

울산 부유식 해상풍력단지 조성에 따른 환경피해의 경제적 가치추정

- 서식지 등가성 분석법을 중심으로 -

최수영* · 문범식** · † 김태균

*한국해양대학교 대학원생, **한국해양대학교 연구원, † 한국해양대학교 해사대학 해사융합학부 교수

The Maritime Environment Impact Assessment of Offshore Floating Wind Power in Ulsan

- A Focus on Habitat Equivalence Analysis -

Su-Young Choi* · Beom-Sik Moon** · † Tae-Goun Kim

*Student, Graduate School of Korea Maritime and Ocean University, Busan 46984, Korea

**Researcher, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

† Professor, Division of Maritime Transportation Science, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 본 연구의 목적은 울산 부유식 해상풍력발전단지를 대상으로 서식지 등가성 분석법(Habitat Equivalency Analysis : HEA)을 적용한 가치평가를 통해 해당 해양공간 특성평가를 위한 객관적인 평가기준 제시에 있다. 울산 부유식 해상풍력발전단지 설립으로 인해 사용이 금지된 해역(5,017.6ha)에서는 상업적 피해, 생태계 파괴 등 여러 피해가 발생한다. 피해의 경제적 가치 규모 산정을 위한 대체 복원사업을 인공어초사업으로 선정하고 이를 HEA로 추정하였다. 추정 결과, 사회적 할인율 4.5%, 4년째부터 성숙도 100%를 기본 가정으로 한 경우 피해액은 약 457억원으로 나타났다. 본 연구에 사용된 HEA는 객관적이고 명확한 DATA를 기본으로 가치를 산정하기 때문에 해양공간 특성평가 시 발생할 수 있는 불합리성을 해결할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구의 결과는 향후, 해양공간계획의 시행에서 발생 가능한 이해관계자들 간의 갈등 해소에 도움이 될 것이다.

핵심용어 : 해양공간계획, 해상풍력발전, 경제적 피해, 환경영향평가, 서식지등가성분석법

Abstract : The main purpose of this study is to provide an objective evaluation standard for the assessment of marine spatial characteristics via Ulsan floating offshore wind power project using HEA. Various levels of damage occur in the waters (5,017.6) near the floating offshore wind power terminals in Ulsan, including commercial damage, ecological destruction and reduction in quality of life due to seascape damage. Alternative restoration projects for calculating the economic value of damage were selected including artificial reef projects and estimates based on HEA. For basic households with a 4.5% social discount rate and a 100% maturity index over four years, the damage was approximately 457 hundred million won. The HEA in this study resolves the possible irrationality in the evaluation of marine spatial characteristics, since the value is calculated based on objective and clear DATA. Therefore, the study results are intended to facilitate conflict resolution between stakeholders in the future during the implementation of the marine spatial plan.

Key words : marine spatial planning, offshore wind power, economic damage, environment impact assessment, habitat equivalency analysis

1. 서 론

우리나라는 효율적인 해양공간관리를 위해 해양공간계획 및 관리에 관한 법률을 제정하여 2019년부터 시행하고 있다(MOMAF, 2018). 해양공간계획의 효율적인 시행을 위해서는 용도구역별 특성을 바탕으로 우리 해역의 공간에 대한 가치평가가 제대로 이뤄져야 한다. 하지만, 우리나라 해양공간계획은 해양공간에 대한 자료수집 및 관리체계가 불완전하다는 문제점이 있다(Choi, 2013). 해양공간에 대한 자료수집 체계가 명

확하지 않은 상태에서 해양공간 특성을 평가할 경우 합리적인 공간계획이 수립될 수 없는 위험을 내포하고 있다. 이는 이해당사자들 간 갈등을 유발하고, 잘못된 국가사업 시행으로 국고 손실뿐만 아니라 생태계 파괴 등 부정적 결과를 초래할 수 있다.

그 대표적인 사례로 해상풍력발전단지 조성에 따른 어업활동 및 환경·생태계 관리구역과의 경합 사항을 들 수 있다. 코로나19로부터 시작된 경제 위기는 자연과 생태계 보전 등 지속 가능한 자원에 기초한 국가 경제발전 전략의 수정을 불가피하게 하였다. 국제 사회는 급격한 기후변화와 자원고갈에

† Corresponding Author : 종신회원, teddykim@kmou.ac.kr 051)410-4437

* disco3154@naver.com 051)410-1411

** tigerfood@hanmail.net 051)816-3575

대응하여 저탄소 에너지 사회로의 전환을 도모하고 있다. 우리나라도 2020년 7월 발표한 한국판 뉴딜 종합계획의 그린뉴딜 정책에 따라 탄소중립을 목표로 미래 에너지 패러다임을 전환하고자 하고 있으며, 해상풍력발전 개발은 그린뉴딜 정책 실현의 한 부분으로써 많은 기여를 할 것으로 기대를 모으고 있다. 하지만, 해상풍력발전단지 설립에 관한 이해당사자 간 갈등은 지속적으로 발생하고 있으며, 이러한 갈등을 해소하기 위해 해양공간특성평가 기준이 중요한 것이다. 현행 해양공간 특성평가 지침에서의 어업활동은 어획량, 어선 밀집도 등의 정량적 평가로 이뤄지고, 에너지 개발구역인 해상풍력발전단지는 조성 여부에 대한 정성적 평가를 제시하고 있다. 지침에 따르면 해상풍력발전단지의 가치는 일반 시장에서 판매되는 시장가가 아니기 때문에 조건부 가치 측정법(Contingent Valuation Method : CVM)을 이용하여 가치를 측정하고, 어업활동은 어획량 통계에 어획별 단가를 적용한 시장가치를 측정하여 우선순위를 정하게 되어있다(MOMAF, 2019). 이 경우 각 용도 별 평가 기준이 서로 다르기 때문에 사용가치와 비사용가치를 모두 포함하여 평가하는 CVM을 통한 가치평가가 단순히 사용가치만 평가할 수 있는 시장가치 측정결과보다 과다하게 나올 가능성이 있고, 이는 곧 용도평가의 불합리성을 가질 위험이 있다.

CVM은 추정치가 실제 지불의사액 보다 과대평가 혹은 과소평가될 위험이 존재한다. 응답의 진정성, 응답자가 평가대상에 대해 가진 정보의 수준, 가상시장 질문에 대한 체감 정도, 개인의 특성(소득수준, 성별, 교육수준, 연령 등)에 따른 가치 부여 수준이 다양하게 반영되기 때문이다(Hong & Eom, 2011). 이에 비해 서식지 등가성 분석법(Habitat Equivalency Analysis: HEA)은 객관적으로 제시된 정보를 바탕으로 가치평가를 실시하므로 정량적이라고 할 수 있다. 또한 데이터 수집을 위한 설문이 불필요하여 CVM과 비교해 시간적 측면에서도 더 효율적이다.

따라서 본 연구의 목적은 울산 부유식 해상풍력발전단지 대해 HEA를 적용한 가치평가를 통하여 해당 해양공간 용도구역 특성평가를 위한 객관적인 평가기준제시에 있다.

이를 위해 첫째, 국내외 선행연구를 통해 환경·생태계 관리구역 측면에서 해상풍력발전단지 설정으로 발생할 수 있는 환경 문제들을 살펴본다. 둘째, 해상풍력발전단지 설립으로 인한 환경영향평가 선행연구 분석을 통해 본 연구에서 사용하고 자 하는 환경영향평가방법의 타당성을 제시한다. 셋째, 울산 부유식 해상풍력발전단지 설립을 통해 발생할 수 있는 해양생태계 피해조사방법으로 서식지 등가성 분석법을 적용함으로써 해양공간의 정량적인 평가 결과를 제시한다. 또한, 이 연구의 활용방안과 한계평가를 통해 향후 해양공간 특성평가 시 나아가야 할 방향을 제시함으로써, 현행 해양공간특성평가 지침의 공간특성 평가요소의 불합리한 문제점을 개선하여 향후 해양공간계획의 목적인 이해당사자들 간 갈등 해결에 도움이 될 수 있을 것이다.

2. 울산 부유식 해상풍력발전과 해양환경

2.1 울산 부유식 해상풍력발전

울산광역시시는 Fig. 1과 같이 2023년부터 동해-1 가스전을 중심으로 1기당 5MW급 풍력발전 터빈 40기를 설치하여 2025년까지 200MW급 용량의 Hywind 부유식 해상풍력발전단지 조성계획을 발표하였다.

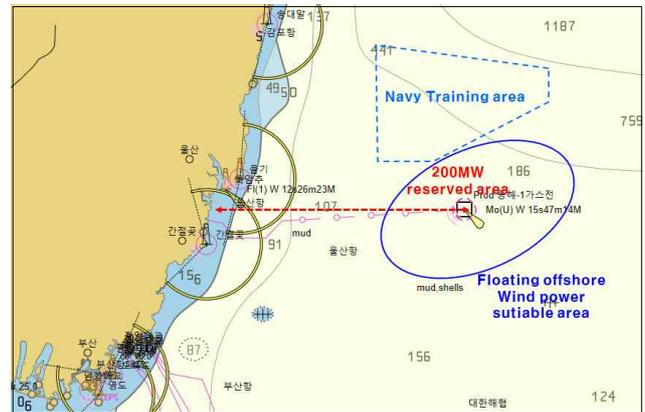


Fig. 1 Ulsan Floating Offshore Wind Power Complex planned Site

울산 부유식 해상풍력발전단지의 설치 위치를 Fig. 1과 같이 선정한 이유는 첫째, 기존 동해 가스전 설치 시 수집한 주변 환경조사 자료를 활용하여 기초구조물 설치비용을 절감할 수 있다. 둘째, 울산으로부터 동남쪽으로 58km 정도 떨어진 거리는 공사 시 발생하는 소음, 진동 등으로 인한 민원 발생 소지가 적다. 셋째, 고리원전, 월성원전, 울산 화력발전소 등 발전소 밀집 지역과 근접하여 대용량의 전력 연계가 용이한 위치상의 이점을 들 수 있다(Jang, 2019).

2.2 해상풍력발전단지의 해양환경 문제

울산 해상풍력발전단지가 조성되면 건설-운영-해체에 이르기까지 다양한 해양자원 서비스 피해가 예상된다.

첫째, 건설단계에서는 기존 해양생태계 서비스 사용에 대한 금지 때문에 상업적, 여가적 어업으로 발생하는 수익 등에 직접적인 손실을 가져올 수 있다. 또한 공사 중 발생하는 소음과 진동은 해양포유류 및 어류가 서식지를 이동하거나 이동성이 떨어지는 어패류, 해양식물들은 개체수가 감소될 수 있으며, 이로 인해 해양생태계 변형을 통한 상업적 수산업 훼손을 가져올 가능성이 있다(Shin and Yoog, 2011).

둘째, 운영단계에서는 화학물질(방오 도료, 윤활유, 냉각제 등)이 노출되는 경우, 해양생태계에 부정적인 영향을 줄 수 있고, 전력선에서 발생한 자기장은 특히 지구 자기장을 활용하

여 이동하는 어류나 해양포유류에게 교란 요인이 될 수 있다(The Scottish Government, 2011). 또한 수중 소음이나 진동은 부유 생태계보다 해양포유류, 어류 및 저서생물에 더 큰 영향을 미친다(Shaw and Wlodarz, 2013). 바다를 볼 때 해상풍력발전단지가 들어선 해양경관(Seascape)이 영향을 받을 수 있다. 해상풍력발전단지 개발은 자원이 중복되는 영역에 대한 공간경쟁과 전력 공급 경쟁 또는 구조물로 인한 파도와 조력 자원량 변화를 통해 파도와 조력 개발에 영향을 미칠 수 있다.

셋째, 해상풍력발전 시설의 수명은 약 20년 정도이다(Jo, 2014). 수명을 다한 발전시설은 중앙의 말뚝 구조물부터 시작하여 터빈, 날개 그리고 육지로 전기를 끌어들이는 전력선까지 모두 철거해야 한다. 특히, 해저에 박아 넣은 구조물은 그 깊이가 적어도 지하 3m에 이른다. 기초공 등을 제거하는 작업은 앞에서 언급한 건설단계 시 고려했던 영향과 대부분 유사하다.

해상풍력발전의 건설-운영-해체단계의 항목들을 살펴보면, 해상풍력발전으로 인해 여러 분야에 걸쳐 부정적 영향이 발생할 가능성이 있다는 것이 확인되었다. 이는 상업적 수산업 뿐 아니라, 해양생태계, 복지 훼손까지 확대되어 해당 해역에서 다양한 이해관계자들 간 갈등을 유발할 것이다.

2.3 해상풍력발전단지 환경영향평가의 경제적 가치 추정법

해상풍력발전단지 설정에 따른 환경문재인 해양생태계의 변형과 손실, 복지 훼손 등은 피해액을 추정하기가 쉽지 않다. 이들은 모든 사람들이 공동으로 이용할 수 있는 공공재이자, 천연자원을 소비하는 환경재이기 때문이다. 공공재 성격을 가진 환경재 및 서비스는 소유권이 명확하지 않고, 일반 시장에서 거래되지 않아 적정가격을 추정하기 어렵다. 따라서 경제적 가치를 정량적으로 평가할 수 있는 방법론의 도입이 필요하다.

환경에 대한 경제적 평가법은 Table 1과 같이 경제적 가치 추정 접근법(Economic Valuation Approach)과 보상대체비용 접근법(Compensatory Replacement Cost Approach)으로 분류된다(Kim, 2016).

첫 번째, 경제적 가치추정 접근법은 현시선호 평가법(Revealed Preference)과 진술선호 평가법(Stated Preference)으로 구분한다. 현시선호 평가법은 사람들의 경제활동으로 나타난 결과를 선호로 보고, 이 정보를 이용하여 비시장 재화의 가치를 간접적으로 추정하는 것이다. 현시선호 평가법에는 MPM(Market Pricing Method), TCM(Travel Cost Method), HPM(Hedonic Pricing Method) 등이 있다. 반면, 진술선호 평가법은 가상적인 거래를 받아들이도록 이어 질문을 하고 마지막 단계에서 선호를 진술하도록 질문을 하여 응답한 자료를 분석함으로써 응답자의 가치평가결과를 도출하는 CVM이 일반적이다.

Table 1 Economic Valuation Method

Economic Valuation Approach	• Revealed Preference (Existing Market)	• Market Pricing Method(MPM)
	• Revealed Preference (Surrogate Market)	• Travel Cost Method(TCM) • Hedonic Pricing Method(HPM)
	• Stated Preference (Hypothetical Market)	• Contingent Valuation Method(CVM)
Compensatory Replacement Cost Approach	• Resource Equivalency Analysis(REA) • Habitat Equivalency Analysis(HEA)	

두 번째, 가치평가방법론은 보상대체비용 접근법이 있으며, 이는 피해를 입은 환경재에 대한 충분한 보상을 위해 복원 노력에 소요된 비용을 추정하는 접근법이다. 대표적인 방법론으로는 서식지 등가성 분석법(Habitat Equivalency Analysis: HEA)과 자원 등가성 분석법(Resource Equivalency Analysis: REA)이 있다. HEA는 개발로 피해를 입은 해양생태계가 훼손된 시점에서 피해를 받기 이전의 수준(Pre-damaged level)으로 복원될 때까지 잃어버린 전체 서비스 가치를 동등하게 제공할 수 있는 생태계복원 사업의 크기를 시행하는데 소요되는 복원비용(Restoration cost)을 해당 생태계 서비스의 가치로 평가하는 방법이다.

CVM은 적어도 손실과 관련된 가격에 대한 정보제공을 목적으로, 시장이 존재하지 않는 경우 사용되는 유일한 경제적 방법이지만, CVM을 적용할 때 선호를 나타내려는 응답자의 의사와 능력에 크게 의존한다(Hong & Eom, 2011). 또한 응답자의 설문 결과에 따라 지불의사 추정액이 과대 평가되기 쉽고, 설문자의 소득수준, 환경에 대한 인식 정도에 따라 편차가 크게 발생할 수 있어 CVM은 추정 결과의 타당성과 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다(Yun, 2017).

따라서 본 연구에서는 경제적 가치추정 평가를 위해 보상대체 비용 접근법으로 선택하였다. 한편, HEA가 훼손된 곳의 기준이 훼손된 완전한 서식지라면, REA는 주로 개별동물(자원)에 대해 훼손된 수량에 초점을 맞춘다. REA는 대체 비용 크기 추정 과정에서 HEA의 서식지를 추정하는 방법으로 복귀하는 경우가 많기 때문에 HEA를 대표적인 보상 대체 비용 접근법으로 선택하였다.

3. 해상풍력발전단지 환경피해의 경제적 가치추정

3.1 서식지 등가성 분석법(HEA)

HEA는 보상 대체 비용법의 대표적인 환경피해 가치평가 방법으로서, 1995년 미 국립해양대기청의 연구보고서에 처음 소개되었다. 2000년과 2006년 두 번의 수정 과정을 거쳐 미국 유류오염법 하에서 유류오염으로 피해를 입은 환경재 및 자원

서비스의 정량적 평가법으로 도입되었다. 전통적인 가치평가 접근법인 CVM의 대체제로 현재 유류오염사고 뿐만 아니라 항만개발 등을 포함하여 다른 해양환경 및 생태계 서비스 영향성 평가방법론으로 적용되고 있다(Kim 2016).

HEA 접근방식은 기본적으로 적절한 보상 복구를 통해 얻은 서식지 서비스의 가치가 자원 상해 이전에 손실된 서비스의 가치와 일치한다는 가정으로 시작된다. 이는 피해를 입은 환경재의 단위 서비스(V_d)와 복원사업이 제공하는 단위 서비스(V_{RP})에 대해 일대일 교환관계($V_d/V_{RP}=1$)임을 의미한다. 즉, HEA는 서비스 대 서비스 접근법(Service-to-Service approach)으로써, 피해를 입은 환경재의 단위 서비스와 복원사업이 제공하는 단위 서비스에 대해 국민들이 일대일 교환관계(One-to-one trade-off)를 기꺼이 받아들인다는 의미를 내포하고 있다.

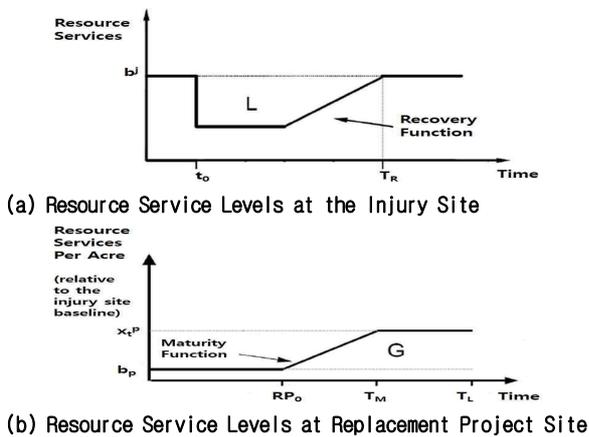


Fig. 2 Basic Concept of HEA Source : NOAA, 1995

Fig. 2는 HEA의 기본 개념을 도식화 한 것이다. Fig. 2(a)에서, 개발이나 환경오염 등으로 훼손된 자원서비스는 일정 시간이 지나면 자연적으로 회복하게 되는데, 피해를 입기 전 서비스 수준(Baseline service; b_j)으로 완전히 복원되는 시간 (T_R)까지가 전체적인 피해를 입은 크기(S)가 되며, L 은 이 기간동안 손실된 자원서비스의 총합이 된다. 따라서 기존에 제공하던 서비스와 같거나 비슷한 서비스 질을 제공할 수 있는 복원사업이 시작된다. 자원회복 기간과 같이 일정 기간 이후 100%의 성숙(Maturity)단계에 도달(T_M)하는 성숙기간을 포함하여 그 이후에 동등한 자원서비스를 제공하게 되며, G 는 해당 복원사업 기간동안 제공되는 자원서비스의 총합이다. 이때 피해를 입은 크기(S)와 똑같은 양의 복원사업의 크기(RP)로 추정하면 되는 것이다(Fig. 2(b)).

마지막으로 생태계 피해와 복원사업은 장기간, 다른 시간 및 공간에서 이루어지기 때문에 현재와 미래의 시간적 가치를 고려하기 위해 사회적 할인율(r)을 적용하여 계산해야 한다 (Shaw and Wlodarz, 2013).

Fig. 2에서 설명한 HEA 기본개념에 대한 계산공식은 식(1)과 같다.

$$RP = S \times \frac{V_d}{V_{RP}} \times \frac{\sum_{t=t_0}^{T_R} [((b_j - x_t^j)/b_j)(1+r)^{(C-t)}]}{\sum_{t=RP_0}^{T_L} [(x_t^p - b^p)/b^j](1+r)^{(C-t)}} \quad (1)$$

여기서,

RP = 피해 보상적 생태계 복원사업의 크기

S = 생태계 피해를 입은 지역의 크기

V_d = 피해 생태계의 단위 생태자원 서비스 당 가치

V_{RP} = 복원 생태계의 단위 생태자원 서비스 당 가치

b_j = 피해를 입기 이전의 생태계 서비스 수준

x_t^j = 피해지역 생태계가 제공하는 t시점의 서비스 수준

b^p = 복원사업 지역의 생태계 초기 생태계 서비스 수준

x_t^p = 복원지역 생태계가 제공하는 t시점의 서비스 수준

t_0 = 최초로 피해를 입은 시기

RP_0 = 복원사업이 시작된 시기

T_R = 피해지역이 피해이전 상태로 완전히 회복된 시점

T_L = 복원사업으로 생태계 서비스가 종료되는 시점

r = 사회적 할인율(4.5%)

일반적으로 피해지역과 복원사업 지역의 해양자원 서비스 질은 시간에 불변하며, 동일한 것($V_d/V_{RP}=1$)으로 가정하고 있다(NOAA, 1995). 그러나 피해지역이 역사적·문화적인 가치 등을 내포하고 있을 경우, 단순한 복원사업으로 제공되는 서비스의 질은 과소평가될 수 있는 반면, 피해지역이 수산업이나 해양관광지역 등과 같이 어떠한 용도로도 이용되지 못하는 가치가 떨어지는 지역일 경우, 과도한 복원사업의 수행은 과대평가된 결과일 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 서비스 질을 제공한다고 가정하고자 한다.

3.2 울산 부유식 해상풍력발전단지의 HEA 요소

해상풍력발전단지 설정으로 인해 경관 훼손, 생태계 교란 가능성 등은 발전단지가 해체되지 않는 이상 지속될 것이다. HEA를 적용하기 위해서는 손실지역의 피해 정도와 크기, 피해 생태계의 회복기간, 보상사업 지역의 성숙도, 보상크기 등의 물리학적, 생물학적 자료와 사회적 할인율과 같은 경제학적 자료들이 필요하다. Fig. 3은 울산 부유식 풍력발전단지의 HEA 요소들을 도식화한 것이다.

해상풍력발전단지 건설 시에는 발전터빈을 고정하기 위한 앵커만으로 모든 구역이 훼손되는 것은 아니다. 하지만 발전 시설의 설치 및 해체 시 발생하는 구조물 설립, 부가적인 공사 등으로 인해 해당 구역 내 저서 생태계가 모두 피해를 입는 점과 해상풍력발전단지가 운영 중일 때는 해당 해역 접근을 금지함으로써 해양생태계 이용을 할 수 없다는 점에서 발전단

지 해역 모두를 피해 구역으로 설정하였다.

해상풍력발전단지 운영 시에는 해당 해역의 사용이 금지되어 피해가 지속된다고 가정한다. 선행 연구들을 참조하여 해상풍력발전의 설계 수명은 20년, 한국석유공사에서 스코틀랜드 Hywind 부유식 풍력발전 건설사인 에퀴노르(Equinor)와 맺은 동해-1 해상풍력발전사업 컨소시엄 서명식에 명시된 건설 기간 2년과 해체 기간도 건설 기간과 동일하게 가정한 2년을 포함한다.

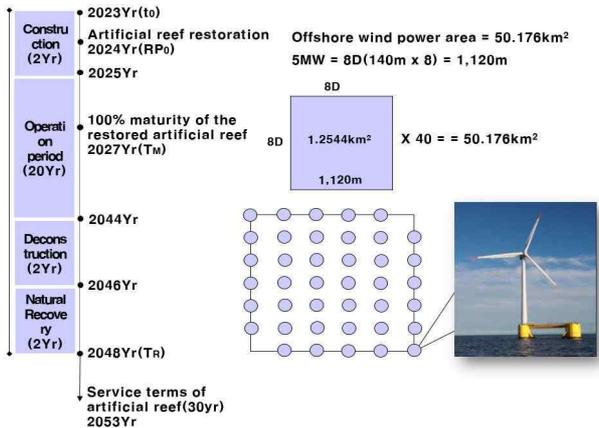


Fig. 3 Factors used in the HEA Analysis for Ulsan Floating Offshore Wind Power Complex

해상풍력발전단지 해체 시에는 구조물 제거 및 공사로 발생한 부유사, 침전물 제거로 인한 생태계 훼손 발생할 수 있다. 생태계가 훼손 이전으로 회복될 때까지 성숙 기간은 저서 생태계의 완전한 회복 기간인 2년으로 하였고, 성숙도는 2년간 100%에 이르는 것으로 한다(Yu, et al., 2006). 따라서 총 26년(T_R) 동안 피해가 진행된다고 가정한다.

최초로 피해를 입은 시기(t_0)는 동해 가스전 가동 정지(2022년) 다음해인 2023년으로 하고 이 시점부터 해당 해역에서 제공하는 생태계 서비스는 100% 훼손된다고 가정한다. 복원 사업지의 인공어초사업이 시작되는 시기(RP_0)는 이듬해인 2024년으로 가정하였다. 인공어초 성숙도가 3년째엔 76.9%인 연구 결과(Yoo, et al., 2014)를 참고하여 선형모형으로 추정하면 4년째(T_M)부터 100%에 도달하는 것으로 가정한다.

인공어초 서비스 효과가 발생하는 기간(T_L)은 30년으로 가정한다(최종두는 인공어초 경제성 분석 시 인공어초는 30년, 부어초는 10년을 적용하고 있다. Choi, 2013). 피해지역인 울산 해상풍력발전단지과 동질의 서비스를 제공해줄 수 있는 복원사업은 인공어초 복원사업으로 정하였다. 본 연구의 대상 해역인 동해-1 가스전 주변 해역 수심(124-142m)을 고려한 생태계 복원사업은 해저 200m까지 설치 가능하며(Seo, et al., 2007) 울산 인근 해상에 가장 많이 사용된 2단 상자형 강제어초 방식으로 선정하였으며, 단위 사업 시행 비용은 Table 2와 같이 8.66(백만원/ha)로 한다.

풍력발전단지 면적 조성에 중요한 풍력발전 간 이격거리에 관한 기준은 연구에 따라 다소 차이를 보이고 있다. 울산 부유식 풍력발전단지 사업에 참여하는 에퀴노르 사(社) 주도하에 설립된 6MW급 스코틀랜드 Hywind의 경우, 720~1600m 간격을 두고 풍력발전시설이 설치되었다. 울산 부유식 풍력발전단지에 적용이 예상되는 5MW급 풍력발전기 간 거리는 8D이다. 이를 5MW급 풍력발전 Rotor의 사양($D=140m$)을 기준으로 8D에 적용하면, 1,120m가 산출되므로, 풍력발전 1기당 가로(1,120m) x 세로(1,120m) = 1.2544km²의 면적이 필요하다. 따라서 200MW급 발전단지가 설립될 울산 부유식 풍력발전단지 총 면적의 단순 추정치는 50.176km²(5017.6ha)이다.

Table 2 Status of artificial reef restoration projects at Ulsan (1971-2019)

Year	Artificial Reef			Double Box Type Reef		
	Project Area(ha)	Project Cost (Million won)	Unit Cost (Million Won/ha)	Project Area(ha)	Project Cost (Million won)	Unit Cost (Million Won/ha)
'71-'10	2,450	12,259	5.00	96	852	8.88
'11	8	655	81.88	-	-	-
'12	4	538	134.50	-	-	-
'13	4	673	168.25	-	-	-
'14	68	655	9.63	-	-	-
'15	20	625	31.25	-	-	-
'16	16	625	39.06	-	-	-
'17	24	519	21.63	8	49	6.13
'18	16	482	30.13	-	-	-
'19	16	294	18.38	-	-	-
Total	2,626	17,325	6.60	104	901	8.66

Source : Korea Fisheries Resources Agency (2020)

Table 3 Summary of variables used in HEA

Variable Name	Values	Remarks
t_0	2023	Point of shut down of Donghae-1 gas field: 2022.6
T_R	2048	Floating Offshore Wind Power operating period: 20 years Dismantling period: 4 years Natural recovery period after completion of dismantling: 2 years
S_t	5,017.6ha	50.176km ² (1km ² =100ha)
Proposed restoration project	Double Box Type Reef	
Marginal Cost of Project	8.66	Million Won/ha
RP_0	2024	Artificial Reef Restoration Implementation year
T_L	2053	Service Period of Double Box Type Reef : 30 years
T_M	2027	100% maturity of the restored artificial reefs: after 3 years of the project implementation
r	4.5%	Discount rate

사회적 할인율은 기획재정부 예비타당성 조사 수행 총괄지침에 따라 4.5%를 적용한다. 위에서 언급한 울산 부유식 해상풍력발전단지 설정으로 인한 HEA 활용 시 변수들은 Table 3과 같다.

3.3 피해추정 결과

3.3.1 피해 추정

HEA를 이용하여 울산 해상풍력발전단지 조성에 따른 경제적 피해액을 추정하였다. 사회적 할인율 4.5%, 성숙도 100%라는 기본 가정 하에 해상풍력발전단지 조성에 의해 손실된 서비스의 크기와 보상지역의 보상된 서비스의 크기는 Fig. 4와 같다. 해상풍력발전단지의 건설 및 해체, 운영기간인 26년 동안 생태계 손실 크기는 Fig. 4의 아래 면적이며, 이는 동질의 서비스를 제공하는 생태계 복원사업인 2단 상자형 강제어초가 제공하는 30년간의 서비스 크기와 같다고 할 수 있다.

Table 5와 같이 피해기간(26년) 동안 전체 해양생태계 피해지역은 70,399.30ha이고, 피해지역과 동일한 서비스 크기를 제공하기 위해 5,277.93ha(보상면적=손실지역 할인된 손실 크기의 합/복원지역 할인된 손실 크기율의 합)의 면적에 30년간 인공어초를 운영하면 된다. 이를 바탕으로 울산 해상풍력발전단지 지정을 통해 발생한 해양생태계 피해액(보상액=보상면적×사업한계비용)은 약 45,706.89백만원으로 추정되었다.

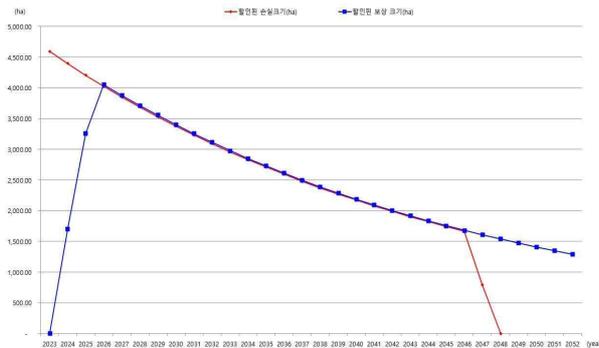


Fig. 4 Area of the total services lost and gained over the restoration project (4.5% discount rate & 100% maturity rate)

3.3.2 민감도 분석

민감도 분석은 다른 조건은 일정하다는 가정 하에, 투입되는 요소가 변동될 때 가치나 수익률 등이 어떠한 영향을 받는가를 분석하는 것이다. 울산 부유식 해상풍력발전단지의 복원사업에 사용되는 인공어초의 성숙도가 낮으면 동일한 서비스 양을 얻기 위해 더 많은 면적이 필요하고, 이로 인해 인공어초 설치비용은 증가하게 되므로 자연스럽게 손실된 서비스의 가치는 상승한다. 또한 할인율이 낮으면 총 손실크기의 하락율은 상대적으로 감소하므로 사회적 할인율이 4.5%일 때보다

총 손실크기는 증가하지만, 할인된 복원 감소율도 작아져 대체 복원사업 서식지의 크기도 감소한다.

Table 4 Sensitivity analysis

Item	Case-I	Case-II	Case-III	Case-IV
Discount rate	4.5%	4.5%	3.0%	3.0%
Maturity Index	100%	76.9%	100%	76.9%
Total effective areas of services lost (ha)	70,399.30	70,399.30	83,644.07	83,644.07
Total restored habitat size providing the equivalent services lost (ha)	5,277.93	6,721.16	4,795.85	6,356.42
Total compensatory restoration cost (Million Won)	45,706.89	58,205.25	43,090.86	55,046.60

민감도 분석을 위해 사회적 할인율은 우리나라의 4.5%와 경제적, 사회적 환경이 다른 미국의 사회적 할인율 3.0%를 적용하였다(KEEL, 2015). 강제어초 성숙도 100%와 선행연구 결과인 76.9%를 적용한 4가지 Case의 추정결과는 Table 4와 같다.

우리나라의 사회적 할인율과 성숙도를 적용한 Case-I과 Case-II의 울산 부유식 해상풍력발전단지의 경제적 피해는 457-582억원으로 추정되었다. 또한 미국의 사회적 할인율과 성숙도를 적용한 Case-III와 Case IV의 경제적 피해는 430-550억원으로 추정되었다.

4. 결 론

울산 부유식 해상풍력발전단지 조성은 해양공간계획 상 이해관계가 충돌하는 대표적인 사례라 할 수 있다. 본 연구는 울산 부유식 해상풍력발전단지가 설립될 해역의 효율적인 해양공간특성평가 지침에 활용될 객관적인 평가 기준이 될 수 있는 HEA의 타당성을 확인하고, 이를 통해 해양공간의 정량적인 평가결과를 제시한다.

4.5%의 사회적 할인율과 4년째부터 100%의 성숙도를 가정한 기본 가정의 경우 피해액은 약 457억원으로 나타났다. 민감도 분석에서는 미국의 평균 사회적 할인율인 3.0%를 적용하고, 선행연구 사례에서 밝힌 인공어초의 성숙도인 76.9%를 적용하였을 때는 최대 약 550억원의 경제적 피해액이 추정되었다.

본 연구는 효율적인 해양공간특성평가 지침에 활용될 객관적인 평가 기준이 될 수 있는 HEA를 통해 울산 부유식 해상풍력발전단지가 설립될 해역의 경제적 가치를 추정하였다. HEA는 객관적이고 명확한 DATA를 기본으로 가치를 산정하기 때문에 해양공간특성평가 시 발생할 수 있는 불합리성을 해결할 수 있을 것이다. 다만, 본 연구는 해양생태계 서비스의 가치평가만을 적용한 사례로, 해상풍력발전단지를 둘러싼 다양한 내외적 요소가 고려되지 않았으며, 변수들에 대해 가정값이 적용되어 추정값이 과도하게 책정될 가능성이 있으므로

Table 5 Estimated Economic Damages from Ulsan Floating Offshore Wind Power Complex

Year	Damaged Site(2021)				Restoration Site(2021)		
	Reduction rate	Effective area of service lost(ha/year)	Discount Factor	Discounted effective area of service lost(ha/year)	Habitat service Present	Discount Factor	Discounted effective area of service lost(ha/year)
2023	1.0	5,017.6	0.915729951	4,594.77			
2024	1.0	5,017.6	0.876296604	4,396.91	0	0.876296604	0
2025	1.0	5,017.6	0.838561344	4,207.57	0.3845	0.838561344	0.322426837
2026	1.0	5,017.6	0.802451047	4,026.38	0.7690	0.802451047	0.617084855
2027	1.0	5,017.6	0.767895738	3,852.99	1.0000	0.767895738	0.767895738
2028	1.0	5,017.6	0.734828458	3,687.08	1.0000	0.734828458	0.734828458
2029	1.0	5,017.6	0.703185127	3,528.30	1.0000	0.703185127	0.703185127
2030	1.0	5,017.6	0.672904428	3,376.37	1.0000	0.672904428	0.672904428
2031	1.0	5,017.6	0.643927682	3,230.97	1.0000	0.643927682	0.643927682
2032	1.0	5,017.6	0.616198739	3,091.84	1.0000	0.616198739	0.616198739
2033	1.0	5,017.6	0.589663865	2,958.70	1.0000	0.589663865	0.589663865
2034	1.0	5,017.6	0.564271641	2,831.29	1.0000	0.564271641	0.564271641
2035	1.0	5,017.6	0.539972862	2,709.37	1.0000	0.539972862	0.539972862
2036	1.0	5,017.6	0.516720442	2,592.70	1.0000	0.516720442	0.516720442
2037	1.0	5,017.6	0.494469323	2,481.05	1.0000	0.494469323	0.494469323
2038	1.0	5,017.6	0.473176385	2,374.21	1.0000	0.473176385	0.473176385
2039	1.0	5,017.6	0.452800369	2,271.97	1.0000	0.452800369	0.452800369
2040	1.0	5,017.6	0.433301788	2,174.14	1.0000	0.433301788	0.433301788
2041	1.0	5,017.6	0.414642860	2,080.51	1.0000	0.414642860	0.414642860
2042	1.0	5,017.6	0.396787426	1,990.92	1.0000	0.396787426	0.396787426
2043	1.0	5,017.6	0.379700886	1,905.19	1.0000	0.379700886	0.379700886
2044	1.0	5,017.6	0.363350130	1,823.15	1.0000	0.363350130	0.363350130
2045	1.0	5,017.6	0.347703474	1,744.64	1.0000	0.347703474	0.347703474
2046	1.0	5,017.6	0.332730597	1,669.51	1.0000	0.332730597	0.332730597
2047	0.5	2,508.8	0.318402485	798.81	1.0000	0.318402485	0.318402485
2048	0.0	-	0.304691373	-	1.0000	0.304691373	0.304691373
2049					1.0000	0.291570692	0.291570692
2050					1.0000	0.279015016	0.279015016
2051					1.0000	0.267000016	0.267000016
2052					1.0000	0.255502407	0.255502407
2053					1.0000	0.244499911	0.244499911
Total discounted effective ha-years lost:				70,399.30	Restored habitat size (ha):		5,277.93
					Total costs of Restoration (Million Won):		45,706.89

실제 해상풍력발전단지 해역에서 발생하는 더욱 광범위한 피해들과의 직접적인 비교는 어렵다. 그러나 향후 해상풍력발전 단지의 해양공간계획 수립 시 예상되는 용도구역들의 특성평가를 위해서는 객관적이고 합리적인 가치평가가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 우리나라 해양공간특성평가 과정에서는 해양공간계획법에 따른 용도구역 간 이해관계를 명확하게 구분하고 사실에 근거한 객관적인 평가 기준이 마련되어야 할 것이다.

References

[1] Choi, J. D.(2013), A study on the Economic Effectiveness of the Artificial Fish Reef Project in the Tae-an Marine Ranching, The Journal of Fisheries Business Administration, Vol. 44, No. 3. pp. 103-109.

[2] Hong, J. H. and Eom, Y. S.(2011), Estimating Demand for Goods Using Survey Method : Issue and Application to the Valuation of Environmental Satellite Project, Journal of Korea Economic Analysis, Vol. 17, No. 1, pp. 1-7. pp. 1-72.

[3] Jang, K. Y.(2019), Floating Offshore Wind power Energy - Breakthrough for Renewable Energy, POSCO Research Institute, POSRI Issue Report.

[4] Jo, S. H.(2014), Status of installation of offshore wind power generation system of 5.5MW class in Korea, The Journal of Electrical World Monthly Magazine, pp. 49-52.

[5] Kim, T. G.(2016), Study on Efficient Port Environmental Management for Sustainable Port Operation(I) : Case Study of Marine Environments and Natural Resources

Impacts by Busan New Port Development, KINPR,
Vol. 40, No. 6, pp. 401-412.

Received 30 April 2021

Revised 17 May 2021

Accepted 17 May 2021

- [6] Korea Energy Economic Institute(2015), Estimation of proper social discount rate and social cost of carbon in Korea.
- [7] Ministry of Economy and Finance(2019), General Guidelines for Conducting Preliminary Feasibility Study.
- [8] Ministry of Economy and Finance(2020), The Korean New Deal.
- [9] Ministry of Ocean Maritime and Fisheries(2018), Law of Marine Spatial Management and Plan.
- [10] Ministry of Ocean Maritime and Fisheries(2019), Guidance of Marine Spatial Estimation.
- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration(1995), Habitat Equivalency Analysis : An Overview, Damage Assessment and Restoration Program National Oceanic and Atmospheric Administration Department of Commerce, pp. 5-14.
- [12] Seo, S. H., Lee, Y. K., Lee, I. H. and Kim, D. K.(2007), Field Investigation on the Efficiency of the Artificial Steel Reefs, Korea Society of Ocean Engineers, Vol. 21, No. 5, pp. 61-67.
- [13] Shaw, W. D. and Wlodarz, M.(2013), Ecosystems, Ecological Restoration and Economics : Does Habitat or Resource Equivalency Analysis Mean Other Economic Valuation Methods Are Not Needed?, Royal Swedish Academy of Science, pp. 628-643.
- [14] Shin, C. O. and Yoog, G. H.(2011), Environmental and Economic Impact of Offshore Wind Power, Korea Maritime Institute, Repot 2011-05, pp. 35-49.
- [15] The Scottish Government(2011), Economic Assessment of Short Term Options for Offshore Wind Energy in Scottish Territorial Waters : Cost and Benefits to Other Marine Users and Interests, Marine Scotland, pp. 84-88.
- [16] Yoo, J. W., Hong, H. P., Hwang, J. Y., Lee, M. S., Lee, Y. W., Lee, C. S. and Hwang, S. D.(2014), A Study on the Ecological Indices for the Assessment of the Function and Maturity of Artificial Reefs, Journal of Korean Society of Oceanography, Vol. 19, No. 1, pp. 8-34.
- [17] Yun, H. Y.(2017), A Study on US Natural Resource Damage Laws : Focusing on CERCLA and OPA, Journal of Law, Vol. 41, No. 1, pp. 197-229.
- [18] Yu, O. K., Lee, H. G., Lee, J. H. and Kim, D. S.(2006), Impact of Sand Mining on the Macrobenthic Community in Gyeonggi Bay, Korea, Ocean and Polar Research, Vol. 28, No. 2, pp. 129-144.