Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 1145-1156, vol. 17, no. 6, Dec. 31. 2022, t. 116, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2022.17.6.1145

# 서남해 연안 해상풍력 발전단지 지리적 적합지 선정 및 최적배치에 관한 연구

김중호* · 류건화** · 손홍철* · 김영곤*** · 문채주****

# A Study on the Optimal Site Selection by Constraint Mapping and Park Optimization for Offshore Wind Farm in the Southwest Coastal Area

Jung-Ho Kim* · Geon-Hwa Ryu** · Hong-Chul Son* · Young-Gon Kim*** · Chae-Joo Moon****

요 약

대규모 해상풍력단지 개발을 위한 입지 적합성을 효과적으로 확보하기 위해서는 개발로 인한 환경영향을 최소화하고 사회적·생태적·경제적 핵심가치에 대한 편익 상충에 대한 분석이 필수적이다. 또한 해양공간계획상 타 용도구역과 충돌하지 않도록 입지 적정성에 대한 사전검토가 반드시 선행되어야 하며, 추가로 전남 해역 인근의 풍력자원을 포함한 국지적인 기상 특성 분석도 사업타당성 조사 이전에 수행되어야 할 필요가 있다. 이에 영광군 안마도 인근 왕등여에 설치된 기상탑의 관측자료를 활용하여 풍력자원분석을 수행하였고, 해상풍력단지 입지 관련 지리적 제약조건을 배제한 후 최적 입지구역을 선정하였다. 또한, 국지적 풍력자원 특성에 적합한 풍력단지 최적배치 결과를 WindSim 기반으로 도출하여 연간발전량을 산출하였으며, 향후 해상풍력 프로젝트의 입지발굴 및 적합지 선정에 기초연구자료로 활용하고자 한다.

ABSTRACT

In order to effectively secure site suitability for the development of large-scale offshore wind farms, it is essential to minimize the environmental impact of development and analyze the conflicts of benefit between social, ecological, and economic core values. In addition, a preliminary review of site adequacy must be preceded in order not to collide with other used areas in the marine spatial plan. In addition, it is necessary to conduct local meteorological characteristics analysis including wind resources near Jeollanam-do area before project feasibility study. Therefore, wind resource analysis was performed using the observation data of the meteorological mast installed in Wangdeungnyeo near Anmado, Yeonggwang, and the optimal site was selected after excluding geographical constraints related to the location of the offshore wind farm. In addition, the annual energy production was calculated by deriving the optimal wind farm arrangement results suitable for the local wind resources characteristics based on WindSim SW, and it is intended to be used as basic research data for site discovery and selection of suitable sites for future offshore wind farm projects.

키워드

Optimal Site Selection, Park Optimization, Offshore Wind Farm, ArcGIS, WindSim
적합지 선정, 최적 배치, 해상 풍력 단지, ArcGIS, WindSim

* 국립목포대학교 대학원(jhkimd@naver.com, shc8710@naver.com)
** OWC (geonhwa.ryu@owcltd.com)
*** (사)에너지밸리산학융합원 (ygkim@eiuca.or.kr)
**** 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소
· 접 수 일 : 2022. 08. 30
· 수정완료일 : 2022. 10. 21
· 게재확정일 : 2022. 12. 17
· Received : Aug. 30, 2022, Revised : Oct. 21, 2022, Accepted : Dec. 17, 2022
· Corresponding Author : Chae-Joo Moon
Smart Grid Institute, Mokpo National University
Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

## Ⅰ. 서 론

우리나라 정부는 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해 친환경·저탄소 기반의 사회로 전환하고자하는 전략을 제시했다[1]. 특히 산업·경제 분야 구조의 저탄소화를 추진하기 위해서는 에너지 전환이 필수적이며, 이는 곧 신재생에너지 활성화와 직결되어 마이크로그리드 구축 등 재생에너지 자원의 활용이 요구된다. 한편, 태양광과 육상풍력은 부지 확보문제, 경제성, 주민수용성 등 사회적 민원 이슈 고려 시 해상풍력에 비해 상대적으로 비효율적이라는 평가를 받고 있기 때문에 해상풍력이 신 에너지전환의 대안으로 급부상하고 있다[2-4].

육지로부터 멀어질수록 해당 해역에서는 더 강한 바람이 지속적으로 발생하기 때문에 풍부한 풍력자원을 바탕으로 한 잠재 에너지를 확보할 수 있지만 수심이 50m를 초과하는 경우 일반적으로 부유식 해상풍력시스템을 적용해야 하는 문제가 발생한다[5-6].

결국, 해저케이블 연장에 대한 비용, 기술적 미완성도, 사업경제성 확보 미흡 등의 이슈로 여전히 투자자와 사업자, 연구자 간의 의견 충돌이 발생하게 된다. 반면, 많은 트랙레코드를 확보한 고정식 해상풍력은 국내에서 신안 8.2GW 대규모 해상풍력단지 프로젝트를 중심으로 진행되고 있으며, 북쪽으로 영광과 부안이, 남쪽으로는 진도, 완도, 고흥 등에서도 다수의 개별 상업 프로젝트가 진행되고 있다. 2021년 11월에는 해양수산부에 의해 전라남도의 해양공간관리계획안이 수립되었고, 2022년 5월에 관리계획이 정식 고시되었다. 해양공간관리계획은 해양 이용개발의 다양화 및 부처별 해양공간 선점경쟁 가속화에 의한 해양생태계 가치 저하를 방지하고, 해양공간을 체계적·계획적으로 이용할 수 있도록 정부가 이용, 개발, 보전방향을 설정하는 것이 목적이다[7-8].

각 광역지자체의 해양용도구역은 어업활동보호구역, 골재·광물자원개발구역, 에너지개발구역, 해양관광구역, 환경·생태계관리구역, 연구·교육보전구역, 항만·항행구역, 군사활동구역, 안전관리구역의 9개 세부 구역으로 분류되어 관리되어진다. 해상풍력발전과 같은 전원개발사업은 에너지개발구역에 해당되며, 기존에 발전사업허가 및 공유수면 점·사용허가가 취득된 사업영역에 한해 지정되어 있다. 산업부의 '해상풍력 발전방안'에 따라 지자체 주도 집적화단지 지정구역과 민간주도 사업구역에 대해 추가적으로 에너지개발구역 지정이 가능하며, 영광 낙월해상풍력, 신안 압해해상풍력 등이 지정되어 있다. 이처럼 해상풍력발전이 진행될 에너지개발구역은 심사에 의해 추가적으로 지정될 수 있으며, 이때 타 용도구역과 복합 이용 시 이해관계 충돌 여부, 환경·생태학적 영향 여부, 어민과의 갈등 여부가 중점이 될 것으로 보이기에 지리적·사회적·환경적으로 최적의 사업구역을 선정하는 것이 중요하다. 이렇게 선정된 사업구역 내에서 연간발전량을 가장 많이 확보할 수 있는 발전기 기종과 배치 방법 검토를 통해 사업 경제성을 최대화할 수 있어야 한다[9-11].

본 연구에서는 2010년 영광군 안마도 인근 낙월면 왕등여에 설치한 해상풍력자원조사용 기상탑의 관측자료를 활용하여 인근 해역의 국지적 풍력자원 특성을 분석하였다. 이어 한국지질자원연구원의 해저지질도 등 문헌자료와 목포대학교의 해저지반조사 자료, 등수심선 분포, 각종 입지제한구역(환경·군사·어업 등) 공간자료를 토대로 왕등여 인근에 해상풍력단지가 입지할 수 있는 최적 구역을 ArcGIS 기술로 선정하여 가상의 해상풍력단지를 구성하였다. 풍력단지 최적배치에 따른 연간발전량은 상용 CFD 소프트웨어인 WindSim을 활용하여 산출하였으며, 터빈 기종에 따른 발전량 민감도 분석도 수행하였다.

본 논문의 2장에서는 연구방법과 분석자료(관측위치 및 장비, 문헌 및 측정자료)에 대해 소개하고 3장에서는 풍력자원 관측자료를 분석하며, 4장에서는 발전단지 입지선정 과정을 소개한다. 5장에서는 발전단지 최적배치에 따른 연간발전량 산출하며. 이를 기반으로 터빈 기종별 민감도 분석을 수행하고 평가하여 6장에서 결론을 맺는다. 해당 연구결과는 향후 사업자들에게 요구되는 해상풍력단지 입지분석과 발전단지 구성 시뮬레이션의 기초자료 또는 가이드라인으로써 그 활용성을 제고하고자 한다.

## Ⅱ. 연구방법 및 분석자료

### 2.1 연구대상지역 및 관측장비

전남 영광군 낙월면 석만리에 위치하는 왕등여 바위섬은 동쪽으로 안마도와 8.6km, 남쪽으로 송이도와

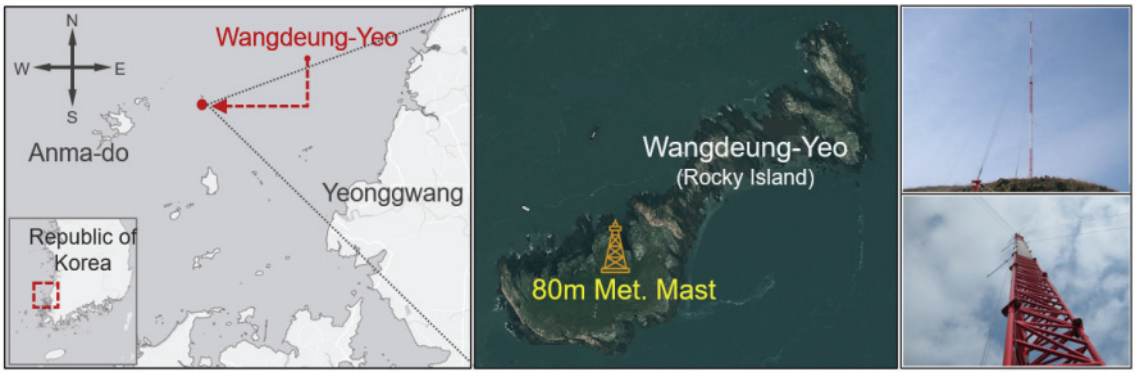


그림 1. 왕등여 위치 및 기상탑 전경
Fig. 1 The location of Wangdeungyeo rocky island and view of meteorological mast

7.8km 가량 떨어져 있다. 왕등여 기준 5km 반경 해역은 최대 수심 20m로 분포되어 있으며, 평균 15m 수심대의 해역으로 구성되어 있다. 왕등여 기상탑은 해발고도 기준 35m 지점에 설치되었으며 기상탑 높이는 80m에 달한다. 기상탑 유형, 센서의 종류 및 설치 위치는 표 1과 같다.

표 1. 기상탑 설치 유형 및 센서 종류
Table 1. Meteorological mast installation types and sensor types

| Item | Contents | |
|---|---|---|
| Type | Guyed Lattice | |
| Height [m] | 80 | |
| Sensor [m] | Anemometer | 80, 70, 60, 40 |
| | Wind Vane | 78, 58, 38 |
| | Temperature | 2 |
| | Air Pressure | 2 |
| Site Elevation [m] | 35 | |
| Angle Position [ °] | 120 | |

### 2.2 연구방법 및 자료

본 연구의 궁극적인 목적은 왕등여 인근의 해상풍력 단지 후보지역을 선정하고 최대 연간발전량을 산출할 수 있는 단지배치를 통해 최적의 프로젝트 경제성을 확보하는 시뮬레이션 결과를 도출하는 것이다.

먼저 왕등여 기상탑 관측자료와 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 해상도 30m이 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 1초 자료를 활용하여 WindSim 시뮬레이션 결과를 산출한다. 기상탑 관측자료는 2010년 2월부터 2012년 7월까지 30개월이며, 10분 평균자료가 모델에 입력된다. 입력되는 관측자료의 경우, 관측기간이 장기화될수록 분석결과의 불확실성을 현저히 감소시킬 수 있기 때문에 프로젝트 분석 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있다는 장점이 있다[12-13].

WindSim에 의한 기본 분석영역 작성과 기상자원 분석 결과를 기반으로 풍력단지를 구성할 구역을 선정해야 한다. 이는 각 부처 또는 연구기관에서 배포하거나 저자가 직접 구성한 해상풍력 입지가능구역 공간자료를 기반으로 추출할 수 있으며, 왕등여 인근해역에 직접적인 영향을 줄 수 있다고 판단되는 주변 타 사업자 프로젝트 진행 구역, 국립공원, 군사훈련 및 작전구역, 생태계보호구역, 양식장, 수심, 여객항로 등이 입지가능구역 선정에 고려된다.

선정된 입지가능구역에 대한 해저지질 및 지반 검토를 수행한다. 2009년 12월, 왕등여 북동쪽 51도 방향으로 9km 이격된 1.1km×1.1km 해역에 진행된 해저지질조사 자료와 한국지질자원연구원에서 배포하는 국내 연안해역 퇴적물입도 및 유형분포도를 활용하였다. 해저지질 및 지반, 퇴적물 유형분포 검토는 향후 어떠한 기초하부구조물을 선택해야 하는지, 또 기본 실시설계 과정에서 정확한 풍력터빈 위치를 선정할 때 면밀히 고려해야 하는 부분이기 때문에 필수적으로 수행되어야 한다[14-16].

최종 해상풍력 입지가능구역으로 선정된 구역에 대해 각 풍력터빈 제원별로 일정 규모의 풍력단지 설비용량 대비 최적의 발전량을 산출할 수 있는 단지배치 민감도 분석이 마지막으로 진행된다. 풍력터빈 제원은 두산에너빌리티사의 DS205-8MW, Vestas사의

V174-9.5MW, Siemens-Gamesa Renewable Energy의 SG 8.0-167DD 모델이 활용되었다.

연구절차는 그림 2와 같이 진행하였으며 요약하면 다음과 같다. ① 왕등여 기상탑 관측자료 및 지형자료를 확보하여 WindSim 시뮬레이션을 진행한다. ② 환경부, 해양수산부, 또는 각종 공공/연구기관에서 배포하는 사회적·환경적 입지고려사항을 검토하여 해상풍력단지가 입지할 수 있는 지리적 적합지를 ArcGIS 툴 기반으로 선정한다. ③ 해저지반 및 지질조사, 퇴적물입도 및 유형분포도 분석을 통해 풍력터빈 배치 시 해저지반 관련 이슈사항이 발생할 가능성이 없는지 검토한다. ④ 최종적으로 선정된 해상풍력 입지가능구역에 대해 여러 기종의 풍력터빈 제원을 적용하여 최적배치 시뮬레이션을 수행하고, 각 결과에 대한 민감도 분석 결과를 검토하여 최상의 시나리오를 도출한다.

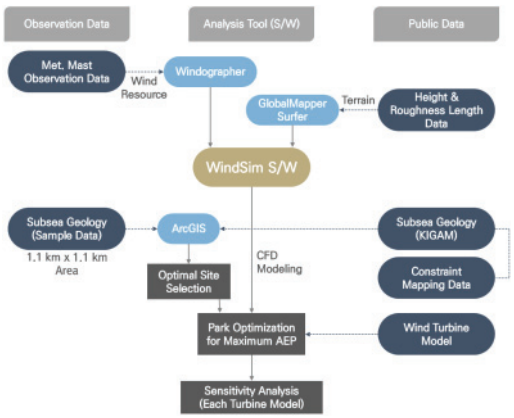


그림 2. 해상풍력 최적입지구역 선정 연구 분석절차
Fig. 2 An analysis procedure for selecting the optimal site for offshore wind farm

## III. 왕등여 풍력자원 분석

### 3.1 풍력자원 특성 분석

왕등여 기상탑 관측값에 의한 국지적 풍력자원 특성을 분석하기 위해 30개월 기간 동안의 기상자원 자료를 분석하였다. 자료회수율은 99.78%로 해당기간 동안 데이터 수집 오류 및 결측값이 거의 존재하지 않은 우수한 데이터 품질을 나타냈다.

그림 3에 왕등여 기상탑의 월별 평균 풍속 변동 특성을 나타내었다. 전체 기간 평균 풍속은 80m 고도 기준 6.92m/s로 나타났고, 특히 2010년 12월에는 월평균 풍속이 9.78m/s로 12월의 월별 평균 풍속이 가장 높게 나타났다. 특히 2010년 9월에는 최대 순간 풍속이 32m/s까지 기록되었는데, 당시 제 7호 태풍 곤파스(KOMPASU)가 안마도 서쪽을 통과하면서 왕등여가 위험반원에 중첩되었기 때문으로 판단된다[17].

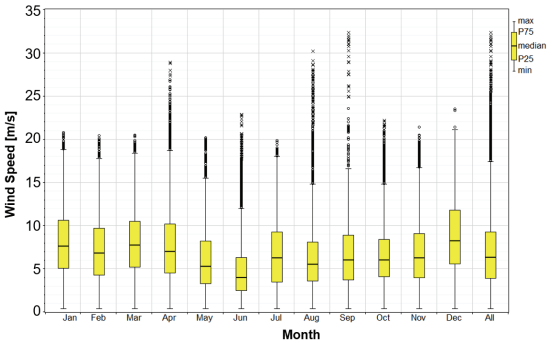


그림 3. 왕등여 인근 80m 월별 평균 풍속 변동 특성
Fig. 3 The characteristics of monthly averaged wind speed change at 80m height near the Wangdeungyeo

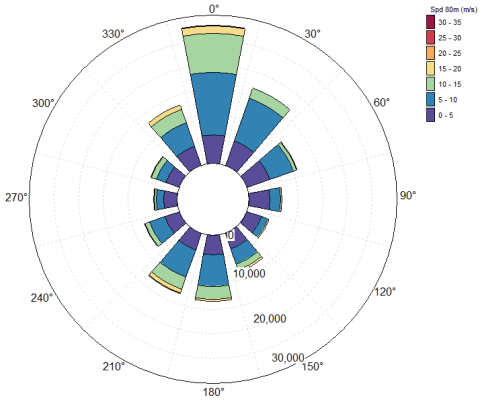


그림 4. 왕등여 기상탑 78m 평균 풍향 분포
Fig. 4 The distribution of averaged wind direction at 78m height of the Wangdeungyeo meteorological mast

그림 4에 주풍 방향 등 바람장미에 의한 풍향 분포를 나타내었다. 전체적으로 북풍 계열의 바람의 아주 우세한 형태로 나타났으며, 따라서 향후 풍력단지 배치

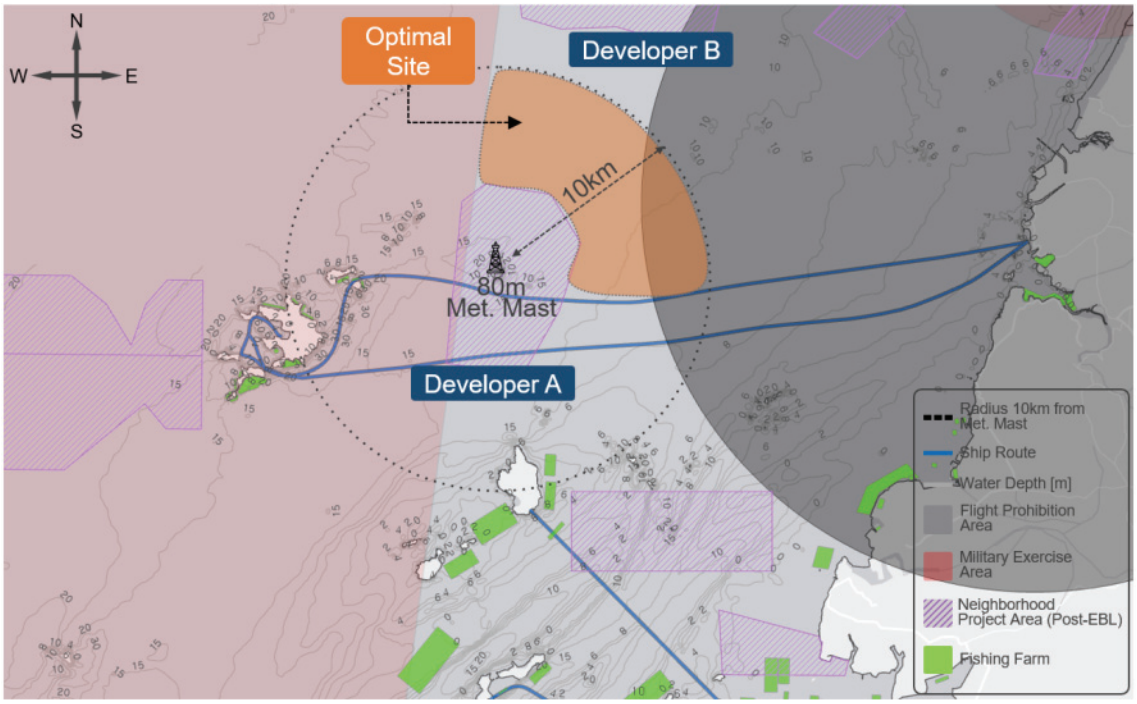


그림 5. 해상풍력단지 우선검토 대상지역 1차 선정 결과
Fig. 5 Results of the first selection of areas to priority review of offshore wind farm

시 남북방향으로 터빈 간 이격거리가 예상발전량 산출에 있어 중점적으로 검토되어야 할 부분이라고 보여진다.

프로젝트에 검토될 풍력터빈 모델 선정 시 난류강도와 극한풍속에 대한 분석이 필수적으로 선행되어야 한다. 난류강도는 단기풍황관측에 의한 결과라고 할 수 있고 극한풍속은 장기데이터에 의한 결과라고 할 수 있다. IEC61400-1에서는 난류강도와 극한풍속에 의한 터빈 등급을 분류하고 있으며, 프로젝트를 진행하고자 하는 지역의 난류특성을 분석하여 이에 적합한 터빈을 선정하길 권장하고 있다[18].

왕등여 기상관측에 의한 15m/s 기준의 Representative 난류 강도는 0.1006으로, C등급의 저난류형 터빈이 적합하며, 50년 재현주기의 극한풍속의 경우, 38.94m/s가 산출되어 Ⅱ 또는 Ⅲ 등급의 풍력터빈 모델이 권장된다. 따라서 해당 해역의 풍력터빈 등급은 고풍속 위주의 Ⅰ 등급의 풍력터빈 보다는 $\text{Ⅱ}_{\text{C}}$, $\text{Ⅲ}_{\text{C}}$, 또는 S가 적합할 것으로 판단된다.

## Ⅳ. 해상풍력 입지가능구역 선정

### 4.1 우선검토대상지 선정

해상풍력 입지가능구역을 선정하기 위해서는 통상적으로 20~30개 내외의 제한사항 포함여부를 검토해야 한다. 국립공원, 생태계보호구역, 보호대상생물 서식지 등 환경·생태계 관련 보호구역과 군작전구역, 군사훈련구역 등 군사활동 관련 구역, 그리고 양식장, 유조선 통항금지해역, 해상교통관제구역, 조업밀집구역 등 어업과 선박관련 구역 등 다양한 요소를 프로젝트 진행 이전에 면밀히 검토해야 한다. 사업자가 해상풍력 프로젝트를 계획하고 진행함에 있어 사업지연의 가장 대표적인 원인이 이러한 제약조건에 대한 인허가 취득 문제이기 때문이다. 따라서 각 개별법에 의한 규제사항을 잘 검토하여 행정적 또는 사회적 제약이 있는지 충분히 파악한 후 프로젝트를 진행해야 한다.

본 연구 대상지역인 영광군 왕등여 인근에는 그림 5에 나타난 바와 같은 입지제약조건들이 존재하며, 군사훈련구역(분홍색), 양식어업(연두색), 발전사업허가를

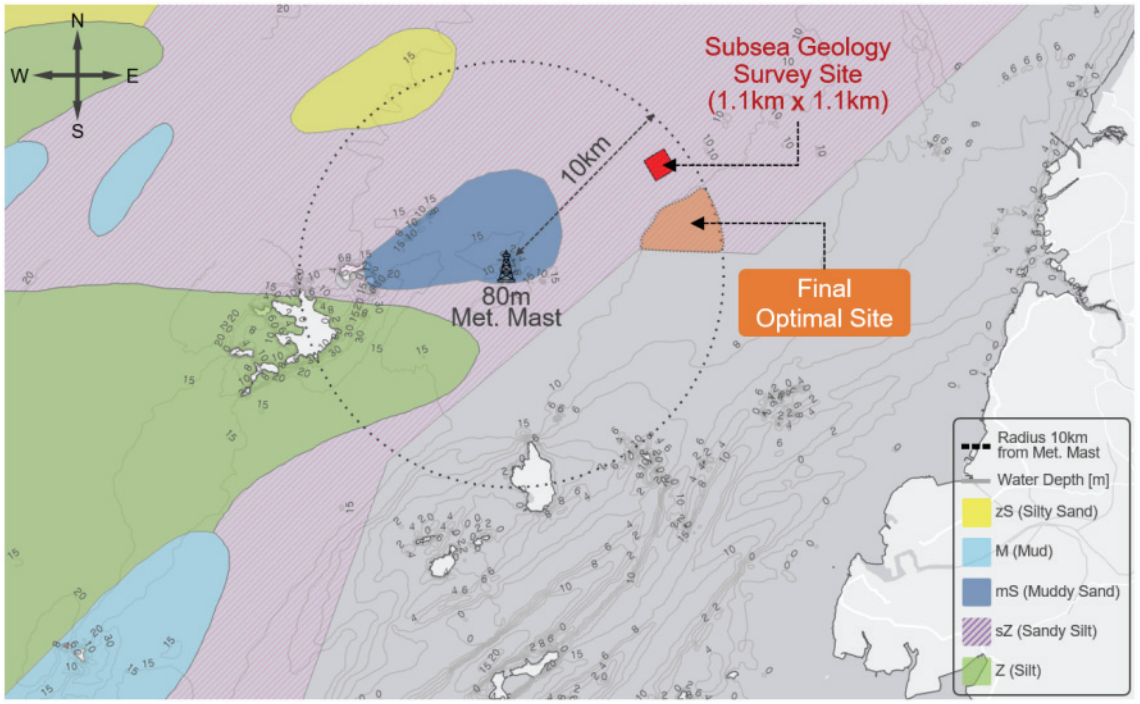


그림 6. 해저지반 종류 분포와 해상풍력단지 최종 입지대상지역 선정 결과
Fig. 6 Distribution of subsea geology types and results of final site selection for offshore wind farm

취득한 인근 타 발전사업구역(보라색), 계마항과 안마도를 운항하는 여객선 항로(파란 실선) 등이 있는 것으로 파악된다. 기상관측지점으로부터 최대 10km 이격된 곳까지 풍력터빈 설치가 가능하기에 80m 왕등여 기상탑으로부터 10km의 반경을 나타내어 해상풍력단지가 입지할 수 있는 구역을 검토하고자 하였다. 기상탑의 서쪽 해역(분홍색 영역)은 군사훈련에 의한 비행제한구역으로 지정되어 있기 때문에 발전사업을 진행하기 위해서는 국방부 및 인근 군부대와의 사전 협의가 반드시 필요하다. 이에 왕등여 기상탑을 기준으로 왼쪽 반원은 입지 가능구역에서 배제한 후 오른쪽 반원 영역만을 고려하고자 하였다. 기상탑을 포함한 10km 반경의 가운데 해역은 354MW 규모의 타 사업자의 프로젝트가 진행 중이며(Developer A), 2022년 착공을 목표로 하고 있다. 또한, 기상탑 10km 반경 원을 벗어나 북쪽으로는 30MW 전북 서남권 실증단지에 이은 시범단지(400MW, Developer B) 영역이 위치하고 있다. 타 사업자와 중첩되지 않는 사업영역을 확보하고자 하였는데 남쪽과 남동쪽으로는 전남 해양공간관리계획에 의해 어업관리 보호구역으로 지정되어 있다. 이 때문에 지자체 및 수협, 주변 어민들과의 갈등이 커질 수 있기 때문에 그림 5에 나타난 기상탑 북동쪽 일부 영역(주황색 영역)을 1차 우선 검토대상지로 선정하였다.

### 4.2 해저지반 및 퇴적물유형 검토

사회적·환경적 우선 검토대상지를 검토한 후, 해저지반조사 결과를 기반으로 더 세부적인 해상풍력 입지가능구역을 추출하고자 하였다. 2009년 12월, 1.1km×1.1km 소규모 영역에 대해 실시한 해저지반조사 결과와 한국지질자원연구원에서 제공하는 국내 해저지질 및 퇴적물유형분포 자료를 종합하여 분석하였다.

그림 6에 나타난 적색 정사각형 영역이 실제 해양조사가 진행되었던 영역이며, 각 꼭지점과 중앙 지점에 해당하는 5개 지점에 대해 시추조사가 수행되었다. 해저지반부터 약 50m 깊이까지 구성되는 해성 퇴적토층에는 대부분 실트질 모래, 실트섞인 모래, 실트질 점토 또는 점토질 실트로 확인되었다. 이후 60~70m부분에

분포하는 풍화토층은 실트질 모래로 구성되었고 그 아래로는 풍화암과 연암층이 순서대로 나타났다. 한국지질자원연구원에서 제공하는 해저지질도 상에서는 시추지역을 포함한 인근 해역 해저지반에 대해 모래질 실트라고 표현하고 있다. 기상탑 인근 해저지반은 점토질 모래라고 표현하고 있으며 안마군도를 포함한 기상탑 서쪽 해저지반은 대부분 실트로만 구성되어 있다고 설명하고 있다. 위 자료들을 검토한 결과 그림 5에서 선정한 우선 검토대상지역은 모래와 실트가 섞인 해저지반으로 구성되어 있다고 판단되었다.

### 4.3 입지가능구역 선정

사회적·환경적 검토대상지역과 해저지반조사 결과 및 문헌자료를 검토한 후, 최종 해상풍력 입지가능구역을 선정하고자 하였다. 풍황분석 결과, 주풍방향이 북풍 또는 북북서풍인 점을 감안하였을 때 기상탑의 정북방향 영역에 해상풍력단지를 구축한다면 프로젝트 B에 의한 외부후류를 직접적으로 받게 되고, 풍하측에 위치하게 됨에 따라 왜곡된 또는 저감된 풍속으로 인해 출력량에도 많은 손해를 받을 수 있다[19].

또한 본 풍력단지의 후류로 인해 프로젝트 A 역시 경제적인 손실을 받게 되므로 사업자간의 갈등 소지도 충분히 발생할 수 있다. 이러한 리스크를 최소화하기 위해 기상탑의 정북쪽이 아닌 북동쪽 또는 동쪽으로 후보지역을 선정하고자 하였고, 프로젝트 B의 후류 회복구간을 고려하여 그림 6의 주황색 영역에 최종적인 입지가능구역을 선정하였다. 이는 등심선을 따라 입지가능구역을 선정함으로써 갑작스런 수심상승에 의한 설계 리스크도 고려한 결과라고 할 수 있다.

## Ⅴ. 해상풍력단지 최적배치 및 발전량 산출

### 5.1 해상풍력단지 최적배치

해상풍력단지 최적배치 시 기준 터빈은 국내에서 가장 규모가 큰 두산에너빌리티의 DS205-8MW 모델로 선정하였다. 추가로 외산 터빈 기종들과의 연간발전량과 이용률에 대한 민감도 분석을 수행한다.

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) 기반의 WindSim 분석 시 모델 설정으로는 수평해상도 120m에 따른 3,197,580개의 격자 설정, 30도 간격의 12 방위 500회 Iteration 수행 및 전 방위 수렴, 그리고 난류모델로는 식 (1), (2), (3)과 같이 Standard k-epsilon 모델을 활용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t}+U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

$$U_i=\overline{U_i}+u_i \quad (2)$$

$$\overline{U_j}\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i}\right)-\rho\overline{u'_i u'_j}\right] \quad (3)$$

그림 7과 같이 터빈 간 이격거리는 주풍방향과 비주풍방향으로 구분하였으며, 주풍계열인 남북방향(A)으로는 DS205-8MW 모델 기준 7D, 동서방향(B)으로는 5D로 설정하였다. 4.3절에서 설정한 입지가능구역의 면적을 고려하여 풍력단지 규모는 65MW 내외로 정하였으며, 8MW 터빈 기준으로 8기를 배치하였다.

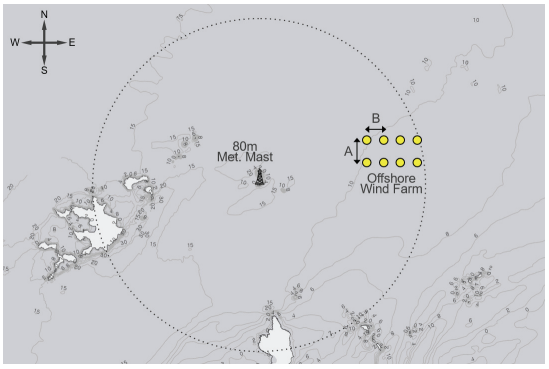


그림 7. 해상풍력 최적입지구역 선정 연구 분석절차
Fig. 7 An analysis procedure for selecting the optimal site for offshore wind farm

DS205-8MW 모델과 비교할 외산 터빈으로는 가장 많은 트랙레코드를 보유하고 있는 Vestas사와 Siemens-Gamesa사 제품으로 선정하였다. 다만 두 외산터빈 모두 풍속이 높은 유럽 해역을 대상으로 개발된 제품이기 때문에 터빈 클래스가 각각 $\mathrm{I}_B$, $\mathrm{II}_A$ 또는 S Class에 해당한다. 따라서 우리나라와 같은 저

풍속대, 고난류성 해역에 적합한 풍력터빈은 아니지만 아시아 시장을 겨냥한 T Class 터빈들이 아직 인증 취득 전이라는 점을 감안하여 위 풍력터빈들을 비교군으로 선정하였다. 풍력터빈별 제원과 배치 형태는 표 2와 같다.

표 2. 풍력터빈별 제원 및 단지배치 유형
Table 2. Each wind turbines model information and wind farm arrangement

| Model | DS205 | V174 | SG8.0 |
|---|---|---|---|
| Wind Turbine | | | |
| Manufacturer | Doosan | Vestas | SGRE |
| Rated Power | 8,000kW | 9,500kW | 8,000kW |
| Type | Direct Drive | Geared | Direct Drive |
| Hub Height | 130m | 120m | 120m |
| Blade Length | 100m | 85m | 81.4m |
| Rotor Diameter | 205m | 174m | 167m |
| Cut-in Speed | 3.5m/s | 3.0m/s | 3.0m/s |
| Cut-out speed | 25.0m/s | 25.0m/s | 25.0m/s |
| Wind Farm Arrangement | | | |
| Turbine # | 8 | 7 | 8 |
| Capacity | 64.0MW | 66.5MW | 64.0MW |
| Distance (A) | 7.0D | 8.2D | 8.5D |
| Distance (B) | 5.0D | 5.9D | 6.1D |

### 5.2 풍력터빈별 연간발전량 민감도 분석

연간풍력발전량 산정을 위해 위 풍력터빈 배치안을 기반으로 WindSim 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 그림 8과 같이 각 풍력터빈별 출력곡선을 기반으로 Jensen 후류모델로 연간발전량을 산출하였다. DS205-8MW의 경우 국내 저풍속 해역 환경에 적합하게 설계되었으며, 이는 타 제조사 풍력터빈과는 달리 로터 회전면적을 증가시키는 형태로 최대의 전력을 생산할 수 있게 하기 위함이다. 또한 그림 8의 터빈별 출력곡선 비교 시 저풍속대에서 훨씬 더 많은 출력이 가능하게 설계가 되어 있음을 확인할 수 있다.

풍력단지의 연간 예상발전량을 추정함에 있어 풍속의 변동성, 터빈 출력곡선의 비선형성, 제작과정의 품질오차, 기타 외부요인 등으로 인해 손실률과 불확도가 항상 존재한다[20-21].

본 연구에서는 통상적인 손실률과 불확도를 고려하여 P-Value값을 최종 산출하였다. 손실률은 터빈 가동률 손실, 전기적 손실, 출력 손실만을 적용하였고, 출력제한에 의한 손실은 적용하지 않았다. 후류 손실은 각 터빈별로 별도 산정되었다. 불확도의 경우 풍력자원 측정값 및 변동성에 의한 불확실성, 모델 분석결과의 불확실성, 터빈 출력곡선의 불확실성이 고려되어 최종 불확도를 산출하였다. 각 터빈별 P50, P75, P90을 각각 산출하였고, 그 때의 단지 이용률 또한 검토하였다. 손실률과 불확도에 대한 내용은 표 3에 나타나 있다. 오직 후류효과만이 반영된 연간 예상발전량을 P50이라고 말할 수 있으며, 귀무가설이 맞다는 전제 하에 통계값이 실제로 관측된 값 이상일 확률이 50%라는 것을 의미한다.

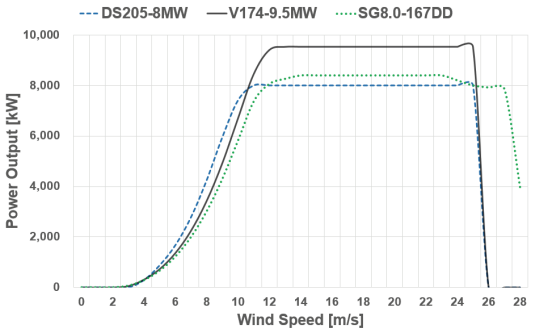


그림 8. 해상풍력 최적입지구역 선정 연구 분석절차
Fig. 8 An analysis procedure for selecting the optimal site for offshore wind farm

표 3. 풍력단지 손실률 및 불확도 설정
Table 3. Set up of losses and uncertainties for offshore wind farm

| Item | | Value [%] |
|---|---|---|
| Losses | Availability | 5 |
| | Electrical | 2 |
| | Performance | 1 |
| | All | 7.83 |
| Uncertainties | Wind Variability | 5 |
| | Wind Measurement | 5 |
| | Modeling | 1 |
| | Power Curve | 3 |
| | All | 11.64 |

총 손실률과 불확도는 모두 동일하게 각각 7.83%, 11.64%로 적용되었으며, 이를 기반으로 한 P-Value에 따른 연간 예상발전량은 표 4에 나타나 있다. P-Value는 특정 가설을 전제로, 그 가설이 부합한다는 가정하에 현재 산출한 통계값이 얼마나 자주 또는 정확하게 발생하는지 여부를 판단하는 지표이다.

이는 P50을 기준으로 상대적 불확도 계수를 구한 뒤 P75, P90, P95 등을 식 (4)와 같이 산출할 수 있다.

$$\sigma = P(50) \times Uncertainty(\%) \quad (4)$$

표 4. 터빈 배치별 후류손실, 단지이용률과 P-Value에 따른 연간 예상발전량 산출
Table 4. Wake loss and capacity factor by each turbine arrangement, and annual expected energy production according to P-Value

| Item | Wake Loss [%] | Capacity Factor [%] | P50 [GWh/y] | P75 [GWh/y] | P90 [GWh/y] |
|---|---|---|---|---|---|
| DS205-8MW | 3.85 | 42.8 | 220.93 | 205.97 | 192.50 |
| V174-9.5MW | 3.69 | 35.3 | 190.26 | 175.31 | 161.85 |
| SG8.0-167DD | 3.56 | 35.4 | 191.75 | 176.70 | 163.15 |

DS205-8MW 터빈의 로터 회전면적이 가장 큰 만큼 터빈 간 이격거리도 상대적으로 작게 설정되었다. 이 때문에 후류손실 비중은 가장 크게 산출되었지만 저풍속대의 바람을 가장 잘 활용할 수 있다는 측면에서 42.8%의 우수한 단지이용률을 확보할 수 있었다. 따라서 64MW의 해상풍력단지로 P75 기준, 연간 약 205GW의 전력생산을 기대할 수 있다고 판단된다. 반면, V174-9.5MW과 SG8.0-167DD 모델은 후류손실은 더 적게 나타났으나, 고풍속대, 고난류강도에 적합한 형태로 설계되었기에 35% 정도의 상대적으로 저조한 단지이용률을 보였다. 이는 그림 9에서도 확인할 수 있으며, DS205-8MW에 해당하는 그림 (a)에서 7m/s의 잠재적 활용 가능한 풍속 영역대가 (b)와 (c)에 비해 훨씬 넓게 분포하는 형태로 나타난다. 이에, 해당 해역에서는 고풍속대, 고난류강도에 적합한 I 클래스의 외산 풍력터빈보다는 DS205-8MW와 같은 저풍속대 풍력터빈 모델을 활용하는 것이 훨씬 더 높은 경제성을 확보할 수 있는 방안임을 확인할 수 있다.

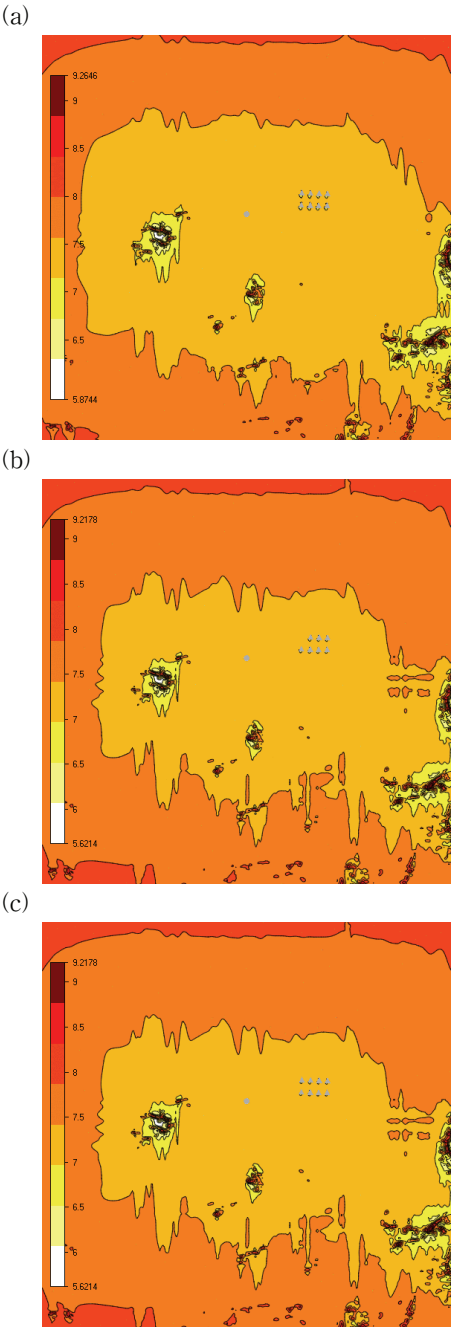


그림 9. 풍력터빈별 잠재적 풍력자원 분포
Fig. 9 The potential wind resource distribution for each wind turbine

## Ⅵ. 요약 및 결론

본 연구는 영광군 안마도 인근 왕등여에 설치된 80m 기상탑을 기반으로 60MW 규모의 해상풍력단지 입지선정과 최적배치안을 검토한 기초연구이다. 해상풍력은 육상풍력에 비해 지리적 제한이 적고 상대적으로 고효율의 풍력자원을 쉽게 확보할 수 있다는 장점이 있지만 어민과의 주민수용성, 생태계 파괴 등 환경문제 등으로부터 자유로울 수 없다. 따라서 해양공간관리계획을 포함한 사회적·생태적 입지제약조건을 면밀히 검토하여 해상풍력 입지가능구역을 선정해야 한다. 본 연구에서는 군사훈련구역, 양식장 등 입지제약조건들과 최대한 충돌을 피하고, 고른 수심분포와 해상풍력단지에 적합한 해저지반유형 등을 고려하여 왕등여 동북동 방향 8km 떨어진 해역을 최종입지대상지역으로 선정했다. 또한, 풍력터빈 제원별 연간 예상발전량의 민감도 분석을 수행하기 위해 대표적 국산 초대형 풍력터빈인 DS205-8MW 모델과 더불어 V174-9.5MW, SG8.0-167DD 외국산 터빈을 각각 최적 배치하여 시뮬레이션하였다.

기본적으로 주풍방향으로 7D~8D 가량 이격시켜 터빈을 배치하였고 일반적인 손실률과 불확도를 고려하여 분석한 결과, DS205-8MW 풍력터빈이 약 42%의 단지이용률을 보이며 가장 우수한 프로젝트 경제성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 DS205-8MW 풍력터빈이 국내 해역의 저풍속, 저난류 형태의 특성을 잘 반영하여 최적 설계되었기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 로터 회전면적이 가장 넓은 만큼 좁은 이격거리로 인해 상대적으로 많은 후류 손실이 발생할 수 있는 만큼 충분한 프로젝트 영역을 확보할 필요가 있다고 판단된다. 후류가 풍력단지에 미치는 영향은 터빈 사이의 간격, 풍향, 풍속의 분포 등 풍력자원의 기본적 성질에 의존한다. 바람조건은 수정할 수 없지만, 풍력단지 배치는 내·외부 후류효과 감소를 목적으로 지속적인 시뮬레이션을 통해 풍력단지 효율성을 최적화할 수 있다. 입지제약조건, 해저지반유형, 풍력자원 특성 등 해상풍력단지 설계 시 고려해야 하는 종합적 요인을 상세히 검토하여 풍력터빈의 최적화 배치를 통해 해저 케이블 공사비를 고려한 프로젝트 경제성을 향상시킬 수 있어야 한다.

향후에는 해당 지역과 다른 지형적·기상학적 특성을 가지는 남해, 동해 지역에 대해 보다 상세한 해상풍력 발전단지 입지분석을 수행하고자 한다. 본 연구결과가 해상풍력발전단지의 타당성조사와 실시설계를 계획하고 수행함에 있어 기초 연구자료로 활용될 수 있길 바란다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-002)

## References

[1] K. Nam, S. Hwangbo, and C. Yoo, “A deep learning-based forecasting model for renewable energy scenarios to guide sustainable energy policy: A case study of Korea,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 122, 2020, 109725.

[2] S. Kim, C. Moon, and G. Jung, “A study design of wind blade with rated capacity of 50kW,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 3, 2021, pp. 485-492.

[3] K. Lee, J. Kim, and S. Yoo, “Would people pay a price premium for electricity from domestic wind power facilities? The case of South Korea,” *Energy Policy*, vol. 156, 2021, 112455.

[4] J. Choi, C. Moon, and Y. Chang, “A study on system retrofit of complex energy eystem,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 1, 2021, pp. 61-68.

[5] A. Martinez and G. Iglesias, “Mapping of the levelised cost of energy for floating offshore wind in the European Atlantic,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, 2022, 111889.

[6] L. Castro-Santos, D. Silva, A. Bento, N.

Salvação, and C. Soares, “Economic feasibility of floating offshore wind farms in Portugal,” *Ocean Engineering*, vol. 207, 2020, 107393.

[7] H. Choi, S. Cho, T. Hwang, J. Nam, and C. Hwang, “Cumulative impact assessment for marine spatial planning: A case study of the Gyeonggi bay in South Korea,” *Journal of Coastal Research*, vol. 114, no. SI, 2021, pp. 360-364.

[8] J. Lee, H. Woo, H. Jung, J. Jeong, and H. Park, “Application of a marine environmental information system(MEIS) data to marine spatial planning(MSP) in the Nakdong river estuary, Busan metropolitan city, South Korea,” *Journal of Coastal Research*, vol. 95, no. SI, 2020, pp. 860-864.

[9] J. Lee, Y. Koh, and D. Lee, “Strategic improvement plan to increase the usability of coastal base maps throughout Korea,” *Journal of Coastal Research*, vol. 114, no. SI, 2021, pp. 395-399.

[10] T. Pham, S. Im, and J. Choung, “Prospects and economics of offshore wind turbine systems,” *Journal of Ocean Engineering and Technology*, vol. 35, no. 5, 2021, pp. 382-392.

[11] H. Liu, N. Nikitas, Y. Li, and R. Yang, “Big data analysis of energy economics in wind power market,” *Big Data in Energy Economics*, First Online, 2022, pp. 95-115.

[12] G. Ryu, Y. Kim, S. Kwak, M. Choi, M. Jeong, and C. Moon, “Atmospheric stability effects on offshore and coastal wind resource characteristics in South Korea for developing offshore wind farms,” *Energies*, vol. 15, no. 4, 2022, 1305.

[13] G. Ryu, D. Kim, D. Kim, Y. Kim, S. Kwak, M. Choi, W. Jeon, B. Kim, and C. Moon, “Analysis of vertical wind shear effects on offshore wind energy prediction accuracy applying rotor equivalent wind speed and the relationship with atmospheric stability,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, 2022, 6949.

[14] T. Tran, E. Kim, and D. Lee, “Development of a 3-legged jacket substructure for installation in the southwest offshore wind farm in South Korea,” *Ocean Engineering*, vol. 246, 2022, 110643.

[15] A. Mathern, C. Haar, and S. Marx, “Concrete support structures for offshore wind turbines: current status, challenges, and future trends,” *Energies*, vol. 14, no. 7, 2021, 1995.

[16] K. Ha, J. Kim, Y. Yu, and H. Seo, “Structural modeling and failure assessment of spar-type substructure for 5MW floating offshore wind turbine under extreme conditions in the east sea,” *Energies*, vol. 14, no. 20, 2021, 6571.

[17] G. Ryu, H. Kim, Y. Kim, K. Chon, J. Joo, and C. Moon, “GIS-Based site analysis of an optimal offshore wind farm for minimizing coastal disasters,” *Journal of Coastal Research*, vol. 114, no. SI, 2021, pp. 246-250.

[18] H. Kim, C. Moon, Y. Kim, K. Chon, J. Joo, and G. Ryu, “Analysis of atmospheric stability for the prevention of coastal disasters and the development of efficient coastal renewable energy,” *Journal of Coastal Research*, vol. 114, no. SI, 2021, pp. 241-245.

[19] S. Kim, G. Ryu, Y. Kim, and C. Moon, “Sensitivity analysis of wake diffusion patterns in mountainous wind farms according to wake model characteristics on computational fluid dynamics,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, 2022, pp. 265-278.

[20] D. Wilkie and C. Galasso, “A probabilistic framework for offshore wind turbine loss assessment,” *Renewable Energy*, vol. 147, 2020, pp. 1772-1783.

[21] M. Mifsud, T. Sant, and R. Farrugia, “Analysing uncertainties in offshore wind farm power output using measure‐correlate‐predict methodologies,” *Wind Energy Science*, vol. 5, no. 2, 2020, pp. 601-621.

## 저자 소개

### 김중호(Jung-Ho Kim)

1992년, 1994년 서울과학기술대학교(공학사),연세대학교(공학석사)
2019년~현재 목포대학교 대학원 신재생에너지공학 협동과정
2003년~2019 포스코 그룹
2020년~2021 ANP Systems(주) 대표이사
2022년~현재 Northlandpower(주) 이사
※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 모델링, 사업개발

### 류건화(Geon-Hwa Ryu)

2014년, 2016년 부산대학교 이학사, 이학석사
2016년~2017년 국립기상과학원 연구원
2018년~2022년 에너지밸리산학융합원 풍력연구센터 선임연구원
2022년~현재 OWC Senior Consultant
Journal of Earth Science: Atmosphere Part 검토위원
※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 수치모델링

### 손홍철(Hong-Chul Son)

1987년 전남대 공학사, 2000년 전남대 공학석사
1987년 한국전력공사 입사
2019년~현재 광주전남건설지사장
2020년~현재 국립목포대학교 대학원 전기공학과
광주전남본부 해남변환소장, 송전부장, 변전부장, 계통운영부장, 신광주전력지사장, 전북본부 송전운영부장, 부산울산본부 북부산전력지사장을 역임
※ 관심분야 : 해상풍력, HVDC 전력변환시스템, ESS 시스템

### 김영곤(Young-Gon Kim)

2003년,2014년 순천대학교 컴퓨터과학졸업(이학석사),목포대학교 신재생에너지공학 졸업(공학박사)
2018년~현재 에너지밸리산학융합원 사무국장, 풍력연구센터센터장
2014년~2018년 목포대학교 연구전임교수
※ 관심분야 : 에너지ICT & HCI, 해상풍력디지털트윈, 적정기술, 마이크로그리드

### 문채주(Chae-Joo Moon)

1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사
1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기및제어공학과 교수
2017년~현재 에너지밸리산학융합원장
한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, 전력전자학회 부회장, 이투뉴스 및 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임
※ 관심분야: 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전력시스템