



K-RE100 이행에 필요한 국내해상풍력단지 누적 설치량 전망 연구

강흥구¹⁾ · 김병하²⁾ · 김현조³⁾ · 양창조⁴⁾ · 정해창^{5)*}

Prospects of Cumulative Installed Power Capacity of Domestic Offshore Wind Projects for K-RE100

Hong Goo Kang¹⁾ · Byung Ha Kim²⁾ · Hun Jo Kim³⁾ · Chang Jo Yang⁴⁾ · Hae Chang Jeong^{5)*}

Received 8 May 2024 Revised 17 June 2024 Accepted 18 June 2024 Published online 24 June 2024

ABSTRACT The objective of this study was to contribute to domestic offshore wind farms by reasonably predicting the expected completion time and installed power generation capacity of offshore wind projects in South Korea. Offshore wind power is drastically regarded as a core tool for clean energy transition and industrial decarbonization in the fight against the climate crisis globally. Especially in South Korea offshore wind power is the main tool in partaking in RE100 and K-RE100, and the Korean government aims to install 14.9 GW of offshore wind farms by 2030. However, this seems to have been significantly delayed due to the complex process of obtaining permits for offshore wind power in Korea. Thus, a reasonable prediction of power generation and a timeline for the final construction are imperative. To establish the delay time for permit licenses, classified location factors were included into site analysis. These factors comprised reviews of transmission and military operability, environmental impact assessment, maritime traffic safety examination, wind resource assessment and an analysis of current offshore wind projects. According to the analysis, the majority of offshore wind projects currently being developed in Korea are predicted to be delayed by 3-5 years as they are among the criteria included in key discussion points for obtaining permits. The cumulative installed power capacity and annual power generation after construction are expected to be 37 GW and 97 TWh respectively.

Key words Offshore wind(해상풍력), K-RE100(한국형 RE100), GIS(공간정보시스템)

1. 서론

전세계적으로 탄소중립에 대한 중요성과 시급성이 강조되는 가운데, 온실가스 전체 배출량의 75% 이상을 차지하

는 에너지 부문에서 탈탄소를 위한 움직임이 활발히 일어나고 있다. 에너지 사용 과정에서 온실가스를 배출하는 기존 화석연료 기반의 에너지 시스템을 친환경·저탄소 에너지 시스템으로 전환하기 위한 전세계적 움직임을 에너지전환이라 부르며, 대다수의 국가에서 효과적인 온실가스 감축을 위해 채택하는 정책이다.^[1]

에너지전환을 활용한 탄소중립을 위해 우리나라 정부에서는 2050년까지 2018년 기준 727.6백만톤의 온실가스 배출량을 2030년까지 40%(436.6백만톤) 감축하겠다는 목표(NDC: National Determined Contribution)를 2021년 12월 23일에 유엔기후변화협약 사무국에 제출했다.^[2]

1) Associate Director, Wind Power Division, RE Energy Co., Ltd.

2) Director, Wind Power Division, RE Energy Co., Ltd.

3) CEO, RE Energy Co., Ltd.

4) Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University

5) Researcher, Mokpo National Maritime University

*Corresponding author: khggogo2019@gmail.com

Tel: +82-2-6953-9650

Fax: +82-2-6499-9650

또한, 민간 부문에서의 대표적인 자발적 탄소중립 캠페인인 RE100은 글로벌 비영리 단체인 The Climate Group이 주관하고 있으며, 탄소정보공개프로젝트(CDP: Climate Disclosure Project)와의 협업하에 이루어지고 있다. 2024년 4월 기준 Google, Apple, Meta 등 426개 이상 글로벌 기업과 삼성전자, 현대차, SK그룹 등 36개 국내기업이 자발적 동참을 하고 있다.^[3] 이들 기업은 2050년까지 전체 전력사용량을 100% 재생에너지로 전환해야 하며, 공급망(Supply Chain)에 있는 기업들에게도 100% 재생에너지 사용을 요구하고 있다. 미진한 재생에너지 전환 실적을 보이는 업체들은 주요 고객을 잃을 수 있어, 수출위주의 경제구조를 가지는 우리나라 대기업 외에도 중견·중소기업들에 큰 부담으로 작용하고 있다.

기업들의 RE100 참여를 지원하기 위해 정부는 재생에너지 활용을 확인해주는 K-RE100(한국형 RE100) 제도를 도입하였다. 기존 글로벌 RE100과 K-RE100의 차이점은 크게 2가지로 연간 전력 사용량과 재생에너지 전환 조건으로 나뉜다. 글로벌 RE100은 연간 전력 사용량이 100 GWh 이상인 기업에게 참여를 권고하고 100% 재생에너지로 전력을 수급해야 하는데 반해 K-RE100은 별도의 전력 사용량과 재생에너지 전환율 선언이 필요 없다. RE100 이행을 위해 크게 여섯 가지 재생에너지 조달 수단을 활용한다: 녹색 프리미엄, 재생에너지공급인증서(REC) 구매, 직접 & 제3자 전력거래계약(PPA: Power Purchase Agreement), 자가발전, 지분참여^[4]이며 수단별 포트폴리오 구성은 제약이 없다. 다만, RE100 이행을 위해 REC 인증서 구매와 녹색 프리미엄 수단을 활용할 경우, 기업은 별도의 재생에너지 발전설비투자를 하지 않고 인증을 위한 추가 비용을 지불하면서 전력을 전력시장에서 공급받는다. 이들 인증 수단도 물론 재생에너지 설비 및 생태계 투자에 대한 선순환 영향을 기여할 수 있지만,^[5] 전세계적으로 실시간 계통 탄소중립에 직접적인 기여도가 떨어진다는 의견이 제시되고 있다.^[6] 이에, 글로벌 RE100 참여기업들은 직접 PPA를 활용한 재생에너지 조달 비율을 가장 높이고 관련 업체들에게 요구하고 있다.^[7]

청정에너지로의 빠른 전환과 확대하고자 하는 정부의 정책 방향에 따라 재생에너지 산업이 촉진되고 있다. 특히, 해상풍력은 다른 재생에너지에 비해 대용량 전력을 보급할

수 있어, 최근 국내 해상풍력 산업의 비중을 급격히 높이고 있다. 2023년 1월에 발표한 ‘제10차 전력수급기본계획’에서는 2030년까지 14.3 GW 규모의 해상풍력을 설치한다는 목표를 제시하였다.^[8] 2025년 이후 글로벌 해상풍력 예상 보급량 130 GW의 약 10%에 해당하는 용량을 국내 해상풍력으로 공급할 것으로 예측되지만, 작년 2023년 기준으로 국내에 설치된 해상풍력의 발전용량은 140 MW로 14.3 GW 목표치 달성을 위해 많은 노력이 필요하다.

본 논문에서는 RE100 및 K-RE100 달성에 핵심적인 국내 해상풍력 발전단지의 개발 현황과 향후 누적 설치량을 GIS(Geographic Information System, 공간정보시스템)를 활용하여 분석하고자 한다. 발전단지 개발 및 프로젝트 기간에 영향을 줄 수 있는 입지 요소들을 항목으로 분류하고 사업자별로 등급을 나누어 사업단지 완공 시점과 향후 누적 설치량을 분석 및 전망하였다.

2. 국내외 RE100 현황

2.1 글로벌 RE100

The Climate Group에서 매년 발간하는 최근 보고서 ‘RE100 Annual Report 2023’에 따르면^[3] 2023년 재생에너지 전환 비율과 RE100 회원사가 급격히 증가하고 있지만, 전력 소비량 또한 폭발적으로 증가하고 있는 추세이다(Fig. 1 참조). 최근 유럽연합의 탄소국경조정제도(CBAM)의 전환기에 들어서면서 RE100이 자발적인 참여 독려라는 본 취지와는 달리, 협력사에 참여 압박을 주고 있어 RE100 회원사

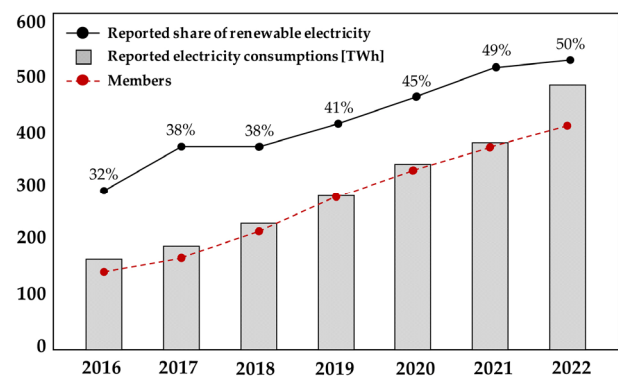


Fig. 1. RE100 Growth from 2016-2022^[3]

및 재생에너지 전환율은 더욱 증가할 것으로 보인다.

최근까지 RE100을 이행하기 위한 수단으로 REC 구매 및 녹색프리미엄 등과 같은 EACs(Energy Attribute Certificate) 구매가 가장 많은 비중을 차지했으며, 뒤를 이어 PPA가 두 번째로 많은 수단으로 활용되고 꾸준히 증가하는 추세이다 (Fig. 2 참조). 이는 기업에서 가격 변동이 심하고 탄소중립 기여도가 낮은 EACs 보다 안정적이며 기여도가 높은 PPA로 조달을 선호하기 때문으로 판단된다. 이중 RE100 기업

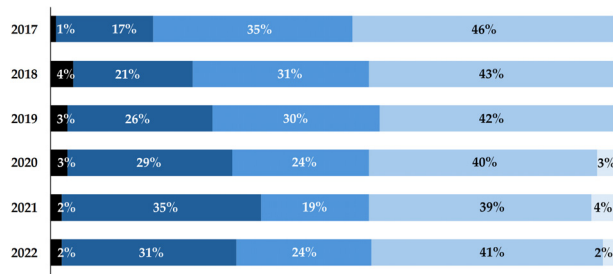


Fig. 2. Global RE100 procurement type mix^[3]

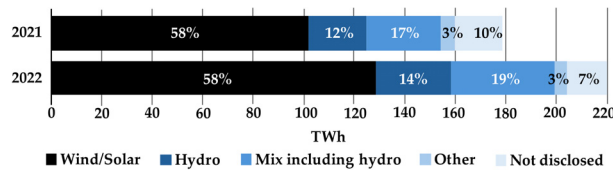


Fig. 3. Global RE100 technology mix^[3]

들이 가장 선호하는 재생에너지 발전 수단은 대용량의 발전이 가능하고 안정적인 수급이 가능한 풍력 및 태양광발전으로 조사되었다(Fig. 3 참조). 실제로 이 들 에너지원은 앞으로 폭발적으로 증가하는 전력 수요량에 대응하기 위해 전 세계적으로 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

2022년도 이후 54개의 기업들이 신규 RE100 회원사로 등록하였고 이중 75% 이상이 아시아 지역에 본사를 두고 있다.^[3] 그중에서 가장 높은 전력을 사용하는 10개 기업 중 7개 기업이 한국에 본사를 두고 있으며 연간 28 TWh의 전력을 소비하고 있다. 이렇듯 한국 기업들이 필요로 하는 재생에너지 수요량이 증가함에 따라 국내 재생에너지 발전량도 늘어나야 하지만 부족한 실정이다. 실제로 회원사들이 RE100 이행을 위한 재생에너지 조달에 가장 많은 어려움을 토로한 국가는 한국이다. 40% 이상의 RE100 기업들이 이행장벽을 경험하였고, 전체 4%의 기업들만 한국에서 RE100 100%를 달성하였다. 대표적 이행장벽으로는 부족한 조달 조달 옵션(32개), 높은 가격/한정된 공급(27개), 마찰과 비효율성(12개) 순으로 나타났다(Table 1 참조).

2.2 국내 K-RE100

앞서 언급한 글로벌 RE100 이행과 ESG(Environmental Social Governance) 경영에 대한 필요성이 강조되면서 국

Table 1. Barriers reported by RE100 companies^[3]

Contents	Republic of Korea	Japan	Singapore	Taiwan	China	India	USA	Russia	Saudi Arabia	Vietnam
High cost or limited supply	27	24	31	37	4	5	5	6	5	2
Lack of procurement options	32	14	12	9	18	10	7	7	8	6
Frictions or inefficiencies (small load)	12	7	10	9	2	1	7	3	2	0
Regulatory barriers	8	8	0	2	7	9	2	4	1	2
Frictions or inefficiencies (other)	2	10	2	1	1	5	2	0	0	0
Frictions or inefficiencies (landlord-tenant arrangements)	3	8	4	1	3	5	7	1	1	0
Credibility concerns	4	1	0	0	4	3	2	1	1	1
Internal reasons	0	1	2	1	0	1	2	0	0	0
Lack of data	5	3	0	0	3	3	2	0	0	0
Total companies citing barriers	66	49	48	43	30	24	24	17	14	11
Share of companies operating in country/area that report barriers	40%	24%	27%	33%	12%	13%	9%	21%	21%	9%
Share of companies operating in country/area that purchase 100% RE there	4%	25%	13%	8%	30%	30%	31%	7%	3%	24%

내 기업들의 RE100 가입 및 달성을 목표로 하고 있다. 하지만 국내 재생에너지 생산에 있어 여러 제약 조건들이 존재한다. 해외와 비교하였을 때 좁은 국토 면적, 풍부하지 않은 재생에너지양, 제한된 국내 전력시장 구조, 부족한 전력계통 용량 등 풀어야 할 많은 과제가 있다.

이러한 시급한 사안을 해결하기 위해 서론에서 언급한 K-RE100이 시행되었으며 6가지 방법을 통해 RE100 달성이 가능하다. K-RE100 옵션을 통해 전력을 구매한 일반용 및 산업용 전기 소비자들은 한국에너지공단(KEA: Korean Energy Agency)으로부터 ‘재생에너지 사용 확인서’를 발급받고 RE100 이행에 활용할 수 있다.^[4] K-RE100을 활용한 국내 기업수는 2024년 3월 기준 521개로 2022년(84개) 대비 많이 증가하였지만, 총 6.3 TWh의 정도만 K-RE100으로 조달하였고 이는 산업부문 전력소비량(278 TWh) 대비 2.2%에 불과한 수준이다.^[9,10] 실제로 2023년 누적 기준으로 K-RE100 기업의 이행수단 중 녹색프리미엄과 REC 구매가 대부분을 차지하였고 Table 2와 같이 각각 83.6%, 16.1%로 나타났다.^[11] 이렇듯 기업들 대부분이 재생에너지 추가성(Additionality)이 낮고 그린워싱이라는 비판을 받을 수 있는 녹색프리미엄과 REC 구매 위주로 이행 수단으로 선택하였다.

국내 기업들의 재생에너지 사용 확대를 저해하는 요인은 Table 3과 같이 크게 5가지로 정리할 수 있다.^[12] 글로벌 추세인 PPA와 자체개발의 촉진을 위해서라도 다음과 같은 저해 요인을 해결하고 재생에너지 제도의 전체적 개선이 필요해 보인다.

Table 2. Status of K-RE100 procurement^[11]

Type	Members No.			Total	Consumption (GWh)			Total
	Major	SMEs	Public /etc.		2021	2022	2023	
Green premium	73	71	30	174	1,440	5,384	8,156	14,981
RECs	31	59	39	129	5	936	1,941	2,882
Green tariff (PPA)	2	2	-	4	-	3	12	15
Direct PPAs	-	-	-	-	-	0,2	7,8	8
Self-gen.	11	22	9	42	5	12	10	28
Total	88	142	65	295	1,451	6,335	10,128	17,904

Table 3. Barriers for K-RE100

Barriers	Description
Additionality	<ul style="list-style-type: none"> • Low in green premium & RECs • Extremely low in purchasing PPAs (high additionality)
Accessibility	<ul style="list-style-type: none"> • Heavy burden on a long-term PPA contract (15-20yr contract) • Difficulty in construction due to complex permitting regulations
Cost effectiveness	<ul style="list-style-type: none"> • High market cost of RECs due to limited supply • High burden on extra network usage fee & commission • High LCOE^[13] (Offshore wind: 228,6 ₩/kWh, onshore wind: 144,3 ₩/kWh, PV:131,2 ₩/kWh, 2023) • Higher PPAs cost than decreasing LCOE
Transparency	<ul style="list-style-type: none"> • Lack transparency of application plan from green premium & RECs finance • Lack transparency of cost estimation of PPAs network usage fee (KEPCO)
Power market structure & regulations	<ul style="list-style-type: none"> • High dependence on fossil fuel • Limited power-grid spare capacity & difficulty in grid expansion • Less available flexible resource (ESS & VPP) and no fair compensation

3. 해상풍력

해상풍력은 기후위기 대응을 위한 청정에너지일 뿐만 아니라 산업의 탈탄소화 실현을 위한 유력한 수단이기도 많은 주목을 받고 있다. 해외에서는 해상풍력의 보급을 가속하기 위해 복잡한 인허가 절차와 기간을 단축하는 정책을 도입하고 있지만, 국내 해상풍력 사업은 인허가 단계에서 많은 지연이 발생하고 있다. 실제 국내에 보급된 해상풍력의 실적은 부진하지만, 해상풍력 발전사업허가를 취득한 사업의 발전용량은 2023년 11월 기준으로 27.1 GW 규모이고^[14] 2030년 발전용량 목표치에 웃도는 수치이다. 발전사업허가는 전기사업법에 따라 예비사업자가 발전사업자의 지위를 갖도록 허가하는 것으로, 해상풍력사업 수행을 위해 핵심적이며 기초가 되는 허가이다.^[15] Fig. 4에서처럼 서남해권을 시작으로 해상풍력 발전사업허가 건수가 증가하고 있으며 발전사업의 사업별 용량도 매해 증가하고 있는 추세이다. 하지만, 국내 해상풍력 발전사업허가 취득 현황과 실제 보급 현황 사이에 큰 괴리가 발생하는 이유는,

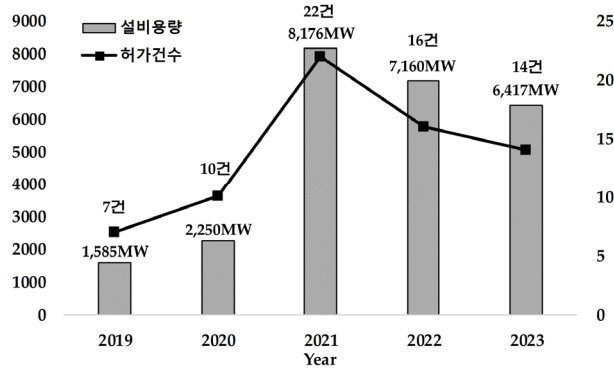


Fig. 4. Status of permitted electric utility acts of offshore wind power generation projects^[14]

발전사업허가를 받더라도 사업이 실제로 운영되기까지 복잡하고 많은 인허가 절차를 통과해야 하기 때문이다.

국내 해상풍력사업 개발 추진절차에는 크게 3가지 주요한 단계 1) 사전타당성 조사 2) 발전사업허가 3) 공유수면 점·사용허가로 나눌 수 있다. 먼저 사전타당성 조사에서는 기술적 검토(풍황 자원 측정, 전력계통 현황조사 등), 입지 검토(해양이용계획, 지반조사 등), 그리고 사회적 요소 검토(어민 및 주민 수용성 등)를 수행하여 관련 부처에 적절성 검토 결과를 받고 발전사업허가를 신청하게 된다. 이후 전기사업(발전사업허가) 인허가를 취득하게 되면 사전타당성 조사에서 검토한 자료와 육·해상 전력계통을 위한 관련 입지 및 개발 인허가를 받아 기본계획을 수립한다. 기본계획도 더불어 군사기지법, 환경영향평가법, 해사안전법 등 여러 법률에 따른 개별 협의와 공유수면 이해관계자 의견 수렴절차를 이행하여 공유수면점·사용허가를 신청하게 된다. 이후에 허가 받은 범위 내에서 자금 조달 방안, 공사 방법 등 구체적 실시계획을 작성하여 공유수면관리청으로부터 승인을 받아 최종 착공하게 된다.^[15]

개발 추진절차 중 가장 많은 사업의 불확실성을 초래하는 부분은 발전사업허가를 받고 난 뒤 나타난다. 입지 규제 사항에 대한 핵심검토가 초기에 이루어지고 입지를 확정하는 외국과 달리, 국내에서는 개별 사업자에게 핵심 항목들을 발전사업허가 취득 이후에 검토하도록 되어있다. 입지 관련 주요 개별법은 해역이용협의 및 해역이용영향평가(해양수산부), 환경영향평가(환경부), 군작전성 검토(국방부), 재해영향평가(행정안전부), 문화재지표조사(문화재청), 해상교통안전진단(해양수산부)이 있고 각각의 절차를 개별

행정기관에서 진행해야하며, 이 중 하나라도 부동의(조건부 승인) 의견이 제시된다면 다음 인허가 절차로 넘어갈 수 없다.

상기 이유와 더불어 불분명한 지방자치단체의 재량권 등 사업 지연을 발생시킬 수 있는 여러 요소가 존재하고 있어 사업의 불확실성은 크다. 현재까지의 국내 해상풍력 사업 진행 단계와 속도를 보았을 때 기존에 계획한 2030년 목표 달성은 사실상 불가능하다는 전망이 지배적이다.^[17] 하지만, 기획재정부는 2024년 1월 4일 국민토론회에서 ‘2024년 경제정책방향’을 발표하였고, 제 11차 전력수급기본계획 수립과 REC 가중치 정기 개편, 직접 PPA시 전력망 사용료 지원확대, 해상풍력 특별법 입법 추진 등 추후 수정 혹은 추가되는 정책이 예정되어 있어 국내 해상풍력사업에 긍정적 신호로 작용하길 기대한다.

4. GIS 활용 풍력발전단지 입지 분석

4.1 GIS 분석모델 및 데이터 구축

GIS를 활용하여 2024년 기준 개발 중인 국내 해상풍력 단지들에 대한 입지 분석모델을 구축하고, 분석한 입지 요소들 바탕으로 상업 발전 시기를 예측하였다. 개발사업의 시작을 나타내는 발전사업허가를 취득한 해상풍력 사업들을 대상으로 분석하였고, 풍황계측기는 설치하였지만 발전사업허가를 취득하지 못한 사업지들은 다수 포함하지 않았다. 하지만 정부 및 지자체 공공주도 대규모 해상풍력 단지는 개발 가능성이 높아 분석 대상으로 포함하였다. 2024년 기준 국내 해상풍력 사업자들에 대한 개발 현황은 전력거래소 발전소 건설사업 추진현황^[17]과 전기위원회 3 MW초과 발전사업 허가대상^[18]을 참조하여 주요 8단계(풍황계측기 계측완료, 발전사업허가 취득, 계통이용신청 완료, 환경영향평가 및 인허가, 전력입찰, 공사계획인가, 착공 및 완공)로 나누어 Table 4와 같이 분류하였다. 대부분의 사업들이 개발 초기 단계인 풍황계측기 계측, 발전사업허가 취득 및 계통이용신청 단계에 있으며 계획했던 프로젝트 기간보다 많은 지연이 발생하고 있다.

개발 프로젝트들의 지연 발생 원인과 추후 발생할 수 있는 잠재적 원인을 분석하기 위해 GIS DB를 구축하였다. 풍

Table 4. Development stages of domestic offshore wind projects

Stages	Process	No. Projects
1	Completed wind measurement	34
2	Awarded an EBL	18
3	Completed a grid connection application	43
4	Completed envir. impact assessment & permits	12
5	Completed a power bidding	2
6	Construction permit	4
7	On construction	1
8	Completed construction (Operating)	2

항, 계통 경과지 검토, 환경영향평가, 해상교통, 사업 중복 지역 검토, 군작전성 등 총 350개의 데이터가 DB에 입력되었다. 그 중 대외비, 자체 취득 데이터 등 정보공개가 민감한 데이터를 제외한 실시간 공공 데이터 231개(Vworld^[19], 해양환경정보지도^[20], Windy^[21], 문화재청^[22], 공공데이터포털^[23], MTIS^[24], KHOA^[25], 기상청^[26], Global Wind Atlas^[27], GEBCO^[28], KIGAM^[29], 국토환경성평가지도^[30], MEIS^[31], ENVBIGDATA^[32], EIASS^[33] 등)를 활용하여 분석하였다.

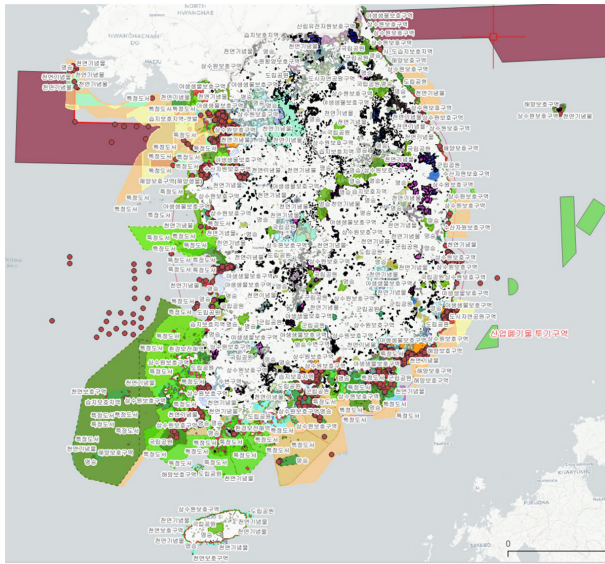
4.2 상세분류기준 설정

해상풍력 입지 분석 시 고려해야 할 주요 항목을 선정하고 세부 항목별 등급을 나누어 개발 단지들을 평가하였다. Fig. 5에서처럼 GIS 지도상에 개별 사업부지에 해당되는 항목들을 검토하고 분류하였고, 모든 항목을 Fig. 6과 같이 지도상에 나타내어 평가하였다. 세부 항목별로 개발 입지에 영향을 미치는 정도를 Table 5와 같이 1점(영향 큼), 3점(일부 영향 있음), 5점(영향 없음)으로 구분하여 등급을 나누고 항목별 점수 합산으로 해당 개발 단지의 사업 지연 정도 및 기간을 예측하였다.

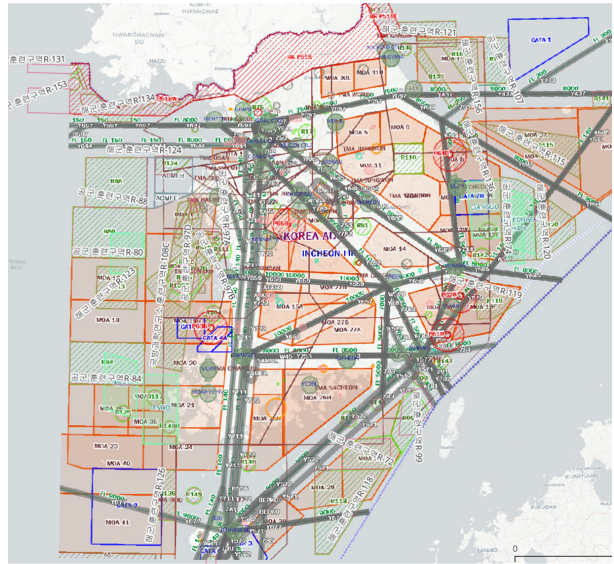
환경영향평가 항목에는 환경부의 '환경공간정보서비스'를 참조하여 환경성평가지도, 보호구역, 육·해상 생태자연도, 해양보호생물 분포 등의 데이터가 포함되어 있다. 만약 개발 사업부지에 여러 개의 환경영향평가 항목이 해당된다면 인허가 절차 중 환경영향평가 통과를 위해 많은 시간이 소요하게 되고 이는 사업 지연에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 환경영향평가 항목에 해당이 많은 개발 사업지는 1점으로 해당이 없는 사업지는 5점의 등급으로 매기게 된다.

Table 5. Assessment classification for project analysis

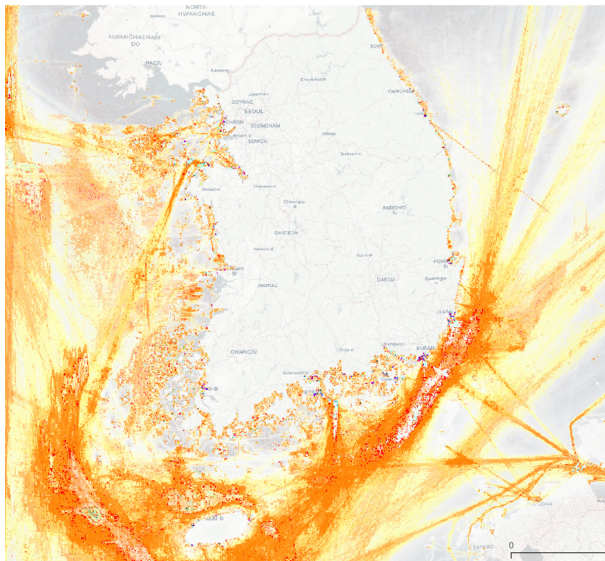
Factors	Grade (point)	Description
Project stage	1 (installed LiDAR) 3 (obtained an EBL) 5 (2-6 stages)	- Permission proces - Project location /site/stage/time - Public-led sites info. - EBL projects Total 6 categories
Integrated complex/cluster	1 (no assigned) 5 (assigned)	- Integrated complex info. Total 2 categories
Marine traffic	1 (significant impact, less than 40 km ²) 3 (partially impact, less than 80 km ²) 5 (no impact, less than 80 km ²)	- Marine/passenger/fishing traffic and route - AIS/V-pass - Vessels spec. - Main/traffic seperation route & distance Total 57 categories
Envir. impact	1 (> 4) 3 (2-3) 5 (< 2)	- Envir. regulations /ecosystem - Protection zone/species Total 96 categories
Military zone	1 (significant impact) 3 (partially impact) 5 (no impact)	- On/Offshore flight info. region/altitude/route Total 20 categories
Grid capacity	1 (no spare) 3 (planned to expand) 5 (spare capacity)	- Capacity status (province/state/city/substation) - Grid contracts status Expansion plan Total 10 categories
Fishery	1 (> 4) 3 (2-3) 5 (< 2)	- Fishing area density (seasons) - V-pass density (montly) - Fish shelter/farm/route Total 30 categories
Economic	Average of 3 categories below	
Grid distance	1 (> 50 km) 3 (20 ~ 50 km) 5 (< 20 km)	- Projects info. - Substation/joint connection/Expansion plan/power-grid - Old envir. assessment info (other projects) Total 10 categories
Water depth	1 (> 50 m) 3 (30 m ~ 50 m) 5 (< 30 m)	- Bathymetry - Water depth_GEPCO Total 8 categories
Wind resource	1 (< 6.5 m/s) 3 (6.5 ~ 7 m/s) 5 (> 7 m/s)	- Wind speed/energy density/direction (KIER & GWA) Total 9 categories



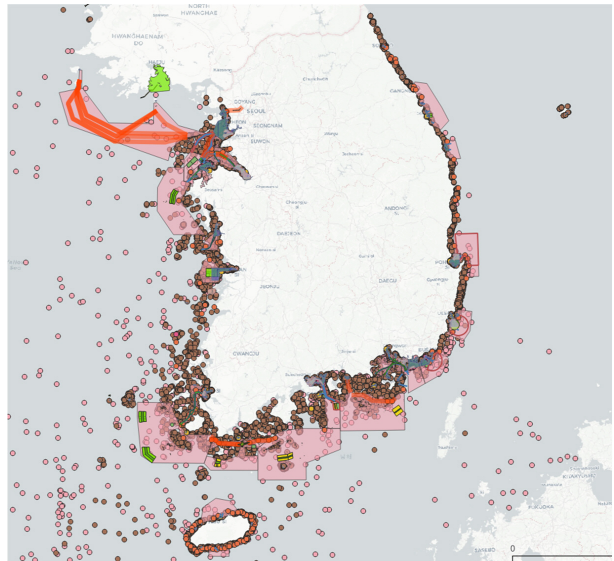
(a) On/Offshore special-purpose areas



(b) Military area & no-flight zone



(c) Marine traffic map



(d) Port/Harbour & vessel passage area

Fig. 5. Spatial data in GIS DB for site analysis

군작전성 평가 항목은 국립해양조사원을 참조하여 군경 혼련구역, 비행제한구역, 위험구역, 군작전구역 등 20개 세부 항목으로 이루어져 있다. 고도제한 등 규제 영향이 큰 지역에 사업 부지가 해당 될 경우 1점으로, 일부 영향이 있거나 합의를 통해 해결이 가능한(선례 참조) 지역이면 3점, 영향이 없는 지역이면 5점으로 등급을 나누었다.

어업 항목에는 V-pass 데이터 밀도, 어업 밀집구역(개발해 참조), 어업보호구역, 어장, 양식장 등의 데이터를 활

용하였다. 계통 여유 항목은 사업 단계 중 계통이용신청이 전인 개발 사업과 한전의 각 도별 여유용량을 참조하여 등급을 나누었다. 또한, 해상풍력 사업지 인근 집적화 단지 여부 항목도 고려하였는데, 집적화 단지 구성 여부에 따라 사업 개발 속도에 영향을 미치기 때문이다.

마지막으로 경제성 항목에는 육·해상 연계거리, 개발 단지 수심, 풍향 데이터를 바탕으로 등급을 나누었다. 풍력단지 중심점으로부터 공동접속점이나 변전소 위치까지의 직

선거리를 산출하여 20 km 거리 미만은 5점, 20~50 km는 3점, 50 km 이상의 연계거리는 1점으로 책정하였다. 수심의 경우 경제성이 높은 모노파일 설치가 가능한 수심 30 m 미만은 5점, 50 m 이상은 경제성이 낮은 부유식 해상풍력을 설치해야 함으로 1점으로 설정하였다. 또한, 평균 풍속 6.5 m/s 미만의 풍황데이터를 가지는 입지는 1점, 6.5~7.0 m/s는 3점, 7 m/s 초과는 5점으로 등급을 나누었다.

점수 합계에 따른 사업 지연 기간은 Table 6과 같이 설정하여 완공 시점을 예측하였다. 기존 국내 해상풍력 사업들의 개발 과정에서 인허가 단계별 최소 1.5년 이상이 소요된 것을 기준으로 1.5년 지연시간을 기준으로 지정하였다.

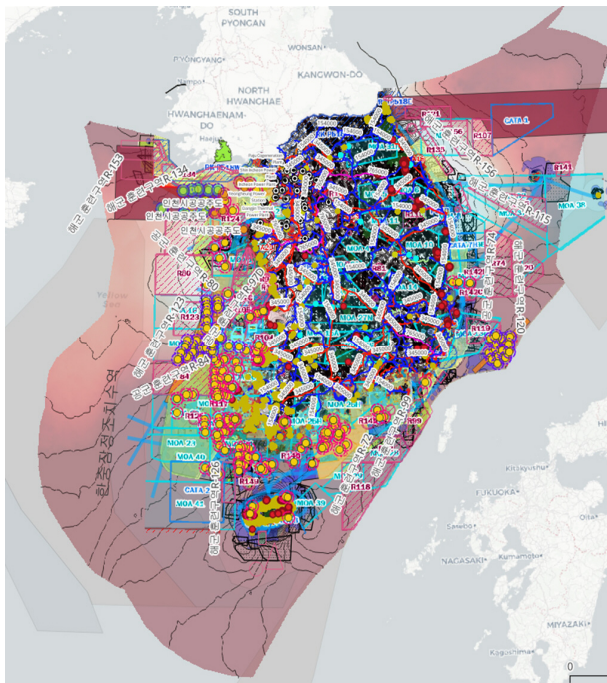


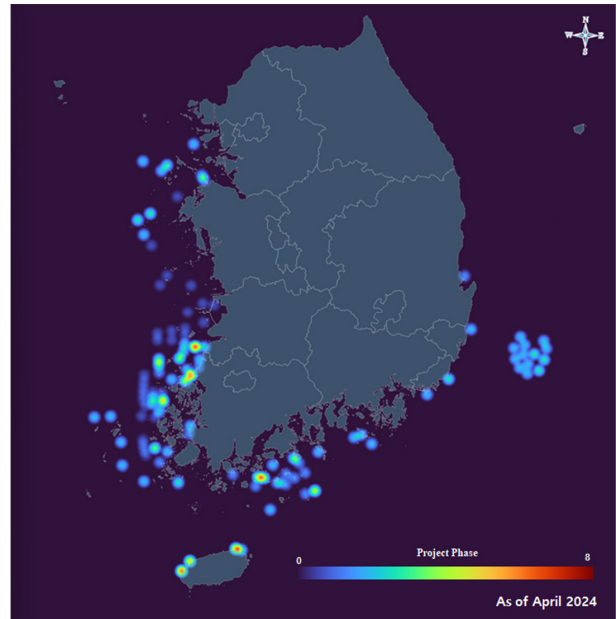
Fig. 6. Overlapped entire spatial data for site analysis

Table 6. Grade classification for project analysis

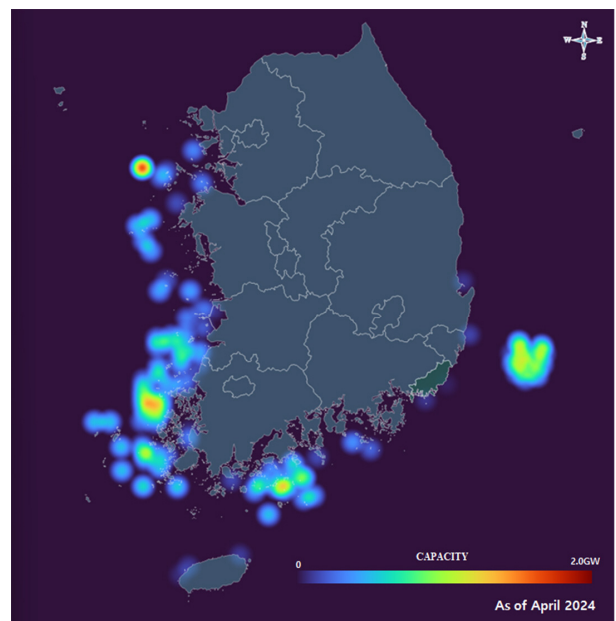
Grade	Delay period
35 - 30	-
30 - 25	1,5 year
25 - 20	3,0 year
20 - 15	4,5 year
below 15	6,0 year

4.3 국내 해상풍력 사업지 분석

GIS DB를 활용하여 국내 해상풍력 사업지의 현재 개발 진행 단계와 총 발전용량을 Fig. 7에 나타내었다. 대부분의 해상풍력 사업지들이 1~3개발 단계에 있으며 호남지방(전라남도, 전북특별자치도) 일대에 주로 위치해 있다. 또



(a) Development phases of offshore wind projects



(b) Offshore wind power generation capacity

Fig. 7. Development phase and power generation capacity of offshore wind farms in South Korea

한, 전국적으로 전라남도 및 전북특별자치도에서 발전량이 제일 많은 것으로 보이며 울산부유식 해상풍력 발전단지가 두 번째로 많은 발전용량을 개발 중에 있다.

분류 항목 등급별 해당되는 사업부지 개수를 Table 7에 정리하였다. 최근 발전사업허가를 취득한 해상풍력 사업자들에게 이슈가 되고 있는 환경영향평가 항목에서 전체 116개 사업지 중 31개 사업지만 영향이 가장 적은, 환경영향평가 통과가 용이할 것으로 판단되었다. 나머지 85개의 사업지는 협의가 필요한 조건부 통과를 받을 가능성이 높으며, 이는 프로젝트 추가 지연시간이 발생한다는 것을 의미한다. 전력계통여유율의 경우 61개 사업지에 1점의 등급을 부여하였는데, 현재 한국전력의 계통 추가보급 및 확보 계획에 따라 사업지연이 불가피한 상황으로 판단된다.

해상교통 항목에는 24개의 사업지가 인근 해상교통로와 겹치거나 영향이 클 것으로 분석되었다. 이를 위해 전라남도 등 일부 지자체에서 집적화단지 인근 사업자들 대상으로 해상교통로 확보를 위한 사업단지 조정 작업을 진행하고 있는 것으로 확인된다. 하지만 타 사업지에서는 사업자별 이해관계, 중첩영역 이슈 등으로 인한 해상교통로 확보를 위한 고려가 부족해 보인다.

이외에도 균작전성 분석, 어업, 경제성(연계거리, 수심, 풍황자원)에서 낮은 등급을 받은 사업지들이 다수 있어 인허가 단계에서 사업지연시간이 불가피하게 발생할 것으로 분석된다.

Table 7. Levelized site assessment factors

Factors	Level		
	5 (Good)	3 (Moderate)	1 (Bad)
Envir. impact	31	52	33
Marine traffic	62	30	24
Military zone	43	40	33
Grid capacity	14	41	61
Fishery	28	56	32
Integrated complex/cluster	48	-	68
Grid connection distance	35	54	32
Water depth	71	23	22
Wind resource	85	31	-

4.4 국내 해상풍력 보급량 예측

이들 항목 등급을 바탕으로 전체 사업지의 점수 합계를 Fig. 8 및 Table 8과 같이 나타내었다. 15개의 사업지를 제외한 대다수가 25~20점 대 이하 등급에 분포하고 있어 최소 3년 이상의 사업지연이 발생할 것으로 판단하였다.

이를 바탕으로 현재 개발 중인 국내 해상풍력 사업지들의 기존 완공 계획 기간에 추가 지연 기간을 적용하여 완공 시기 및 발전량을 Fig. 9와 같이 예측하였다. 2030년까지 정부에서 목표한 14.9 GW 규모의 해상풍력을 설치하기 위해서는 기존 개발계획 상 2031년에 27 GW로 달성이 가능

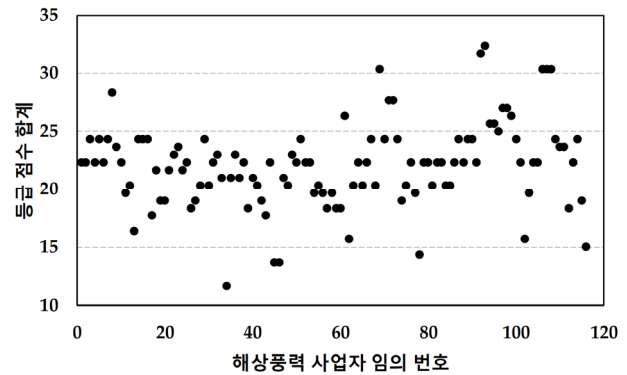


Fig. 8. Distribution of graded offshore wind projects

Table 8. Estimated delay periods of offshore wind projects in South Korea

Sum of grade	No. offshore wind projects	Delay time
35 - 30	6	-
30 - 25	9	1.5 year
25 - 20	73	3.0 year
20 - 15	23	4.5 year
below 15	5	6.0 year

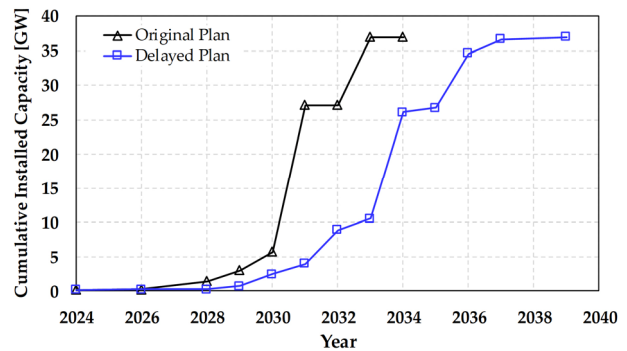


Fig. 9. Estimated cumulative installed capacity of offshore wind farms

하지만, 지연시간을 고려한 예측 모델의 경우에는 2033년에도 4.4 GW가 부족한 10.5 GW 만 설치 가능한 것으로 분석하였다. 예측 모델에 기타 공급망 이슈(해상크레인, 터빈 및 타워 생산/보급 등)를 고려하지 않아 추가 사업지연이 발생할 가능성이 있다.

완공 예정일은 기존 개발계획에서 2033년으로 목표한 것과 달리 예측 모델로는 2039년에 37 GW 설비용량이 구축 가능하며 연간 97 TWh의 발전량으로 완공할 것으로 분석하였다. 2039년까지 해상풍력을 모두 완공 한다고 해도 현재 기준 산업부문 전력사용량의 절반도 충족하지 못하는 수치이다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 해상풍력발전 사업지들의 개발 현황을 분석하고 완공 시점과 발전 보급량을 예측하고자 하였다. 사업 추진에 영향을 줄 수 있는 입지 요소들을 분류하고 이들에 따른 개별 사업지의 프로젝트 지연기간을 산출하였다.

GIS를 활용하여 2024년 기준 개발 중인 국내 해상풍력 사업지들에 대한 입지 분석과 예측 모델을 구축하였다. 사업지들의 지연 발생 원인과 추후 발생할 수 있는 잠재적 원인을 분석하기 위해 GIS DB에 풍황, 계통 경과지 검토, 환경영향평가, 해상교통검토, 사업 중복지역, 군작전성 검토 등 총 350개 데이터를 구축하였다. 이 중 200개의 데이터를 활용하여 크게 7개의 항목(환경영향, 해상교통, 군작전성, 계통여유, 어업, 집적화 단지, 경제성)으로 분류하고 사업지별 등급을 나누었다.

전체 116개 해상풍력 사업지 중 15개의 사업지를 제외한 사업지에서 대부분 최소 3년 이상의 사업지연이 발생할 것으로 분석하였다. 인허가 단계에서 중요한 요소인 환경영향평가, 해상교통, 군작전성 및 전력계통 여유에서 많은 사업지들이 제약조건을 가지고 있어 협의와 해결을 위한 추가 지연시간이 불가피할 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 기존 개발계획 완공 시점과 보급량을 비교하였는데, 2031년에 27 GW 규모의 해상풍력 보급 계획과 달리 분석 모델에서는 2039년 완공(누적 설비용량 37 GW, 연간 발전량 97 TWh) 예측하였다.

본 연구는 국내 해상풍력발전의 현실적인 개발 소요시간과 보급량을 개략적이거나 예측하고자 자체 기준과 분석 모델을 바탕으로 분석하였다. 해상풍력발전 사업의 크기, 복잡성 및 소요 자원의 규모가 크기 때문에 해당 분석 모델로 프로젝트의 지연시간을 정확하게 예측하기에는 무리가 있지만, 사업입지 선정 시 참고 자료로 사용될 수 있기를 기대한다. 또한, 이러한 지연시간이 발생되지 않도록 체계적인 정책과 기준에 대한 연구가 좀 더 체계적으로 이루어지기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 지원을 받아 수행된 2024년도 재도전성공패키지 사업(20242497)의 일환으로 수행 되었습니다.

References

- [1] Lee, S.M., and Kim, C.H., 2021, "Study on the implications of Energy transition policy comparing to major countries", Korea Energy Economics Institute, 1-88, https://www.keei.re.kr/pdfOpen.es?bid=0001&list_no=82095&seq=1.
- [2] Ministry of Foreign Affairs & Ministry of Environment, "The Republic of Korea's enhanced update of its first nationally determined contributions", Notice No. 21-1101, https://www.mofa.go.kr/www/brd/m_4080/view.do?seq=371966&page=19.
- [3] The Climate Group, 2024, "RE100 annual disclosure report 2023", <https://www.there100.org/our-work/publications/re100-2023-annual-disclosure-report>.
- [4] Korea Energy Agency, 2023, "K-RE100 Introduction", Accessed 29 March 2024, https://www.knrec.or.kr/biz/introduce/new_policy/intro_kre100.do?gubun=A.
- [5] Monthly Electrical Journal, "Is industrial complex able to be a key for activating RE100", 2022.03.15., <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=4487>.
- [6] International Energy Agency (IEA), 2022, "Advancing decarbonisation through clean electricity procurement",

- OECD Publishing, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4a07d1b5-1beb-4611-874d-7acd4f21d9eb/AdvancingDecarbonisationthroughCleanElectricityProcurement.pdf>.
- [7] Monthly Electrical Journal, “RE100, Which way to participate?”, 2023.01.12., <http://www.keaj.kr/news/articleView.html?idxno=4866>.
- [8] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023, “The economic impact analysis of the 10th Master Plan for long-term electricity”, Notice No. 2023-036, <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCLc01b2801b/68162/view>.
- [9] Korea RE100 Alliance, RE100 Information Platform, “Korean RE100 membership status”, Accessed 30 March 2024, https://www.k-re100.or.kr/bbs/board.php?bo_table=sub2_2_2.
- [10] Korea Electric Power Corporation, “2021 Korea electric power statistics”, https://home.kepco.co.kr/kepco/KO/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardSeq=21057408&boardCd=BRD_000099&menuCd=FN05030103&parmScrpSeq=0&categoryCdGroup=®DateGroup2=.
- [11] Korea RE100 Alliance, 2024, “Analysis of global RE100 fulfillment major trends”, Session 3, 2024 RE100 Technical Strategy Conference for global decarbonization.
- [12] Solutions for Our Climate (SFOC), 2022, “Accelerating corporate renewable electricity procurement in Korea”, <https://forourclimate.org/hubfs/Accelerating%20Corporate%20Renewable%20Electricity%20Procurement%20in%20Korea.pdf>.
- [13] BloombergNEF, 2023, “Levelized cost of electricity 2023 H1”, <https://about.bnef.com/blog/2h-2023-lcoe-update-an-uneven-recovery/>.
- [14] Electric Power Journal, “Obtained electric utility act of over 6-GW capacities of offshore wind power generation projects in this year”, 2023.12.27., <https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=33613>.
- [15] Solutions for Our Climate (SFOC), 2023, “Permits problem and solution for offshore wind”, <https://forourclimate.org/sub/data/koreas-offshore-wind-permitting>.
- [16] Money Today, “Target achievement 1%...is the investment amount of tens of trillions won by wind going back?”, 2024.02.24., https://m.mt.co.kr/renew/view.html?no=2024022312144644443&MVJ#_enliple.
- [17] Korea Power Exchange, 2024, “2023 4th quarter power plant construction status”, https://www.kpx.or.kr/board.es?mid=a10403040000&bid=0040&act=view&list_no=72316.
- [18] Electricity Regulatory Commission, “Over 3MW power generation business permit register”, https://www.korec.go.kr/bbs/bbsView.do?table_no=710&bbs_sntnc_no=410.
- [19] V-world, Ministry of Land, Infrastructre and Transport, Accessed 29 March 2024, https://www.vworld.kr/v4po_main.do.
- [20] MEIS, Ministry of Oceans and Fisheries, Accessed 29 March 2024, <https://www.meis.go.kr/map/oemsBaseMap.do>.
- [21] WINDY, Windyty, SE, Accessed 29 March 2024, <https://www.windy.com/ko/-%EB%A9%94%EB%89%B4/menu?waves,36.949,121.690,5>.
- [22] Korea Heritage Service, Ministry of Culture, Sports, and Tourism, Accessed 29 March 2024, <https://english.khs.go.kr/cha/idx/SubIndex.do?mn=EN>.
- [23] DATA.GO.KR, Ministry of the Interior and Safety, Accessed 27 March 2024, <https://www.data.go.kr/>.
- [24] MTIS, Korea Maritime Transportation and Safety Authority, Accessed 29 March 2024, <https://mtis.komsa.or.kr/mn/view>.
- [25] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Accessed 29 March 2024, <https://www.khoa.go.kr/eng/Main.do>.
- [26] Korea Meteorological Administration, Accessed 29 March 2024, <https://www.kma.go.kr/neng/index.do>.
- [27] Global Wind Atlas, Accessed 29 March 2024, <https://globalwindatlas.info/en>.
- [28] GEBCO, British Oceanographic Data Centre, Accessed 29 March 2024, <https://www.gebco.net/>.
- [29] KIGAM, Korea Institute of Geoscience and mineral resources, Accessed 29 March 2024, <https://www.kigam.re.kr/english/>.
- [30] ECVAM, Ministry of Environment, Accessed 29 March 2024, <https://ecvam.neins.go.kr/board/guide/guideList.do>.
- [31] MEIS, Ministry of Oceans and Fisheries, Accessed 29 March 2024, <https://www.meis.go.kr/portal/main.do>.
- [32] ENVBIGDATA, Water Industry Company, Accessed 29 March 2024, <https://www.bigdata-environment.kr/user/main.do>.
- [33] EIASS, National Institute of Environmental Research, Ministry of Environment, Accessed 29 March 2024, <https://www.eiass.go.kr/>.