 유정 봉쇄)
⑤	Conductor Removal(컨덕터 제거)
⑥	작업 마지선 동원 계획
⑦	플랫폼 제거: 탑사이드 및 자켓 제거
⑧	파이프라인 및 전력 케이블 폐기
⑨	철거 잔해물 처리
⑩	Site Clearance

* 출처: Society of Petroleum Engineers
(https://petrowiki.spe.org/Offshore_decommissioning)

이어서 해체 공사를 보다 합리적, 효율적으로 자원·비용 낭비를 최소화하면서 수행하기 위해, 사업 타당성 조사와 환경 영향성 평가 등을 진

행하여 법적, 환경적, 기술적, 경제적 타당성 등을 종합적으로 검토함으로써, 가장 적합한 해체 계획을 채택·구성한 후 정부나 지자체의 최종 승인을 획득해야 한다(Friederichs et. al., 2015). 해체 작업 중 첫 단계는 해양 유정(油井) 봉쇄(well plugging & abandonment)인데, 이는 해양 환경 오염 방지와 관련해서 가장 중요한 작업이기도 하다.

본격적인 해체 작업은 전체 구조물 제거 작업(complete removal), 부분 구조물 제거 작업(partial removal), 해당 영역에 일부를 남겨두는 작업(leave in place) 등으로 세분된다(Chandler et. al., 2017). 전체 구조물 제거의 경우 해저면 아래에 위치한 하부 구조물까지 모두 남김없이 절단하여 제거·해체하게 된다. 이 작업이 해양 환경 보호를 위한 가장 확실하고 책임감 있는 처리 방식이지만, 비용과 시간 등의 문제로 인해 관련 국가나 기업들이 가장 난색을 표하고 망설이는 작업이기도 하다(Bressler & Bernstein, 2015). 부분 제거의 경우 하부 구조물 중 일부분을 남겨두고 상단과 중단 구조물 중심으로 제거하게 된다.

해체 방법은 구조물의 규모, 무게, 주변 수심 등에 따라 결정되는데, 결정 기준은 국가 또는 지역마다 상이하다. 따라서, 해체 공사를 본격 진행하기 이전에 각 국가, 지역마다 적용되는 해체 관련 규정을 숙지하고, 해체 대상 구조물의 무게, 규모, 용도, 주변 해역의 수심 등을 종합적으로 검토함으로써, 가장 적합하고 무리 없는 해체 방법을 선택해야 할 것이다(Bressler & Bernstein, 2015). 해체사업은 공사 비용에 비해 경제적 이익이나 기타 효과들이 창출되지 못하는 관계로, 각국 정부나 관련 기업들이 쉽게 시도하지 못하는 상황이며, 노후화된 구조물의 분해, 절단 등으로 인해 발생할 수 있는 해양 환경 오염 문제도 큰 걸림돌이 된다(Parente et. al., 2006). 이와 함께, 국가나 지역 간 상이한 이해관계와 해체 관련 국제 규정 미비 등 다양한 기술적, 정책적, 제도적 문제들이 얽혀 복잡한 양상으로 전개되는 경우가 많다(Techera & Chandler, 2015). 이런 산적한 문제들을 국제 협약과 공조를 통해 합리적으로 해결하면서, 인류의 ‘미래의 지속 가능한 삶’을 보장하는 중요 거대 환경이자 자원의 보고(寶庫)인 해양 환경을 보호할 수 있는 현실적, 실용적인 해양 플랫폼 해체 또는 재활용 방안을 모색하고 정착시켜야 할 것이다.

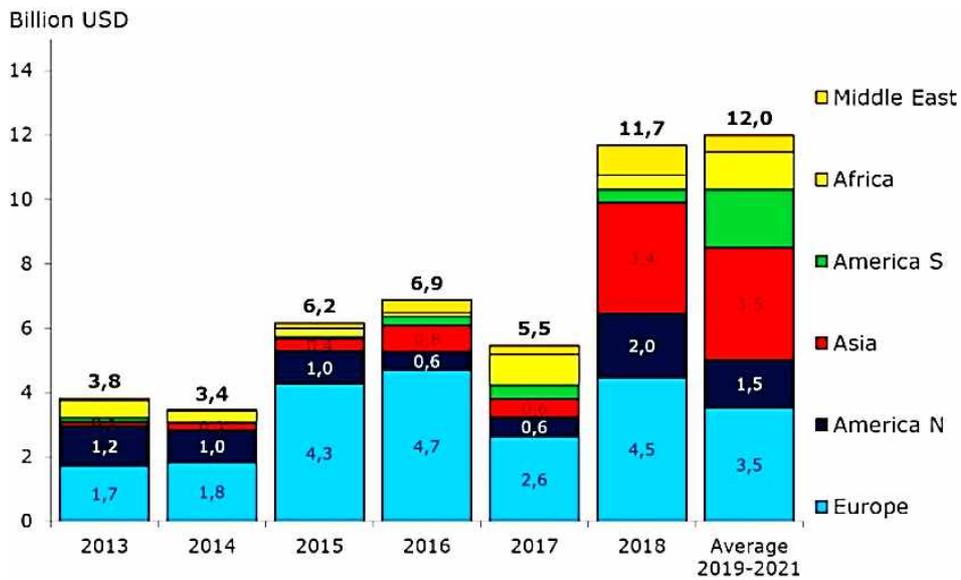
나. 해양 플랫폼 해체 산업 현황

해양 플랫폼 해체 산업이 글로벌적으로 본격화되기 시작한 것은 1990년대부터이며, 상술한 대로 이는 해양 플랫폼 설치 산업이 개시되고 활성화된 시점을 감안하면 상당히 늦은 것으로 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고, 그로부터 10년 정도 경과한 21세기 초부터 이미 비용 대비 효과가 매우 저조하고 각종 위험 부담도 높은 전면 해체·철거 방식을 대체할 만한 유용한 해결책이나 대안이 모색되기 시작하였다(Chandler et. al., 2017). 이 과정에서 해양 기술 선진국들을 중심으로 노후화된 해양 설비의 해체·철거 대신 부분 또는 전체 구조물의 재활용 방안이 제안되고 연구되기 시작하였다. 21세기에 들어서서 국제 사회는 이와 같이 노후화된 해양 또는 해저의 석유·천연가스 등과 같은 자원 탐사, 시추 및 생산 구조물의 방치를 해양 환경 오염의 주요한 원인으로 인식하기 시작하였고, 특히 해양에서의 선박의 항해 및 어로(漁撈) 행위 등에 장애를 줄 뿐 아니라 해양 환경 오염 및 파괴를 유발하는 거대 해양 설비를 제거해야 한다는 인식이 국제적으로 확산되면서, 국가 간에 어느 정도 강제력과 구속력을 지니는 국제 협약들이 연이어 타결되었고, 이와 같은 제도적, 정책적 개선으로 인해 해양 플랫폼 해체 산업이 본격적으로 성장하였다.

Douglas-Westwood의 관련 시장 보고서에 의하면, 2015년 기준으로 고정식 해양 플랫폼은 전 세계적으로 7,600개소나 된다고 하며, 해양 플랫폼의 운영 연한을 최대 30년 정도로 가정할 경우, 대다수의 플랫폼이 향후 10년 이내 해체 상태에 이르러 관련 진행해야 하는 것으로 확인되었다(Douglas-Westwood, 2015). 영국의 전문 리서치 기관인 Visiongain은 2013년도에 해양 플랫폼 해체 시장으로 지출된 글로벌 자금은 39억 4,680만 달러였다고 보고하면서, 5년 뒤인 2018년에는 65억 5,190만 달러로 66%나 상승할 것이라고 예측하였다(Visiongain, 2013). 또한, Market Research Future에서 출간한 <Offshore Decommissioning Market Research Report-Forecast to 2023>에서는 2017~2023년간 글로벌 해양 플랫폼 해체 시장이 연평균 6.93%씩 성장할 것으로 예측하였다(Genuine & Olaide, 2019).

이처럼 글로벌 해양 플랫폼 해체 산업을 선도하고 있는 3대 지역은 북미 지역, 북유럽 시장, 그리고 아시아 지역으로 나눌 수 있는데, 우선, 북미 시장의 중심지는 단연 멕시코灣(Gulf of Mexico)으로서, 이 지역은 전 세계 해양 플랫폼의 32%에 해당하는 플랫폼들이 포진되어 있는데, 본격적인 해체 사업이 개시되기 이전인 1980년대에는 3,000개소가 넘는 설비물들이 집중되어 있었다(Kaiser & Liu, 2014). 그러나, 설치된 지 25년 이상인 노후화된 해양 플랫폼이 현재까지도 40%에 육박하기 때문에, 적어도 향후 10~20년 동안은 글로벌 해체 산업의 중심지 중 하나가 될 것으로 전망된다. 둘째, 현시점 기준으로 세계에서 두 번째로 해양 플랫폼 해체 산업 규모가 크고 관련 시스템이 발전되어 있는 북유럽 지역에서는 2025년까지 563곳의 해양 영역에 위치한 304개소 플랫폼을 해체할 예정이며, 영국 대륙붕만 해도 98개소의 플랫폼을 해체할 예정이다. 북유럽 지역의 중심 국가 중 하나인 영국의 해양 플랫폼 해체 시장은 2010년에는 전 세계 해체 시장으로 지출되는 경비의 2.0%만을 차지하였지만, 2016년에는 그 비중이 7.0%(12.0억 파운드)까지 상승하였으며, 2025년까지 해상 설비물 해체를 위해 170억 파운드 이상을 지출할 것으로 예상된다(Oil & Gas UK, 2017). 또 다른 중심지인 노르웨이의 해양 플랫폼 해체 시장은 2010년에는 전 세계 해체 시장 지출 경비의 2% (4억 파운드) 정도를 차지하였지만, 2021년에는 4%(8억 파운드)까지 상승하였다(www.npd.no/en). 셋째, 아시아 지역은 전 세계 해양 플랫폼 해체 시장 중에서도 대표적인 신흥 시장으로 급성장하고 있다. 아시아 국가들의 석유·가스 채굴 시설의 대부분이 해양에 설치된 관계로, 전 세계의 해양 플랫폼 중 26% 정도가 이 지역에 집중되어 있기 때문이다. 그 중에서도 국내 기업들의 비즈니스 타겟으로 부상하고 있는 동남아시아의 경우 80여 개소의 해양 설비물들이 설치된 이후 20년 이상 경과된 노후 시설로 파악되고 있으며, 인도네시아, 말레이시아 등이 가장 많은 비중을 차지하고 있다(Lyons, 2013). 또한, 아시아 지역의 해양 설비물들은 멕시코灣(Gulf of Mexico)의 설비물들과는 달리, 얕은 수심에 설치되어 있어 해체나 재활용이 상대적으로 용이하며, 북유럽 지역에 비해 기후도 상대적으로 온난하다.

이상과 같이 아시아 지역의 풍부한 해체 물량과 우월한 해양 환경 조건 등은 지속적인 해체 시장 성장 요인으로 작용하고 있으며, 실제로 아시아 지역의 해양 플랫폼 해체 시장은 2010년대 이래로 해마다 평균 15.1%씩 그 시장 규모가 커질 것으로 예상되는데, 이는 다른 지역보다도 평균 두 배에 달하는 수치이다(Jensen et. al., 2020).



[그림 3] 생산 중단 연도별 총 해체 비용

*출처 : Rystad Energy ServiceCube(2019)

(<https://www.hellenicshippingnews.com/global-decommissioning-set-to-hit-record-36-billion-over-the-next-3-years/>)

노르웨이의 소재의 저명한 산업동향 분석기관인 Rystad Energy 보고서에 의하면, 기후변화의 대응으로 탄소중립이 강요되는 에너지 전환시기인 오늘날 석유값 하락세로 인해 2021년까지 수백 개의 해상 석유 및 가스 유정의 생산이 중단될 수 있고, 그 결과 글로벌 석유 및 가스 산업의 소위 해체 의무는 지난해 117억 달러로 증가했으며, 2019년부터 2021년까지 연간 평균 약 120억 달러로 꾸준히 유지될 것으로 전망했다(Rystad Energy, 2019).

상술한 3대 중심 지역 외에도 전 세계적으로 해양 플랫폼 해체 산업은 전성기를 맞이하고 있는데, 이처럼 단기간에 빠른 속도로 성장·팽창하는 데 영향을 미친 긍정적 요인들을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 해체 기술의 지속적 발전이다. 해양 시설물 및 관련 장비, 선박 등의 해체에 필요한 기술적 발전은 프로젝트 기간, 비용, 공력 등을 대폭 경감함으로써, 공사를 효율적, 성공적으로 수행할 수 있는 원동력이 되고 있다(양무석, 2020). 해저에 위치한 하부 구조물과 해저 관련 설비 등을 절단할 때에는 해저의 수온, 수압, 조류 등의 환경조건 등을 면밀하게 파악하고 신중하고도 정확하게 작업해야 하는데, 이 과정에서 다이버들이 작업의 효율성과 안정성을 확보하여 수행하는데 한계가 있다. 그러나, 육상이나 해상 또는 선상(船上)에서 원격으로 조종하는 무인잠수정 ROV (Remotely-Operated Vehicle)가 개발된 이후 잠수부들이 작업하기 까다로운 해저 여건 속에서도 큰 어려움 없이 고난도의 작업을 수행할 수 있게 되면서, 작업 기간과 공정을 대폭 단축하게 되었다(Love et. al., 2020).

둘째, 해체·철거 작업의 국제적 강제화이다. 전 세계적으로 자원 확보를 빙자한 무분별한 환경 훼손, 남용, 오염 등에 대한 경각심과 비판 의식이 갈수록 확대됨에 따라(차지은, 2022), 정상적으로 가동되지 않는 해양 시설물의 해체 및 폐기에 관련된 국제 규제가 순차적으로 타결되고 어느 정도 공적인 강제력도 확보하게 되었다(최영진, 2019). 이는 해양 산업 분야만이 아니라, 모든 현대 산업 전반에 걸쳐 공통적으로 확산되고 있는 친환경 발전 및 ‘지속 가능한 발전’이라는 거대한 범 글로벌적 흐름에도 부합하는 변화라고 볼 수 있다.

2000년대 중반부터 급속도로 악화된 환경 문제, 기아·난민 문제, 지역 격차 문제 등에 대한 국제 사회의 위기의식이 고조됨에 따라, 각국 정부와 UN 등 국제기구들은 다방면으로 인류 현안의 공동 해결과 미래의 지속 가능 성장을 모색하기 시작하였다(명재규 외, 2021). 이러한 일련의 노력과 모색의 결실로써, UN (United Nations)은 2015년에 ‘지속 가능 발전 목표’ (Sustainable Development Goals, SDGs)를 글로벌 산업 발전, 조직 운영, 국가 정책, 기업 경영 등의 최우선 목표로 채택하였으며,

이를 계기로 지속 가능한 발전 또는 ‘인류의 삶의 지속 가능성 (sustainability)’은 적어도 이론적, 당위적으로는 모든 국가의 정책, 제도, 기업 경영 등에 우선해야 하는 원칙이자 인류 공통 과제로 부각되고 존중되기에 이르렀다(박태영, 윤건용, 2021).

이처럼 인류의 지속 가능성이라는 대의를 전제로, 해양 환경 보호에 기여할 수 있는 해양 플랫폼 해체 또는 재활용의 책임을 다해야 한다는 국제 여론이 조성되기 시작하였고, 이것이 암묵적인 강제력을 지니게 됨에 따라, 각국 정부, 지역 공동체, 기업들의 경각심과 노력도 고조되고 있다. 이는 해체 관련 기술 발전에 못지않게 중요하고 의미심장한 환경적, 사회 심리적 변화이자 강제력을 갖춘 동인(動因)이라고 볼 수 있다. 해양환경만이 아니라, 글로벌 환경 전체에 대해 이상과 같은 긍정적 변화와 선순환 구조가 조속히 정착되어야 할 것이다.

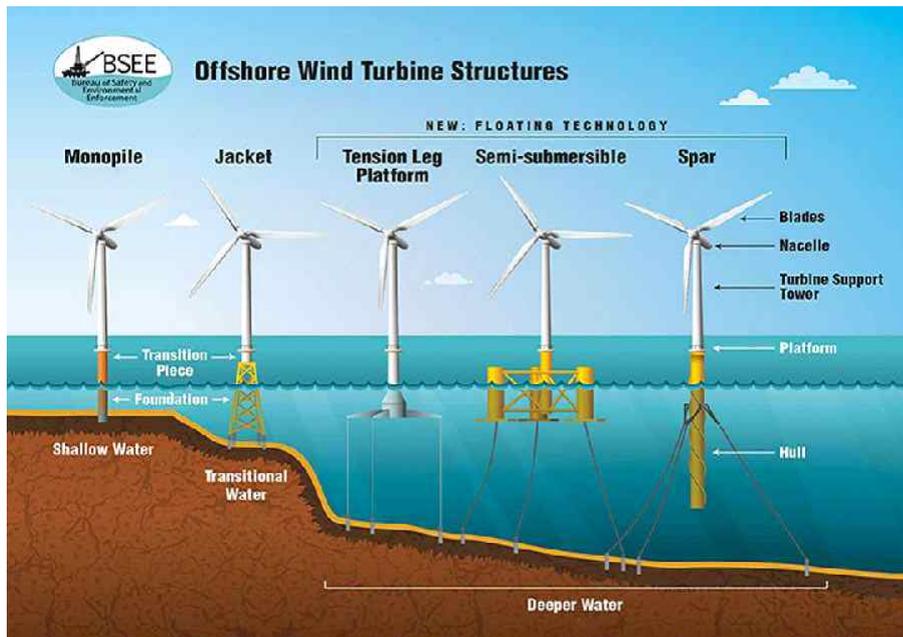
다. 해상풍력 발전설비의 개요 및 전망

풍력발전은 바람이 갖는 운동에너지를 기계에너지로 변환하는 발전기를 육상 또는 바다에 설치해 전기를 생산하는 대표적인 재생에너지로서, 육상에서 시작한 풍력 발전은 기술의 발달로 터빈이 점차 대형화되고 이에 따른 설치 장소의 한계를 해소하기 위해 해상 풍력발전으로 개발되었으며, 육상 풍력발전보다 비교적 소음 및 경관 훼손 등 환경적 요인에서 자유롭고, 해상에서 바람이 갖는 바람의 질도 육지보다 뛰어나 대규모 발전단지 조성 및 전력 생산 비용 절감이 가능하다.

해상풍력 발전설비는 설치 장소에 따라 고정식과 부유식으로 구분하며, 고정식(fixed)에는 하부구조물의 형태에 따라 중력식(gravity), 모노파일(monopile) 그리고 자켓(jacket) 타입으로 구분할 수 있고, 부유식(floating)은 텐션 레그 플랫폼(Tension leg platform), 반잠수식(semi-submersible) 그리고 스파(spar) 타입으로 분류된다. 지구 온난화의 주범인 이산화탄소를 포함한 온실 가스의 글로벌 배출량은 1970~2010년의 40년 동안 80% 이상 증가하였으며, 전 세계 평균 기온은 지난 100년 동안 0.74℃나 상승하였다(권민상, 2021). 우리나라의 온실 가스 배

출량도 수십 년 간 급속도로 늘어났는데, 1990년에 2억 9,220만톤으로 조사된 전국 이산화탄소 등가물은 2018년에는 7억 2,770만톤으로 보고되어, 28년 만에 149%나 증가하였다(조세라, 2020).

세계는 지구온난화에 따른 기후변화에 대응하기 위한 일환으로 태양광 및 해상 풍력 발전 등의 신재생 에너지의 발전 비중을 매우 크게 확대하고 있으며, 이와 관련한 세제 혜택 및 인프라 확대를 위한 투자를 촉진하는 등의 다양한 지원을 모색하고 추진하고 있으며, 국내의 경우도 ‘재생에너지 3020’, ‘신재생에너지 공급의무화제도(RPS: Renewable Energy Portfolio Standard)’ 그리고, ‘RE100 (재생에너지 100%)’ 등 탄소중립을 위한 단계적 이행방안 수립 및 이에 부합하는 관련 기술혁신 추진체가 구성되어 신재생 에너지 발전에 따른 연계 정책 및 실증단지 구축, R&D 지원 및 선진국과의 기술격차를 좁히기 위한 기반 마련 및 관련 기술고도화에 힘쓰고 있다.



[그림 4] Types of Offshore Wind Turbine Platforms

*출처: <http://www.bsee.gov>

상술한 것과 같이, 현재 국내에서 모노파일(monopile) 및 자켓(jacket) 타입의 고정식(bottom-fixed) 하부구조물을 갖는 해상풍력 발전단지는 제주 탐라 해상풍력, 전남 영광 해상풍력 그리고, 서남해 해상풍력 발전 단지가 있고, 이들 역시 설계수명이 다하는 오는 2028년 즈음에 해체시기를 맞이하게 될 것으로 예상된다.

한편, 인도네시아의 해양투자조정부는 우리나라 해양수산부와 업무성격이 유사한 부처로, 앞서 2019년 인도네시아 자카르타에 ‘한-인니(印尼) 해양플랜트 협력센터’를 만들기도 하였으며, 이후 ‘해양플랜트 서비스산업 업무협약(MOU)’을 체결하고, 인도네시아 동부 지역에 위치한 노후 해양플랫폼 1기를 순수 우리 기술력으로 해체하여왔을 뿐 아니라, 이를 인공어초로 재활용한 후 해당 지역에 대한 생태 환경 모니터링을 성공적으로 진행 중이다. 이는 우리기업의 실제 해체 경험과 더불어 노하우를 축적하는 계기가 되었고, 관련 시장에 진출 할 수 있는 기반을 마련한 성과라 볼 수 있어 향후 귀추가 주목된다.(해양수산부, 2023).

고정식 해상풍력 발전설비의 하부구조물 해체는 전통적인 해양 플랫폼 설비보다 규모가 월등히 작아 해체 프로세스나 기술이 복잡하지 않고 이에 따른 공사기간도 짧기에 비용도 상대적으로 매우 적을 것으로 예상된다. 상기의 인니 해체 경험을 바탕으로 이르면 향후 15년 내 도래하는 국내 해상풍력 발전설비 하부구조물의 해체 기술과 노하우를 국제수준에 준하는 내용으로 매뉴얼화 하고, 해체 뿐 아니라 이와 연계된 인공어초로의 재활용과 관련된 전문기술을 확보하는 것이 중요하다. 이에, 이번 인도네시아 해체 경험을 바탕으로 해양 플랫폼 해체와 인공어초로의 재활용을 패키지로 구성하여 기술 및 노하우 수출로 가까운 동남아 시장의 진출을 공고히 하며, 또한 정부와 국내 대학은 협업 체계를 구축하여, 관련 전문 인력을 적극적으로 양성할 필요가 있을 것이다.

2. 해양 플랫폼 재활용의 개념 및 현황

가. 해양 플랫폼 재활용의 개념과 기대 효과

지금까지 살펴본 것처럼, 전통적인 해양 플랫폼 해체 산업의 기술적, 비용적, 법제적 취약점들이 드러남에 따라, 최근에는 해체보다는 재활용(reutilization) 방안에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다. 해양 플랫폼 재활용은 노후화된 해양 시설물을 해체하거나 철거하는 대신, 각 부분별로 구조 변경 및 적절한 리모델링을 통해 다른 용도로 전환하여 재사용하는 것을 지칭한다(Hou et. al., 2023). 해체에 비해 재활용 방법의 경제적 효과가 높다는 사실이 알려짐에 따라 최근에 글로벌적 관심이 집중되고 있다. 현재의 전통적인 해양 플랫폼 재활용 산업은 전체 구조물 중에서도 상대적으로 변경이나 재배치가 용이하고 다방면으로의 응용 가능성이 높은 하부 구조물을 재활용하는 방식이 주류를 이루고 있고(Hou et. al., 2023), 현재까지 하부 구조물을 해상 관광 시설, 외해 양식장, 인공어초, 해양 연구 시설 등으로 재개발·재배치하는 방법들이 개발되어 주로 활용되고 있다.

해양 플랫폼 및 해양 자원 개발과 관련된 선진 기술과 노하우를 축적해온 미국과 유럽 국가들이 해양 플랫폼 재활용 산업도 역시 선도하고 있다. 해양 플랫폼 해체 산업 초창기에 접어든 동남아시아 지역에서도 기술적으로 어렵고 비용적으로 부담이 큰 해체 산업 대신 글로벌 최신 트렌드로 부각되고 있는 재활용 산업으로 눈을 돌리는 실정이다. 이런 대세적 흐름을 고려하면서, 우리나라도 해양 플랫폼 재활용 기술과 노하우를 개발하고 축적하는 데 집중해야 할 것이다. 실제로 현대중공업(현, HD현대), 삼성중공업, 대우조선해양(현, SK조선플랫폼), 현대삼호중공업, 현대미포조선, 한진중공업, 케이조선(구, STX조선해양) 등 국내 주요 기업들도 해양 플랫폼 해체 및 재활용 글로벌 시장을 공략하기 위해, 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI), 빅데이터, 3D 프린팅 등 첨단 ICT 기술 융복합을 통한 스마트 공법, 기술 확보에 조직 역량을 집중하고 있어(이슈퀘스트, 2022) 미래의 우수한 성과가 기대되는 부분이기도 하다.

나. 해양 플랫폼 재활용의 현황과 전망

현재까지 개발·시도되고 있는 해양 플랫폼 재활용 프로세스의 현황과 전망 등을 유형별로 정리해 보면 다음과 같다.

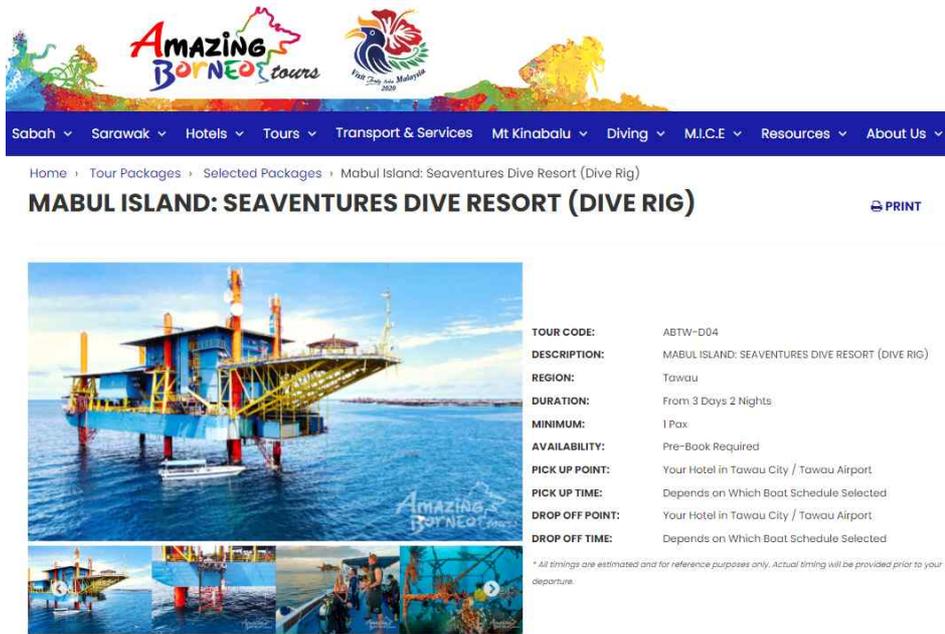
1) 해양 관광 자원으로서의 재활용

낙후된 해양 플랫폼 시설을 해상 리조트 겸 다이빙 플랫폼으로 재개발하는 사업은 해상 관광객을 유치하고 해당 지역의 관광 산업을 활성화하는 등 긍정적인 효과를 창출할 수 있다(Kruse et. al., 2015). 말레이시아 보르네오주의 시파단(Sipadan) 섬 인근 바다의 해양 플랫폼들을 리조트·다이빙 플랫폼 시설로 개조한 것이 모범적, 대표적인 사례이다 [그림 5]. 이곳은 본래부터 해양 스쿠버 다이빙의 글로벌 중심지로 유명했는데(Musa, 2002), 이와 같은 지역적, 환경적 특성을 십분 살려서 노후 플랫폼을 해상 리조트·다이빙 플랫폼으로 개조한 결과, 과거부터 존재한 지역 해상 호텔·레포츠 시설들과 조화롭게 연동되고 상호 시너지 효과를 내면서 해양 문화 체험 및 해상 레포츠 관광지로서 글로벌 인지도와 위상을 더욱 제고할 수 있었다.

시파단 섬의 선구적, 창의적 사례가 국제적으로 알려짐에 따라, 노후 플랫폼의 해양 관광 자원으로서의 재개발·재활용은 사업적으로 성공 가능성이 높고 경제적 수익성도 뛰어난 모델 중 하나로 인식되기 시작하였다. 특히, 노후 해양 플랫폼의 해체 대신 재활용을 결정하는 과정에서 가장 중시되는 전략적 목표가 ‘지속 가능한 순환 비즈니스 모델’을 개발·구축하는 것인데, 해양 관광 자원으로서의 재개발은 이런 조건을 충족한다고 볼 수 있다(Basile & Vona, 2021).

또한, 지난 2021년 사우디아라비아 공공 투자기금(PIF)은 원유 생산 시 사용했던 Oil Rig(석유 굴착 설비)에 영감을 얻어, 150,000m² 규모의 ‘Extream Park’와 리조트로 전환하는 ‘THE RIG’ 프로젝트를 계획을 발표했으며(PIF, 2021), 이 프로젝트는 해양 플랫폼에 호텔과 레스토랑, 그리고 롤러코스터·번지점프 등의 익스트림 스포츠를 경험할 수 있는 국제

엔터테인먼트 및 관광 서비스를 제공하는 명소로 재활용할 계획을 발표한 바 있다 [그림 6].



[그림 5] Scuba Dive Resort, 보르네오 관광 홈페이지

*출처 : <https://www.amazingborneo.com/package/mabul-island-borneo-divers-mabul-resort>

이에 다른 한편으로는 해양 관광 자원으로의 재개발 모델은 경제적, 지역 개발적 효과에도 불구하고, 주변 해역이 관광 시설로의 개발에 얼마나 적합한가, 혹은 주변 해역에 既개발된 관광 자원이 존재하여 그와의 연동 개발이 가능한가 등에 따라 사업 성공 가능성이 제한될 수도 있다는 단점도 확인된다(Kruse et. al., 2015). 해양 환경 오염 방지, 해양 자원 보호 및 노후 시설물 재활용 등을 위해 관광 자원 재개발 모델을 선택한 것인데, 재개발 이후에도 여전히 적지 않은 양의 관광 쓰레기·부산물 등으로 인해 해양 환경 오염 방지, 해양 자원 보호라는 의무는 소멸되지 않거나 오히려 더욱 증가할 수도 있으며, 일정한 시기가 지난 이

후에는 또 다른 재개발 혹은 (채산성, 수익성이 맞지 않으면) 또 다른 철거의 가능성도 배제할 수 없는 것이다.

이런 점에 주목하면서, 해양 관광 자원으로서의 재개발 모델을 선택하고자 할 경우에는 개별적인 사업 전략 개발이라는 관점보다는 지속 가능한 최적화된 비즈니스 프로세스 및 시스템 설계, 해양 관광 전문 인력 양성, 정책적·제도적 지원 등 보다 거시적, 총체적 관점에서의 접근도 간과할 수 없는 대목으로 자리 잡아야 할 것으로 생각된다.



[그림 6] Tourism project offshore oil platforms in Saudi Arabia

*출처 : <https://www.pif.gov.sa>

2) 외해 양식장 재개발

노후 해양 플랫폼을 외해(外海) 양식장으로 재개발·재활용하는 내용은 지금도 계속 시도되고 있다. 연안에서 수 킬로미터 떨어진 지점에서 진행되는 외해 양식(offshore aquaculture)은 내륙 및 연안 지역 사회의 영향과 자연 재해 등을 상대적으로 적게 받는 청정 양식 방법이다(이광남 외, 2008). 세계적으로 어류 소비량의 꾸준한 증가로 인해, 세계 양식업 시장은 최근 20~30년 간에 지속적으로 성장하였고, 2014년에 양식 어류 생산량은 전체 어업 생산량의 44%인 7,380만 톤에 달하였고(박영진, 2020), 이런 관점에서 보자면 글로벌 어류 및 수산물 소비 증가에 대응할 수 있는 내해 및 외해 양식장의 확충은 필요한 프로세스라고 볼 수 있다. 최근에는 전 세계적으로 근해(近海) 생태환경이 악화됨에 따라, 양식 산업은 청정하고도 여유로운 공간 확보를 위해 점차 외해로 이동되는 추세이기도 하여 해당 산업의 미래는 밝다. 해양 플랫폼이 가장 잘 발달한 미국 멕시코 灣(Gulf of Mexico) 해역에서 해양 플랫폼을 활용한 인공양식의 역사는 1990년 텍사스 연안에서 시작되었고(Chambers, 1998; Kaiser, 2003), 비록 어획량이 많지는 않았으나, 이는 멕시코 만 연안에서 거둔 의미있는 첫 사례이다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 난류성 어종과 한류성 어종을 두루 양식할 수 있는 천혜의 환경과 지리적 잇점을 갖고 있다. 또한, 국내 인공 양식 산업은 다양한 어종에 대한 양식기술을 보유하고 있고, ICT 기술을 접목한 첨단 스마트 양식 관련 산업은 해마다 지속적인 성장세를 보이고 있기도 하다. 앞서 2019년 해양수산부에서는 국내 양식기술을 세계적인 수준으로 끌어올리기 위해 ‘스마트 양식 클러스터 사업’을 추진하는 등 관련 산업에 높은 의지를 가지고 있어 양적으로나 질적으로 좋은 시너지 효과를 기대할 수 있을 것이다. 특히, 서해와 남해에는 고정식 해상풍력 발전단지의 건설이 상당할 것으로 전망되는 가운데, 대단위 해상풍력 발전단지의 하부구조물을 이용하여 주변 해역을 바다 목장과 바다 양식장 등으로 연계 개발해 수산업 발전에 큰 도움이 될 것으로 전망되며, 지속 가능한 어업 및 양식업 체계·관리를 개선하고 개발하는 것은

미래 세대가 해양 자원과 생태계로부터 지속적으로 혜택을 누릴 수 있도록 하는 데 매우 중요하다.

3) 기타 재활용 방안 모색

국내에서는 2016년 6월을 마지막으로 가스 생산을 종료하는 동해 가스전이 폐기 예정이며, 예상 폐기 비용은 약 1,300억원으로 추정되고 있다(한국해양과학기술원, 2018). 이는 인공어초, 해양 현장교육 및 해양관광 용도로의 재활용, 해양과학 연구 및 조사를 위한 관측기지, 첨단 해양장비 등의 실용화를 위한 테스트베드 그리고, 리모델링을 통한 동해 부유식 해상풍력 발전단지와 연계한 해상변전소 등으로 재활용을 모색 중이다.

이렇듯 상당한 재정적, 사회적 비용이 투입되어야 하는 해양 플랫폼 해체의 대안으로서 재활용 전략을 시도하는 것은 ‘지속 가능한 순환 비즈니스 모델’을 개척하고 구축한다는 점에서 미래 지향적 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 향후, 동해 가스전을 필두로 해양 플랫폼 재활용 방안 및 효과에 대한 검증된 자료나 신뢰할 만한 지침을 마련하는 기틀을 마련함은 물론 나아가 해상풍력 하부구조물의 재활용에 지속 가능성, 순환성, 안전성 등에서 모두 신뢰할 만한 기초 사례를 구축하여, 경제적, 환경적 효과의 비교모델로 삼을 수 있다.

이와 같은 필요성, 당위성 등에 주목하면서, 본 연구는 최근에 기존 재개발 모델에 비해 환경적 측면에서의 지속 가능성과 효율성 면에서 보다 우수하며 사업 추진의 용이성 등이 거론되는 인공어초로의 재활용 방안에 대해 본격적으로 탐색하고자 한다. 즉, 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 방법과 세부 절차, 관련 기술들을 고찰하고 그로부터 유발되는 환경적, 경제적, 사회적 효과를 문헌 고찰을 통해 분석함으로써, 해양 환경 보호와 해양 자원의 ‘지속 가능한 순환적 활용’에 도움이 될 수 있는 실무적, 산업적 시사점을 제언하고자 한다.

Ⅲ. 해양 플랫폼의 인공어초 재활용 방안

1. 인공어초의 개념 및 운용

가. 인공어초의 개념과 기능

인공어초(人工魚礁, artificial reef)는 해양 생물들의 정착과 군집화, 지속적 배양과 보호 등을 목적으로 연안 또는 내해(內海, inland sea)의 해저와 해중에 설치되는 인공 구조물로서, 해양 생물의 생활 환경과 서식·생식 특성을 최대한 활용한 자연 친화적인 자원 배양 장치이다(해양수산부, 2019; Macreadie et. al., 2011). 인공어초는 해중림초(海中林礎, seaweed reef)보다도 더욱 다양하고 확장된 기능을 수행할 수 있도록 개발되고 운영되는 해저·해중 구조물이라고 볼 수 있다. 즉, ‘바다 숲’과 ‘바다 목장’의 기능을 겸비한 설비라고 규정할 수 있다.

해중림초는 해조류나 패류를 증식할 목적으로 내해 해역에 설치되는 구조물인데(김용관, 2019), 이와는 달리 인공어초는 해조류, 패류 증식만이 아니라, 그 포식자인 어류까지를 포함하여 모든 바다 생물들을 포괄적으로 증식·배양함으로써, 해양 생태계를 복원하고 수산 자원 증대를 통한 경제 성장을 촉진하는 등 다원적, 복합적인 목적을 위해 설치·운영된다(Bell et. al., 1998). 내해는 외해보다 면적이 한정된 데다 내해 지역 주민들의 무분별한 수산 자원 포획 및 남용 등으로 인해 바다 생물들의 보존 상태가 열악할 수밖에 없다. 따라서 내해 해역에 인공어초를 설치하여 소실된 바다 생물들을 끌어 모으고 배양함으로써, 내륙과의 접근성이 뛰어난 바다 숲 겸 바다 목장을 조성하는 것이야말로 수산 자원의 보호와 활용을 위한 가장 효과적인 전략이 될 것이다(이지현, 2009).

인공어초는 각종 해양 생물들의 서식과 산란 장소로 이용됨은 물론, 치어(稚魚)·유어(幼魚)들의 성육장으로도 활용될 수 있어 순환적이고 지속 가능한 수산 자원 배양과 해양 생태계 복원 등의 효과를 거둘 수 있다(Basile & Vona, 2021). 따라서, 인공어초는 반영구적으로 사용 가능해

야 하며, 이를 위해 해양 환경을 오염시키지 않는 친환경 재료로 제작되어야 한다. 또한 구조적으로 안정되어 내해의 파도, 폭풍 등에 의해서도 큰 피해를 입지 않도록 내구성 있게 조성되어야 한다.

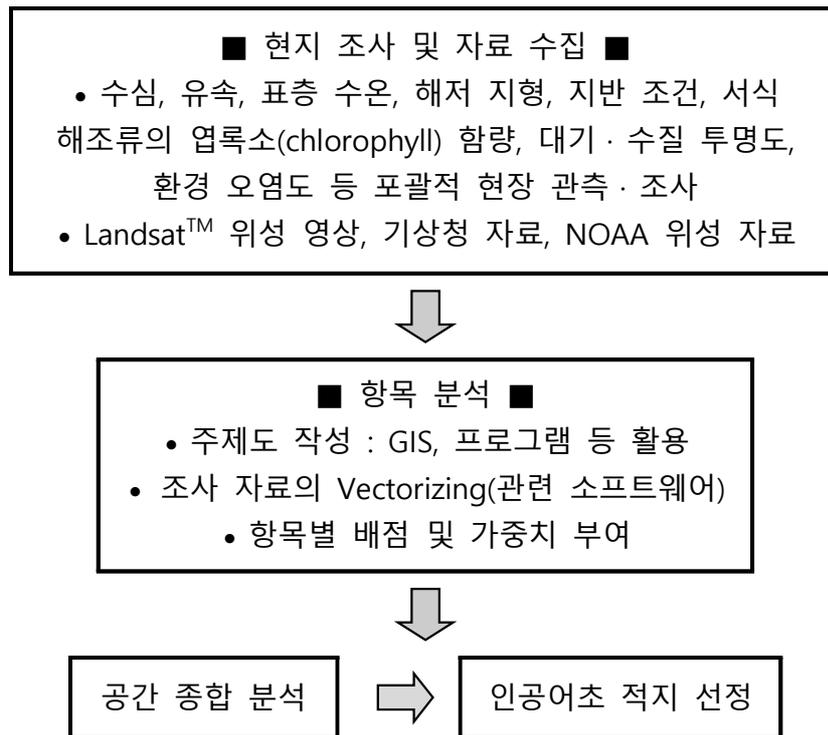
나. 인공어초 적지 선정 및 고려 사항

인공어초 설치를 위해서는 해양수산부가 수립·배포한 <인공어초 설치사업 집행 및 관리 규정>에 의거하여 적지 조사 및 적지 판정을 수행하여야 한다(윤대호, 2018). 적지 조사는 대상지의 주요 연안 환경 요소들을 현장 관측 및 조사하는 작업으로써, 수심, 유속, 표층 수온, 해저 지형, 지반 조건, 서식 해조류의 엽록소(chlorophyll) 함량, 대기·수질 투명도, 환경 오염도 등 다양한 항목들을 면밀하게 조사·수집하게 된다. 최근에는 조사의 정확도, 신뢰도 등을 위해, Landsat™ 위성 영상, 기상청 자료, NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration, 미국 국립 해양 대기 관리국) 위성 자료들까지도 수집하여 비교 분석함으로써, 대상지의 적절성 여부를 국제적 표준까지 정밀하게 고려하여 판단한다(김범규 외, 2015).

조사·수집된 결과를 종합하여 적지 여부를 판정하는데, 1990년대 후반부터는 GIS(Geographic Information System)를 활용하여 조사 자료들을 데이터베이스화하고, 이를 토대로 각 항목마다 적지 조건 점수를 배분하고 가중치를 부여하는 등 보다 과학적, 시스템적으로 적지 여부를 판정하게 되었다. 첨단 분석 시스템을 활용한 적지 판정으로 인해 인공어초 사업의 안정성, 수익성 등이 크게 향상되었으며, 향후에도 지속적인 시스템 개선, 질적 향상 등이 요구된다.

상술한 내용처럼, 다양한 항목들의 조사·검토 및 향상된 분석·판정 기법에도 불구하고, 설치 후 일정 시간이 경과하면 인공어초 본체의 부식, 세굴(洗掘, scour : 흐르는 물에 의해 인공어초 표면이나 부품 등이 마모되고 패이는 현상) 등이 진행될 수 있기 때문에, 지속적인 모니터링과 엄격한 관리, 즉각적인 보수·점검, 부식·마모 방지 등이 요구된다. 부식·마모 방지를 위해서는 친환경 자재의 개발과 적용, 인공어초 본체의 3D

프린터 제작 등 첨단 방법들이 동원되고 있다(이병재 외, 2022). 세굴 방지를 위해서는 설치 지점의 지반에 보강재를 추가하여 본체의 안정적인 정착과 가동을 보장함으로써, 수심으로 인한 파손과 세굴을 최소화하는 방법 등이 강구되고 있다(윤대호, 2018).



[그림 7] 적지 조사 및 선정 절차

인공어초는 제작 단가 및 편의성을 고려하여 대형은 강재(鋼材)로 제작되고 중소형은 철근 콘크리트로 제작되는 경우가 많다. 콘크리트는 강알칼리성으로 인해 함께 사용되는 철근의 부식을 방지하고 높은 강도를 구현하는 장점을 지니지만, 바다에 투입되면 pH 8~9인 해수(海水) 평균치보다 높은 pH 12~13의 강알칼리 성분을 용출 함으로써, 해중(海中) 미생물과 해양 생물들의 성장과 생태 환경 등에 악영향을 미치게 된다(김정배 외, 2007).

이로 인해, 인공어초 제작용 콘크리트의 강알칼리성을 저감할 수 있는 방법에 대한 연구들이 진행되어 왔는데, 그 중에서도 김정배 외(2007)는 인공어초용 저알칼리성 모르타르를 3D 프린터로 제작하여 콘크리트를 대체하는 방법을 제안하였다. 3D 프린터를 활용하면 설치 지점의 수중 환경에 적합한 다양한 크기, 복잡한 형상, 맞춤형 구조 등을 지닌 인공어초 제작이 가능해진다. 이처럼 3D 프린터를 활용하여 내구성이 강화되고 저알칼리성도 증진되며 친환경적 속성을 지닌 첨단 재질의 인공어초를 제작하게 된다면, 부식, 세굴 등에도 효과적으로 대응할 수 있을 것으로 예측되기 때문에, 인공어초의 3D 프린터 제작은 강력한 대안으로 주목받고 있다(이병재 외, 2022). 최근에는 내해 해역의 환경 오염과 기후 변동으로 인한 수온 상승 등으로 인해 인공어초의 안정적인 가동이 어려워지고 그 기능과 효과도 점진적으로 하락하는 추세이다. 이에 정부와 관할 지자체는 인공어초의 관리와 보수, 점검 등에 더욱 큰 관심과 노력을 기울이고 있다. 이러한 상황을 개선하기 위한 신규 기술이나 첨단 소재 개발, 운영 노하우 개발 등이 이루어져야 할 것이다. 노후 해양 플랫폼을 인공어초로 재개발하는 방식은 비용 절감, 자원 재활용, 해양 환경 보호 등 다양한 이점과 혜택을 가져올 것으로 전망되는데, 그런 점에서 본 연구의 시도는 유효하고 시의적절하다고 생각된다.

2. 인공어초 활용 현황

가. 국내 사례 고찰

우리나라에서는 1971년에 강원도 양양군에 사각 인공어초가 최초로 시설된 것을 시작으로, 2021년까지 전국 11개 시·도의 내해에 총 1,446,777개의 인공어초 어장이 시설되었는데, 이는 면적으로는 총 231,645ha에 해당한다(해양수산부, 2022). 1971년 부터 개시된 국내 인공어초 사업은 1984년까지는 초기 단계로서, 소형의 사각 인공어초들이 단편적으로, 소규모로만 시설되었으며, 적지 조사, 제작·설치, 사후 관리 등

에 대한 기술들이 전반적으로 미흡한 상태였다.

이후 1985~1991년 동안 원통형, 반구형, 요철형, 사다리형, 잠보형 등 다양한 유형, 재질, 구조 등을 지닌 인공어초들이 국내 업체들에 의해 개발·보급되면서 국내 인공어초 사업의 도약기를 맞이하였다(해양수산부, 2022). 인공어초 종류의 증가 및 다양화로 인해, 내해의 상이한 생태 조건, 수심·수질, 수중 환경 등에 부합되는 맞춤형 시설이 가능해졌고, 까다로운 조건에서도 어장을 설치·관리할 수 있게 됨에 따라, 인공어초의 활용성, 확장성이 크게 강화되었다(이정삼, 남종오, 2020).

1990년대 초반부터는 GPS(Global position system)의 상용화로 인해 개별 인공어초의 위치를 정확하게 파악할 수 있게 되면서, 적지 조사, 사후 관리 등을 더욱 효율적, 체계적으로 수행하게 되었다. 2004년부터는 전국에 시설된 인공어초 어장에 대한 정확한 시설 위치, 분포, 관리 상태 등이 전수 조사되었고, 각 어장마다 서식하는 생물들의 기능성, 종의 다양성 등의 질적 평가를 통해, 전국 인공어초 어장에 대한 방대하고도 세밀한 데이터 베이스를 구축하게 되었다(해양수산부, 2022).

전국 인공어초에 대한 전수 조사와 질적 평가 및 통일된 데이터 베이스 구축을 통해 국내 인공어초 사업은 제2의 중흥기를 맞이하게 되었다. 여기에 2010년 이후부터 연간 3~4백억원의 정부 지원이 이루어지면서(이병재, 김봉균, 김운용, 2022), 인공어초의 기술력과 관리 역량은 국제적으로도 경쟁력을 갖추게 되었다.

이와 같은 선진 시스템 구축 및 적극적인 지원을 통해, 생산성과 기능이 저하된 취약 어장들에 대해서는 시설 보강, 청정 환경 회복, 관할 지자체의 재정 지원 등 필요한 조치를 취함으로써, 되도록 많은 어장들의 기능성 회복과 ‘지속 가능성’을 보장하기 위해 국가 차원으로 노력하고 있다. 예컨대, 어장 내부에 버려진 폐그물 등을 수거하고 어장 내 수질의 청정성을 복원하는 등 어장 기능 회복에 집중함으로써, 전국 어장들의 평균적인 기능과 생산성을 높이는 데 주력하고 있다(해양수산부, 2022).

최근에는 국내뿐 아니라 전 세계적으로도 인공어초의 조성 범위가 내해로부터 외해 인근으로까지 확대되면서 인공어초 시설의 수심이 갈수록

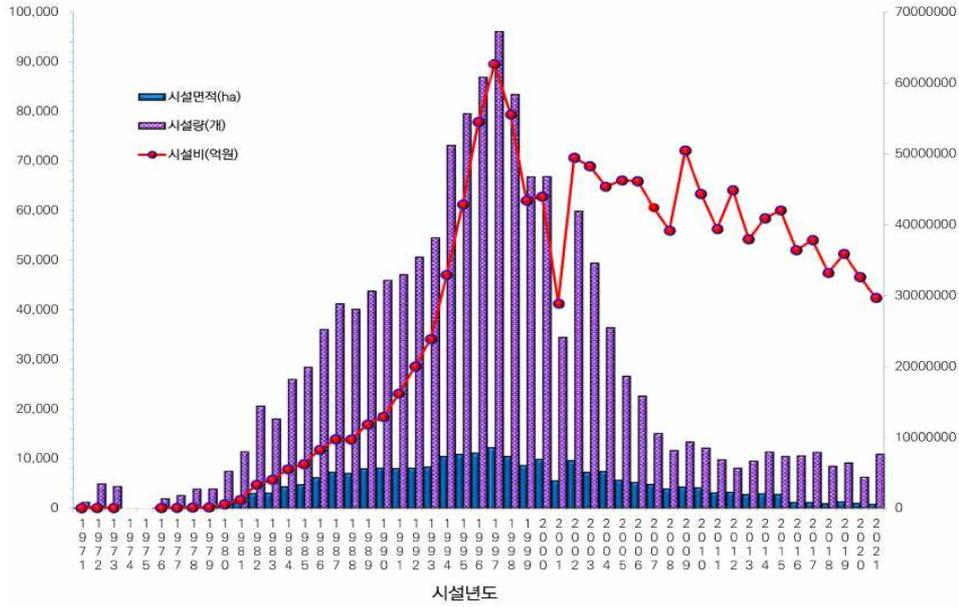
깊어지게 되었고, 이로 인해 더욱 과학적, 전문적인 환경 관리가 요구되고 있다(Vivier et. al., 2021). 또한, 예전보다 다양하고도 특수한 생물들을 배양하는 사례들이 증가함에 따라, 특수 종별 생태에 적합한 세분화·특성화된 기능을 지닌 인공어초의 개발과 시설도 점차 확대되고 있다.

2022년 기준 국내 인공어초의 설치 현황 및 세부 유형들을 종합적으로 정리하면 <표 2>, [그림 8], [그림 9] 등과 같다.

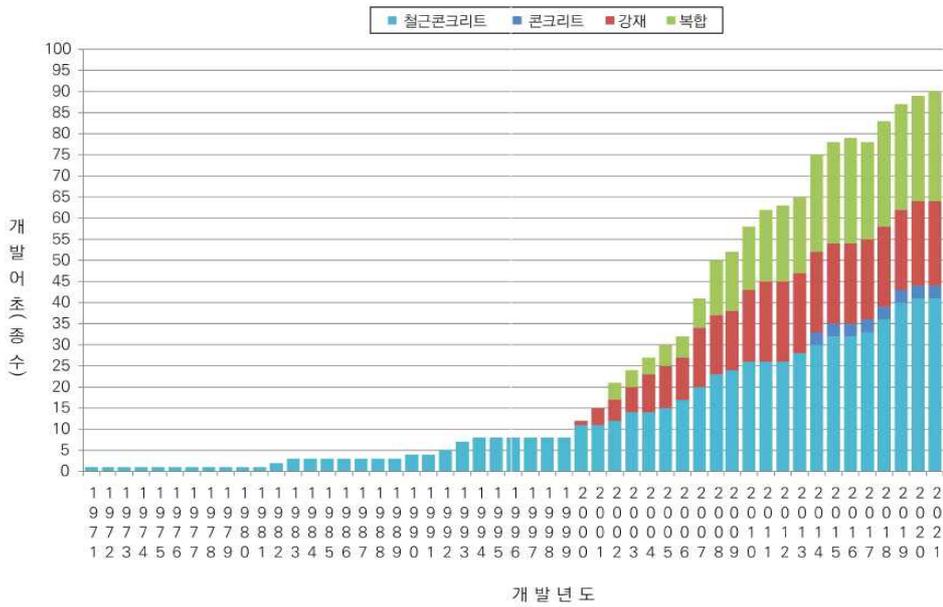
<표 2> 전국 인공어초 시설 현황

시·도별	면적(ha)	시설량(개)	시설비(백만원)
합계	231,645	1,466,777	1,318,268
부산광역시	3,382	15,053	23,607
인천광역시	12,024	69,797	89,135
울산광역시	2,658	20,475	18,291
경기도	6,228	43,884	68,256
강원도	23,903	131,362	120,914
충청남도	19,106	96,446	116,710
전라북도	17,581	69,836	89,478
전라남도	46,033	305,023	229,992
경상북도	24,060	177,862	124,962
경상남도	38,685	258,758	190,370
제주특별자치도	37,985	258,281	246,553

*출처 : 해양수산부 (2022). 인공어초 시설통계(1971~2021)



[그림 8] 1971~2021년 전국 인공어초 시설 현황



[그림 9] 1971~2021년 전국 인공어초 시설 현황 (재질별)

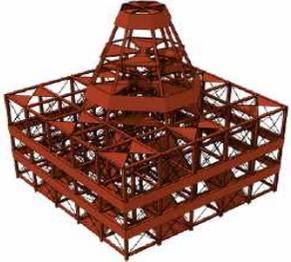
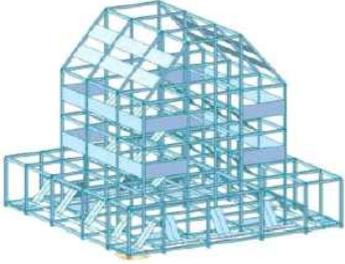
*출처 : 해양수산부 (2022). 인공어초 시설통계(1971~2021)

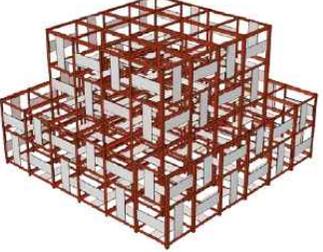
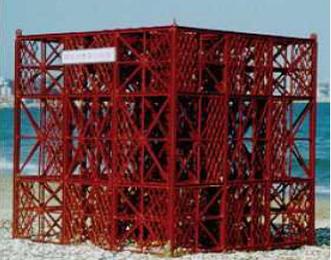
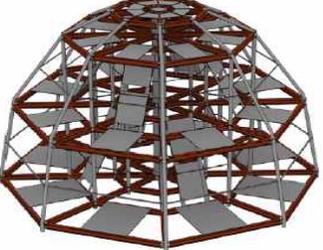
한편, 강재(鋼材)재질 인공어초 소재인 철(steel)은 염수(鹽水)에서 이온화되어 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하는 식물성 플랑크톤에 영양소를 공급하는 성분을 제공함으로써 식물성 플랑크톤이 보다 풍부하게 되고, 따라서 어류의 위집효과를 용이하게 한다. 일반적으로 해수에서 철(steel)의 부식 속도는 0.002~0.02mm/년 정도일 것으로 예상되어(Roy Johnsen, 2007) 강재재질 인공어초의 내구성에는 문제가 매우 적을 것으로 보여 그 수요가 꾸준히 증가하는 추세이다. 또한, 한국수산자원공단이 2022년 8월에 발행한 ‘인공어초 정보집’의 집계에 따르면, 국내 전체 인공어초 종류 91가지(강재침선어초*는 제외) 가운데 순수 강재 재질의 인공어초가 차지하는 비중은 20% 이상을 상회하는 수준으로 철근 콘크리트 재질의 인공어초 다음으로 많이 사용되고 있다. 반면, 철근 콘크리트 재질의 인공어초는 강재 재질의 인공어초에 비해 콘크리트 양생기간을 감안하면 제작기간이 길고, 완성 후 무거운 무게로 현장까지의 운송 및 현장에서의 설치에 높은 비용이 뒤따른다. 제주 탐라 해상풍력 자켓 타입 하부구조물의 사이즈는 대략 8.5m x 8.5m x 36m (가로x세로x높이, 사다리꼴 평균추정, 탐라해상풍력발전(주) 홈페이지에서 발전설비 기본규격 참조)으로, 걸보기 용적은 약 2,600m³로 추정해 본다면 이는 ‘원통2단 강제어초 (923.0m³)’ 3개를 합친 것과 비슷한 용적임을 짐작할 수 있다. 대상어종이나 목적에 따라 인공어초의 모양이나 사이즈에 변화가 있을 수는 있겠지만, 신규로 인공어초를 제작·설치 하는 것보다는 분명히 경제적으로 상당한 이득을 볼 수 있을 것으로 내다볼 수 있다. 이에, 기존 운영중이거나 미래 건설예정인 해상풍력 발전단지의 관련 설비가 경제수명을 다해 해체시기에 접어들게 될 시, 하부구조물을 철거한 후 육상으로 옮겨와 폐기하는 대신 Topple-in-place(자켓의 전체 전복방식)을 채택하여 해상풍력 발전단지 인근을 인공어초 조성으로 재활용·재조성 하는 것은 단순 폐처리 보다 많은 경제적 이득을 취할수 있을 뿐 아니라, 해양생태계 개선 효과, 어족자원의 확대 및 이와 연계된 관광 인프라로서의 발전에 크게 이바지할 것으로 전망된다.

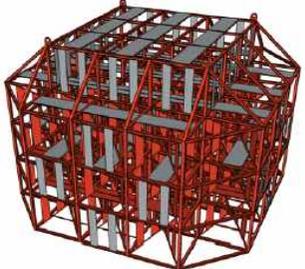
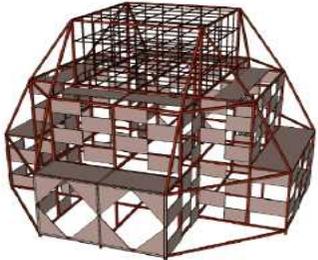
* 강재침선어초: 사용연한이 초과한 실제 강재 선박을 환경 위해성 없이 사후 처리 후 인공어초로 사용

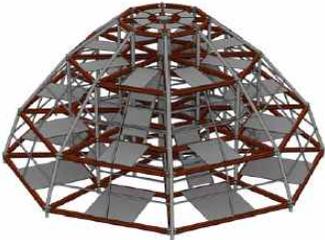
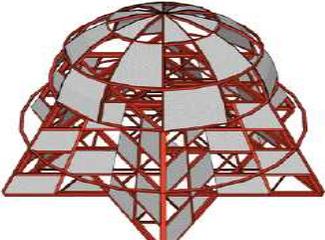
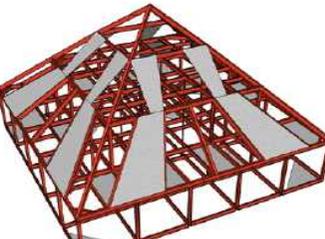
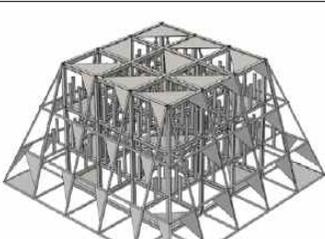
<표 3> 강재 재질의 인공어초 (발취)

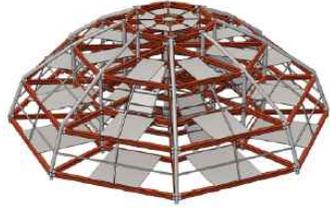
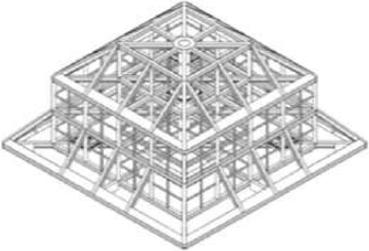
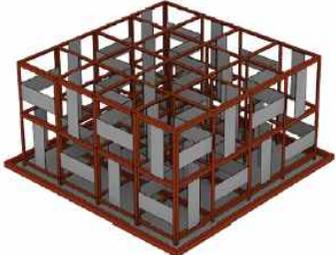
*출처 : 해양수산부, 한국수산자원공단 (2022). 인공어초 정보집

No.	일반어초 명칭	재질	규격 (가로x세로x높이) (지름x높이) (m)	겉보기 용적 (m ³)	중량 (ton)	단지당 기준 시설량 (개)	단가/개 (₩)	단가/단지 (₩)
1	 [원통2단강제어초]	강재	11.0x11.0x13.2	923.0	33.1	1	₩ 165,662,000	₩ 165,662,000
2	 [삼단격실강제어초]	강재	12.0x12.0x10.7	841.0	33.4	1	₩ 197,498,000	₩ 197,498,000
3	 [타워형강제어초]	강재	12.0x12.0x10.7	840.8	27.8	1	₩ 179,352,000	₩ 179,352,000

4	 <p data-bbox="407 411 640 438">[강제고기굴어초]</p>	강재	13.71x11.94x9.03	840.0	31.0	1	₩ 179,352,000	₩ 179,352,000
5	 <p data-bbox="421 726 627 753">[대형강제어초]</p>	강재	12.0x12.0x8.0	832.0	35.8	1	₩ 190,653,000	₩ 190,653,000
6	 <p data-bbox="407 1042 640 1069">[상자형강제어초]</p>	강재	9.0x9.0x10.2	826.0	29.3	1	₩ 179,352,000	₩ 179,352,000
7	 <p data-bbox="392 1356 656 1383">[팔각반구대형어초]</p>	강재	Ø13.5x9.0	818.0	28.1	1	₩ 158,240,000	₩ 158,240,000

8	 <p>[2단상자강제어초]</p>	강재	14.0x14.0x9.0	804.0	21.8	1	₩ 143,412,000	₩ 143,412,000
9	 <p>[팔각상자형강제어초]</p>	강재	10.0x10.0x8.3	680.0	31.4	2	₩ 182,208,000	₩ 364,416,000
10	 <p>[점보형강제어초]</p>	강재	12.0x12.0x9.15	550.0	39.3	2	₩ 211,018,000	₩ 422,037,000
11	 <p>[팔각별강제어초]</p>	강재	14.14x14.14x6.0	480.0	19.9	2	₩ 147,114,000	₩ 294,228,000

12	 <p>[팔각반구중형어초]</p>	강재	∅12.8x6.0	407.0	19.5	2	₩ 111,889,000	₩ 223,779,000
13	 <p>[육각별강제어초]</p>	강재	11.55x11.55x7.0	372.0	17.0	3	₩ 129,750,000	₩ 389,251,000
14	 <p>[피라미드강제어초]</p>	강재	10.0x10.0x7.0	367.0	18.4	3	₩ 123,932,000	₩ 371,796,000
15	 <p>[사다리꼴복합강제어초]</p>	강재	10.0x10.0x5.0	339.0	11.8	3	₩ 70,546,000	₩ 211,964,000

16	 <p>[팔각반구소형어초]</p>	강재	∅12.5x4.0	274.0	17.6	3	₩ 99,726,000	₩ 299,180,000
17	 <p>[탑기단형강제어초]</p>	강재	10.0x10.0x5.2	267.0	16.9	3	₩ 101,985,000	₩ 305,957,000
18	 <p>[중형연약지반용강제어초]</p>	강재	8.0x8.0x4.0	256.0	15.9	4	₩ 83,439,000	₩ 333,756,000
19	 <p>[연약지반용강제어초]</p>	강재	10.6x10.6x2.0	164.0	13.5	5	₩ 71,526,000	₩ 357,632,000

나. 해외 사례 고찰

인공어초는 자연초가 지닌 생태적, 환경적 정점을 응용하여 제조한 인공 구조물로서, 해저·해중에 배치되어 수산 자원의 증대, 보호, 육성 및 조업 효율화를 목적으로 운영된다. 현대의 많은 국가들은 수산·해양 자원을 배양·증진하고, 해양 환경을 보호하기 위해 인공어초를 적극적으로 활용하고 있다. 또한, 경제수명 및 설계연한을 다해 노후한 해양 플랫폼을 인공어초로 변경하는 것은 더 이상 새로운 아이디어가 아니다. 이미 40여 년 전부터 고안되고 개발된 Rigs-to-Reefs (R2R) 프로그램은 플로리다 해안과 멕시코 灣(Gulf of Mexico), 브루나이와 말레이시아에 이르기까지 석유 및 천연가스과 같은 해저 천연자원을 보유한 많은 국가에서 이미 성공을 거두었고, 플랫폼을 인공어초로 전환하여 사용하는 것은 전체해체보다 작업 집약도가 훨씬 낮아 큰 공사비용을 잠정적으로 절약할 수 있으며, 환경적으로 가장 의미있는 것은 해양 플랫폼 주변에서 이미 수십년에 걸쳐 형성되어 온 해양 생태계를 파괴하지 않으면서 보존할 수 있다. 1984년에 미국 의회는 국가 어업 진흥법(The National Fishing Enhancement Act.)에 서명했다. 이 법안은 인공어초가 어업 향상에 얼마나 유익할 수 있는지를 인식하고, 주변 주(州, state) 정부가 노후되어 폐기된 해양 플랫폼을 인공어초로 전환하도록 장려하기도 했다. 그 이후로 멕시코 만의 5개(Texas, Louisiana, Mississippi, Alabama and Florida) 해안 주(州)에서는 Rigs-to-Reefs (R2R) 프로그램을 시행했으며, 이 지역의 500개 이상의 플랫폼이 인공어초로 전환되었으며, 이러한 프로그램은 말레이시아와 브루나이의 다루살람에서도 실행되었다.

태국 해양 해안 자원부(DMCR, Department of Marine and Coastal Resources)는 2019년에 Chevron Thai Exploration and Production, Ltd.(Chevron Thai) 및 Chulalongkorn University와 함께 태국만(Gulf of Thai) 수랏타니 코팡안(Koh Pha-Ngan)의 Chaloklam Bay 인근의 해양 및 연안 자원 보존 연구를 위해 가동을 중단한 해양 플랫폼 자켓(jacket)을 인공어초로 사용하는 것에 관한 합의각서(MOA)를 체결하였다. 이는 수중 환경 및 생태학적 구성 요소를 연구, 모니터링 및 평가하

는 것을 목적으로 하며, 동시에 해양 자원을 보존하고 복원하기 위해 공공, 민간, 교육 부문 간의 유기적인 협력을 통해 해외의 전문 지식을 적용하고 실천하는 공동 노력을 강화하는 것을 포함하였다. 이러한 노후된 해양 플랫폼을 개조한 인공어초가 연구 지역에서 얻을 수 있는 이점을 연구, 모니터링 및 평가하여 해당 주제에 대한 자국의 지식을 확립하는데 기여하는 것을 또 하나의 목표로 삼기도 하였다(Chevron Thailand Exploration and Production, Ltd., 2023).

미국의 경우에는 인공어초 사업은 100여년 전에 이미 시작되었지만, 연안 어업 의존 비율이 낮은 데다, 전국적으로 천연 어장 면적이 방대하고 어장 자원이 워낙 풍부한 관계로, 인공어초 활용의 필요성을 크게 느끼지 못하였다. 1950년대 이후 미국은 연안 대상 인공어초 사업을 최초로 개시하였는데, 1960년대까지도 해양 레저를 위한 소형 사업만을 영위하였다. 또한, 연방 정부가 아닌, 지자체나 민간 단체들이 인공어초 사업을 주도하였다(Swett et. al., 2011). 이러한 관행은 지금까지도 이어져서 플로리다 등 글로벌 해양 휴양지를 중심으로 지방 정부와 민간 기업들이 주도하는 인공어초 사업이 주류를 이루면서 발전하고 있다. 종합적으로 미국 전체 해양 산업에서 인공어초가 차지하는 비중은 높지 않은 편이다. 민간 기업들이 주도하는 인공어초 사업은 수산 자원 배양 목적에 못지 않게, 수상 관광·레저의 목적도 중시하기 때문에, 개별 어장마다 배양하는 해양 생물들의 종류가 다양하고 관리도 잘 되어 있다(이지현, 2009). 이 같은 다원적, 개방적 운영 방식과 관리의 노하우 등은 국내에서도 벤치마킹할 필요가 있을 것이다. 유럽은 인공어초 사업이 30년 전부터 시행되어 왔으며, 어업 생산 증가, 해양 레저 향상 등의 목적 하에 운영되고 있다(Vivier et. al., 2021). 유럽의 인공어초 사업 시스템은 국가별로 상이해서, 영국, 핀란드, 프랑스, 폴란드 등에서는 인공어초 인허가 제도가 적용되고 있으며, 터키, 네덜란드, 스웨덴 등에서는 민간 기업들을 중심으로 소규모의 인공어초 사업이 운영되고 있다(Jensen, 2002). 해양 강국인 노르웨이는 강철 제작 인공어초 기술이 특히 발전하였으며, 이런 진화된 기술력을 바탕으로 노후 해양 플랫폼을 인공어초로 재활용하는 사업에서도 선도적인 지위를 점유하고 있다(Vivier et. al., 2021).

미국과 유럽의 경우, 공통적으로 생태계 보호를 위한 대체 어장의 목적 외에도 해양 레저·다이빙 관광의 목적도 중시하며, 그로 인해 노후 플랫폼 등과 같이 산업적인 부산물을 재활용하여 인공어초를 제작하는 문제에 관심을 기울이고 있다. 그로 인해, 인공어초의 다양한 형태, 구조 등을 끊임없이 개발하면서 부식, 마모, 세굴 등을 방지하기 위한 정교한 기술을 축적한 우리나라나 일본에 비해서는 상대적으로 제작 기술은 떨어지는 편이다(윤대호, 2018).

아울러, 미국과 유럽 공통으로 민간 주도 사업으로 운영되는 비중이 높다. 민간 주도 사업인 관계로, 운영의 유연성, 어장에서 배양하는 생물의 종의 다양성 등이 뛰어나기 때문에, 정부 주도의 획일적 경영, 배양 생물의 종의 다양성 등이 상대적으로 제약되는 우리나라의 인공어초 현황과는 대조를 이룬다. 해외 국가들과의 교류 및 정보 교환을 통해, 우리의 장점인 정교한 제조 기술, 미국·유럽 등지의 장점인 사업 모델의 유연성, 배양 생물의 종의 다양성 등을 상호 공유할 필요가 있을 것이다.



[그림 10] Fish habitat a reefed oil platform

* 출처 : <https://tpwd.texas.gov>

3. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 현황

가. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 이점

지금까지 살펴본 내용들을 토대로, 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 방식의 이점과 효과를 정리해 보면 다음과 같다.

첫째, 해상풍력 하부구조물을 포함한 해양 플랫폼을 재활용·재구성하여 인공어초로 전환할 경우 다방면에서 비용을 절감할 수 있다. 해양 플랫폼 해체를 위한 막대한 비용을 절감하는 것은 물론, 불완전한 해체로 인한 주변 해역의 환경 오염 문제를 사전에 예방할 수 있다. 즉, 기회 비용 절감 효과뿐 아니라, 미래의 추가 비용을 절감하는 효과도 크다고 볼 수 있다.

둘째, 인공어초 사업을 유지하거나 확장하는 데에도 노후 해양 플랫폼의 재활용은 플러스 요인이 될 수 있다. 비용과 시간, 기회 비용 절감 효과를 기대할 수 있으며, 플랫폼 관리 분야와 인공어초 관리 분야 모두에서 상호 시너지 효과를 가져올 수 있다. 우리나라는 정부·지자체의 지원과 관련 업체, 연구 기관들의 노력으로 인해, 해외 국가들에 비해 정교한 인공어초 제조 기술을 구축한 상태로서, 해외보다 훨씬 다양한 형식과 구조, 재질 등을 지닌 인공어초 종류들이 풍부하게 개발되어 있다(해양수산부, 2022). 이를 노후 해양 플랫폼 재활용 과정에서 어떤 식으로 접목하고 응용할 수 있는지도 관건이 될 것이다.

셋째, 일반적인 이점과 함께, 우리나라만의 특별한 이점이나 유리한 상황도 고려할 수 있는데, 이를 정리해 보면 다음과 같다. 우리나라는 자체적으로 석유, 가스 등 중요 에너지원이 되는 천연자원이 부재하지만, 이를 보완하기 위해 신재생 에너지 발전 설비를 지속적으로 개발·운영해 왔고, 해상 풍력 발전 설비도 그 일환으로 계속 개발·증설해 왔다. 우리나라 정부는 1987년에 <대체 에너지 기술 촉진법>을 공표한 이후 꾸준히 재생 에너지 확대·육성 정책을 전개해 왔는데(권영한, 김지영, 이민주, 2008), 이로 인해 내해 해역의 바람을 활용한 해상 풍력 발전 설비들이 1990~2000년대 사이에 중점적으로 건설되었다.

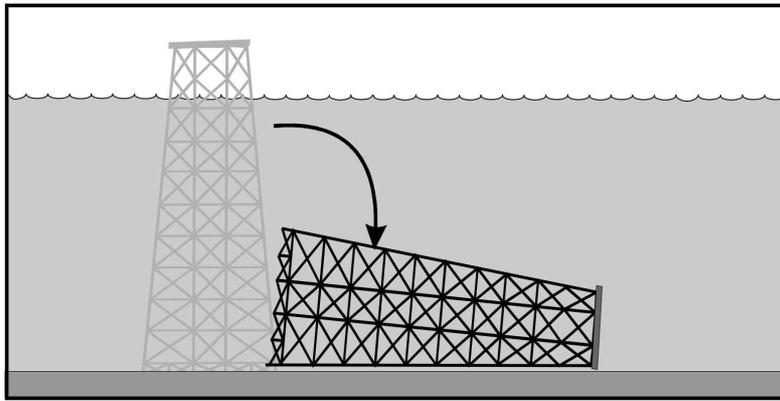
이 때 건설된 해상 풍력 발전 설비들이 대부분 설계 연한이 다 되어 노후된 상태인데(황재동, 2019), 노후 해양 플랫폼들을 인공어초로 재개발하는 전략이야말로 국내외 환경 문제를 개선하고 해양 산업의 글로벌 트렌드에도 부합하는 ‘지속 가능한’ ‘순환적’ 발전 모델이라고 판단된다. 국내 뿐 아니라 전 세계 해상풍력 발전설비의 하부 구조물이 모노파일(monopile)과 자켓(jacket) 유형인 경우가 90% 이상을 차지하고 있다. 따라서, 노후된 국내 해상 풍력용 발전 플랫폼의 자켓형 하부 구조물을 인공어초로 재활용하는 방안 및 노하우를 개발하고 축적하는 것이야말로 국내 해양 산업의 경쟁력을 강화할 수 있는 또 다른 미래 지향적이고 글로벌 경쟁력을 확보할 수 있는 유효한 전략이 될 것이다.

나. 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 방법

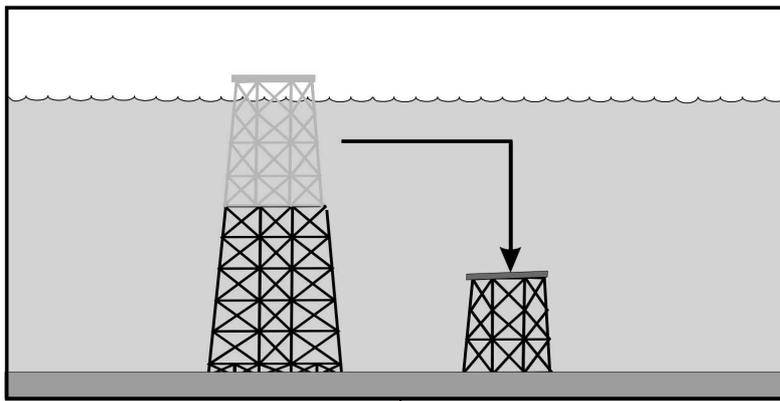
해양·해저에서의 석유나 가스를 개발하기 위한 목적에서, 현재 전 세계적으로 약 10,000개 이상의 해양 플랫폼이 설치되어 운영되고 있으며, 그 중 95% 정도가 ‘고정식 자켓 타입 강재 구조 플랫폼’(fixed type steel jacket platform)으로 알려져 있다(해양수산부, 2017). 따라서, 이런 유형의 해양 플랫폼 하부를 지지하는 구조물인 모노파일(monopile)과 자켓(jacket)은 세계적으로 노후 해양 플랫폼 해체 산업의 주요 타겟이 된다. 해양 플랫폼 구조물의 평균적인 설계 수명 주기는 25년 내외로서, 평균 수명을 다하여 생산 활동이 종료되거나, 자연 재해, 사고 등으로 인해 정상 가동이 불가능하게 되면 해체 또는 재사용 프로세스를 통해 공식적으로 임무를 종료해야 한다(양무석 외, 2019). 자켓 타입 플랫폼의 인공어초 재활용과 관련하여 현재 국내외에서 보편적으로 사용되는 기술 방식은 Rigs-to-Reefs (R2R)이며, 1980년대 후반에 R2R 프로그램이 시작된 이래로 멕시코灣(Gulf of Mexico)에서는 약 3,000개의 플랫폼 중 500개 이상을 인공어초로 만들었다.

R2R 방식은 제자리에서 자켓을 전복시키는 방식(Topple jacket in place)과 인공어초 대상지로 자켓을 운송하는 방식(Lift & Transportation jacket to reef location)으로 세분된다. 제자리 전복 방식

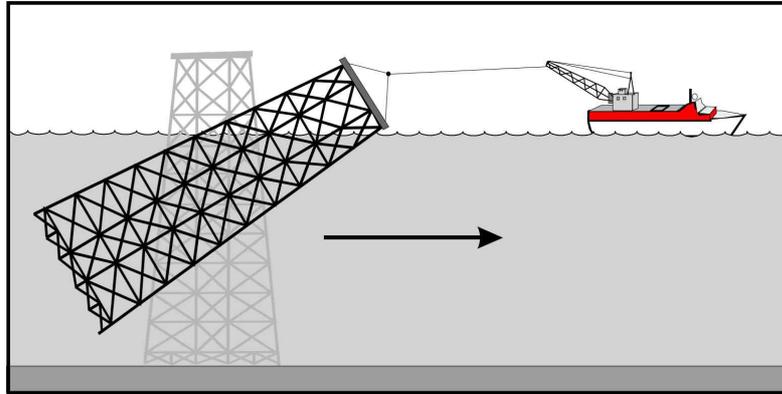
은 ①노후 해양 플랫폼 하부 구조물 전체를 크레인을 이용하여 그대로 수평 방향으로 넘어뜨리는 방식(그림 11)과 ②노후 해양 플랫폼 하부 구조물의 일부 지점을 절단한 후 크레인으로 절단된 부분만 넘어뜨리는 방식(그림 12)으로 나뉜다(Les Dauterive, 2000). 이 방식은 자켓 운송 방식보다는 시간이 덜 소요되고 공정도 비교적 간단하지만, 노후 플랫폼을 그대로 인공어초로 변경하여 즉시 운영할 수 있는 입지와 환경이 조성되어 있어야 한다(Basile & Vona, 2021).



[그림 11] Rigs-to-Reefs 中 전체 전복 방식 (topple-in-place)



[그림 12] Rigs-to-Reefs 中 부분 제거 방식 (partial removal)



[그림 13] Rigs-to-Reefs 中 이동배치 방식 (tow-and-place)

*출처 : Les Dauterive (2000). *Rigs-to-Reefs Policy, Progress, and Perspective*

따라서, 내륙으로부터 멀리 떨어진 외해의 노후 해양 플랫폼에 이 방식을 적용하는 것은 곤란하며, 내해이면서 인공어초 적지 조건에 부합하는 지점의 플랫폼들에 대해 이 공법을 안정적으로 적용할 수 있을 것이다. 상술한 국내의 해상 풍력용 발전 플랫폼들은 내해라는 입지 조건을 대부분 충족하는 데다, 국내에는 인공어초 사업과 관련 노하우가 보편화된 상황을 고려할 때, 향후 이 방식을 적극적으로 활용해야 할 것이다.

대상지로의 자켓 운송 방식(그림 13)은 노후 해양 플랫폼 주변 해상에 다른 유형의 해양 설비물들이 복잡하게 설치되어 있을 경우, 해저의 파이프 라인이나 기타 설비 등으로 인해 노후 해양 플랫폼을 제자리에 두지 못할 경우, 노후 해양 플랫폼이 외해에 위치한 관계로 제자리에서의 인공어초로의 변경이 어려운 경우 등에 주로 적용되는 방식으로서, 인공어초 적지 판정을 거쳐 대상지를 미리 정한 후 운송 작업을 진행하게 된다(Salcido, 2005). 이 과정에서 새로운 대상지 선정 및 실행과 관련하여 지자체나 민간 기업들의 의견이 충돌하는 등 정치 역학적 문제가 발생하기도 한다(Mcginnis, 2005).

노후 해양 플랫폼의 하부 구조물을 다른 지점으로 운반하여 인공어초로 재활용하기 위해서는 해양 환경, 해저 지형·지질, 수심, 수온, 주변의

어업 여건 등을 면밀하게 조사하여 엄격하게 적지를 선정하고 사후 판정하는 절차가 반드시 필요할 것이다. 인공어초 적지 선정 및 판정 작업이 제대로 진행되지 못한 상태에서 무리하게 노후 플랫폼 하부 구조물을 운반해 온 후 정상적으로 활용을 못 하고 방치하게 된다면, 재활용이라는 목적을 무색하게 만드는 지역 내 애물단지로 전락할 위험성이 있다.

이는 지역의 자연·생태 환경과 경제적 환경까지 동시에 훼손하는 치명적인 결과로 이어질 수 있기 때문에, 더욱 엄정한 사전 조사와 장기적 관점의 사업 타당성 조사가 수반되어야 할 것이며, 이러한 노력을 통해, 노후 해양 플랫폼의 하부 구조물을 인공어초로 재활용하는 사업이 환경과 경제, 사회에 모두 기여할 수 있는 성공적인 사업으로 자리매김할 수 있을 것이다.

IV. 인공어초로의 재활용의 환경적, 경제적, 사회적 효과

지금까지 전통적인 노후 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 방안의 당위성과 필요성, 추진 절차와 방법, 국내외 현황과 주요 사례 등에 대해 살펴보았다. 이상과 같은 고찰 내용들을 참고하면서, 본 장에서는 노후화된 해상풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 효과를 환경적 측면, 경제적 측면, 사회적 측면으로 각각 나누어 논의해 보겠다.

1. 환경적 효과

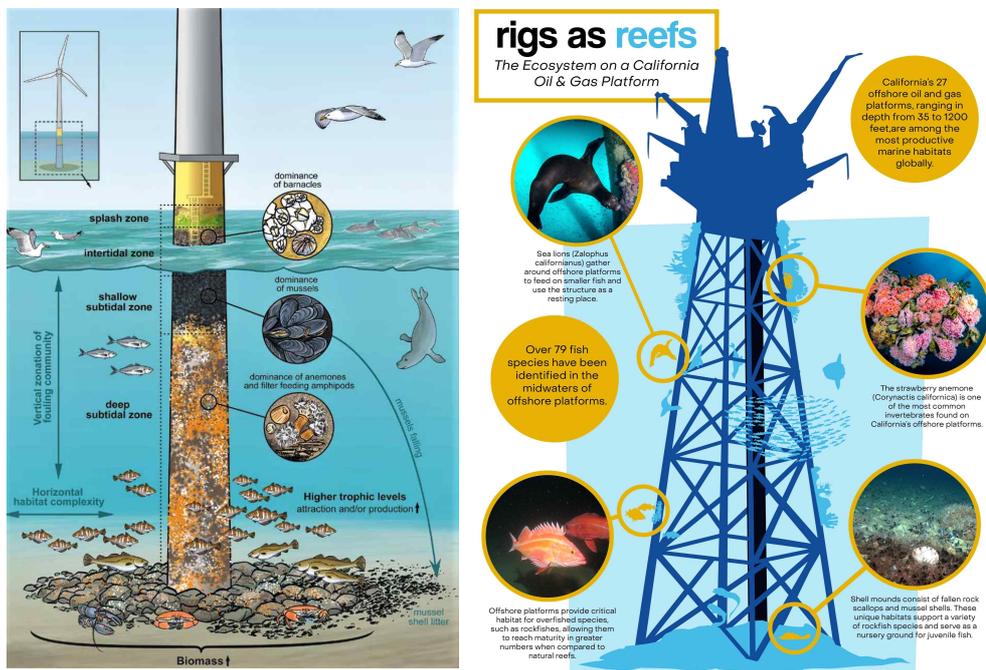
가. 수산·해양 생태계 개선·복원 효과

환경적 효과는 해양 플랫폼을 인공어초로 재활용하는 방안이 논의되면서부터 가장 많은 관심과 기대가 집중된 사안이다. 현재는 물론, 향후에도 환경적 효과는 고정식 해상풍력 하부구조물을 포함한 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용의 최우선적, 핵심적 목표가 될 것이며, 대부분의 국가들도 수산·해양 환경 보호 및 개선 효과에 주목하면서 인공어초로의 재활용을 추진할 것으로 예상된다.

노후화된 해상풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼을 인공어초로 재활용하게 되면, 인공어초 제작·개설을 위한 기술적, 사회적 비용을 절감하면서 인공어초 증설에 의한 수산·해양 자원 양식의 활성화 및 수산·해양 생태계 개선 등을 기대할 수 있다. 인공어초 증설·활성화로 인해 창출되는 환경적 효과를 세부 영역별로 나누어 파악해 보면 다음과 같다.

첫째, 수산·해양 생태계의 개선·복원 효과이다. 해양 플랫폼의 재활용을 통한 인공어초 증설과 활성화는 해양뿐 아니라, 연안 어장, 강, 호소(湖沼) 등을 모두 포괄하는 총체적인 수산·해양 생태계의 개선과 복원 등에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대되며, 관련 연구들을 통해 실질

적인 효과가 보고되기도 하였으며(김민석, 2008; 박종수, 서만석, 김지현, 2000; 임후순, 2005; Charbonne et. al., 2002; Glarou et. al., 2020; Seaman, 2004; Tsiamis et. al., 2020), 이와 같은 수중·해양 생태계 복원과 종의 다양성 상승, 평균 서식 생체량 증가 등은 자연스럽게 수산 자원 증산을 통한 어획량 증가, 어업 수익성 증가 등과 같은 경제적 효과로 직결되는데, 경제적 효과는 4.2절에서 별도로 분석하고자 한다.



[그림 14] 해상풍력 하부구조물에 서식하는 생태 군락

* 좌 출처: <http://www.anglersforoffshorewind.org/>

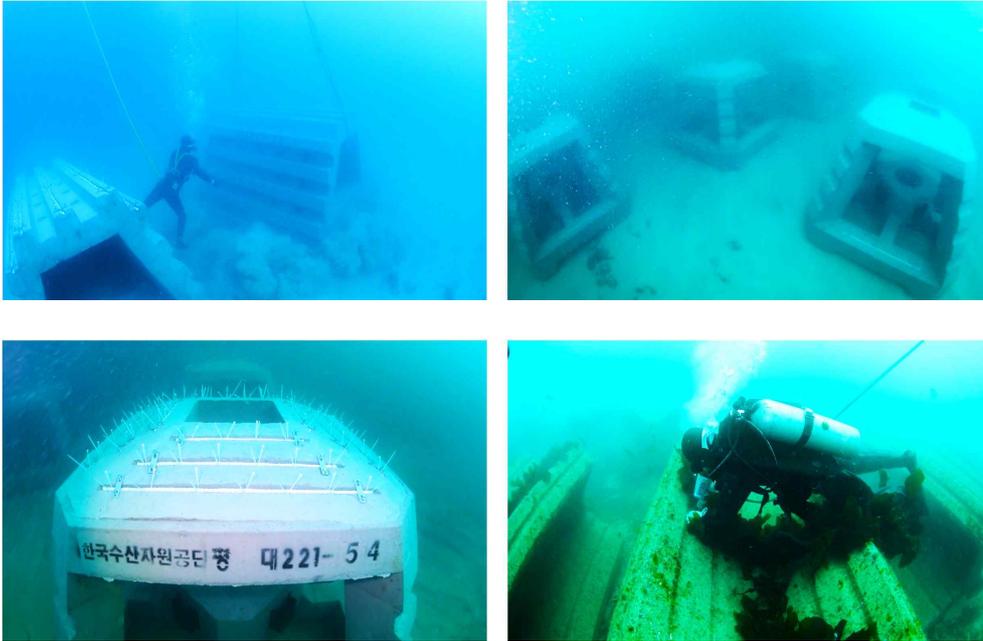
* 우 출처: <https://www.bluelatitudesfoundation.org/>

해외에서도 인공어초의 수중·해양 생태계 개선·복원 효과가 다수의 사례들을 통해 입증되었다. 1990~2000년 간에 플로리다 해역에 집중적으로 시설된 인공어초는 다양한 수중 생물들의 서식과 위집을 통한 종 다양성 상승을 촉진한 동시에, 이로 인해 해당 지역의 수중 생태계 개선

에 긍정적 영향을 미친 것으로 보고되었다(Bell et. al., 1998; Seaman, 2004). 이와 유사한 맥락에서, 스코틀랜드(Tsiamis et. al., 2020), 지중해(Charbonne et. al., 2002) 등지에서도 인공어초 시설로 인해 해당 수역의 생물 위집도와 종 다양성 등이 심화·향상된 것으로 보고되었다.

인공어초에 수중 생물들이 비교적 용이하게 위집되는 원인으로는 도피 장소 효과, 먹이 발생 효과, 산란 장소 효과 등이 지목된다(박중수, 서만석, 김지현, 2004). 인공어초는 천적으로부터 안전하게 피신할 수 있는 도피 장소이자 평화로운 서식 및 산란 장소로 활용될 수 있기 때문에, 수중 생물들의 위집을 유도하게 되며, 이를 통해 수중 생물들의 종 다양성 상승 및 수중 생태계 복원에 기여하게 되며(Glarou et. al., 2020, 인공어초 표면에 부착되는 저서 생물들과 플랑크톤 등의 미생물 및 내부에 서식하는 소형 어류 등은 어류의 다양한 섭이 형태에 부합하는 먹이들을 유형별로 풍부하게 제공함으로써, 많은 어류들의 위집도 및 종 다양성을 상승시킬 수 있다(Buckley & Hueckel, 1985; Layman & Allgeier, 2020). 이렇듯 다양한 종류의 어류들이 인공어초에 위집되어 비교적 안전하게 영양을 섭취하고 산란함으로써, 인공어초의 종 다양성을 풍부하게 하는 동시에, 어장으로서의 생산성도 높일 수 있다(노준성, 2015; 박중수, 서만석, 김지현, 2004).

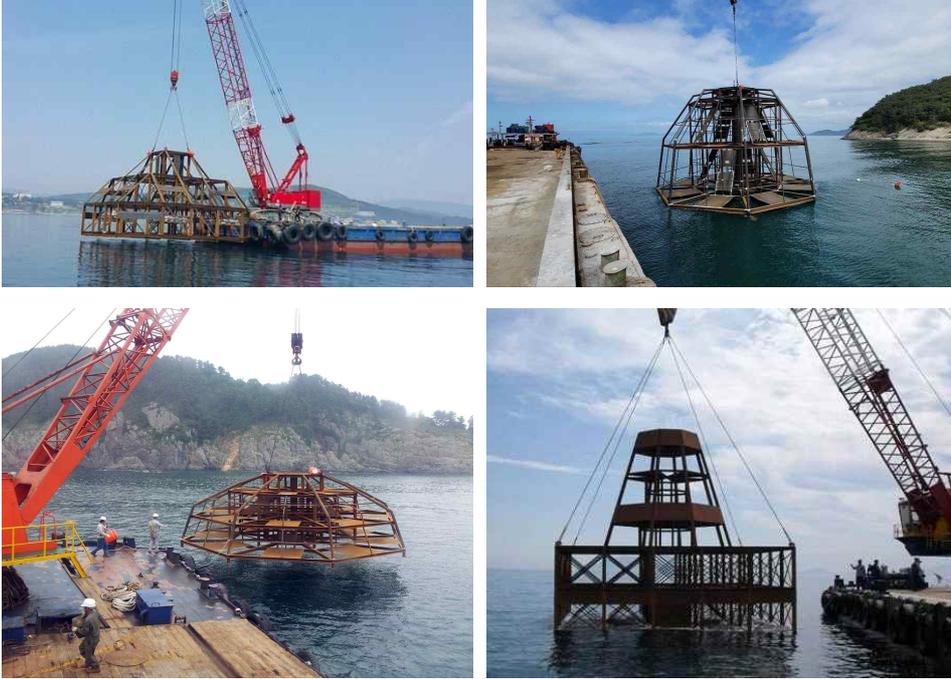
이상과 같이 인공어초는 수중 생물들의 생태 특성과 먹이 사슬 구조 등에 부합하는 양질의 서식, 산란, 먹이 섭취, 도피·은신 등의 환경을 제공함으로써, 수중 생물들의 풍부한 위집과 종 다양성 상승 등을 촉진할 수 있으며(손병규, 2008), 이를 통해 가장 효과적이면서도 자연스러운 방식으로 수중 생태계 개선·복원에 기여할 수 있다(Glarou et. al., 2020). 또한, 인공어초에서 배양되는 수중 식물들은 수중 유기물을 흡수하는 동시에, 뿌리를 통해 미생물을 여과하는 기능도 담당함으로써, 수질 정화 효과도 함께 거둘 수 있다(Khairullina et. al., 2022). 수질 정화를 통해 서식 생물들의 종류를 늘려 나가고 안정적인 서식과 산란 등을 유도함으로써, 인공어초는 하나의 독립된 소규모 수중 생태계(Biotope)로 기능할 수 있다. 인공어초를 활용한 수중·해양 생태계 복원은 국제 환경 협약에도 부합하는 시의 적절하고도 미래 지향적인 시도라고 볼 수 있다.



[그림 15] 인공어초 세부 경관

좌상 : 인공어초 투하 장면, 우상 : 수중의 인공어초
 좌하 : 인공어초의 케이블, 우하 : 케이블에 해조류를 이식하는 장면
 (출처 : 해양수산부, 2021)

국제 사회는 2030년까지 전 세계 해양 면적의 30%를 보호 구역으로 지정하기로 합의하였다(박성욱, 이주아, 2022). 이는 ‘자연을 위한 정상들의 서약’ (Leader’s pledge for Nature), 생물 다양성 보호 지역 확대 연합(High Ambition Coalition), 세계 해양 연합(Global Ocean Alliance) 등에 의해 주도되고 있는데, 우리나라도 이에 적극 동참하고 있다(김미주, 2021). 또한, 세계 5대 갯벌이자 국내 최초인 가로림만 국가 해양 정원의 조성사업은 국내 해양 자원 보호와 수중 생태계 복원을 최우선적 목표로 삼는 동시에, 해양과 관련된 국내 문화와 역사에 대한 체험, 교육, 홍보, 관광 자원화 등도 병행함으로써, 해양 자원의 ‘지속 가능한 이용 및 활성화’를 도모하려는 것이다.



[그림 16] 인공어초의 운반 및 수중 투하

좌상 출처 : <https://www.busan.com/view/busan/view.php?code=20180911000269>

우상 출처 : <https://www.hankyung.com/politics/article/202207246679Y>

좌하/우하 출처 : <https://www.yna.co.kr/view/AKR20110603071200052>

또한, 세계 5대 갯벌이자 국내 최초인 가로림만 국가 해양 정원의 조성사업은 국내 해양 자원 보호와 수중 생태계 복원을 최우선적 목표로 삼는 동시에, 해양과 관련된 국내 문화와 역사에 대한 체험, 교육, 홍보, 관광 자원화 등도 병행함으로써, 해양 자원의 ‘지속 가능한 이용 및 활성화’를 도모하려는 것이다.

이런 추세에 주목하면서, 국가적, 국제적 차원의 수중·해양 생태계의 개선과 보호, 지속 가능한 활용이라는 원대한 목표와 정책적 비전에 부합할 수 있는 해상풍력 하부구조물의 인공어초로의 진화된 재구성·재활용 방안 및 효율적, 유기적인 활성화 전략을 지속적으로 모색하고 실천하여, 해양 생태계 파괴와 자연 어장 감소 등을 효과적으로 예방·개선해

야 할 것이며, 그렇게 해서 양적으로 증설된 인공어초를 통해 시설지의 종 다양성, 수중 생태 환경, 어장으로서의 생산성 등을 동시에 향상시킬 수 있다.

나. 이산화탄소 저감 효과

인공어초 증설 및 활성화로 인해 유발되는 또 다른 중요한 환경적 효과로는 이산화탄소 저감 효과를 들 수 있다. 이산화탄소 저감은 인공어초 활용의 가장 바람직하고도 기대되는 효과인 동시에, 인공어초 사업 추진의 핵심 목표이기도 하다. 글로벌 환경 문제와 관련하여 가장 심각한 현안이자 최대 이슈 중 하나인 지구온난화를 개선하거나 최소한 진행 속도라도 늦출 수 있는 직접적인 해법 중 하나가 이산화탄소 저감이다(손재익, 이창근, 2008). 인공어초 개설·활용으로 인해 해당 수역의 이산화탄소 배출량이 감소된다면, 인공어초 사업의 당위성과 필요성이 더욱 강력하게 지지될 수 있을 것이다.

20세기 중반부터 전 세계적인 산업화·도시화로 인해 화석 연료 사용량이 기하 급수적으로 증가함에 따라, 온실 가스 배출량도 급속도로 상승하였으며, 그 결과 지구 온난화 현상이 글로벌 문제로 부각되었다(IPCC, 2022). 지구 대기 중에 함유된 온실가스(Greenhouse Gases, GHGs)의 농도가 높아지면 온실 효과가 발생하여 지구 표면 온도가 점차 상승하게 되는데, 이로 인해 인류의 미래를 위협하는 지구 온난화 현상이 심각한 현안으로 대두되었다(김준호, 2012).

1997년 교토의정서에는 온실효과를 야기하여 지구 온난화 현상의 주된 요인으로 꼽히는 6대 기체인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)를 배출량 감축 대상으로 합의하였으며, 그 이전인 1985년에 세계기상기구(WMO)와 국제연합환경계획(UNEP)은 이미 이산화탄소가 지구 온난화의 주범이라고 공식 선언한 바 있다(박헌열, 2011). 이를 계기로, 온실 가스 배출량을 조사·보고할 때에는 6대 온실 기체 배출량을 등가의 이산화탄소로 환산한 ‘이산화탄소 등가물’(Carbon dioxide equivalent, CO₂e)을

공식 지표로 활용하는 것이 국제 관행으로 정착되었다(손재익, 이창근, 2008). 이처럼 갈수록 심각해지는 온실가스 또는 이산화탄소 등가물 배출량을 저감하기 위한 다양한 방법과 전략들이 개발·시도되고 있는데, 인공어초의 시설 및 활용도 유용한 대안으로 주목되고 있다. 특히, 바다 숲과 바다 목장의 기능을 겸비한 다용도·다기능의 인공어초를 활용하여 해초·해조류 등을 중점적으로 배양하고 증산할 경우, 수중·해양 생태계 복원과 수산 자원 증산 등 다양한 결실과 함께(주병석, 2016), 수산·해양 환경의 ‘탈탄소화(脫炭素化)’ 및 이산화탄소 저감 등을 촉진할 수 있다. 식물은 글로벌 차원에서 전개되는 탈탄소화 시도에서 중추적인 기능을 담당할 수 있는데, 이는 지상 식물은 물론, 해조류 등 수중 식물에게도 공통되는 내용이다. 특히, 최근에 규명된 수중 식물의 탁월한 탄소 흡수 기능은 이산화탄소 저감을 위한 강력한 미래 솔루션으로 주목되고 있다(권인하 외, 2023). 이산화탄소 저감은 생산·제조 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량을 줄이는 방법과 이미 자연 속에 존재하는 이산화탄소를 식물들을 활용하여 흡수하는 방법으로 구분되는데, 식물들을 활용하여 이산화탄소를 흡수하는 방식 또는 그러한 기능을 담당하는 탄소 흡수원을 ‘그린 카본’(green carbon), ‘블루 카본’(blue carbon) 등으로 지칭한다(한국 산림청 외, 2014).

그린 카본은 대기나 자연 속에 존재하는 이산화탄소를 흡수하는 지상 식물 및 그들의 흡수원으로서 기능을 의미하며(박준수, 2018), 블루 카본은 수중·해양의 이산화탄소를 흡수하는 수중·해양 식물 및 그들의 탄소 흡수 기능을 뜻한다(박성일, 2021). 지상의 이산화탄소를 저감하기 위한 목적의 도시 숲 조성은 20세기 후반부터 활발하게 추진되었으며, 이에 더하여 수중·해양에 분포하는 이산화탄소를 흡수·저감하기 위한 바다 숲 조성도 세계 각국에서 중점적으로 진행되고 있다(명수정, 오일찬, 2021). 그린 카본 활성화를 위한 도시 숲 조성과 블루 카본 활성화를 위한 바다 숲 조성은 이산화탄소 저감을 위한 ‘자연 기반 해법’의 대표적 전략이라고 볼 수 있다. 자연 기반 해법(nature-based solutions. NbS)은 자연의 법칙과 섭리를 활용하여 각종 환경 문제를 해결하려는 지속 가능한 접근법을 말한다(Kabisch et. al., 2022). 즉, 인류의 미래를 좌우할 수 있는

심각하고도 복잡한 환경, 사회, 경제 관련 문제들에 대해, 자연으로부터 영감을 얻거나 자연의 원칙을 모방·응용한 활동들을 통해, 인류 복지 강화, 생물 다양성 증진, 생태계의 보호·복원과 지속 관리, 생태계 서비스 혜택 제공 등에 기여하는 ‘지속 가능한 접근법’이라고 할 수 있다(명수정, 오일찬, 2021). 자연 기반 해법은 21세기의 범 글로벌 이슈인 환경 문제를 전체 인류 사회 혹은 각 국가나 지역 사회 등이 보다 효율적, 순응적이며 지속 가능한 방식으로 해결하도록 돕는 활동으로서, 경제 활동과 사회 복지에 기여하면서 생물 다양성과 생태계의 조화를 보전·증진하고, 기후 변화의 부정적 영향을 축소하면서 인류의 생활 환경을 개선하는 데 궁극적인 목표를 둔다(Kiss et. al., 2022). 즉, 자연의 핵심 원리인 생태계 서비스 기능을 대폭 강화하면서 자연과 인간의 조화·공존을 통해 인류의 삶의 질을 향상시키고 자연 친화적이고 지속 가능한 생활을 유지하는 접근법이라고 정리할 수 있다(Eggermont et. al., 2015).

아직까지 인공어초의 탄소 저감 효과를 직접 입증한 연구는 찾아보기 힘들지만, 앞에서 살펴본 대로 수중 식물의 배양과 증산, 종 다양성 강화 등에서 뚜렷한 효과를 나타내는 인공어초의 자연 기반적 수중 생태계 개선 기능이 다방면에서 확인된 이상, 블루 카본 기능도 충분히 예측할 수 있다. 인공어초를 활용하여 수중·해양의 이산화탄소 흡수와 저감에서도 확실한 효과를 거두게 된다면, 노후화된 해양 플랫폼 구조물을 인공어초로 재활용하는 방안의 당위성과 명분, 실효성 등도 더욱 강화될 것이다.

그런데, 도시 숲 또는 그린 카본보다도 몇 배 혹은 몇 십 배나 강력한 자연 기반 해법 역량을 발휘할 수 있는 것이 바다 숲의 블루 카본이라는 사실이 최근에 규명됨으로써, 환경 전문가 및 정책 관련자들의 관심을 집중시키고 있다(Alongi, 2022).

블루 카본은 갯벌과 연안의 퇴적물과 수중 식물 등 수중·해양 생태계가 수중과 해양은 물론, 대기 중의 탄소까지도 흡수하는 기능을 지칭한다(Mcleod et. al., 2011). 블루 카본은 그린 카본보다도 탄소 흡수 속도가 50배나 되고, 탄소 저장 능력도 몇 배나 높으며, 흡수한 탄소의 저장 기한도 백 년 이상이라고 보고되었다(서민아, 2022; Alongi, 2022). 특히, 지구 전체 산소량의 20% 정도를 생산할 정도로 그린 카본 기능이 막강

한 아마존 열대 우림보다도 바다와 해양 습지의 탄소 흡수·저장 능력이 더욱 뛰어나다는 사실이 규명된 이후, 지구 온난화를 해결할 수 있는 강력하고도 효과적인 지속 가능한 솔루션으로써 블루 카본이 주목받고 있다(권인하 외, 2023).

이 같은 블루 카본의 엄청난 효과에 주목하면서, 바닷속 생태계의 중요성을 전국적으로 홍보하고 바다 숲 조성을 국가 차원에서 독려하기 위해, 우리 정부는 2023년에 5월 10일을 ‘바다 식목일’로 새롭게 지정하였는데, 이는 매우 의미 있는 조치라고 볼 수 있다.



[그림 17] 울릉도 남양리 앞 바다에 조성된 인공어초의 바다 숲
(출처 : <https://hope1.soosoo-info.com/50>)

바다 숲의 블루 카본 기능에 대한 데이터베이스가 국내외에서 아직 충분히 축적되지 못한 관계로, 그린 카본보다 몇 배나 강력한 블루 카본 효력의 실제 수치를 세부적으로 확인할 수는 없지만, 현재 국내에 조성된 바다 숲만으로도 연간 약 9.8만톤의 온실 가스를 저감할 수 있는데, 이는 자동차 4만대의 온실 가스 배출량에 해당한다고 설명된다(윤호성 외, 2022). 최근에 국내에서도 의욕적으로 추진 중인 바다 숲과 갯벌의

블루 카본 기능에 대한 실증적, 분석적 연구 결과를 공유하면서, 노후화된 해상 풍력 발전설비 등의 해양 플랫폼 구조물을 재활용한 인공어초의 블루 카본 기능으로의 확장·응용 방안에 대해서도 진지하게 모색하고 고민해야 할 것이다.

단위 면적당 최고 수준의 블루 카본 기능을 지닌 서식종 구성·배양과 관련하여, 현재 ‘잘피(거머리말, *Zostera marina*)’가 주목되고 있다. 2019년에 한국수산자원공단(FIRA)은 바다숲 조성 사업의 일환이자 새로운 시도로서, 인천광역시 옹진군 굴업도 해역에 잘피숲을 중점 조성하였고, 2022년 상반기에는 해당 해역을 대상으로 총 3년 간의 효과 조사를 실시하였다. 2009년부터 한국수산자원공단이 의욕적으로 운영·관리해 온 바다숲 조성 사업은 감태, 모자반, 다시마, 미역 등의 일반적인 해조류를 주요 대상으로 해 왔는데, 최근에 탁월한 블루 카본 기능을 국제적으로 공인받은 잘피 숲을 해당 지역에 중점 조성·관리한 것이다. 조사 결과, 인근 비교 대상 해역에 비해 잘피 숲 조성 해역에서는 해양 저서 생물 종수가 평균 1.5배 이상, 개체 수는 약 2.5배, 종 다양성 지수는 20% 정도 증가한 것으로 분석되었다(한국수산자원공단, 2022). 이를 통해, 잘피 숲 조성이 해양생태계 회복에 높은 긍정적 효과를 나타내는 사실을 확인하였다. 또한, 잘피 숲은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 기후 변화에 관한 정부 간 협의체)에서 인증한 대표적인 블루 카본 식물로서, 10,000m² 당 연간 300~500ton의 탄소 흡수·저감 효과를 나타내는 것으로 확인되는데, 이에 따르면 굴업도 해역에 조성된 잘피숲(3,800m²)은 연간 152ton의 탄소를 흡수·저감할 것으로 예측된다(한국수산자원공단, 2022). 이처럼 강력한 블루 카본 기능을 지닌 잘피숲 육성으로 인한 해양생태계 복원과 탄소 저감은 현재 우리나라 정부가 강력하게 추진 중인 ‘2050 탄소중립 정책’의 순조로운 달성을 위해서도 반드시 필요한 프로젝트임을 알 수 있다.

이에 본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 발전설비의 하부구조물 등의 해양 플랫폼 구조물을 재활용한 인공어초의 바다 숲 조성 과정에서 최고 수준의 블루 카본 기능을 지닌 잘피 활용을 극대화할 것을 제안한다.

이상과 같은 일련의 노력과 시도들을 통해, 재활용 인공어초의 바다 숲 기능과 블루 카본 기능을 극대화함으로써, 수중·해양 환경 보호와 수중·해양 생태계 복원이라는 본연의 목적과 효과를 뛰어넘어, 이산화탄소 저감과 지구 온난화 개선이라는 ‘범 글로벌 자연 기반 환경 해법에도 효과적으로 기능할 수 있도록’ 유도해야 할 것이다. 인공어초의 블루 카본 기능을 새롭게 개발하고 관련 노하우를 축적하는 것은 인공어초의 확장된 열린 활용과 ‘지속 가능한’ 미래 지향적 운영 방안을 보장하는 진화된 자연 기반 해법으로서, 인공어초의 질적 발전과 기능·위상 강화 등에 기여할 것으로 예상된다. 이러한 이해를 바탕으로, 인공어초의 블루 카본 기능 활성화 및 그에 발맞춘 실증적, 실험적 연구도 이루어져야 할 것이다. 본 연구는 이를 위한 선행적 문헌 고찰 작업에 집중함으로써, 인공어초의 블루 카본 기능의 당위성과 명분을 제시하고자 한다.

2. 경제적 효과

지금까지 노후 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 효과를 가장 중요하고 핵심적인 영역인 환경적 효과에 초점을 맞추어 살펴보았다. 즉, 노후화된 해양 플랫폼 구조물의 재구성·재활용을 통한 인공어초의 증설을 전제로, 인공어초의 시설 수량 증가 및 활성화로 인해 창출될 수 있는 환경적 효과에 초점을 맞추어 분석해 보았다. 이러한 이해를 기반으로, 본 절에서는 수중·해양 환경 개선 및 수중·해양 생태계 복원·상승 등으로 인해 자연스럽게 파생될 수 있는 경제적 효과에 대해서도 함께 고찰해 보겠다.

첫째, 다방면에서 비용이 절감되는 효과를 들 수 있다. 노후화된 해양 플랫폼을 해체 후 인공어초로 재활용하게 되면, 인공어초 제작·개설을 위한 사회적, 기술적 비용을 절감하면서 인공어초에 의한 수산 자원 양식을 활성화할 수 있다. 사회적, 기술적 비용의 절감은 자원 절약으로 이어지고, 이는 궁극적으로 지구 자원 절약과 환경 보호로도 이어지기 때문에, 비용 및 자원 절감의 경제적 효과도 최근에 중시되고 있다.



[그림 18] 잘피숲 조성 전 전경(상)과 잘피숲 조성 후 전경(하)
(출처 : 한국수산자원공단, 2022)

특히, 폐기물이나 산업 부산물의 친환경적 처리와 재활용, 자원의 순환적 활용 등이 범 글로벌 의무 과제로 갈수록 중시되고 있는 최근의 추세를 고려 할 때, 해양 플랫폼 구조물의 인공어초로의 재활용은 그 자체로 기본적으로고도 중요한 경제적 효과를 가져온다고 평할 수 있다.

둘째, 어획량 증산 및 수산업의 효율성 증진에도 기여할 수 있다(최종두, 2013; Kakimoto & Okubo, 1985; Polovina, 1989; Ropicki et. al.,

2006). 이는 특히 우리나라의 지리적 특성에 부합되는 동시에, 반드시 필요한 효과라고 볼 수 있다. 반도 국가인 우리나라는 국토의 삼면이 바다로 둘러싸인 관계로, 육상 농업과 함께 연해·근해 수산업의 운영이 국가 발전과 국민 생존을 위한 필수 과제라고 할 수 있다.

한편, 지구 온난화와 수온 상승 등으로 인해 한반도 주변 수중·해양 생물의 군집 분포와 어획량이 빠르게 변화하고 있고, 이러한 해양 환경의 변화는 수산업에 부정적인 영향을 더하고 있다. 우리나라 해역은 지구 온난화의 영향으로 인해 표층 수온이 최근 49년간(1968~2016년) 1.23℃나 상승하였는데, 이는 동 기간 전 세계 표층 수온 상승(0.47℃)과 비교하면 2.6배 이상이나 높은 것이다(해양수산부, 2019).

이러한 지구 온난화로 인한 국내 어업 생산 감소를 중장기적으로 예방하고 개선하기 위해 다양한 전략과 방법들이 시도되고 있는데, 그 중에서도 인공어초 시설을 통한 바다 목장, 바다 숲 조성 사업은 효과적인 대안이 될 수 있다. 국내의 수산 자원 증강을 위한 연안 바다 목장, 바다 숲 조성 사업들이 각지에서 2010년대 초반부터 적극 추진되었는데, 이 과정에서 훼손된 수중 생태계를 개선하고 어업 생산 기반을 새롭게 조성하기 위해 팔각 반구형 강제 어초, 삼단 격실형 강제 어초, 터널형 어초, 방사형 어초 등과 같은 다양한 유형과 구조를 지닌 인공어초들이 각지의 환경과 세부 상황에 맞게 맞춤형으로 시설되었다(한국수산자원공단, 2017).

인공어초 시설 사업은 바다 목장 및 바다 숲 조성 사업, 종자 방류 사업 등 연관 분야의 다른 사업들과 병행하여 추진될 경우 수산 자원 증가와 훼손된 어장 기능 복원 등에서 긍정적인 효과를 거두었고(한국수산자원공단, 2019; Ropicki et. al., 2006), 이는 곧 서해 및 남해에 분포한 해상 풍력 발전 설비 하부구조물의 인공어초로의 재활용 및 재구성을 통해 어류의 위집·은신·산란 등의 효과를 가져와 어획량 증산 및 수산업 효율성 증진에 일조 할 수 있다.

인공어초 시설·활용의 경제적 효과는 다양한 지역에서 입증되었는데, 국내의 최신 사례 중 하나를 살펴보면 다음의 <표 4>, <표 5>와 같다. 2019년 10월부터 12월까지 2개월간 남해군 평산, 포항시 오도에서 표본

어선을 각 2척 씩 지정하여 운용한 결과, 남해군 어초구의 CPUE는 비어초구(암반구, 비암반구) 대비 1.28배, 포항시 어초구의 CPUE는 비어초구(암반구, 비암반구) 대비 1.13배로 조성 효과가 있음이 규명되었다. 또한, 표본어선에서 어획된 상위 10종의 수익성을 분석한 결과, 남해군 어초구의 수익성은 비어초구(암반구, 비암반구) 대비 1.17배이며, 포항시 어초구의 수익성은 비어초구(암반구, 비암반구) 대비 1.23배로 어초구의 경제적 효과를 확인할 수 있었다(해양수산부, 2019).

<표 4> 인공어초 조성효과 정량화 시스템 고도화 운영 결과(CPUE*)

비교		구역	어획일수 (일)	어획량 (kg)	CPUE	비어초구 대비 어초구 CPUE효과
남해	어초구		70	719.54	10.279	1.28
	비 어초구	암반	13	111.25	8.558	1.0
		비암반	12	89.50	7.458	
	전 체		95	920.29	-	
동해	어초구		32	1,762.80	23.736	1.13
	비 어초구	암반	8	936.40	18.220	1.0
		비암반	23	92.50	21.891	
	전 체		63	2,791.70	-	

* CPUE (Catch Per Unit of Effort)는 ‘단위노력당 어획량’이라 부르기도 하며 그 뜻은 그물에 잡힌 물고기를 모두 더한 무게(kg)를 그물 폭수 (1폭 : 50 m × 2 m, Ø 82mm)와 물속에 넣어둔 시간(24시간)으로 나누어 계산한 값

인공어초나 바다 목장, 바다 숲 조성으로 인한 수상·해양 생태계의 복원과 종의 다양성 증가, 평균 개체수 증가 등은 해당 지역의 어획량 증가, 수산 자원 증가 등을 촉진함으로써, 직접적인 경제 효과 창출로 직결됨을 알 수 있다. 이런 의미에서, 인공어초, 바다 숲, 바다 목장 등의 증설과 활성화로 인한 환경적 효과는 경제적 효과와 불가분의 관계를 지니면서 선순환 구조를 창출하는 사실을 확인할 수 있다.

<표 5> 인공어초 조성효과 정량화 시스템 고도화 운영 결과(수익)

비교	구역		어획일수 (일)	어획량 (kg)	총수익 (원)	단위수익 (총수익/횟수)	비어초구 대비 어초구 수익 효과
	비어초구	암반					
남해	어초구		70	719.54	18,322,892	261.756	1.17
	비어초구	암반	13	111.25	2,658,709	204.516	1.0
		비암반	12	89.50	2,928,645	244.054	
	전 체			95	920.29	23,910,246	-
동해	어초구		32	1,762.80	8,226,166	257.068	1.23
	비어초구	암반	8	936.40	1,519,160	189.895	1.0
		비암반	23	92.50	4,982,850	216.646	
	전 체			63	2,791.70	14,728,176	-

* 출처 : 해양수산부(2019)

셋째, 노후화된 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 및 그로 인한 인공어초의 증설·활성화와 바다 목장, 바다 숲의 증가는 ‘지속 가능한 양식업’에도 기여할 수 있다. ‘지속 가능한 양식업’은 2016년부터 UN이 새로운 밀레니엄의 범 글로벌 목표로 천명한 ‘지속 가능 발전 목표’(Sustainable Development Goals, SDGs)를 어업·양식업 분야에 접목·응용한 개념이라고 볼 수 있다. SDGs는 20세기 중반부터 대두된 환경 문제의 심각성과 그로 인해 고조된 글로벌 위기 의식, 경각심 등에 주목하면서, 이러한 경각심과 인류의 미래를 걱정하는 집단 지성 등을 토대로 국가 간 협력과 공조를 강화하는 건설적, 당위적인 동력으로 작용할 수 있다(최영출 외, 2022). SDGs라는 글로벌 정책 목표를 인공어초 육성 사업에서도 관철하기 위해 노력하고 모색하는 자세가 필요할 것이다.

‘지속 가능한 양식업’의 원칙 하에, 국내에서는 2022년 5월에 관련 기관 및 이해 관계자 간 협의를 거쳐 <친환경 농·어업법>을 개정하였고, 그를 토대로 친환경·고부가 가치 양식 품목 증산, 친환경 수산물 인증

제도 개선, 친환경 수산물 유통 시스템 정비 등에 제도적, 재정적 지원을 집중하고 있다(농림축산식품부, 2022). 친환경·고부가 가치 양식업 정착을 위한 연구 시설(9개소)과 시범 양식 어가(6개소) 등도 개설하여 운영하고 있다. 이 외에도 친환경 ICT 순환 여과 양식 연구 시설(경북), 친환경 바이오 플라크 방식 흰다리 새우 양식장(전북), 친환경 스마트 가두리 양식장(경남) 등 15개소의 사업 모델을 구축·운영하면서, 총 83억원의 국비를 지원하고 있다.

지속 가능한 양식업을 위한 핵심적 도구로 주목되고 있는 것이 스마트 양식으로서, 국내에서도 첨단 ICT 기술과 인공지능 기술 등을 활용한 친환경 스마트 양식 시스템 개발과 상용화에 노력을 집중하고 있다(정훈, 허태욱, 이일우, 2021). 경남 지역에서 시범적으로 운영되고 있는 친환경 스마트 가두리 양식장이 대표적 사례인데, 최근의 노력과 관심에도 불구하고 아직까지 스마트 양식의 국내 기술 수준은 글로벌 평균에 비해 다소 부족한 것이 사실이다. 따라서, 향후 민·관 협력 하에 중점적인 투자와 노력을 통해 지속 가능한 친환경 스마트 양식 기술과 관련 클러스터, 운영 시스템 등을 정비하고 발전시켜 나가야 할 것이다.

친환경 스마트 양식 기술을 인공어초 운영·관리에도 접목시키게 된다면, 더욱 높은 효과를 거둘 수 있을 것이다. 인공어초를 증설하고 활성화하는 과정에서 이상과 같은 지속 가능한 양식업, 친환경·고부가 가치 양식업, 친환경 스마트 양식업 등과 같은 각종 미래 지향적 원칙과 트렌드를 효과적으로 접목한다면, 인공어초의 지속 가능한 경제적 가치를 더욱 드높일 수 있을 것이다. 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼 구조물의 해체 후 인공어초로의 재활용을 지속 가능한 양식업으로 승화시킬 수 있다면, 이는 산업 부산물의 재활용과 처리 및 순환적 자원 활용의 모범적 선례를 제시하게 될 것이다. 이를 위해서는 재활용된 인공어초 시설의 적지 선정, 타겟 지점의 생태 환경이나 사회적, 경제적 상황에 맞는 최적화된 설계와 사후 모니터링 등 관련 문제들을 정확하고 세밀하게 처리할 수 있는 특화된 노하우와 프로세스를 개발·정착시키는 등 다방면에서 지속적인 노력을 기울여야 할 것이다.

3. 사회적 효과

노후화된 고정식 해상풍력 발전설비 하부구조물 및 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 방안의 사회적 효과를 추가적으로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 관광 인프라 및 레크리에이션 자원으로 활용되는 효과를 들 수 있다. 이는 다수의 인공어초 관련 연구에서 제시한 효과로서, 특히 명승지로 유명한 미국 플로리다와 북유럽 해역에서는 해양 플랫폼을 재구성한 인공어초의 높이를 활용하여 다이빙 플랫폼 또는 해상 레포츠 시설이나 해양 리조트 등으로 활용함으로써, 해상 관광 및 해양 문화 체험 기회를 제공하고 있다(Kruse et. al., 2015; Musa, 2002). 이와 같은 인공어초의 창의적, 심미적 활용은 국가나 지역 브랜드를 제고하고 관광 산업을 활성화하는 등 다양한 사회적, 문화적 효과를 창출할 수 있다.

앞에서 살펴본 것처럼, 인공어초는 수중 생물들의 위집 효과가 뛰어나기 때문에, 관광객들의 낚시 플랫폼으로도 활용될 수 있다. 대형 침선어초나 강제어초는 대량의 어류와 부착 생물 등이 집중 서식하는 같은 수중 볼거리를 제공함으로써, 양질의 수중·해양 체험 관광 기회를 제공할 수 있다. 해상 레저·관광 효과는 지역 경제 활성화 및 지역 브랜드 제고 등에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 아울러, 수중·해양 체험은 아동·청소년들의 자연 학습, 과학 교과목 학습 등에 활용되는 등 교육적, 문화적 가치도 지니게 된다.

둘째, 인공어초는 기선 저인망 등 불법 조업을 예방함으로써, 각국의 수산 자원 방지·보호 역할도 추가적으로 담당할 수 있다. 국내에서 추진 중인 대게 산란·서식장 조성 사업, 일본의 대게 서식초 육성 사업의 경우 인공어초를 기선 저인망 조업 구역에 인위적으로 배치함으로써, 보호구역임을 공식화하고 있는데, 이는 실제로 치게나 암컷 대게 등을 불법 조업으로부터 보호하는 효과를 창출하고 있다(구수지, 2022). 또한, 서해 북방 한계선(NLL)을 침범하여 불법으로 조업하는 중국 저인망 어선을 막기 위해 인공어초에 어구 걸림 장치를 부착하여 시설하는 방법도 유의한 효과를 거두고 있다(강태중, 2023).



[그림 19] Oil rig를 활용한 레크레이션 스쿠버 다이빙

(출처 :

<https://www.abc.net.au/news/2021-07-23/woodside-plans-to-dump-part-of-oil-facility-near-ningaloo-reef/100314478>)

이처럼 인공어초는 국내 수산 자원을 남획과 내외국인의 불법 조업으로부터 보호함으로써, 수산·해양 환경 보호는 물론, 수산·해양 주권을 보장하는 데에도 기여할 수 있다. 환경적 효과와 경제적 효과에 비해서는 부차적이지만, 사회적 효과 역시 상당히 중요하고도 긍정적임을 알 수 있다. 이처럼 다방면에서 인공어초 증설과 활성화의 효과를 극대화하기 위해서는 지속 가능한 플랜과 미래 지향적 비전 하에 기술적, 운영적 발전에 사회적, 정책적 노력을 집중해야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 방안 및 그에 따른 인공어초의 증설·활성화로 인해 촉진되는 환경적, 경제적, 사회적 효과 등을 다각도로 고찰하기 위한 목적의 선행적, 정성적(Qualitative) 문헌 고찰 연구로 수행되었다. 20세기 중반부터 글로벌 환경 문제 중 하나로 부각된 해양 플랫폼의 폐기와 해체에 투입되는 기술적, 사회적 비용을 절감하면서 ‘자원의 순환적 활용’을 달성하기 위해 노후화된 해양 플랫폼의 재활용 방안이 다양하게 논의되었다. 그 간에 주로 논의된 재활용 방안은 해양 관광 자원으로서의 재활용, 외해 양식장으로의 재개발, 연안 양식용 구조물인 인공어초로의 재활용 등이었는데, 이 중에서도 다방면으로 높은 효용성, 실효성이 예측된 동시에, 지속 가능한 방안으로 주목된 것이 인공어초로의 재활용이었다.

이에 본 연구는 국내에서도 가파르게 성장하는 해상풍력 발전설비 가운데 고정식 모노파일(monopile) 및 자켓(jacket) 타입의 하부구조물이 향후 노후화 되어 해체시기가 도래되면, 이들 하부구조물들의 인공어초로의 재활용으로 인한 인공어초 증설과 활성화를 전제로, 인공어초 재활용의 환경적, 경제적, 사회적 효과를 문헌 고찰을 통해 분석함으로써, 노후된 해양 자원 또는 해양 산업 폐기물의 ‘지속 가능한 순환적 활용’에 도움이 되는 실무적, 산업적 시사점을 도출하였다. 주요 고찰 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

첫째, 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용은 수중·해양 환경 보호, 인공어초 시설 지역을 중심으로 수중 생물의 종 다양성과 위집도 증가, 평균 생체량 증가, 시설 해역의 생태계 복원과 개선, 인공어초에 위집된 수초·해조류의 블루 카본 기능으로 인한 탄소 저감 효과 등 다양하고도 중요한 환경적 효과를 창출한다는 사실을 파악하였다. 이를 통해, 인공어초로의 재활용은 ‘자원의 순환적 활용’, ‘지속 가능한 양식업’, ‘자연 기반 해법’의 탄소 절감 솔루션 등에 두루 기여하는 사실을 확인하였다. 이런 고찰 결과를 토대로,

노후화된 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용 프로세스의 친환경적 기법 개발과 상용화, 시설된 인공어초의 지속 가능한 활용과 관리를 위한 자연 기반 해법 강화(블루 카본 등 미래 지향적 기능의 집중 육성), 첨단 스마트·인공지능 양식 기술 접목 등 창의적, 진보적 솔루션을 지속적으로 개발하고 축적해야 할 것이다. 특히, 본 연구는 노후화된 고정식 해상 풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼을 재활용한 인공어초 기지에 탁월한 블루 카본 기능이 최근에 입증되어 관심이 집중되고 있는 잘피숲을 중점 육성함으로써, 해양생태계 복원은 물론, 탄소 저감·흡수에서도 큰 효과를 거둘 것을 제안한다.

둘째, 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼의 인공어초로의 재활용은 시설 해역의 어획량 증가, 연안 해역의 어업 생산성과 수산 자원 증가 등 바람직한 경제적 효과를 창출하는 것으로 파악되었다. 이런 효과에 주목하면서, 1980년대 이래로 꾸준히 감소·쇠퇴하고 있는 국내 어업의 경쟁력과 불안정성을 해소·완화할 수 있는 미래적 대안 중 하나로 인공어초의 활용도를 높이는 방안을 지속적으로 강구하고 모색해야 할 것이다.

셋째, 인공어초로의 재활용은 해양 리조트, 다이빙 플랫폼, 수중 생물 체험 플랫폼 등 해상 관광 자원 활성화에 기여하는 동시에, 불법 조업 예방을 통한 해양 주권 보호에도 기여하는 등 의미 있는 사회적 효과까지 함께 창출하는 것으로 분석되었다. 이에 주목하면서, 인공어초를 매개로 국내 해양 문화와 해양 자원의 사회적, 교육적 활용도를 높일 수 있는 방안과 참신한 아이디어를 지속적으로 발굴할 필요가 있을 것이다.

본 연구는 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 및 해양 플랫폼의 해체 후 인공어초로의 재활용 및 재구성 방안의 환경적, 경제적, 사회적 효과를 종합적으로 파악하기 위한 문헌 고찰 연구이다. 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물의 해체 시기는 아직 국내에 본격적으로 도래하지 않아 정확한 데이터를 확보 하는데 어려움이 있으나, 국제적인 환경문제와 규제로 그 중요성이 보다 크게 대두되고 정책적으로도 활발히 고려중에 있다. 현재 운영중인 우리나라 제주 탐라 해상 풍력 발전단지, 전남

영광 해상풍력 발전단지 및 서남해 해상 풍력 발전단지는 앞으로 이르면 향후 15년 내 해체시기에 접어든다. 앞서 인니 해양플랫폼 해체 경험을 보유한 우리나라는 고정식 해상풍력 하부구조물의 해체는 전통적인 해양 플랫폼 해체에 비해 수심이 낮은 곳에 설치되어 있고, 사이즈도 작아 해체 공법이나 동원되는 관련 장비가 비교적 간단하여 이에 따른 기술적 장애없이 수월하게 진행할 수 있을 것이다. 또한, 기후변화에 따른 지구 온난화는 해수면 온도 상승을 야기시키며, 생물다양성 손실의 가장 큰 원인이 되고 있다. 이에, 해상풍력 발전설비 확장의 궁극적인 또 다른 목표는 이러한 상호 연관된 해양 생태계의 위기를 해결하고 공존하는 데 그 핵심을 둘 수 있다.

이에, 앞으로 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물의 독자적인 해체 기술과 가이드라인을 정립하고, 이와 연계한 인공어초로의 재활용의 사업적 타당성, 실효성 등을 실험 설계나 사례 조사 및 분석 등의 차별화된 연구를 통해 추가 실증하는 작업이 수행되어 더욱 확실하게 증명할 필요가 있을 것이다. 그를 통해, 노후화된 고정식 해상풍력 하부구조물 등의 해양 플랫폼 구조물 해체 후 인공어초로의 재활용 및 재구성의 노하우와 관련 시스템을 체계화·고도화함으로써, 재활용 모델의 지속 가능성과 실효성, 자원 순환성 등에서 우리나라 미래의 경제적·환경적 기본 비교모델로 삼을 수 있을 뿐 아니라 관련 정책 수립 및 사업 추진에 중요한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 강태중(2023). 부이형 어군 탐지기를 이용한 수산자원 모니터링 기술에 관한 연구. 석사학위논문. 전남대학교.
- 강희석·이선민·김호석(2021). 지속 가능한 해양도서 관광자원의 개발정책에 관한 고찰. 觀光研究, 36(5), 173-187.
- 고용노동부(2020). 증장기 인력수급전망 2018-2028 미래 일자리 세계의 변화. 서울 : 고용노동부.
- 곽민영(2018). 노후화된 해양 설비의 해체 및 재활용 방안에 관한 연구. 석사학위논문. 한국해양대학교.
- 구수지(2022). 울릉 현포 해역 인공어초의 서식생물상 변동과 자원 조성 효과. 석사학위논문. 부경대학교.
- 국립수산과학원·김석태·배봉성·양용수·차봉진·구명성·박수봉·박미선·국립수산과학원 수산공학과(2022). 스마트양식 기술 및 모델 개발. 부산 : 국립수산과학원.
- 권민상(2021). 지구온난화가 서해안 해안사구의 식생구조 및 대표식물의 형태와 생장에 미치는 영향. 박사학위논문. 가톨릭대학교.
- 권영한·김지영·이민주(2008). 환경성을 고려한 태양광, 풍력발전소 입지 선정 가이드라인. 수시연구보고서, 2008, 1-167.
- 권오병(2007). 인공식물섬 조성에 의한 수생태계 개선효과에 관한 연구. 박사학위논문. 강원대학교.
- 권인하·이종민·송현서·박신영·김태우·김종성(2023). COVID19 팬데믹에 따른 이산화탄소 배출 및 블루카본 흡수량 영향. 한국해양환경·에너지학회지, 26(1), 89-101.
- 글로벌 오토뉴스(2023). 현대자동차, 해양수산부-한국수산자원공단과 해조류 블루카본 개발 협력을 위한 업무협약 체결, 2023.05.10.
- 김미주(2021). 해양보호구역 환경수용력과 출입관리 정책의 효과성 평가. 박사학위논문. 서울대학교.
- 김민석(2008). 석탑형 다기능 인공어초에 서식하는 어류의 계절별 종조성 및 군집구조. 석사학위논문. 전남대학교.

- 김범규·황도현·윤홍주·서원찬(2015). GIS을 활용한 인공어초의 적지 선정에 관한 연구. 한국전자통신학회 논문지, 10(5), 629-636.
- 김봉태(2023). 연안어업의 기후변화 피해비용 분석 - SSP 시나리오를 적용하여. 해양정책연구, 38(1), 131-152.
- 김봉태·이준수·서영상(2016). RCP 시나리오에 따른 남해안 어업 및 어종의 기후변화 노출 분석:수온 변동을 대상으로. 수산경영론집, 47(4), 31-44.
- 김순미(2022). 수산물 산지거점유통센터(FPC)를 통한 물류효율화가 산지 위판에 미치는 효과에 관한 연구. 박사학위논문. 전남대학교.
- 김용관(2019). 해조류 포자방출과 실해역 흐름을 고려한 해중립초 최적 배치. 박사학위논문. 전남대학교.
- 김정배·조현제·김학운(2007). 토양 pH가 만수국(*Tagetes patula* L.)의 생육 및 항산화 작용에 미치는 영향. 한국자원식물학회지, 20(4), 348-352.
- 김종규(2022). 우리나라에서 기후 변화에 따른 어업 생산량의 변동. 한국 재난정보학회 논문집, 18(1), 194-201.
- 김준호(2012). 지구온난화. 서울 : 서울대학교출판문화원.
- 김평래·박찬열(2021). 서울 청량리 교통섬과 홍릉숲의 미세먼지 특성과 저감효과 평가. 한국환경생태학회지, 35(5), 569-575.
- 김현아(2016). 한국 서해 어업의 잠재생산량 추정 연구. 석사학위논문. 부경대학교.
- 김희선(2002). 수산업생산의 변화에 따른 한국인의 어패류 이용양상의 변천. 박사학위논문. 이화여자대학교.
- 노준성(2015). 인공어초와 환경요인이 제주도 연안해역 어류군집에 끼치는 영향. 석사학위논문. 서울대학교.
- 농림축산식품부(2022). 보도자료.
<https://www.mafra.go.kr/home/subview>.
- 명수정·오일찬(2021). 환경위기 대응을 위한 자연기반해법(NbS) 연구. 수시연구보고서, 2021, 1-136.
- 명재규·윤덕찬·김종대(2021). ESG 경영: 규범적 도입과 전략적 실행. 용

인 : 아딘크라.

- 박광서(2012). 국내 해양플랫폼 서비스산업 활성화 방안. 해양수산, 2(2), 70-102.
- 박년배·홍성준·박상용(2014). 2050년 탄소 사회로의 전환을 위한 경제성장, 산업구조, 효율개선, 전력 탈탄소화와 연료 대체의 효과. 에너지공학, 23(4), 61-72.
- 박성욱·이주아(2022). 우리나라 해양보호구역 관리현황과 효율적 관리방안. 해양정책연구, 37(2), 151-180.
- 박성일(2021). UAV 영상을 활용한 블루카본 추적기법 개발 : : 한국의 남해안 연안습지를 사례로. 박사학위논문. 경북대학교.
- 박영진(2020). 기후변화가 양식어류에 미치는 경제적 영향분석. 박사학위논문. 건국대학교.
- 박종수·서만석·김지현(2000). 전라북도연안 인공어초의 효과에 대한 연구. 水産海洋教育研究, 21, 11-21.
- 박종수·서만석·김지현(2004). 인공어초의 어장환경과 어군 위집에 관한 연구. 군산대학교 수산과학연구소 연구논문집, 4, 261-269.
- 박준수(2018). 그린카본을 이용한 하이브리드 슬러지 연료 제조 및 연료 특성에 관한 연구. 석사학위논문. 아주대학교.
- 박찬열(2020). 도시숲 미세먼지 저감 효과와 증진방안. 한국정책학회 추계학술발표논문집, 2020, 13-31.
- 박태영·윤건용(2021). ESG의 구조 : 착한 ESG 그리고 위험한 ES+G. 고양 : 문우사.
- 박헌열(2011). 지구온난화, 그 영향과 예방. 서울 : 우용.
- 변국영(2022). 국내 갯벌 연간 최대 49만톤 이산화탄소 흡수한다. 에너지데일리, 2022.07.26.
- 서민아(2022). 습지보전계획에 따른 블루카본 흡수 잠재량 분석. 석사학위논문. 한양대학교.
- 손병규(2008). 해중립 조성을 위한 어초의 수리학적 특성. 한국수산학회지, 41(3), 215-220.
- 손재익·이창근(2008). 지구온난화 저감기술. 서울 : 아진.

- 안성민(2017). 한국 서해안 갯벌의 저서 규조류 다양성을 밝히기 위한 DNA barcoding 및 차세대 염기 서열 분석. 박사학위논문. 대구 대학교.
- 안영화·김준택(2000). 제주도 연안 인공어초 시설어장의 자원조성과 생산 효과에 관한 연구. 해양과환경연구소 연구논문집, 24, 27-35.
- 안요한·김민수(2012). 동남아시아 해양플랫폼 해체시장 진출전략. 한국항해항만학회 학술대회논문집, 2012, 408-410.
- 양무석(2020). 해양플랫폼 자켓 해체용 수중 다이아몬드 와이어 절단 장치의 개발에 관한 연구. 박사학위논문. 한국해양대학교.
- 양무석·김성익·조종래·조효제(2019). 해양플랫폼 강 구조물 철거를 위한 수중 절단장치 개발. 한국마린엔지니어링학회지, 43(7), 522-527.
- 오진석·박동국·조성환·곽준호·조관준·강철원·정혜미·김비아·정성영·오유미(2008). 외해 수중 가두리 양식장용 자동 감시 및 관리 시스템 개발. 서울 : 농림수산식품부.
- 윤대호(2018). 보강재가 적용된 인공어초 지반의 지지력, 침하 및 세굴 특성 연구. 박사학위논문. 부경대학교.
- 윤병선(2016). 동해연안 바다목장 조성 해역에서 수산생물의 생태학적 변동특성. 박사학위논문. 부산대학교.
- 윤재현(2018). 한국석유공사, 부유식 해상풍력발전을 위한 본격적 행보 시작. 전기신문, 2018.10.21.
- 윤호성·도정미·전병희·여희태·장형석·양희욱·서호성·홍지원(2022). 동해안 블루카본 자원의 가치와 활용방안. 생명과학회지, 32(7), 578-587.
- 이병재·김봉균·김윤용(2022). 인공어초 3D 프린터 출력을 위한 저알칼리 모르타르의 강도와 내구성능. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 26(1), 67-72.
- 이정삼·남종오(2020). 한국 바다목장사업의 성과와 교훈. 韓國島嶼研究, 32(2), 179-199.
- 이지현(2009). 인공어초에 서식하는 해양생물의 군집구조 분석. 박사학위논문. 순천향대학교.
- 이창석·이안나(2004). 생태학적 원리를 적용하여 창조된 환경림에서 확인

- 된 복원 효과. 환경생물 : 환경생물학회지, 22(1), 220-226.
- 임후순(2005). 한국 동해안에 시설된 콘크리트 사각 인공어초의 어류 위
집 효과. 박사학위논문. 여수대학교 .
- 전영환(2005). 대형 인공어초가 연안 생태계에 미치는 영향에 관한 연구.
석사학위논문. 관동대학교.
- 정환도(2018). 온실가스 저감을 위한 도시 녹색 숲의 기여도 연구. 한국
정원디자인학회지, 4(1), 33-40.
- 정훈·허태욱·이일우(2021). 국내 스마트양식 기술 동향. 전자통신동향분
석, 36(5), 62-73.
- 조남준(2023). 해양생태계 탄소흡수원 ‘블루카본’확대법 제정 한 목소리.
에너지데일리, 2023.04.18.
- 조세라(2020). 산업화 이전 대비 2°C와 3°C 지구온난화 수준에서의 동아
시아 및 한국의 기후변화 : 기후대 및 극한강수의 변화. 박사학
위논문. 부산대학교.
- 주병석(2016). 인공어초 부착용 미생물을 이용한 해조류 증식에 관한 연
구. 석사학위논문. 상지대학교.
- 주진희·윤용한(2011). 도시 숲의 이용현황과 열섬현상 저감효과에 대한
인지도 분석. 도시설계 : 한국도시설계학회지, 12(4), 39-50.
- 차지은(2022). 해양플랫폼 해체 규제에 대한 국제법적 검토 OSPAR 협
약 체제를 중심으로. 법학논총, 46(3), 75-114.
- 최명섭·박찬열(2005). 도시숲의 생태적 관리 방안. 수목보호, 10, 34-40.
- 최영출·송양훈·정애숙·공기서·장지현·Nemoto·Masatsugu(2022). SDGs와
분야별 국제개발협력 전략. 서울 : 윤성사.
- 최종두(2013). 태안시범바다목장해역내 인공어초사업의 경제적 효과에
대한 연구. 수산경영론집, 44(3), 103-109.
- 한국 산림청·김영환·이경학·손영모·김래현·배재수·송민경·전어진·김경남·
표정기·김소원·엄기중·이충국·김상수·전영신·이상신·한상국·정유
경·김진성·박민성·양성규·국립산림과학원·한국기후변화대응연구
센터·이와이드플러스(2014). 탄소흡수원 유지 및 증진을 위한 산
림탄소 관리방안 연구. 대전 : 산림청.

- 한국수산자원공단(2022). 한국수산자원공단, 바다숲 조성사업을 통한 잘
피숲 복원 및 해양생태계 회복 확인. 부산 : 한국수산자원공단.
- 한국해양과학기술원(2018). 동해 가스전 해양과학조사 및 해양장비 테스
트베드 활용 기획연구. 부산 : 한국해양과학기술원.
- 한국해양수산개발원(2011). 해양산업동향. 부산 : 한국해양수산개발원.
- 한국해양수산개발원(2019). 해양수산 산업동향. 부산 : 한국해양수산개발
원
- 한인성·고우진·김하원·윤선영·박경동(2018a). 기후변화에 따른 남해안과
제주연안 어업인들의 체감실태와 인식에 관한 연구. 水産海洋教育研究, 30(6), 1968-1977.
- 한인성·서영상·윤선영·이수은·김하원·박경동(2018b). 기후변화에 따른 동
해안 어촌어업의 실태 및 인식에 관한 연구. 水産海洋教育研究, 30(2), 598-607.
- 해양수산부(2019). 한국해양환경평가 II : 수산자원조성. 부산 : 해양수산부.
- 해양수산부(2020). 2019 바다숲 조성관리 사업 최종보고서. 부산 : 해양
수산부.
- 해양수산부(2021). 제3차 수산자원관리기본계획. 부산 : 해양수산부.
- 해양수산부(2022). 인공어초 시설통계(1971~2021). 부산 : 해양수산부.
- 해양수산부(2023). 보도자료
<https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=49547&searchDeptName=&menuSeq=971&searchEndDate=&searchetc1=&searchetc2=&searchetc3=&searchetc4=&searchetc5=¤tPageNo=1&searchSelect=title&searchStartDate=&recordCountPerPage=&bbsSeq=10&searchValue=%ED%95%B4%EC%B2%B4>
- 황성일·김대권·성봉준·전수경·배종일(2017). 제주도 북촌해역에 시설된
하우스형 인공어초의 자원조성 효과. 水産海洋教育研究, 29(6),
1903-1912.
- 황재동(2019). 터빈 특성을 고려한 한국 연안 해상풍력 발전량 평가. 박
사학위논문. 원광대학교.
- Issue Focus(2022). 윤석열 정부 국정과제/정책-해양영토 수호 및 지속

가능한 해양 관리 2022-05-11.

- sbn 뉴스(2023). 서산시, 가로림만 갯벌식생 복원사업 ‘시동’. 2023. 08.14.
- Adedipe, T., Shafiee, M.(2021). An economic assessment framework for decommissioning of offshore wind farms using a cost breakdown structure. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 344 - 370.
- Alongi, D.(2022). Impacts of Climate Change on Blue Carbon Stocks and Fluxes in Mangrove Forests. <https://www.mdpi.com>.
- Amelia, S., Latief, Y., Zawawi, N., Santos, A. J.(2018). *Policy and Institution of Offshore Platform Decommissioning in Indonesia Oil and Gas Upstream Industry to Improve the Performance of Navigational Safety and State-Owned Asset Management*. SPE Symposium on Decommissioning and Abandonment 2018 - Kuala Lumpur, Malaysia.
- Basile, V., Vona, R.,(2021). Sustainable and Circular Business Model for Oil & Gas Offshore Platform Decommissioning. *International journal of business management*, 16(10), 1-20.
- Bell, F. W., Bonn, M. A., & Leeworthy, V. R.(1998). *Economic Impact and Importance of Artificial Reefs in Northwest Florida*. Office of Fisheries Management and Assistance Service, Florida Department of Environmental Administration, Tallahassee.
- Bressler, A., & Bernstein, B. B.(2015). A Costing Model For Offshore Decommissioning in California. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(4), 554 - 563.
- Buckley, R. M., Hueckel, G. J.(1985). Biological processes and ecological development on an artificial reef in Puget Sound, Washington. *Bulletin of Marine Science*, 37, 50-69.
- Chambers, M. D. (1998). Potential offshore cage culture utilizing oil and gas platforms in the Gulf of Mexico. In: C. E. Helsley

- (Ed.), Proceedings of an International Conference on Open Ocean Aquaculture '97, Charting the Future of Ocean Farming (pp. 77 - 87). April 23 - 25, 1997. Maui, HI: University of Hawaii Sea Grant College Program #CP-98-08.
- Chandler, J., White, D., Techera, E. J., Gourvenec, S., & Draper, S.(2017). Engineering and Legal Considerations For Decommissioning Of Offshore Oil and Gas Infrastructure in Australia. *Ocean Engineering*, 131, 338-347.
- Charbonnel, E., Serre, C., Ruitton, S., Harmelin, J. G., Jensen, A.(2002). Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units(French Mediterranean coast). *ICES Journal of Marine Science*, 59, 208 - 213.
- Chevron Thailand Exploration and Production, Ltd., (2023)
<https://thailand.chevron.com/en/news/latest-news/2023/2023-rigs-to-reefs>
- Douglas-Westwood(2015). World Offshore Maintenance: Modifications and Operations Market Forecast 2015-2019.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., van Ham, C., Weisser, W. W., & Le Roux, X.(2015). Naturebased solutions : New influence for environmental management and research in Europe. *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243-248.
- FAO(2016). The State of World Fisheries and Aquaculture 2016.
- Ferrandis, J., Rodríguez, R., Chryssostomidis, C., Bonfiglio, L.,(2020). Influence of Viscosity and Non-Linearities in Predicting Motions of a Wind Energy Offshore Platform in Regular Waves. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 142(6), 1-12.

- Friederichs, C., Dibello, F., Tignanelli, A., & Garzia.(2015). Reliable and Innovative Approach for Decommissioning Study of Oil & Gas Plants. in *the Proceedings of Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, 25-27, Ravenna, Italy.
- Genuine, S. E., Olaide, A. W.(2019). Comparative Economic Analysis of Offshore Platform Decommissioning Methods. *Engineering and Applied Sciences*, 4(1). 11-15.
- Glarou, M., Zrust, M., Svendsen, J.(2020). Using Artificial-Reef Knowledge to Enhance the Ecological Function of Offshore Wind Turbine Foundations: Implications for Fish Abundance and Diversity. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5), 1-25.
- Hall, R., Topham, E., & João, E.(2022). Environmental Impact Assessment for the decommissioning of offshore wind farms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165. 1-34.
- Higgins, E., Metaxas, A., Scheibling, R.,(2022). A systematic review of artificial reefs as platforms for coral reef research and conservation. *PLOS ONE*, 17(1), 1-23.
- Hou, X. X., Huo, H. B., Zhang, X. C., Xie, T., He, R. B., Lin, H. Xu, D. S., Zhang, Li, Y. C., Song, Z. H., Liu, J.(2023). Minimizing Environmental Impacts During Offshore Drilling and Production Using Innovative Waste Recycling and Reutilization Technology in China Bohai Oilfield. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA.
- IPCC(2022). *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press.
- Jensen, A.(2002). Artificial reefs of Europe : perspective and future. *ICES Journal of Marine Science*, 59, 3-13.
- Jensen, P. D., Purnell, P., Velenturf, A. P. M.(2020). Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning: The case of offshore wind. *Sustainable*

- Production and Consumption*, 24, 266 - 280.
- Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Hansen, R.(2022). Principles for urban nature-based solutions. *Ambio*, 51, 1388-1401.
- Kaiser, J. B. (2003). Offshore aquaculture in Texas: Past, present, and future. In C. J. Bridger & B. A. Costa-Pierce (Eds.), *Open ocean aquaculture: From research to commercial reality* (pp. 269 - 272). Baton Rouge, LA: The World Aquaculture Society.
- Kaiser, M. J., Liu, M.(2014). Decommissioning cost estimation in the deepwater U.S. Gulf of Mexico : Fixed platforms and compliant towers. *Marine Structures*, 37, 1-32.
- Kakimoto, H., Okubo, H.(1985). Fishery production from artificial reefs. In *Comprehensive Research on Artificial Reefs in the Coastal Areas of Niigata Prefecture. Niigata Prefect. Fish. Exper. St.* 193-200.
- Khairullina, T. P., Kalita, T. L., Naumov, N. M., Vaganova, A.,(2022). Model of an Artificial Reef for Increasing the Bioproductivity of Donuzlav Lake. *European Proceedings of Life Sciences*. In Beketov, S. V., Nikitin, I. A., (eds.), *Biotechnology, Ecology, Nature Management*, Russian : Moscow.
- Kiss, B., Sekulova, F., Hörschelmann, K., Salk, C. F., Takahashi, W., Wamsler, C.(2022). Citizen participation in the governance of nature-based solutions. *Environmental Policy and Governance*, 32(3), 247-272.
- Kruse, S., Bernstein, B., Scholz, A.,(2015). Considerations in evaluating potential socioeconomic impacts of offshore platform decommissioning in California. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 11(4), 572-583.
- Layman, C., Allgeier, J. E.(2020). An ecosystem ecology perspective on artificial reef production. *Journal of Applied Ecology*, 57(11), 2139-2148.

- Les Dauterive(2000). *platforms-to-Reefs Policy, Progress, and Perspective*. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service Gulf of Mexico OCS Region.
- Love, M., Nishimoto, M., Clark, S., Kui, L., Aziz, A., Palandro, D.(2020). A comparison of two remotely operated vehicle (ROV) survey methods used to estimate fish assemblages and densities around a California oil platform. *PLoS ONE*, 15(11), 1-7.
- Lyons, Y.(2013). Abandoned Offshore Installations in Southeast Asia and the Opportunity for platforms-to-Reefs. (<https://cil.nus.edu.sg/wp-content/uploads/2010/08/YounaLyons-Disused-Offshore-Installations-DecomWorld.pdf>)
- Macreadie, P. I., Fowler, A. M., Booth, D. J.(2011). platformsreefs: will the deep sea benefit from artificial habitat?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9, 455 - 461.
- Mcginnis, M.(2005). *The Political Ecology of the Offshore Oil Platform Rig-to-Reef Policy Debate*. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service Pacific OCS Region.
- Mcleod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H., Silliman, B. R.(2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552 - 560.
- Meyer-Gutbrod, E. L., Kui, L., Nishimoto, M. M., Love, M. S., Schroeder, D. M., Miller, R. J.(2019). Fish densities associated with structural elements of oil and gas platforms in southern California. *Bulletin of Marine Science*, 95(4), 639 - 656.
- Moraes, F. F., Ferreira-Filho, V. J. M., Infante, C. E. D. C., Santos,

- L.(2020). A Markov Chain Approach to Multicriteria Decision Analysis with an Application to Offshore Decommissioning. *Sustainability*, 14, 1-15.
- Musa, G.,(2002). Sipadan: A SCUBA-diving paradise: An analysis of tourism impact, diver satisfaction and tourism management. *International Journal of Tourism Space, Place and Environment*, 4(2), 195-209.
- Norwegian Petroleum Directorate, 2023. (www.npd.no/en)
- Oil & Gas UK(2017). Decommissioning Insight 2017.
- Parente, V., Ferreira, D., dos Santos, E. M., & Luczynski, E.(2006). Offshore Decommissioning Issues : Deductibility and Transferability. *Energy Policy, Elsevier*, 34(15), 1992-2001.
- Offshorewind.biz (2022)
(<https://www.offshorewind.biz/2022/05/04/orsted-trials-turning-jackets-into-coral-reefs-video/>)
- PIF (Public Investment Fund)(2021)
(<https://www.pif.gov.sa/en/Pages/NewsDetails.aspx?NewsId=203/PIF-announces-THE-RIG.-project-the-worlds-first-tourism-destination-on-offshore-platforms>)
- Polovina, J. J.(1989). Artificial Reefs: nothing more than benthic fish aggregations. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations*, 30, 37-39.
- Qasim, R. M., Hasan, A.,(2020). Investigating the Behavior of Offshore Platform to Ship Impact. *Civil Engineering Journal*, 6(3), 495-511.
- Ropicki, A., Adams, C., Lindberg, B., & Stevely, J.(2006). *The Economic Benefits Associated with Florida's Artificial Reefs*. UF IFAS Extension University of Florida(<https://edis.ifas.ufl.edu>).
- Roy Johnsen(2007) Corrosion Behaviour and Protection of Copper and

- Aluminium Alloys in Seawater. U.K : Woodhead Publishing
RystadEnergy(2019)
(<https://www.hellenicshippingnews.com/global-decommissioning-set-to-hit-record-36-billion-over-the-next-3-years/>)
- Salcido, R. E.(2005). Enduring Optimism: Examining the Rig-to-Reef Bargain. *Ecology Law Quarterly*, 32(4), 863-937.
- Seaman Jr., W.(2002). Unifying trends and opportunities in global artificial reef research, including evaluation. *ICES Journal of Marine Science*, 59(suppl), S14-S16.
- Seaman, W.(2004). Artificial reef monitoring in Florida coastal counties. *Florida Sea Grant College Program*, 1-16.
- Swett, R. A., Adams, C., Larkin, S., Hodges, A. W., & Stevens, T. J.(2011). *Economic Impacts of Artificial Reefs for Six Southwest Florida Counties*. TP-178. Florida Sea Grant. College Program, UF/IFAS Extension, Gainesville.
- Techera, E. J., Chandler, J.(2015). Offshore Installations, Decommissioning and Artificial Reefs: Do Current Legal Frameworks Best Serve The Marine Environment?. *Marine Policy*, 59, 53-60.
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., et. al.(2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et. al., Eds., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Langdon, 235-336.
- Tsiamis, K., Salomidi, M., Küpper, F.(2020). Macroalgal vegetation on a north European artificial reef(Loch Linnhe, Scotland): biodiversity, community types and role of abiotic factors. *Journal of Applied Phycology*, 32, 1353 - 1363.

- Visiongain(2013). The Offshore Oil and Gas Decommissioning Market 2013-2023.
- Vivier, B. Dauvin, J. Navon, M., Rusig, A., Mussio, I., Orvain, F., Boutouil, M., Claquin, P.(2021). Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness. *Global Ecology and Conservation*, 27(e01538), 1-22.

Abstract

A study on ways to recycle aged bottom-fixed offshore wind substructures into artificial reefs and the effects

Euikyoung Choi

Graduate School of Industrial Technology
University of Ulsan
Korea

This study was conducted to comprehensively consider recycling of aged bottom-fixed offshore wind substructures into artificial reefs and the effects promoted by the expansion and revitalization of artificial reefs. In order to achieve 'circular use of resources' while reducing the technical and social costs of disposing and decommissioning bottom-fixed offshore wind substructures and offshore platforms, which have emerged as one of the global environmental problems since the mid-20th century, various ways to recycle decommissioned-aged offshore platform have been discussed. The recycling methods that have been mainly discussed are recycling into marine tourism resources, redevelopment into open-sea fish farms, and recycling into artificial reefs, which are coastal aquaculture structures. Among these, artificial reefs have been attracted high attention, because they have high utility and effectiveness in many ways, and simultaneously using them was a sustainable recycling methods.

Accordingly, this study analyzed the environmental, economic, and social effects of recycling of decommissioned-aged bottom-fixed offshore wind substructures and offshore platforms into artificial reefs through a literature review, thereby establishing a 'sustainable cycle' of aged marine platform structures or marine industrial wastes, and its practical, industrial implications. The results of this study are summarized as follows.

First, it was confirmed that the recycling of decommissioned-aged offshore platforms including bottom-fixed offshore wind substructures into artificial reefs creates many important environmental effects, such as protecting the marine environment, increasing the species diversity and concentration of aquatic organisms, increasing the average biomass, restoring and improving the ecosystem in the artificial reefs areas, and promoting the blue carbon function of aquatic plants and algae in the artificial reefs.

Through these, it was confirmed that recycling of decommissioned-aged offshore platforms into artificial reefs contributes to 'circular use of resources', 'sustainable aquaculture', 'sustainable marine life conservation' and carbon reduction solutions of 'nature-based solutions'. Based on these considerations, it will need to develop and accumulate creative and progressive solutions, such as the development and commercialization of eco-friendly techniques for the recycling process of aged offshore platforms including bottom-fixed offshore wind substructures into artificial reefs, strengthening of nature-based solutions for sustainable use and management of installed artificial reefs(intensive cultivation of future-oriented functions such as blue carbon), and application advanced smart and A.I. farming technology.

Second, recycling of decommissioned-aged bottom-fixed offshore wind substructures and offshore platforms into artificial reefs was found to create desirable economic effects, such as increasing fishing productivity and fishery resources in coastal waters. Paying attention to these effects, it should be to seek ways to increase the utilization of artificial reefs as one of the future alternatives that can resolve and alleviate the competitiveness and instability of the domestic fishing industry, which has been steadily decreasing and declining since the 1980s.

Finally, it was analyzed that recycling into artificial reefs creates meaningful social effects, such as revitalization of marine tourism resources. that is marine resorts, diving platforms, and underwater life experience platforms, and protecting marine sovereignty by preventing illegal fishing. Paying attention to these, it should be to continuously discover ways and novel ideas to increase the social and educational use of domestic marine culture and marine resources through artificial reefs.

Keywords : fixed-bottom offshore wind substructure, offshore platform, artificial reefs, decommissioning, recycling, carbon emissions reduction, sustainable marine life conservation, nature-based solutions