

# 파트너십을 통한 한국 해상 풍력 발전 가속화

시나리오 기반 공급망,  
균등화 발전 비용,  
고용 창출 효과 연구

2021년 5월



▲ AEGIR

● PONDERA

COWI

주한 덴마크 대사관, 덴마크 에너지청,  
네덜란드 외교부를 대표하여 발간함.



EMBASSY OF DENMARK  
Seoul



Danish Energy  
Agency



Kingdom of the Netherlands

본 연구를 검토해주신 다음 기관들께  
감사드립니다.



생분류에너지전략연구소



에너지경제연구원  
Korea Energy Economics Institute

다음은 본 보고서의 작성자입니다.



Aegir Insights는 데이터 지향적 연구 및 고급 분석 솔루션을 통해 해안 풍력 산업의 전략적 의사 결정을 지원합니다. Aegir Insights는 시장 전략 및 투자 결정 분야에서 최고의 경험을 보유한 업계 전문가가 설립하여 선도적 개발자, 투자자, 정부가 해안 풍력 투자의 가치를 극대화하는 데 도움이 되도록 적용합니다.



COWI A/S는 엔지니어링, 경제, 환경 과학 분야의 선도적인 국제 컨설팅 그룹입니다. 1930년 덴마크에서 설립된 COWI는 미래의 지속가능한 사회에서 일관성을 창출하기 위해 전념하고 있습니다. 우리는 시장 자문부터 기초 설계까지 해상 풍력을 위한 360° 솔루션을 제공합니다.



Pondera는 네덜란드에 본사를 둔 국제 재생 에너지 컨설턴트입니다. 2007년 창립 이래 Pondera는 재생 가능 에너지 프로젝트에 대한 자문, 개발, 공동 투자를 하고 있습니다. 우리의 심층적인 전문성과 경험을 통해 정책 입안자들에게 일상적인 관행과 일치하는 지속가능한 에너지 정책을 수립하도록 조언드릴 수 있습니다.

책임의 한계:

본 보고서는 정보 제공만을 목적으로 하며 법적, 재정적 또는 공학적 조언을 포함하거나 전달하지 않습니다.

Cover photo courtesy of Vestas.

© 2020 COWI A/S, Aegir Insights, Pondera Consult.

All rights reserved. ISBN 978-3-00-068843-0.



9 783000 688430

# 목차

주한 덴마크 대사관 발간사	5
주한 네덜란드 대사관 발간사	6
개요	7
1 도입	1
2 정책 환경	13
2.1 주요 재생에너지 계획	13
2.2 한국, 네덜란드, 덴마크의 해상 풍력 시장 현황	15
2.3 요약	26
3 공급망	29
3.1 공급망 구성요소	29
3.2 한국 공급망 단기 전망	45
3.3 한국 공급망 중기 전망	47
3.4 공급망 시나리오	48
3.5 요약	50
4 균등화 발전 비용	52
4.1 선정된 진흥 지역의 LCOE 분석	52
4.2 국내 공급의 위험	64
4.3 한국 해상 풍력의 LCOE 히트매핑	65
4.4 2035년까지 비용 감축 방향	70
4.5 LCOE 예시	72
4.6 요약	73
5 고용 효과	75
5.1 경제적 영향 계산	75
5.2 최대 12GW 규모까지 대표 결과 외삽	80
5.3 가치 확보와 장기 보유를 위한 경제적 권장사항	81
5.4 요약	82

6	전망	84
7	약어	88
8	참고문헌	91
9	별첨	102

## 발간사 주한 덴마크 대사관

덴마크와 한국은 2011년부터 녹색 성장 동맹국(Green Growth Alliance)으로 긴밀히 협력해 왔습니다. 이 동맹을 통해 우리 정부와 기업은 강력한 파트너십, 혁신 및 공동 투자를 추진했습니다. 우리는 한국과 경험을 공유하고 한국에서 배웠으며 이 방식대로 계속 진행할 것입니다.

양국의 협력은 한국 정부가 2030년까지 신 재생 에너지 발전량 비중을 20%까지 보급하겠다는 야심찬 3020 신재생 에너지 계획 도입을 계기로 더욱 강화되었습니다. 이는 광범위한 이행을 보장하고 진행 상황을 모니터링 하는 정부 주도 조치의 좋은 사례입니다.

2021년 P4G 서울 정상 회의와 관련하여 한국의 미래 해상 풍력 단지의 에너지 비용과 이러한 비용을 절감하고 경쟁력을 높이며 협력할 수 있는 방법에 대해 시의 적절하게 필요한 연구를 소개하게 되어 기쁘게 생각합니다.

지면을 통해 본 연구를 제 시간에 실현하고 완료하기 위해 끊임없는 노력을 기울여 주신 COWI, Aegir, Pondera에 감사드립니다. 또한 본 연구를 지원해 주신 한국 에너지공단, 에너지 경제연구원, 녹색 에너지 전략 연구소에 특별히 감사드립니다.

네덜란드와 덴마크의 기존 신 재생 에너지 양해각서에 따라 연구에 참여하고 지원할 기회를 주신 네덜란드에도 감사드립니다.

끝으로 연구에 대한 관심과 재정적 자금을 지원해주신 덴마크 에너지청에 감사드립니다.

우리의 연구가 한국 RE3020 계획이 강력하고 효과적으로 실행될 수 있도록 새로운 아이디어, 파트너십, 이니셔티브를 이끌어내는 데 기여할 수 있기를 바랍니다.  
한국과 한국 국민 여러분, 한국 경제의 상생을 응원합니다.

즐겁게 읽어 주시기 바랍니다.

2021년 5월 서울



야콥 라스무센

A handwritten signature in green ink, which appears to be 'Jakob Rasmussen'.

주한 덴마크 대사관  
에너지 참사관

# 발간사

## 주한 네덜란드 대사관

네덜란드와 한국은 비즈니스에서 문화, 스포츠까지 다양한 분야에서 오랫동안 협력해 왔습니다. 올해 2021년은 양국이 수교 60 주년을 맞이하는 특별한 해입니다. 앞으로 60 년도 이처럼 긴밀한 협력이 계속되기 바랍니다. 해상 풍력 에너지는 미래 협력의 기회 중 하나입니다. 지속 가능한 미래를 향한 양국의 공통된 목표에 완벽하게 부합하는 것입니다. 지난 몇 년 동안 네덜란드는 해상 풍력 분야를 개척하고 해상 풍력 단지를 실현하기 위한 효율적인 접근 방식을 개발했습니다.

한국이 야심차게 2030 년 12GW 해상 풍력 보급을 목표로 잡은 것은 대단한 발전입니다. 네덜란드는 그동안 배운 교훈을 공유하여 이 목표의 성공에 기여하고자 합니다. 본 보고서는 그 출발점입니다.

본 보고서는 여러 파트너와 긴밀히 협력하여 작성되었습니다.

먼저 본 보고서를 작성하고 기쁘게 협력해주신 덴마크 대사관과 덴마크 에너지청에도 감사드립니다. 덴마크 동료들은 한국의 해상 풍력에 대한 광범위한 네트워크와 지식에 크게 기여했습니다. 이러한 협력은 2020 년에 체결된 덴마크와 네덜란드의 에너지 전환 협력에 관한 양해각서에 따라 처음으로 진행되었습니다.

둘째, Pondera, COWI, Aegir에게 감사드립니다. 이들의 높은 품질 기준이 본 보고서의 기반이 되었습니다.

마지막으로 네덜란드 외무부와 네덜란드 기업청의 관심과 재정 지원에 감사드립니다.

본 보고서는 한국의 해상 풍력 발전을 검토하고 한국, 네덜란드, 마크 해상 풍력 분야의 파트너십 옵션을 살펴봅니다. 우리는 보고서의 결과를 기쁘게 생각하며 국가간 협력 발전의 출발점이 되기를 바랍니다.

2021 년 5 월 서울

주한 네덜란드 대사관

# 개요

한국은 2030년까지 12GW 규모의 해상 풍력을 보급하겠다는 계획에 따라 탄소를 저감하고 해상 풍력 산업을 현재의 초기 단계에서 글로벌 강자로 성장시키기 위해 노력하고 있다. 본 연구는 현황을 검토하여 예상되는 개발을 정량화하고 구현 과정의 주요 문제점을 파악하고 솔루션을 제안하여 한국의 정책 입안자들이 본 계획을 실현할 수 있도록 지원하는 것을 목적으로 한다.

**한국은 다른 신흥 시장에 비해 유리한 출발점에 있지만 본 분석에 따르면 현상 유지만으로는 2030 해상 풍력 2030 목표를 달성하기 어렵다. 파트너십은 이러한 위험을 완화하는 효과적인 방법이다.**

## 정책 환경

어느 국가이든 해상 풍력 산업이 성공하려면 위험을 적절히 분산하고 풍력 발전 단지개발자에게 확신을 주는 정책 환경이 필수적이다. 정책 프레임워크는 해상 풍력 발전 가속화와 더불어 발전 원가에 영향을 미치는데 그 이유는 풍력 발전 단지 개발자가 직면하는 위험 비용과 비효율 비용이 결국 소비자에게 전가되기 때문이다. 한국은 이를 인식하고 지방 정부 주도 부지 선정, 고려 구역, 간소화된 인허가 절차 절차를 도입하고 지역 이해 관계자의 동의를 확대할 계획을 수립했다. 그러나 지금까지 한국 정부의 포부와 노력에도 불구하고 현재 해상 풍력 개발자의 위험은 유럽의 성숙한 개발 환경에 비해 높은 것으로 보인다. 따라서 이러한 문제들을 완화하기 위한 계획을 신속하게 이행해야 한다.

## 공급망

한국의 해상 풍력 발전 가속화는 유리한 정책 환경 외에도 업계가 지속 가능하고 효과적인 공급망을 구축하는 능력에 달려 있다. 이 공급망이 해상 풍력 용량의 이용 속도뿐만 아니라 비용까지 결정할 것이다. 국내 공급망의 경우 한국은 철강과 조선업이 강하므로 출발점이 매우 좋다. 탐라 및 서남해 해상 풍력 단지는 100% 국내 공급망으로 실행되었으나 이들 프로젝트를 통해 설치 기간 개선이 특히 필요한 것으로 나타났다.

향후 몇 년 동안 한국의 공급망에서는 풍력 터빈 공급이 가장 약한 고리가 될 것으로 예상된다.

- 국내 OEM 업체 두산과 유니슨이 각각 현재 모델인 8MW, 10MW보다 훨씬 큰 터빈 모델을 발표해 베스타스 (Vestas), 지멘스 가메사 (Siemens Gamesa), GE 등 글로벌 OEM과 경쟁 격차를 줄이는 데 도움이 될 것으로 전망된다.
- 많은 개발자들과 투자자들은 새롭게 개발될 한국산 터빈을 이용하면 위험이 엄청날 것으로 보고 있다.
- 터빈의 국내 생산도 도전 과제이다. 향후 8년 내에 12GW 규모를 보급하려면 터빈을 10배 확대해야 한다.

따라서 한국의 탄탄한 시작점에도 불구하고 다음과 같은 이유 때문에 국내 공급망에만 의존하여 2030년 목표를 달성하기는 매우 어려울 것이다.

- 프로젝트 계획, 자금 조달 및 관리 경험 부족
- 국내 터빈의 낮은 경쟁력과 한정된 실적 때문에 프로젝트 개발자가 사용을 망설임
- 터빈 제조 역량 부족
- XL 모노 파일 기초 제조의 이전 및 구축을 위한 리드 타임
- 설치 선박 병목 현상
- 느린 설치 속도

### 파트너십의 힘

한국에서 해상 풍력의 확장을 가속화하고 2030년 목표를 달성할 가능성을 높이려면 지금까지 축적된 글로벌 산업의 지식과 성숙한 산업 리더의 지식과 경험을 활용하는 것이 중요하다. 이는 다음을 수행할 수 있는 국내 및 외국 기업과의 파트너십을 통해 달성할 수 있다.

- 역량 위험 완화, 선박 및 풍력 터빈과 같은 병목 현상 완화
- 국내 파트너에게 지식 전수
- 최첨단 기술과 최적화된 방법을 통해 구축 속도 증대

본 연구에서는 이 접근법의 경제적 영향을 정량화하기 위해 "파트너십 시나리오"와 "국내 시나리오"를 개발하였다. 파트너십 시나리오에서는 해외 및 한국 공급망에서 가장 유능한 부분을 활용하는 반면 국내 시나리오에서는 한국내 공급에만 의존한다.

### 균등화 발전 비용

이 두 시나리오를 각각 500MW 규모의 참조지 4곳에 적용하여 2026년에 배치 목표로 에너지 균등화 발전 비용 (LCOE) 분석을 수행하였다.

- 고정식 단지의 LCOE는 파트너십 시나리오의 경우 75 EUR/MWh, 국내 시나리오의 경우 91-95 EUR/MWh로 국내 시나리오가 22% 더 높다.
- LCOE 22%는 500MW 규모의 인천 (고정식) 참조지에 대한 추가 프로젝트 비용에서 8억 7천만 유로 (1조 1,600억 원)에 해당한다.
- 부유식 단지의 LCOE는 파트너십 시나리오의 경우 98-101 EUR/MWh, 국내 시나리오의 경우 116-120 EUR/MWh로 국내 시나리오가 19% 더 높다.
- 새로운 터빈 플랫폼 개발은 항상 지연되거나 실적이 저조할 가능성이 있다. 500MW 규모의 프로젝트에서 개발자가 8MW 터빈 대신 5.5MW를 사용해야 한다면 낮은 에너지로 인해 12억 5천만 유로가 손실될 것으로 추정된다.

---

**파트너십을 활용하면 한국의 해상 풍력 발전 속도를 높이고 비용을 낮추는 동시에 국내 기업들이 동급 최강으로 도약할 수 있다. 2030년까지 한국의 12GW 보급 목표를 달성하는 가장 효율적인 방법은 유럽 파트너들이 배운 교훈을 활용하고 글로벌 산업의 지원을 받는 것이다.**

---

## 고용 효과

풍력 발전 단지의 경제적 영향은 비용뿐 아니라 국내 고용에 미치는 영향으로도 측정할 수 있다. 고용 효과는 전일제 환산(FTE; Full Time Equivalent) 연도, 즉 한 사람이 1년 동안 일한 시간으로 측정한다. 참조지를 통해 다음과 같은 고용 효과를 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

- 파트너십 시나리오의 경우 전 주기 FTE 수치는 16,079-27,452
- 국내 시나리오의 경우 전 주기 FTE 수치는 24,626-33,566

국내 시나리오가 더 많은 FTE를 생성하지만 파트너십 시나리오에서는 더 빠른 설치 속도로 보상될 가능성이 높다. 인천 참조지를 사례로 국내 시나리오는 500MW 규모 풍력 단지에 대해 전 주기 FTE 수치는 24,626이다. 파트너십 시나리오가 동시에 1000MW 규모 풍력 단지를 구축할 수 있다면 전 주기 FTE 수치 32,000 개 이상 생성될 것이다. 부유식 풍력 발전 단지는 자본 비용이 높기 때문에 고정식보다 더 많은 FTE를 생성한다. 모든 시나리오에서 최대 일자리 창출은 짧은 기간 동안 FTE가 많이 달성되는 건설 기간에 발생한다.

## 경제적 가치 확보

이러한 잠재적인 경제 가치는 호황과 불황의 순환(경기 순환)보다 안정적인 해상 풍력 파이프라인을 통해 가장 잘 포착하고 장기적으로 유지할 수 있다. 파이프라인이 안정적으로 유지되면 해당 부문은 계속 작동하고 성장은 더디더라도 경제에 장기적인 영향을 미칠 것이다. 빠른 성장은 종종 일시적 효과에만 머물러 장기간 실업 상태가 계속된다. 안정적인 파이프라인은 지역 공급망을 유지할 가능성도 높여 국산 부품 공급 비율이 높아질 것이다.

에너지 비용, 설치 속도, 일자리 창출을 고려한 전체적인 관점에서 한국 해상 풍력 산업을 보면 파트너십 접근 방식으로 에너지 비용 절감, 유기적 성장, 지속 가능한 일자리 창출, 빠른 설치 속도와 같은 가장 큰 가치를 확보하는 동시에 지식과 경험을 한국 기업에 전수할 수 있다.

# 1



Photo: Vestas

도입

# 1 도입

본 연구의 목적은 2030년까지 12GW 규모의 해상 풍력 보급을 목표로 하는 한국 정부의 해상 풍력 “3020 신재생에너지 계획”을 지원하는 것이다. RE3020 계획은 2030년까지 12GW 규모의 해상 풍력 보급을 목표로 한다. 본 분석은 한국의 정책 입안자들을 고려하여 주요 해외 해상 풍력 산업의 전문 지식을 한국 해상 풍력 시장에서 활용할 경우의 윈윈 효과를 살펴볼 것이다.

이 영향은 제2장의 정책 환경에 대한 검토를 시작으로 전체론적 관점에서 고려된다. 이 장에서는 한국에서 해상 풍력 프로젝트가 개발되는 환경 및 한국의 해상 풍력 에너지 확대 일정과 비용에 미치는 잠재적인 영향을 설명하여 보고서의 나머지 부분에 대한 토대를 제공한다.

한국의 해상 풍력 에너지 구축은 유리한 정책 환경 외에 풍력 발전 단지를 제조, 설치, 운영할 적절한 공급망이 필요하다. 이에 대해서는 3장에서 살펴본다. 본 장에서는 한국 공급망의 현재 역량을 확인하고 이를 바탕으로 연구 전반에 걸쳐 다루게 될 두 가지 공급망 시나리오를 설정한다.

4장에서는 분석을 정량화한다. LCOE 가격의 주요 동인을 사용하여 지침적 LCOE 수준을 히트 매핑(heat mapping)을 통해 고정식 및 부유식 해상 풍력 단지와 매핑한다. 3 장의 공급망 시나리오와 더불어 풍력 진흥 지역 4곳을 참고지로 선정하여 LCOE에 대한 심층 분석을 실시하였다. 끝으로 2035년의 LOCE 전망을 살펴본다.

끝으로 각 기준 사례와 시나리오에서 예상되는 고용 창출 수준에 대한 분석과 이러한 경제 가치 창출을

장기적으로 유지하는 방법에 대한 권장 사항을 제시한다.

본 연구를 지원해주신 아래 기업들에게 감사드린다.

- 아커 오프쇼어 윈드
- 블루윈드엔지니어링(주)
- 코펜하겐 오프쇼어 파트너스
- 씨에스윈드
- 두산중공업
- GE 리뉴어블 에너지
- 제주한림해상풍력(주)
- 김앤장 법률사무소
- 한국풍력산업 주식회사
- 한국노동연구원
- 한국풍력산업협회
- 노스랜드 파워
- 오스테드(Ørsted)
- 지멘스 가메사 리뉴어블 에너지
- 반 오드 (Van Oord)
- 베스타스
- 더블유피디

본 연구에서는 다음의 환율을 적용하였다.

- 1 Euro = 1,335원 (한국)
- 1 Euro = 0.86 파운드 (영국)
- 1 Euro = 7.43 크로네 (덴마크)
- 1 Euro = 1.20 달러 (미국)



Photo: Vestas

정책 환경

## 2 정책 환경

특정 단위의 에너지를 생산하는 데 드는 비용은 가장 근본적인 시장의 정책 프레임워크가 무엇인지부터 시작하여 여러 요인에 따라 달라진다. 해상 풍력 에너지가 개발, 건설, 운영되는 정책 환경은 프로젝트 위험과 전반적 산업 구축 속도의 주요 결정 요인이다. 위험과 비효율 비용은 궁극적으로 소비자에게 전가되므로 정책 환경은 에너지 비용에 큰 영향을 미친다.

본 장에서는 해상 풍력에 초점을 맞추고 유럽의 정책과 비교하여 한국의 재생가능 에너지 정책의 개요를 제공한다. 또한 현재의 개발 단계와 개발자의 인센티브 및 위험에 대해 설명한다. 이러한 요인을 바탕으로 현재 한국 해상 풍력 산업의 투자 환경을 설명한다.

### 2.1 주요 재생에너지 계획

한국은 최근 전반적인 재생에너지와 해상 풍력에 관한 재생에너지의 구축과 관련하여 몇 가지 계획을 수립하였다. 다음 섹션에서는 해상 풍력과 가장 관련성이 높은 계획에 대해 설명한다.

#### 2.1.1 재생에너지 3020 이행 계획

한국 정부는 기존 에너지 시스템을 저탄소 신재생 에너지 시스템으로 전환하고 관련된 일자리를 창출하기 위해 2017년에 신재생에너지 3020 추진 계획(RE3020, Renewable Energy 3020 Implementation Plan)을 발표하고 신재생자원에서 얻는 에너지를 7.6%에서 2030년까지 20%, 해상 풍력 발전 용량을 현재의 124.5 MW에서 2030년까지 12GW로 확장한다는 목표를 수립했다 [1]. 이 계획 이름에서 “3020”은 2030년까지 재생에너지로 전력의 20%를 생산하겠다는 정부의 목표를 반영한 것이다.

#### 2.1.2 3차 에너지 기본 계획 및 9차 전력 수급 기본 계획

한국의 에너지 보급 및 공급 전략은 한국 에너지 기본 계획(계획 기간 20년, 5년마다 수립)과 장기 전력 수급 기본 계획(계획 기간 15년, 2년마다 수립)을 기반으로 한다. 2019년 6월의 제3차 에너지 기본 계획은 생산 및 유통에서 소비에 이르는 전체 에너지 시스템을 혁신적이고 친환경적으로 전환하는데 중점을 두었다. 계획의 요건은 다음과 같다.

- 석탄 화력 발전의 현저한 감소
- 노후된 원자력 발전의 수명 연장 중단
- 재생가능 자원을 통한 발전량 증가

- 액화 천연 가스 확대로 전력 생산에서 재생 에너지 비율을 2017년 7.6%에서 2040년 까지 30-35%로 높이겠다는 정부 목표 확인 [2].

2020년 9 차 전력 수급 기본 계획에서는 신재생에너지 비중을 현재 15.7%에서 2034년까지 40.9%로 늘리겠다는 목표를 발표했다. 재생가능 에너지원

은 77.8GW로 증대하는 것을 목표로 하고 있으며 태양광 발전(45.6GW)과 풍력 발전(24.9GW)은 2034년까지 전체 재생가능 에너지의 91%를 차지할 것으로 전망된다 [3]. 그림 2-1은 해당 계획에 따른 한국의 에너지원별 국가 에너지 믹스 목표를 나타낸 것이다.

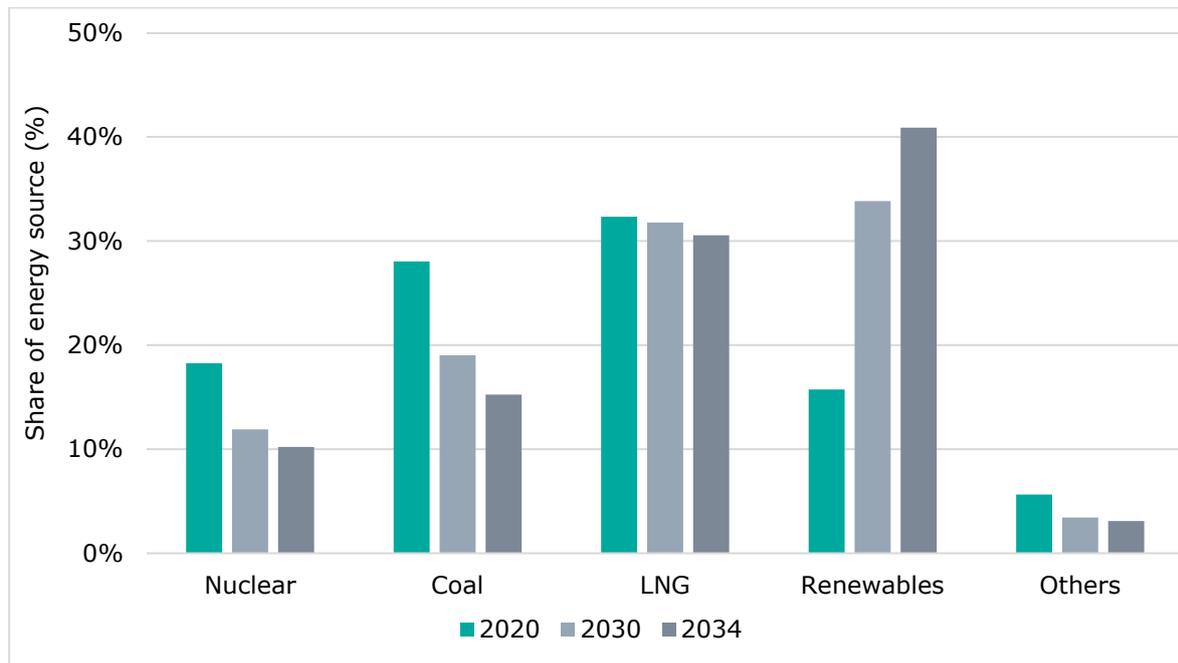


그림 2-1 제9차 전력 수급 기본 계획에 따른 에너지원별 국가 에너지 믹스 목표 [3]

### 2.1.3 그린 뉴딜

2020년 7월 문 대통령은 그린 뉴딜을 통해 신재생 에너지 및 친환경 사업에 정부 지원 및 민간 투자로 73.4 조원(550억 유로)을 지원하여 2025년까지 일자리 659,000개를 창출하고 신재생에너지 인프라를 구축하고 환경 배려형 기업을 더 늘리겠다고 발표했다 [4].

정부는 국가 에너지 산업의 "탄소 중립 추구"와 "탄소 배출량을 줄이고 더욱 친환경적으로 경제 기반

을 전환"한다는 방향을 제시했다. 이 기본 계획은 RE3020과 일치하며 해상 풍력 발전에 대해서는 다음의 이행 계획을 담고 있다.

- 정부 주도 개발 확대
- 허가 및 인허가 절차 과정을 간소화하기 위한 전문 조직 설립
- 2021년 상반기 중 해상 풍력 후보지 발표

## 2.1.4 수산업 협력

2020년 7월 산업 통상 자원부 (산업통상자원부), 해양수산부 (MOF), 환경부 (MOE)는 공동으로 '주민과 함께 하고, 수산업과 상생하는 해상 풍력 발전 방안'을 발표했다. [5]. 이 방안의 목표는 2030년까지 해상 풍력 발전 시설을 12GW 규모로 확대해 세계 해상 풍력 5대 강국으로 도약하고 해상 풍력개발의 경제적 이익을 지역 주민 및 수산업과 공유하고 그린 뉴딜을 실현하는 것이다.

이 계획에는 정부 및 지자체 주도의 부지 선정, 고려 구역 및 인허가 절차 절차 간소화, 해상 풍력에 적합한 지원 시스템 구축을 통한 주민 수용성 확보, 해상 풍력 발전과 수산업의 상생 모델 준비 및 홍보, 대규모 프로젝트를 통한 및 풍력 산업 생태계 육성 등이 포함된다.

## 2.2 한국, 네덜란드, 덴마크의 해상 풍력 시장 현황

한국의 정책 환경이 미치는 영향을 평가하려면 풍력 시장이 발전된 국가와 비교해 보는 것이 유용하다. 유럽 전체, 특히 덴마크와 네덜란드는 훌륭한 비교 대상이다. 세계적으로 해상 풍력의 선구자인 덴마크와 네덜란드는 오랫동안 해상 풍력의 성장을 장려하는 정책 프레임워크를 지속적으로 발전시켰다. 그와 동시에 두 국가 모두 해상 풍력 에너지 비용을 크게 절감했다. 네덜란드와 덴마크 해상 풍력 정책 프레임워크의 발전은 사업자가 직접 개발 부지를 선정하는 '개발 부지 선정(open door)' 원칙을 사용해 프로젝트 개발을 민간 개발자에게 맡겨온 것을 정부가 대부분 주도해온 시스템으로 전환했다는 점이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 이 접근 방식은 해상의 가용 공간을 더욱 효율적으로 사용할 수 있고 (해양 공간 계획; marine spatial planning) 어업, 해상 운송, 석유와 가스 추출 등 다른 이해 관계자들의 이익을 더욱 잘 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한, 정부는 이 접근 방식을 활용하여 각 입찰자들이 동일한 출발점에서 참여하는 대규모 경쟁 입찰도 조직할

수 있게 되어 경쟁을 추진하고 이와 함께 비용 절감할 수 있다.

섹션 2.2.1에서는 덴마크와 네덜란드의 프로젝트 개발 과정을 간략하게 살펴보고 한국의 프로젝트 개발 과정과 비교하였다.

한국 해상 풍력개발 업체는 대부분 한국 전력 공사 (KEPCO)의 자회사인 국유 발전 회사(GENCO; generation companies)이다. GENCO는 총 발전량의 정해진 최소 비율 이상을 신재생에너지원에서 생성할 의무가 있으며 신재생에너지 센터 (New and Renewable Energy Center)가 시행하는 정액 계약 제도를 사용하여 신재생에너지 공급 인증서 (REC; renewable energy certificate)를 최소량 이상 구매해야 한다.

한국의 민간개발자는 보통 주요 건설 회사와 중공업 회사이다. 이러한 대규모 민간개발자 외에 많은 중소기업들도 해상 풍력 발전 단지 프로젝트를 개발하고 있다.

2021년 3월 현재 총개발 용량 약 7.7GW 규모에 해당하는 해상 풍력 프로젝트 42건이 전력 사업 허가 (EBL; Electric Business License)를 취득했다. [6]

EBL은 풍력 자원 캠페인 성공 이후 시행된 첫 번째 허가증이므로 조기 프로젝트 개발에 좋은 지표가 된다. 해당 프로젝트의 목록은 별첨 A에 나와 있다. EBL 목록에 따르면 민간 사업자가 전체 용량의 68.8%를 개발하고 17.9%는 공공 (정부 또는 GENCO) 및 민간 사업자가 공동으로 개발하고 있다. 전체 프로젝트 중 13.3%만 공공 사업자가 전적으로 시행하고 있다. 일부 글로벌 해상 풍력개발 업체들이 한국 해상 풍력 시장에 진출하겠다고 발표했지만 EBL 목록에는 외국개발자가 포함되어 있지 않다. 그러나 일부 SPC의 구조는 EBL 목록에 명시되어 있지 않고 공개되지 않아 알 수 없는 외국개발자가 있을 수 있다는 점에 유의해야 한다.

한국에서 현재 개발 중인 프로젝트 규모는 7.7GW 인데 비해 불과 140.1MW만 운영되고 있다. 그림 2-2는 현재 가동 중인 풍력 단지이다. 이 140.1MW에는 상업용 풍력 단지와 더불어 일부 테

스트 부지도 포함된다. 표 2-1은 이와 같은 차이점을 나타낸 것이다. 제주 월정 테스트 부지는 현재 가동되지 않고 있으며 아직 재가동할 계획이 없기 때문에 표에 포함되지 않았다.

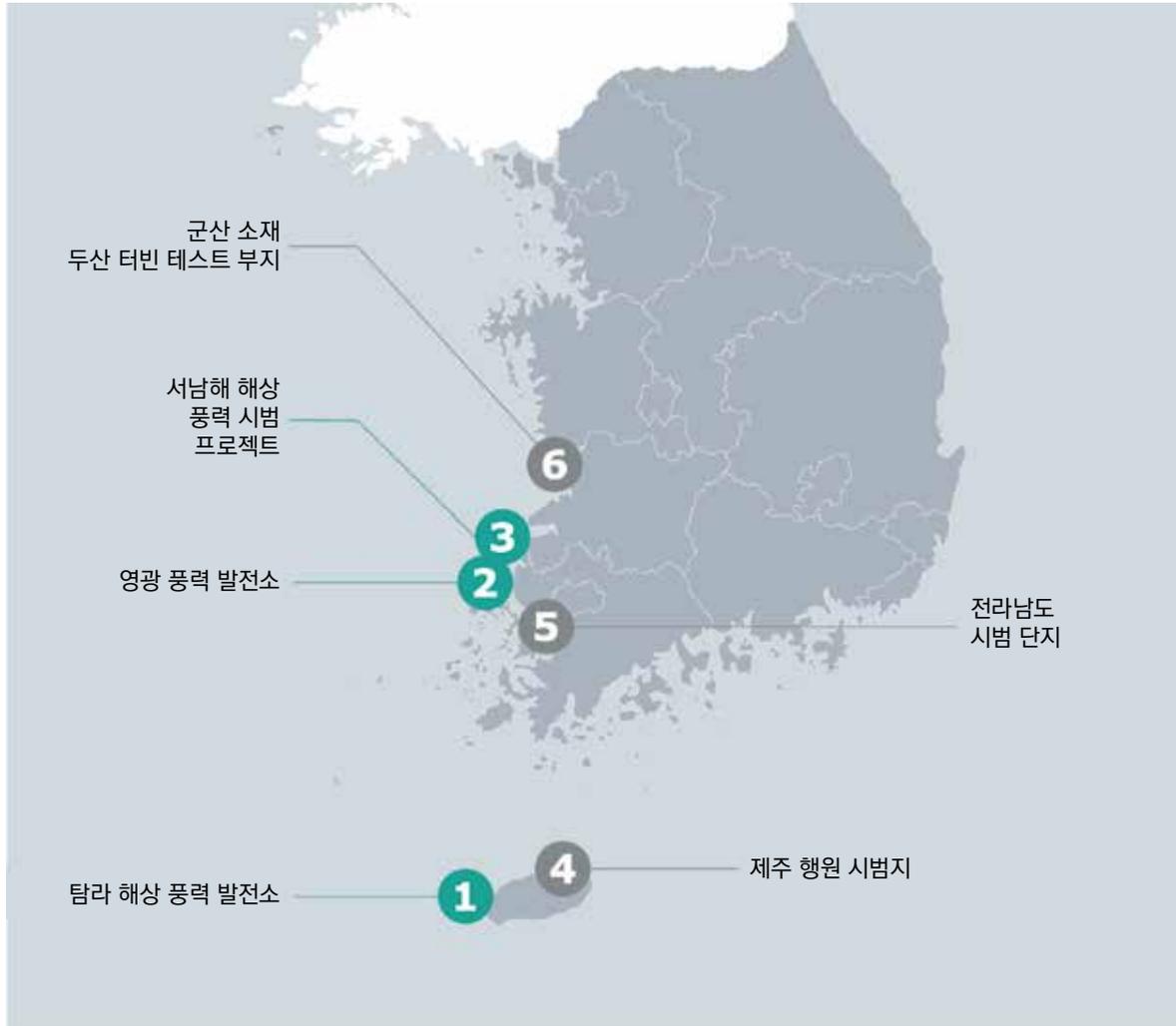


그림 2-2 한국의 해상 풍력 단지 지도

표 2-1 한국에서 가동 중인 해상 풍력 단지

해상 풍력 단지	생산량	터빈 모델	터빈 제조업체	설치연도
탐라 해상 풍력 발전소	30 MW	10 x WinDS3000/91 (3MW)	두산	2016
영광 풍력 발전소	34.5 MW	15*U113 (2.3MW)	유니슨	2018
서남해 해상 풍력 시범 프로젝트	60 MW	20 x WinDS3000/134(3MW)	두산	2020
<b>가동 해상 풍력 발전소 소계</b>	<b>124.5 MW</b>			
제주 행원 테스트 부지	3 MW	1 x WinDS3000/91 3MW)	두산	2014
전라남도 시범 단지	9.6 MW	1*U113 (2.3MW); 1 x WinDS3000/91 (3MW); 1*U151 (4.3MW)	유니슨 두산 유니슨	2015 2016 2018
군산 소재 두산 터빈 테스트 부지	3 MW	1 x WinDS3000/91 (3MW)	두산	2017
<b>육상에 설치된 해상 테스트 터빈 소계</b>	<b>15.6 MW</b>			
<b>Total</b>	<b>140.1 MW</b>			

\* 육상 터빈 모델을 해상에 설치

유럽은 총 설치 용량 25GW로 전 세계적으로 가장 큰 해상 풍력 시장을 보유하고 있다. 유럽은 15년 이상의 경험을 가지고 있으며 현재 터빈 5,402개가 그리드에 연결되어 있다. 유럽 12개국에 해상 풍력 발전 단지 116곳이 운영되고 있다. 네덜란드에서는 터빈 537개가 가동 중이며 설치 용량은 2,611 MW 이고 덴마크에서는 터빈 559개가 가동 중이며 설치 용량은 1,703 MW이다. 또한, 작년에 해상 풍력 단지 8곳의 자금 조달 조건이 확정되었으며 2021년에 건설이 시작될 예정이다. 유럽은 2020년 말 기준으로 총 62MW 급의 부유식 해상 풍력을 보유하고 있으며 이는 전 세계 부유식 풍력 용량의 83%에 해당한다. [8]

기후 중립성과 경제 회복을 모두 충족하기 위한 경제 전략인 EU 그린 딜(EU Green Deal)에는 2050년까지 EU에 300GW 규모의 해상 풍력을 보급하기 위한 해상 재생에너지 전략이 포함되었다. 그림 2-3은 지난 15년 간 유럽에 설치된 해상 풍력 누적량이다. 그림에는 덴마크가 해상 풍력 분야의 얼리어답터였으며 2006년부터 2015년까지 10년 동안 EU 전체에서 10~11GW를 설치한 것으로 나타나 있다. 이후 2020년까지 5년 동안 14GW가 추가로 설치되었다 [8].

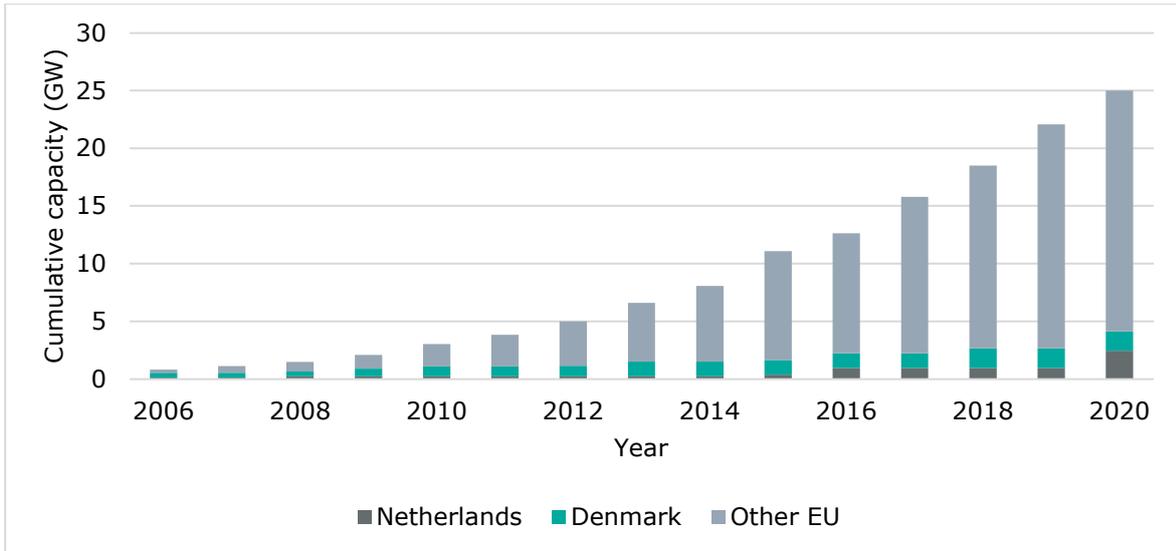


그림 2-3 지난 15년 간 유럽에 설치된 누적 해상 풍력 용량 [8]

표 2-2는 북해와 발트해에서 가장 큰 규모로 가동 중인 풍력 단지, 설치 용량, 건설 비용을 나타낸 것이다. 이 표에는 설치 용량이 300MW 이상인 해

상 풍력 단지만 포함되어 있다. 북해와 발트해 해상 풍력 발전 단지의 평균 비용은 설치 용량 1MW 당 4~5 백만 유로이다.

표 2-2 북해와 발트해의 최대 규모 풍력 발전 단지 [9]

해상 풍력 단지	시운전년도	설치 용량, MW	총 설비 투자비 (EUR)	설비 투자비 (EUR/MW)	국가
Hornsea One	2019	1,218	3.4	2.8	영국
Borssele 1 and 2	2020	752	1.9	2.5	네덜란드
Borssele 3 and 4	2021	731.5	1.3	1.8	네덜란드
East Anglia ONE	2020	714	2.9	4.1	영국
Walney Extension	2018	659	2.0	3.0	영국
London Array	2013	630	2.4	3.8	영국
Gemini	2017	600	2.8	4.7	네덜란드
Beatrice	2019	588	2.9	4.9	영국
Gode Wind 1 and 2	2016	582	2.2	3.8	독일
Gwynt y Môr	2015	576	2.7	4.7	영국
Race Bank	2018	573.3	3.0	3.4	영국
Greater Gabbard	2013	504	2.2	4.3	영국
Hohe See	2019	497	1.8	3.6	독일
Borkum Riffgrund 2	2018	450	1.3	2.9	독일
Horns Rev 3	2019	406.7	1.0	2.5	덴마크
Dudgeon	2017	402	1.7	4.3	영국
Veja Mate	2017	402	1.9	4.7	독일
Rampion	2018	400.2	1.9	4.7	영국
BARD Offshore 1	2013	400	2.9	7.3	독일
Global Tech I	2015	400	1.8	4.5	독일

## 2.2.1 프로젝트 개발 과정

해상 풍력 프로젝트의 개발은 프로젝트 개발을 시작한 후 풍력 발전 단지가 가동하기까지 매우 오래 걸린다는 것이 특징이다. 유럽에서는 개발 기간이 약 8년이지만 프로젝트 및 국가별로 큰 차이를 보일 수 있다. 한국의 허가 절차는 해상 풍력 개발의 경우 개방형 절차(open-door procedure)로, 프로젝트 개발자가 프로젝트를 시작하며 프로젝트를 완료하기 위해 필요한 개발 절차를 모두 책임진다는 원칙을 기반으로 한다.

프로젝트 개발자는 프로젝트 개발 활동을 모두 수행해야 하며 부지 선정, 부지 확인, 모든 승인 및 허가 신청 등 모든 관련된 업무와 투자를 담당한다. 또한 관련 부처와 사전 논의 협의를 통해 지역 주민의 민원을 관리해야 한다. 그림 2-4는 한국의 해상 풍력 발전 단지 개발 절차를 나타낸 것이다.

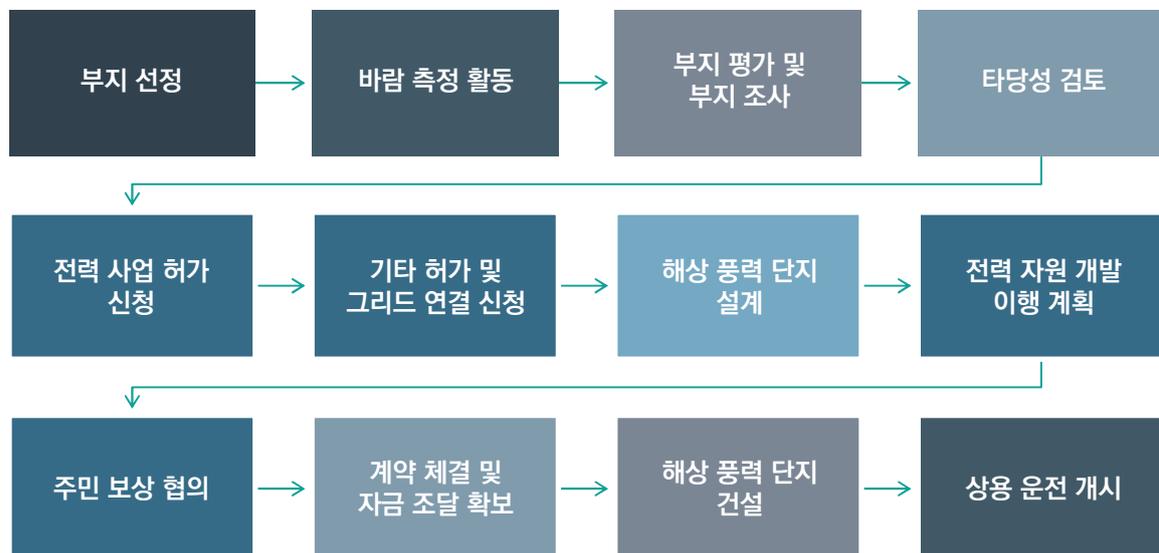


그림 2-4 한국의 해상 풍력 개발 절차

개발자는 기본 부지 자료를 바탕으로 해상 풍력 프로젝트 후보지를 선정하며 계획된 발전 설비의 용량은 전력 수급 기본 계획에 따라 결정된다. 프로젝트의 타당성은 풍황 예측 시스템(Met mast)이나 부유식 라이다(Floating LiDAR)를 사용한 고비용 해상 풍력 자원 측정 활동, 환경 영향 평가, 그리드 연결 검토, 풍력 발전 단지 배치 계획을 포함한 현장 조사를 통해 결정된다. 개발자는 풍속 측정 활동을 완료한 후 추가 허가 신청, 그리드 연결 신청, 지역

주민들의 민원 해결 업무를 계속 진행하기 위해 필요한 첫 번째 허가 과정인 EBL을 신청한다.

개발자에게는 기상 측정 장비 설치가 허가되는 시점부터 5년 동안 독점 기간이 부여된다. 이 독점 산업 통상자원부는 허가된 측정 장비당 100 km<sup>2</sup>인 유효 면적에 대하여 다른 개발자에게 EBL을 부여하지 않는다.

이 과정을 통해 평균 규모가 약 180MW인 여러 소규모 풍력 단지가 EBL을 취득했다 [6]. 이는 지난 몇 년 간 꾸준히 규모가 커지면서 2020년 평균 788MW 급의 풍력 발전 단지를 갖춘 유럽 추세와 대조를 이룬다 [8].

제주도는 중앙 정부의 정책 및 개발 절차와 다르다. 제주도 지방 정부는 2011년 제주 특별 자치도 설립에 관한 특별법 개정을 통해 풍력 자원 공공 관리 제도 조항을 제정하여 중앙 정부의 해상 풍력 발전 사업 권한을 제주 특별 자치 도지사로 이관하였다 [10]. 제주도는 부지 선정과 해상 풍력 프로젝트 허가를 관리하기 위해 지자체인 제주 에너지 공사를 출범하였다.

이와 같이 한국의 해상 풍력 발전 절차는 유럽 국가들과 다르다. 유럽은 해상 풍력 개발 초기에 “개방형” 해상 풍력 개발 원칙을 사용했으나 이로 인해 부지 선정과 허가에 대한 규제 부족으로 해상 풍력 발전 단지 개발이 정체되었다. 유럽의 미래 해상 풍력 단지 부지 선정 방식은 현재 주로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 정부가 해상 풍력 단지 개발이 가능한 넓은 지역을 선정하는 "구역 (zone)" 선정
- 정부가 선정한 소규모 지정 지역에서만 개발이 허용되는 "특정 부지 (site-specific)" 선정

네덜란드와 덴마크 정부는 개발 지역 선정, 개발 면허, 건설 허가, 운영 허가, 그리드 연결, 보조금 등 모든 단계에 관여한다. 유럽의 경험에 따르면 복잡한 해상 풍력 허가 과정은 허가 시간 지연 및 프로젝트 개발자의 위험 증가와 직접 관련되어 있다. 프로젝트 개발자의 위험이 증가하면 미실현 프로젝트 비율이 높아지고 구축 목표를 놓치게 된다. 네덜란드 및 덴마크 정부는 라이선싱과 허가 절차를 간소화하고 위험을 줄이기 위해 '원 스톱 숏' 형태의 허가 과정을 도입했다. 네덜란드 기업청(RVO)과 덴마크 에너지청(DEA)이 구현한 이 프로세스를 통해 개발자의 행정 절차가 크게 감소하고 해상 풍력 에너지 개발이

가속화된다. 이 두 정부 기관은 부지 선정, 사전 현장 조사, 라이선싱, 환경 영향 평가, 그리드 연결, 관련 인프라 구축을 담당한다 [11].

덴마크와 네덜란드에서 사용되는 단일 허가 과정과 비교하면 한국의 일관성 없는 허가 과정은 긴 리드타임과 지연 위험이 예상되는 주된 원인 중 하나이다. 이 밖에 영향을 미치는 원인은 다음과 같다.

- 지역 주민 반대 해소를 위한 중재 포럼 부재
- 그리드 연결에 관한 불확실성
- 너무 긴 허가 절차

기존의 프로젝트들은 최초 허가(EBL)부터 상업 운전일(COD; commercial operation date)까지 8-11년에 이르는 오랜 기간을 겪었다. 그림 2-5는 선정된 4개 프로젝트의 EBL에서 COD까지 개발 일정(경우에 따라 실제 일정 또는 예상 일정)을 정리한 것이다.

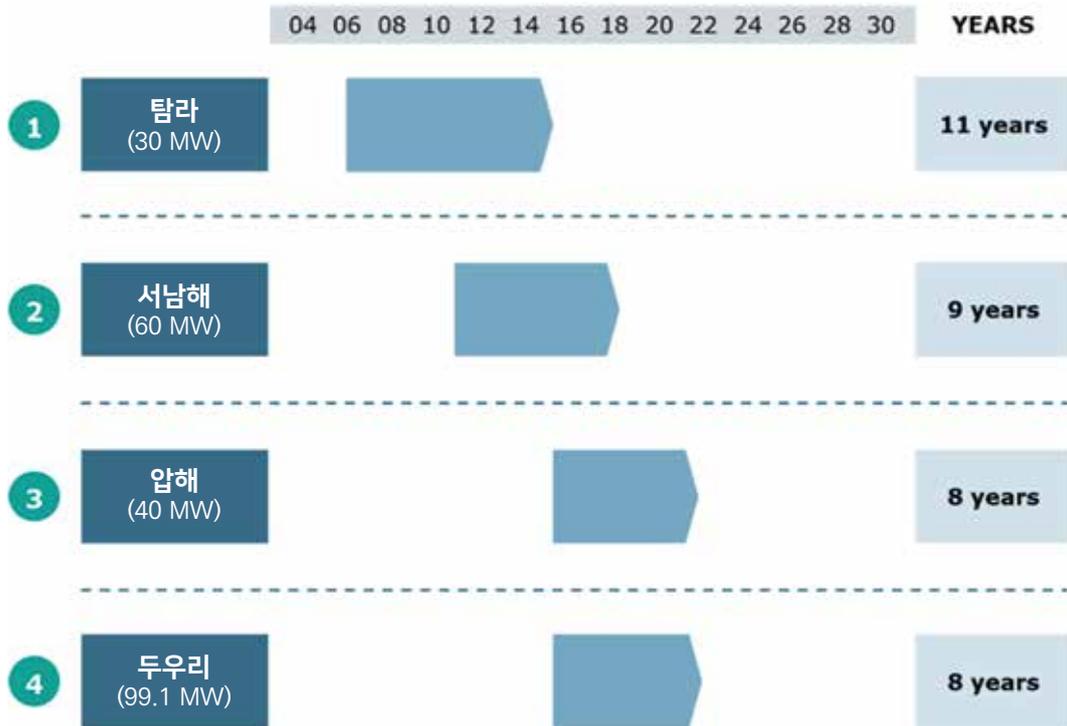


그림 2-5 선정된 4개 프로젝트의 EBL 취득부터 프로젝트 COD까지 개발 일정

일정 지연은 각종 허가가 필요하고 때로는 중앙 당국과 지방 당국의 목표가 일치하지 않아 발생했다. 본 연구에서 실시한 한국 개발자들의 이해 관계자 참여에 따르면 수산업과 여성 다이버<sup>1</sup> 등 강력한 이해 관계 단체의 반대도 해상 풍력 발전을 지연시켰다.

본 연구를 목적으로 논의에 참여한 이해 관계자들은 정부의 노력과 정책 계획에도 불구하고 한국의 해상 풍력 개발자들의 해상 풍력 계획 허가와 수용 확보 절차는 아직도 길다고 지적했다. 현재 허가 신청서를 여러 부처 (산업통상자원부, 교육부, 해양수산부 및 관련 조직)에 제출해야 하기 때문에 프로젝트 개발자에게는 불확실성을 유발하는 요소가 된다. 프로젝트를 성공적으로 실현하지 못하는 경우에도 개발자가 실패한 개발 과정의 비용을 전부 부담해야

한다.된다. 프로젝트를 성공적으로 실현하지 못하는 경우에도 개발자가 실패한 개발 과정의 비용을 전부 부담해야 한다.

### 2.2.2 개발 인센티브와 위험

해상 풍력을 구축하려면 프로젝트 개발자의 경제적 인센티브와 개발자가 시장에서 감수해야 하는 위험이 균형을 이루어야 한다. 경제적 인센티브에 비해 위험이 너무 큰 경우 개발자는 위험이 잠재적 수익만큼 가치가 없다고 결정하기 때문에 프로젝트 개발이 부진해지고 결과적으로 풍력 발전도 침체될 것이다. 본 섹션에서는 한국 프로젝트 개발자의 인센티브와 위험을 유럽 프로젝트 개발자와 비교하여 설명한다.

<sup>1</sup> 여성 다이버(해녀)들은 손으로 해산물을 수확해 생계를 유지하는 전통적 방법으로 생활한다.

## 한국의 개발 인센티브

### 재생가능 에너지 포트폴리오 표준

재생가능 에너지 포트폴리오 표준(RPS; Renewable Energy Portfolio Standard)은 에너지 공급업체가 일정 비율 이상의 에너지를 재생가능 에너지로 공급하거나 RPS 의무를 충족하지 못한 부분에 대해서는 REC를 구매하도록 의무화하는 한국의 제도이다. RPS는 2012년에 도입되었으며 에너지 총 발전량의 일정 비율에 해당하는 재생에너지를 공급하기 위해 500MW 급 이상의 발전 시설(재생에너지 시설 제외)을 갖추도록 의무화한다 [12]. 따라서 2021년까지 총 발전량의 9%, 2022년까지 10%인 초기 목표를 달성하지 못하면 REC 기준 가격의 150%가 벌금으로 부과된다. 2021년 4월 20일에 개정되어 2021년 발효되는 개정안에 따라 신재생 에너지 의무 공급량 상한선은 25%로 상승하고 실제 목표는 연 단위로 설정하게 된다. 따라서 재

생가능 에너지 목표는 계속 증가할 것으로 예상된다.

### 신재생 에너지 공급 인증서

신재생 에너지 공급 인증서(REC; Renewable Energy Certificates)는 한국의 재생가능 에너지 지원을 통한 전기 생산에 대하여 경제적 인센티브를 제공하는 시장 기반 조치(market-based instrument)로 고안되었다. REC의 기준 단위는 1MWh이며 전력 공급량이 같더라도 발전 방식에 따라 가중치를 적용하여 REC 수량을 구별한다. RPS와 REC에 따라 전기의 도매 계통 한계 가격(SMP; System Marginal Price)과 REC 가격 판매가 해상 풍력 발전의 총 수입이 된다. 그림 2-6은 2015년부터 2020년까지 SMP 거래 가격의 일시적 추세를 나타낸 것이며 [13], 그림 2-7은 같은 기간 REC 거래량과 평균 거래 가격의 일시적 추세를 보여준다 [14].

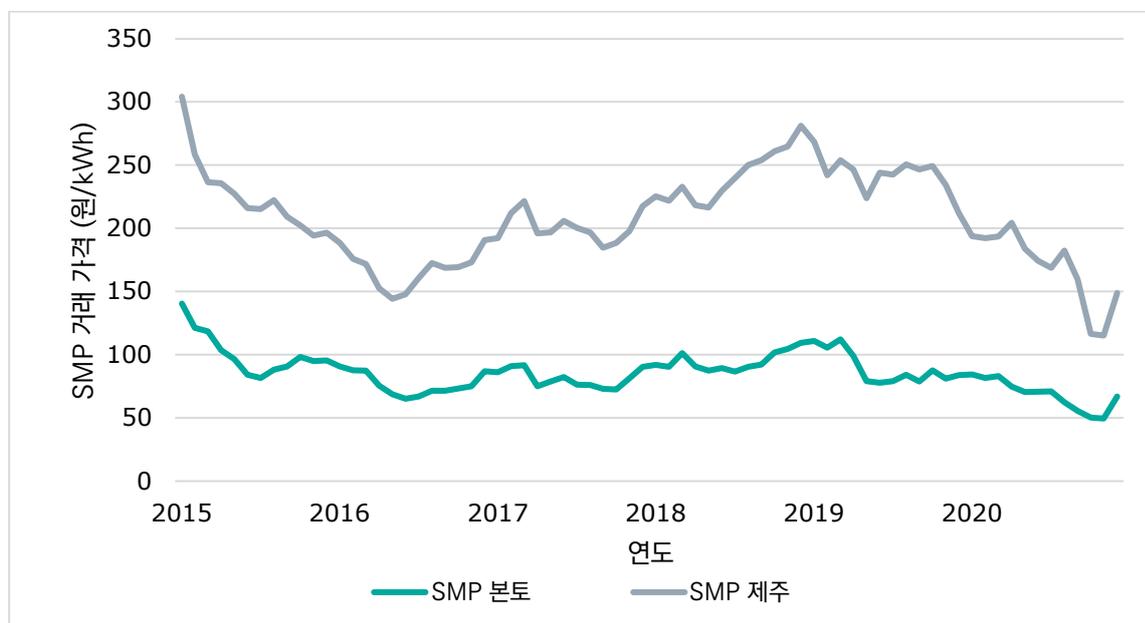


그림 2-6 SMP 거래 가격의 일시적 추세 (2015-2020) [13]

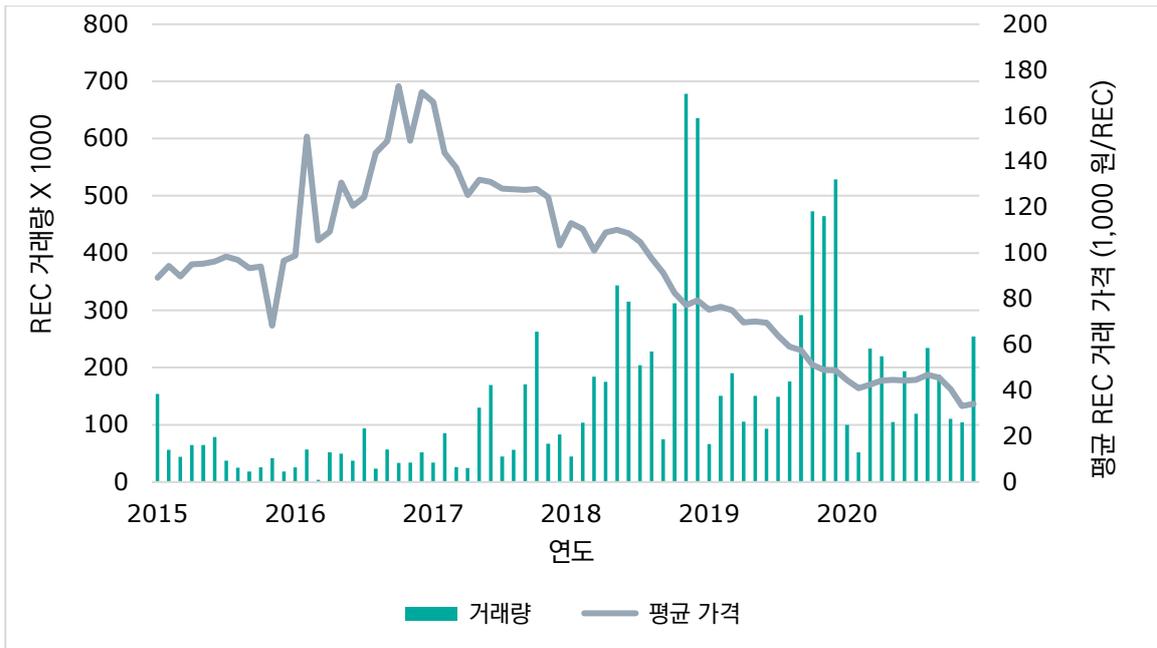


그림 2-7 REC 거래량 및 가격의 일시적 동향 (2015-2020) [14]

특정 프로젝트에 할당된 REC에는 REC 가중치 계수를 곱한다. 가중치 계수는 KEPCO 변전소와 가장 가까운 해안선과 해안선에서 가장 가까운 WTG의 중심점(연결 거리(Connecting Distance)라고 함) 사이의 직선 거리로 추산하며 범위는 2.0~2.5 이상이다.

현재 RPS에서 전력 회사는 해상 풍력 사업에서 생산된 전력을 정가로 구매하는데 정가는 SMP 또는 도매 전력 가격과 REC 가격을 합한 금액이다.

그림 2-7에서 REC 시장 가격은 2018년 5월 기준 173,000원 정도였으나 이후 계속 하락해 2020년 11월 REC 1당 33,000원 내외로 최저 가격을 기록했다. 이러한 하락의 정확한 이유는 확인되지 않았지만 이해 관계자들은 주로 다음과 같은 이유로 REC 가격이 하락한다고 밝혔다.

- 재생가능 에너지 공급 증가 (그림 2-7의 2019년경 REC 거래량 참조)
- 신재생에너지로 인정되는 다양한 발전 유형 (석탄과 목재 펄릿을 혼합한 열 발전은 신재생에너지로 인정됨)

이러한 감소 때문에 개발자들은 해상 풍력의 경제적 타당성에서 어려움을 겪고 있다. 이해 관계자들은 REC 규정 내용을 3년에 한 번씩 변경될 것으로 예상하고 있으며 2021년이 개정 예정 연도이다.

### 한국 RE100

100% 재생가능 에너지 달성에 전념하고 있는 가장 영향력 있는 기업들이 함께 하는 글로벌 이니셔티브 (RE100이라고도 함)를 본보기로 삼아 산업통상자원부는 2021년에 한국 RE100 (K-RE100) 이니셔티브를 도입할 계획이다. 재생가능 에너지를 사용하는 전기 소비자는 한국 에너지 공단에 재생에너지 신청서를 등록해 신재생에너지 사용을 승인받아야 한다. 재생가능 에너지 소비자나 생산자가 승인을 받을 수 있는 방법은 5가지이다 [15].

- 그린 프리미엄 (Green Premium): 전기 소비자가 추가로 녹색 프리미엄을 지불하고 재생가능 에너지 사용 확인서를 받는 제도
- REC 구매
- 제3자 전력 구매 계약
- 주식 투자

- 자가 발전

## 한국의 개발 위험 프로필

한국 해상 풍력 산업은 아직 개발 초기 단계에 있기 때문에 이해 관계자 참여 조사를 통해 개발 과정의 다양한 리스크를 파악하였다.

주요 위험은 섹션 2.2.1에 설명된 현재의 개발 절차와 관련된다. 한국의 개발자는 허가 신청 전에 비용이 많이 드는 초기 단계 투자를 해야 한다. 수백만 유로에 달하는 해양 기상 (metocean) 연구 및 이해 관계자 참여 (또는 보상까지 포함)에 대한 초기 투자 비용을 개발자가 전부 부담해야 한다. 허가 과정이 분산되어 있기 때문에 여러 해상 풍력 프로젝트가 지연되어 비용이 증가하고 투자 수익에 대한 불확실성이 발생한다. 프로젝트는 전력 구매 계약을 체결하고 재정을 확보한 후에 확정되는데 이 단계가 개발 과정에서 매우 늦게 진행되기 때문에 프로젝트 개발자의 위험이 더 커진다.

허가의 불확실성과 높은 초기 개발 비용 외에 필요한 허가를 취득하기 위한 요건 중 하나는 인근 주민들의 동의를 입증하는 것이다. 본 연구에서 실시한 이해 관계자 참여를 보면 이러한 동의는 증명하기 어려우며 많은 프로젝트가 지역 주민의 반발을 겪고 지연되는 것으로 나타났다.

한국의 전기 그리드(electricity grid)는 아직 재생 가능 에너지원에 최적화되어 있지 않기 때문에 개발자는 진행 중인 프로젝트의 그리드 연결이 적시에 제공될 것이라는 확신이 없다. 필요한 그리드 최적화를 담당하는 관련 당국은 이 제약을 해결하려고 노력하고 있지만 정부와 추가적인 논의 및 협의가 필요하며 이 과정은 시간이 많이 걸릴 것으로 보인다. 이런 점도 해상 풍력 프로젝트의 지연 위험을 증가시킨다.

개발자들은 OEM (Original Equipment Manufacturer)이라고도 하는 해외 풍력 터빈 제조업체와 계약을 체결할 때도 제약을 겪는다. 많은 이

해 관계자들은 프로젝트 비즈니스 사례에서 국내 OEM의 실적 부족으로 인한 추가 위험을 감당할 수 없기 때문에 해외 OEM을 강력하게 선호한다고 밝혔다. 여러 이해 관계자들이 국산 부품 사용 요건 (LCR; Local Content Requirement)과 관련된 불확실한 전망이 한국 시장 진출에 제약이 된다고 여긴다. 이해 관계자들은 전력 구매 계약 체결할 때 특정한 현지 부품 사용 요건이 있다는 점에는 동의하지만 요건의 내용이 문서화되어 있지 않는다. 결국 개발 과정에서 매우 늦은 시점까지 프로젝트 불확실성이 증가한다. 본 연구를 위해 이해 관계자들과 논의하는 과정에서 이 문제를 둘러싼 불확실성이 반복해서 나타났다.

## 한국의 전반적 프로필

앞에서 논의한 인센티브와 위험을 고려할 때 한국 해상 풍력 개발자들의 현재 위험 프로필은 불균형적으로 보인다. 주요 개발 위험으로는 오래 걸리고 신뢰할 수 없는 허가 절차, 지역 주민의 반대에 대한 길고 불확실한 해결 절차, 발전된 외국 터빈 기술 사용에 대한 장벽이 암묵적으로 국산 부품 사용 요건이라는 형태로 나타난다는 점 등이 있다. 허가 과정과 주민 반대 처리 같은 사안은 인허가 절차 간소화를 모색하는 그린 뉴딜(Green New Deal)에서 다루고 있다. 이와 같은 계획이 구현되면 개발자의 허가 위험이 크게 감소할 것이다.

인센티브의 경우 정부는 시장에 다양한 조치를 시행하여 개발자들이 해상 풍력 사업에 투자하고 참여하도록 장려하고 지원하고 있지만 여전히 미흡하며 많은 제도적 약점이 있다. 한편 REC 가격 하락은 잠재적인 위험 요소이다. 2021년 개정안에서 REC 위험에 대해 다룰 가능성도 있다.

## 유럽 개발 인센티브

유럽에서는 해상 풍력 투자를 가속화하기 위해 발전 차액 지원 제도(FIT; feed-in tariffs)를 가장 많이 사용하고 있다. 가장 일반적인 FIT 정책 두 가지는 고정 FIT와 프리미엄 지원제도(feed-in premium)

로 전자는 전기 시장 가격과 무관하며 후자는 의존적으로 볼 수 있다. 표 2-3에는 한국, 네덜란드, 덴마크의 정부 보조금 제도에 관한 내용이 설명되어 있으며 각 정부의 해상 풍력 인센티브 제도를 비교한 것이다.

표 2-3 해상 풍력 보조금 제도 및 비교

국가	한국	네덜란드	덴마크
보조금 형태	RPS	Stimulerend Duurzame Energieproductie, Windenergie op Zee (SDE+Offshore Wind), 2018년부터 보조금 미지급	발전 차액 정산 제도 (CfD; Contract for Difference)
옵션	REC	발전 차액 유연 지원 제도 (Sliding Feed-in Premium)	발전 차액 유연 지원 제도
지원 기간	전 주기	15년 + 1년 예치 (banking)	50,000 전부하 운전시간 (full-load-hours) (부지와 기술 솔루션에 따라 운전 기간 약 11~12년에 해당)
경매	-	+	+
세액 공제 (Tax production credit)	+	+	+

보조금과 개발권은 기업이 해상 부지를 대상으로 입찰하는 경쟁 입찰 절차를 통해 부여된다. 이 입찰에서 풍력 발전 단지의 건설 및 운영 허가가 동시에 부여된다. 입찰 참가자는 입찰에 포함된 kWh 당 최저 비용으로 입찰 금액의 기술적, 재정적 타당성을 입증해야 한다.

설명된 접근 방식으로 개발자의 개발 시간과 비용이 크게 줄었다. Hollandse Kust Zuid I & II 입찰 (700MW)은 2018년에 보조금 없이 Hollandse Kust Zuid III 및 IV (760 MW)와 Hollandse Kust Noord (759 MW) 프로젝트도 각각 2019년과

2020년에 보조금 지원 없이 낙찰되었다. [16, 17, 18] 이 모든 프로젝트에서 그리드 연결, 허가, 모든 토양 조사 비용은 네덜란드 정부가 부담한다.

## 유럽 개발 위험 프로필

유럽에서는 프로젝트 개발자의 위험 감소로 해상 풍력 에너지의 균등화 발전 비용이 지난 몇 년 동안 크게 감소했다. 허가에 대한 원 스톱 숏 구현, 경쟁 입찰 계획 시행, 풍력 터빈 크기에 따른 해상 풍력의 경제성 향상 및 발전된 공급망을 에너지 비용 절감의 주요 동인으로 볼 수 있다. 그 결과 프로젝트 개발자의 위험이 감소되었다.

그러나 프로젝트 개발에서 정부 당국이 많은 결정을 내리기 때문에 프로젝트 기획에서 개발자의 자유는 제한적이다. 해상 풍력 단지의 프로젝트 규모와 개발 영역은 당국이 선정하며 개발자는 새로운 사업 기회를 거의 발견할 수 없고 산업과 시장 규모는 제도적 여건에 따라 크게 제한된다. 또한 소규모 개발자들은 해상 풍력 구축 경험 및 자본 현황에 대한 엄격한 기준 때문에 해상 풍력 입찰에 참여할 수 없다.

유럽 개발자들의 또 다른 주요 위험은 프로젝트 비즈니스 사례가 입찰 가격을 기준으로 정해진다는 점이다. 건설비가 예상 우발 위험을 초과하거나 PPA 수익이 예상보다 낮을 경우 프로젝트의 재정적 타당성이 급격히 떨어질 수 있다.

## 유럽의 전반적 프로필

앞에서 논의한 인센티브와 위험을 고려할 때 네덜란드와 덴마크의 해상 풍력 개발자들의 현재 위험 프로필은 균형적인 것으로 보인다. 개발자에게 프로젝트 위험이 여전히 존재하지만 가장 직접적으로 통제할 수 있는 것들이 대부분이다.

인센티브의 측면에서 비록 네덜란드에는 최저 에너지 가격 메커니즘이 구축되어 있지 않지만 인센티브는 잠재적인 수익 하락을 제한하여 투자 확실성을 보장한다. 이렇게 균형 잡힌 위험 프로필과 성숙한 공급망을 통해 에너지 비용을 신속하게 감축할 수 있었다.

## 2.3 요약

2017년부터 한국 정부는 한국의 해상 풍력에 관련 정책을 구성하는 몇 가지 계획을 발표하였다. 모든 계획의 공통 목표는 재생가능 자원의 에너지를 늘리고 해상 풍력 용량을 현재의 124.5MW에서 2030년까지 12GW로 확대하는 것이다.

유럽, 특히 덴마크와 네덜란드는 해상 풍력의 얼리어답터로 경험을 통해 자체적인 해상 풍력 개발 정책을 수립했다. 유럽의 사례를 보면 복잡한 해상 풍력 허가 과정은 허가 시간 지연 및 프로젝트 개발자의 위험 증가와 직접 관련된 것으로 나타났다. 네덜란드 및 덴마크 정부는 인허가 절차를 간소화하고 위험을 줄이기 위해 '원 스톱 숏' 형태의 허가 과정을 도입했다. 네덜란드 기업청(RVO)과 덴마크 에너지청(DEA)이 이러한 과정을 이행하면서 개발자의 행정 절차가 크게 줄고 해상 풍력 에너지 개발과 보급이 가속화되었다. 이 두 정부 기관은 부지 선정, 사전 조사, 인허가 절차, 환경 영향 평가, 그리드 연결, 관련 인프라 구축을 담당한다.

한국 정부의 계획에 따르면 해상 풍력 투자에 유리한 여건이 조성될 것으로 보이지만 2020년 말 기준으로 총 설치 용량이 124.5MW인 해상 풍력 단지 4개만 실현되었다. 이 밖에 총 개발 용량이 약 7.7GW 규모인 42개 해상 풍력 프로젝트에서 전기를 생산하기 위해 필요한 가장 첫 라이선스를 취득하였다. 풍력 이러한 프로젝트는 주로 한국 민간 기업이나 한국 민간 및 공공 기관 컨소시엄이 개발한다.

정부는 2030년까지 12GW 규모의 해상 풍력 건설 목표를 달성하기 위해 한국의 해상 풍력 협력 계획을 통해 지자체 주도 부지 선정 도입, 고려 구역, 면허 절차 간소화를 추진하고 주민 수용성을 확대하고 있다.

지금까지 정부의 포부와 노력에도 불구하고 현재 개

발자의 위험은 유럽의 성숙한 개발 환경에 비해 높은 것으로 보인다.

한국 정부는 원 스톱 허가를 담당하는 새로운 조직을 설립하겠다는 계획을 발표했지만 부처 간 입장 차이로 지연되고 있으며 여전히 논의가 진행 중이다. 또한 프로젝트 개발자들은 아직도 지역 수산업 및 여성 다이버 단체의 반대를 겪고 있으며 허가, 조기 개발 투자, 국산 부품 사용 요건에 대한 불확실성 등으로 높은 투자 위험에 시달리고 있다. 경험이 없는 계약자의 참여로 설치 및 운영 단계의 위험과 비용이 증가할 것으로 예상된다.

한국에서는 프로젝트 개발자가 초기 개발 비용을 전부 부담한다. 전기 그리드를 개선하고 대량의 재생 가능 에너지에 적합하게 구축하려면 추가적인 논의와 협의가 필요하기 때문에 그리드 연결과 관련된 불확실성도 또 다른 위험이다.

허가된 해상 풍력 프로젝트의 경제적 타당성은 해상 풍력 이외의 자원을 이용해 지속가능한 방식으로 생산되는 에너지 비율의 증가로 REC 가격이 하락하면서 압박을 받고 있다. 끝으로 불명확한 국산 부품 사

용 요건은 외국 풍력 터빈 제조업체의 한국 시장 진출에 큰 장애물로 작용해 경쟁이 제한되어 풍력 터빈에 대한 경쟁은 줄고 가격은 대체로 높아진다.

본 연구에서는 개발자의 위험을 줄이고 산업을 활성화할 수 있도록 한국의 정책 입안가들에게 정책 환경에 대한 몇 가지 권장사항을 제안한다.

- 명확하고 안정적인 장기 로드맵: 도입된 기본 계획은 광범위하지만 더 자세하고 구체적인 계획이 필요하다.
- ‘원 스톱 슝’ 허가 과정 도입: 인허가 과정 지연과 그로 인한 위험과 비용의 증가를 방지해야 한다.
- 정부의 위험 부담: 개발 초기 단계에서 개발자의 위험을 줄이려면 정부가 부지 선정, 허가, 그리드 연결, 이해관계자 참여를 진행해야 한다.
- REC 가격 감소로 인한 개발자의 부담을 완화하기 위해 안정적이고 예상 가능한 금전적 인센티브를 부여하는 공식 법규를 수립해야 한다.



Photo: GE

구민망

## 3 공급망

한국의 해상 풍력 에너지가 성장하려면 유리한 정책 환경 외에도 풍력 발전 단지를 구축, 설치 및 운영할 수 있는 적절한 공급망이 필요하다. 한국의 해상 풍력 발전 가속화는 유리한 정책 환경 외에도 업계가 지속 가능하고 효과적인 공급망을 구축하는 능력에 달려 있다. 이 공급망이 해상 풍력 용량의 이용 속도 뿐만 아니라 비용까지 결정한다.

이 장에서는 해상 풍력 공급망의 핵심 구성 요소와 유럽과 한국의 주요 업체를 개괄적으로 살펴본다. 이는 관련된 모든 기업에 대하여 완전한 개요를 제공한다는 의미가 아니다. 또한 한국의 공급망에 대하여 단기 (2026년 이전) 및 중기 (2026년부터 2030년까지) 전망을 설명하고 한국에 12GW 규모의 해상 풍력 발전 단지를 구축할 수 있는 효율적 방법을 찾기 위한 두 가지 공급망 시나리오를 소개한다.

### 3.1 공급망 구성요소

해상 풍력 발전 단지는 육상 변전소에서 해상의 풍력 터빈까지 상호 연결된 부품으로 이루어진 시스템이다. 그림 3-1은 고정식 해상 풍력 발전 단지의 전형적인 구성 요소를 나타낸 것이다.

그림의 구성 요소는 전형적인 해상 풍력 발전 단지 공급망이다. 풍력 터빈은 풍력 발전 단지의 핵심이며 터빈을 제외한 모든 인프라를 포함하는 BOP

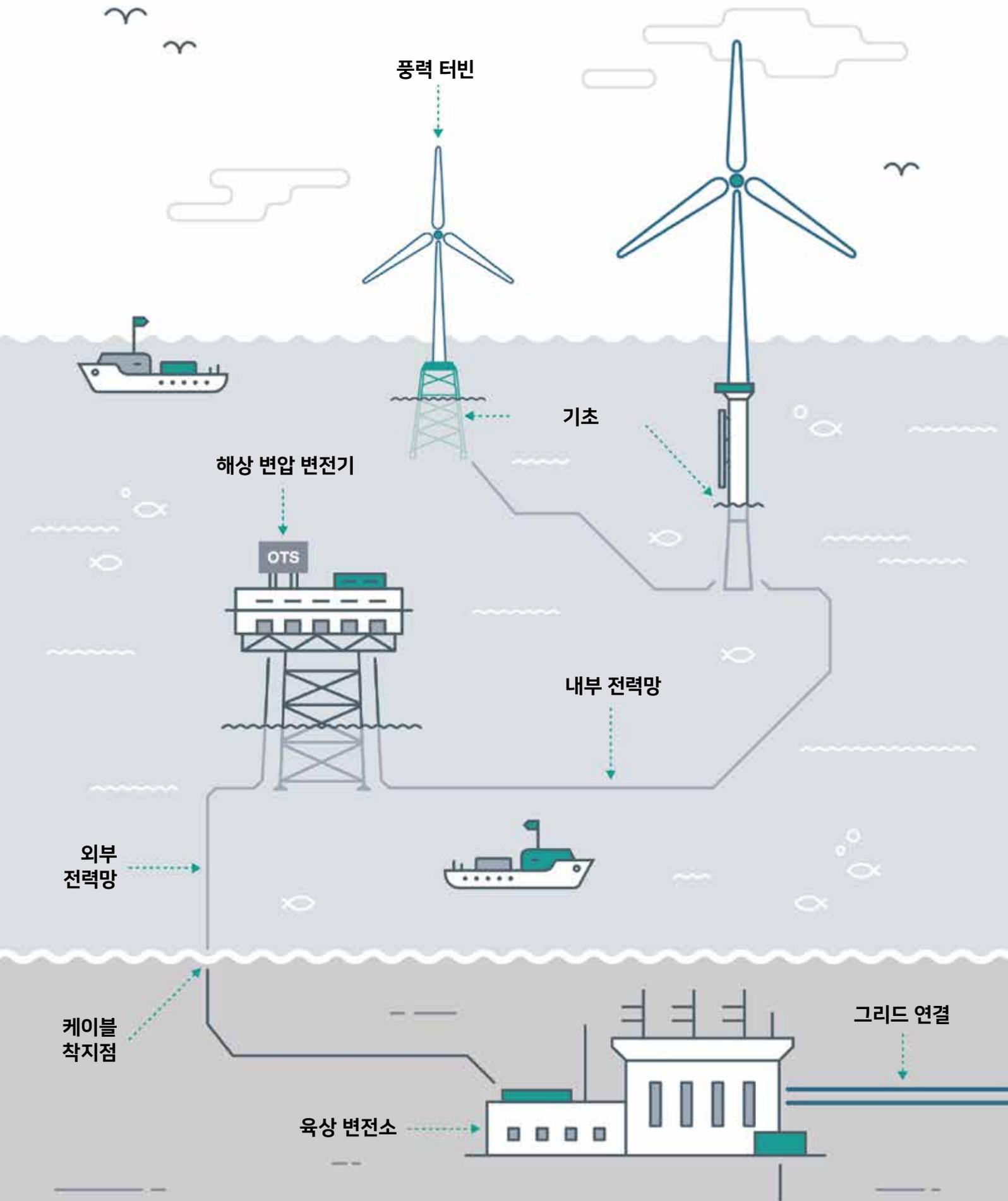
(Balance of Plant)의 지원을 받는다. BOP는 다음을 포함한다.

- 터빈 기초  
(일반적으로 모노파일 또는 재킷)
- 기초와 터빈 사이의 트랜지션 피스
- 내부 전력망  
(풍력 단지 내부의 중전압 전력망)
- 해상 변전소
- 외부 전력망 (해상 변전소와 육상 변전소를 연결하는 고전압 케이블)
- 육상 변전소
- 육상 그리드 연결에 필요한 추가 요소

이러한 구성 요소의 제조 및 공급 외에 그림에도 표시된 특수 선박을 통해 설치 및 서비스를 받아야 한다. 풍력 단지의 수명이 끝나면 비슷한 선박을 이용해 해체한다.

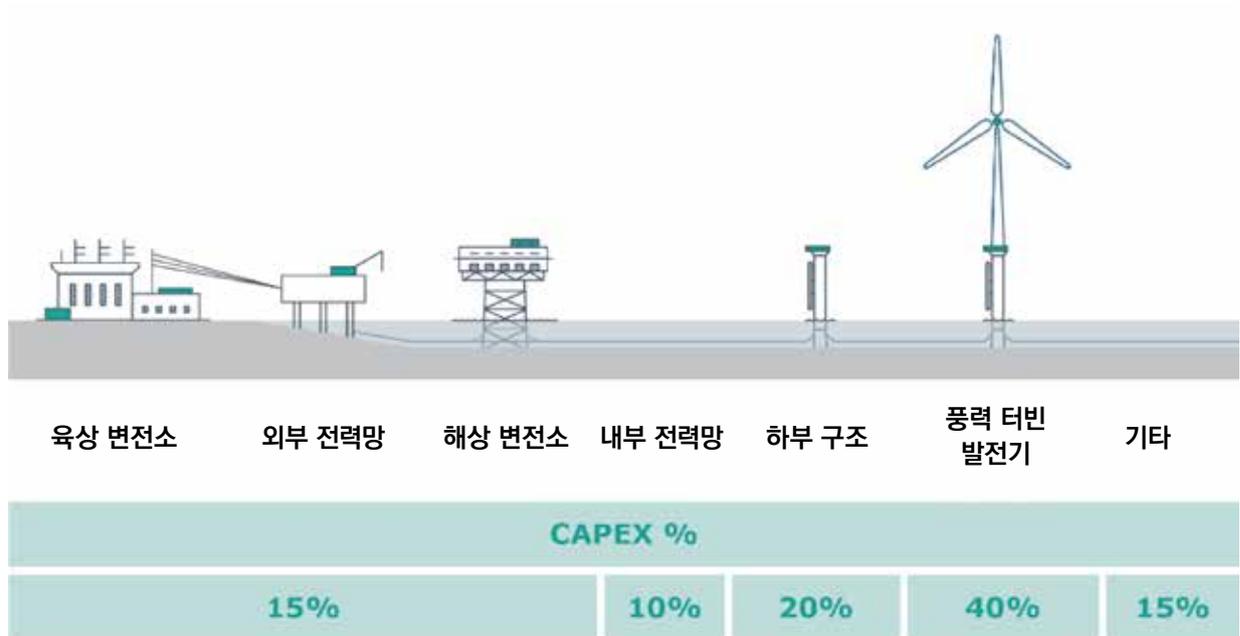
부유식 해상 풍력 발전 단지의 구성 요소는 약간 다르다. 고정식 모노파일은 특수 선박이 해저에 집어 넣지만 부유식 기초는 목적지로 견인한 후 제자리에 정박하면 된다. 부유식 풍력 발전 단지도 마찬가지로 해상에 터빈을 설치할 때 특수 터빈 설치 선박이 필요하지 않다. 터빈은 항구에서 부유식 기초에 간단히 장착한 후 설치가 끝난 풍력 발전 단지로 견인된다.

그림 3-1 전형적인 고정식 해상 풍력 발전 단지의 구성 요소 (출처: COWI)



예산 내에서 프로젝트를 제 시간에 완료하려면 모든 단계와 시스템에 걸쳐 적절한 공급망을 갖추는 것이 중요하다. 개발 단계의 많은 요소가 비용을 유발한다. 그림 3-2는 풍력 발전 단지의 자세한 비용 내역을 나타낸 것이다. 이 그림에 표시된 백분율 수치는 참고용이다. 부지 조건, 건설 방법, 기술 수준, 공급망 용량에 따라 차이가 클 수 있다.

을 나타낸 것이다. 이 그림에 표시된 백분율 수치는 참고용이다. 부지 조건, 건설 방법, 기술 수준, 공급망 용량에 따라 차이가 클 수 있다.



\*내외부 자원 비용, 보험, O&M 시설 및 장비, 우발 포함

그림 3-2: CAPEX 구성 요소 및 총 CAPEX에서 각 구성 요소의 비중 [19]

해상 풍력 프로젝트는 자본 집약적이다. 그림 3-2를 보면 해상 풍력 발전 단지의 비용은 대부분 풍력 터빈의 공급, 설치와 BOP에서 발생한다. 이들 항목에 대해서는 향후 섹션들과 프로젝트 개발에서 자세히 다룰 것이다. 프로젝트 개발 비용 자체는 풍력 단지 CAPEX에서 적은 비율을 차지하지만 개발 단계가 나머지 풍력 단지 비용에 불균형적으로 큰 영향을 미친다.

해상 풍력 프로젝트의 일반적인 단계는 다음과 같이 설명할 수 있다.

### 3.1.1 프로젝트 개발

해상 풍력은 다분야에 걸친 산업으로 프로젝트를 개발하려면 광범위한 지식, 기술, 경험이 필요하다. 필요한 사항과 프로젝트 이행 유지 방법에 대해 충분한 지식을 갖춘 개발자는 프로젝트를 성공적으로 실현하고 리더와 인허가 당국을 만족시킬 수 있는 유리한 입장에 있다.

- 부지 인수
- 타당성 조사
  - 풍속 측정
  - 풍력 단지의 잠재적 수익 계산
  - 예비 터빈 선정
  - 기본적인 기초 설계
  - 레이아웃 최적화
  - 그리드 연결 옵션
  - 케이블 경로 결정
  - 재정적 타당성
- 환경 영향 평가
- 허가
- 컨소시엄 구성

- 계약 체결 (풍력 터빈, BOP, 건설 및 설치)
- 전력 구매 계약
- 자금 조달
- 건설 관리
- O&M 관리

이 모든 단계에서 경험이 있는 개발자, 컨설턴트, 엔지니어가 매우 중요하다.

## 해외 공급

한국이 2030년까지 해상 풍력 발전 규모를 12GW로 확대하겠다는 포부를 밝히면서 전 세계 많은 개발자들이 한국으로 진출하고 있다.

오스테드는 인천 앞바다에 1.6GW 규모의 한국 해상 풍력 프로젝트에 대한 계획을 발표했다. 노스랜드 파워는 전남 초도 인근에 해상 풍력 개발 부지를 몇 군데 보유하고 있는 개발업체인 다도오션윈드팜에 대한 인수 계약 체결을 발표했다. 그린 인베스트먼트 그룹과 토탈 SE는 총 발전량 1.5 GW 규모로 울산에 세 곳, 총 발전량 800MW 규모로 전남에 두 곳 등 해상 풍력 프로젝트 다섯 건으로 구성된 초기 포트폴리오를 공동 개발하는 계약을 체결했다 [20, 21, 22]. 독일의 개발업체인 더블유피디는 현재 공개하지 않은 현지 파트너와 “1 GW 이상 규모의 잠재적인 육상/해상 프로젝트 파이프라인”을 진행하고 있다 [23].

울산시는 시의 부유식 해상 풍력 구축에 참여하도록 여러 주요 글로벌 개발업체를 유치했으며 (1) 문무바람 (로열 더치 셸과 코엔스핵시쿰), (2) 코펜하겐 인프라스트럭처 파트너스와 SK E&S, (3) 그린 인베스트먼트 그룹, (4) KF윈드 (윈드파워 코리아, 프린시플 파워, EDP 리뉴어블, 에이커 솔루션, ENGIE) (5) 에퀴노르, 한국 석유 공사, 한국의 전력 업체인 한국 동서 발전) 등 다섯 개 컨소시엄과 양해각서를 체결했다 [24, 25, 26, 27].

개발업체와 더불어 국제 컨설턴트, 엔지니어링 기업, 연구 기관 등도 한국에 진출하고 있다.

폰데라 컨설트는 네덜란드 소재의 국제 재생 에너지 컨설턴트사로 제주 한림 해상풍력에 오너스 엔지니어 서비스를 제공하고 있다 [28]. K2 매니지먼트는 덴마크의 국제 재생 에너지 컨설턴트사로 태안 해상 풍력의 오너스 엔지니어 업무를 수행하고 있다 [29]. COWI는 엔지니어링 및 시장 자문 컨설턴트사로 해상 풍력 구축 경험이 있으며 한국에 사무소를 두고 있다. 아에기에르 인사이트는 덴마크 코펜하겐의 본사에서 세계 시장의 시황을 제공하고 있다.

멜타레스는 독립 응용 연구 기관으로 특히 수자원 분야 연구에 중점을 두며 응용 연구 및 컨설턴트 프로젝트의 형태로 해상 풍력 산업에도 기여하고 있다 [30]. KCI는 해상 풍력에 대하여 깊이 있는 엔지니어링 및 설계 서비스를 제공하며 [31] 지리학 데이터 전문업체인 푸그로는 기초에 대한 설계 및 설치 컨설팅 서비스를 제공한다 [32]. 독일의 엔지니어링 업체인 Iv-Groep은 해상 변전소 설계 분야에서 실적을 보유하고 있다 [33].

## 국내 공급

2021년 3월 기준 총 42개 해상 풍력 프로젝트가 EBL을 취득했다 [6]. 이 중에서 태안 해상 풍력이 총 발전량 504 MW 규모로 가장 크며 한국 남동 발전, 한국 서부 발전, 두산중공업으로 구성된 특수 목적 회사가 개발하게 된다. 지방 차원에서는 전남 해상 풍력 발전 단지가 가장 큰 규모로 총 발전량 984 MW에 이르는 해상 풍력 프로젝트를 한국 전력, 한화 E&C, SK E&S가 3단계에 걸쳐 개발하게 된다. 한림 해상 풍력 발전(100 MW)은 올해 건설이 착공될 가능성이 있는 유일한 해상 풍력 발전 프로젝트이다. 이 프로젝트는 한국 전력, 한국 중부 발전, 한국 전력 기술(KEPCO E&C)로 구성된 특수 목적 회사가 개발하고 있다. 현재의 허가 과정을 감

안하면 다음 해상 풍력 단지들이 앞으로 착공 준비를 하고 있다.

- 안마 해상 풍력 발전 (JNDC- KWC- KHNP-HEC 컨소시움)이 개발 중인 안마 해상 풍력 단지
- SK E&S가 개발 중인 전남 해상 풍력 발전 (96 MW)
- 명운 개발이 개발 중인 낙월 해상 풍력 발전 (358 MW)
- 한국 남동 발전이 개발 중인 금일 해상 풍력 발전 (200 MW)
- 한화 E&C가 개발 중인 신안 우이 해상 풍력 발전 (396 MW)

EBL을 취득한 개발업체 전체 목록은 별첨 A 참조.

해상 풍력 산업에서는 프로젝트 대주에게 제공하는 부지 조건 검토, 경제적 타당성 분석, 설계 및 기술 자문 서비스 등 각종 엔지니어링 서비스가 요구된다. 블루 윈드 엔지니어링, 윈디텍, 유석 산업, 드림 엔지니어링, 한새 코리아, 케이윈드, 한국 전력 기술, 한국 에너지 종합 기술 (KLEM), 삼안 엔지니어링, 유신 엔지니어링, 도화 엔지니어링이 해상 풍력 발전 개발에 대한 엔지니어링 서비스를 제공하고 있다.

### 3.1.2 풍력 터빈

해상 풍력 공급망에서 풍력 터빈 공급 계약과 O & M 계약은 개발자가 체결하는 가장 큰 계약이다. 해상 풍력 터빈의 크기는 계속 증가하고 있다. 2020년 유럽에 설치된 터빈의 평균 정격 용량은 8.2 MW였으며 2022년에 설치 예정인 터빈의 평균 크기는 10-13 MW이다. GE 리뉴어블 에너지는 2018년에 12-14MW 터빈을 출시했다 [34]. 지멘스 가메사는 최근 2024년부터 상용화 예정인 15MW 풍력 터빈을 공개했다 [35]. 최근의 터빈 관련 발표는 대부분 15 MW 범위의 정격 용량에 관한 것이었다

[34, 35, 36]. 이러한 발전은 유럽의 북해, 발트해, 아일랜드해의 강한 바람 때문에 이루어지는 것으로 유럽의 풍력 단지는 대개 100m에서 평균 풍속 9-10m/s 이상으로 설치된다 [37].

그러나 한반도의 풍속은 보통 허브 높이 100m에서 6.5-8m/s로 매우 낮다 [37]. 이러한 저풍 조건에서는 저풍속 육상 풍력 터빈처럼 대구경 로터와 비교적 작은 발전기로 구성된 터빈이 가장 적합하다.

풍력 터빈은 다음과 같은 주요 부품으로 구성된다.

- 블레이드
- 나셀
- 저속 샤프트
- 기어박스
- 고속 샤프트
- 발전기
- 요, 피치 드라이브, 베어링
- 타워 플랜지

풍력 터빈은 위와 같은 부품이 포함된 아주 복잡한 장비이기 때문에 외국 공급업체와 해외 공급업체가 부품에 관한 협력을 통해 시너지 효과를 노리는 것을 고려해 보는 것도 좋다. 이렇게 부품 협력을 진행하면 국산 부품 비중을 확대할 수 있다.

## 해외 공급

유럽의 해상 풍력은 MHI 베스타스 해상 풍력 (베스타스), 지멘스 가메사 재생 에너지 (SGRE), GE 재생 에너지 (GE) 등 세계적으로 활약하고 있는 3개 OEM이 주도하고 있다.

GE는 2018년 최대 용량의 12-14MW 터빈을 출시했으며 지멘스 가메사는 최근 2024년부터 상용화 예정인 15MW 풍력 터빈을 공개했다. [34, 35] 베스타스는 2024년부터 연속 생산을 시작할 예정인 V236-15.0MW를 선보인다 [36].

글로벌 OEM은 한국 시장의 저풍속을 고려해 대부분 로터 직경이 큰 대형 터빈 모델을 제공하고 발전기 출력을 약 10MW 수준으로 줄일 것으로 보인다. 이는 섹션 4.1.1에서 살펴볼 결과 성능 곡선의 장점과 더불어 타워와 기초 설계를 최적화해 비용이 약간 감소할 수 있다. 풍력 터빈에 상대적으로 낮은 풍하중이 가해지므로 설계 수명을 25년 이상으로 예상할 수 있는데 이는 저풍속 지역에만 한정되는 것은 아니다. 향후에는 풍력 발전 단지의 운영 수명 연장을 위해 광범위한 상태 모니터링 시스템과 라이더 풍력 측정을 사용하는 스마트 모니터링과 같은 혁신 기술도 사용될 것이다.

KK 윈드 솔루션, 미타 테크닉 등 덴마크 기업들은 풍력 터빈 제어, 하부 구조, SCADA 스템을 제공한다. LM 윈드 파워와 웰콘은 각각 해상 풍력 터빈용 블레이드와 타워를 제공한다 [38, 39, 40, 41].

골드윈드, 상하이 일렉트릭, 밍양, 엔비전 등 중국 OEM이 생산하는 터빈은 중국 시장에서 거의 독점적으로 사용하고 있다. 중국 터빈의 정격 용량은 3 ~ 8 MW이다 [42, 43, 44, 45].

## 국내 공급

해상 풍력 시장에서 국내 OEM 업체로는 두산 중공업 (두산), 유니슨, 효성 등 3개 기업이 활동하고 있다.

OEM 업체들 중 두산은 현재 해상 풍력 터빈을 생산하는 유일한 업체로 알려져 있다. 두산의 3MW DS3300 모델은 상업 프로젝트에 공급된 유일한 해상 터빈으로 총 30건의 실적을 올렸다 [46].

두산은 2017년에 현대전자로부터 5.5MW 풍력 터빈 설계 및 제조 면허를 확보해 현재 두산 WinDS5500으로 시판되고 있다. 2020년에 두산 5.5MW 모델 총 18 대가 제주 한림 해상 풍력 프로젝트에 배치될 것이라는 발표가 있었다 [47].

두산은 2018년부터 8MW급 해상 풍력 터빈 개발에 착수했다. 터빈 디자인은 한국과 기타 아시아 지역 등 상대적으로 저풍속 지역에 중점을 두고 있다. 이 프로젝트는 정부의 지원을 받고 있으며 2022년 상용화를 목표로 한다 [48].

유니슨은 풍력 터빈 전문 기업으로 육상 터빈 분야에서 상당한 실적을 보유하고 있다. 최근에 새로운 해상 풍력 터빈 Hemu-X 10MW를 개발하겠다는 계획을 발표했다. 유니슨은 2021년부터 프로토타입을 생산해 2023년 첫 해상 풍력 터빈 상용화를 목표로 한다 [49].

효성의 5MW 프로토타입은 2014년 시험 부지에 설치되어 2015년에 인증 받았으나 이후 해상 풍력 시장에서 활동을 추진하겠다는 판매 실적이나 발표가 없었다 [50].

한국 기업인 씨에스윈드는 모든 글로벌 풍력 터빈 제조업체와 일부 중국 OEM의 타워를 생산하는 선두 주자이다. 씨에스윈드는 중국을 제외한 세계 시장에서 점유율 60-70%를 차지하고 있다 [51].

풍력 터빈 부품 분야에서 한국 공급업체들의 실적은 비교적 우수하다. 해성 티피씨는 3 MW급 풍력 발전 시스템 요 드라이브와 피치 드라이브를 개발해 총 21대를 납품하였으며 추가 공급 계약이 진행 중이다. [52]. 단조품 전문 기업 태웅은 [53 한국 에너지 기술 평가원의 지원으로 요 베어링 개발에 성공해 해외 진출을 적극 추진하고 있으며 현재 GE와 베스타스에 안정적으로 제품을 판매하고 있다. PSM (평산) [54], 태웅, 용현 BM, 현진 소재 [55], 동국 S & C [56], 유니슨이 메인 샤프트, 타워 플랜지, 타워, 베어링 등 강단조 및 용접 공정을 거치는 주요 부품을 생산, 수출하고 있다. 대형 블레이드의 경우 케이엠이 3 MW, 5.5 MW, 7 MW급 풍력 발전기 블레이드를 제조한 경험이 있으며 휴먼 컴퍼지트는 [57] 최근 대형 블레이드 생산을 위한 수주 계약에 착수하였다. 국내 유일 블레이드 제조업체인 휴먼 컴퍼지트는 2 MW급 육상 블레이드부터 5 MW급 해상 블레이드까지 생산하고 있다. 2017년부터는 초경량 탄소 섬유로 3 MW급 (IEC Class III) 블레이드를 생산하여 서남해 해상 풍력 시범지에 공급하고 있다.

### 3.1.3 발전 보조 설비 (BOP; Balance of plant)

발전 보조 설비 계약에는 풍력 터빈을 제외한 기초, 케이블 연결, 해상 변압기 변전소, 육상 변전소 등 모든 인프라의 엔지니어링, 조달, 설치가 포함된다. 터빈 기초는 BOP 투자 비용의 주요 부분을 차지한다. 기초 유형 선택은 수심, 해저 조건, 파도 및 조수

하중, 터빈의 정적 및 동적 하중뿐만 아니라 현지 제조 및 설치 역량에 따라 달라진다. 전통적으로 기초는 해저에 고정되었으나 이제는 부유식 기초가 도입되고 있다. 한국에서는 동해에 위치한 울산에서 부유식 기초를 고려해 볼 수 있다.

고정식 기초에서 모노파일의 개념은 1994년 네덜란드의 렐리(Lely) 해상 풍력 발전 단지 프로젝트에 처음 도입되었다. 이후 유럽의 모래 해저와 상대적으로 낮은 수심 때문에 유럽 해상 풍력 프로젝트 전체 중 80% 이상에서 이 기초가 적용되었다. [58].

재킷은 보통 깊은 수심, 특수한 해저 조건 또는 국내 공급망 제약으로 모노파일을 적용하기 어려운 경우에 사용된다. 해상 풍력 터빈에서 재킷의 사용은 2006년 스코틀랜드의 베아트리스 (Beatrice) 프로젝트와 함께 시작되었다 [59]. 재킷 생산은 모노파일에 비해 제작과 유지 보수가 어렵다. 또한 바다로 수송하는 동안 갑판 공간을 더 많이 차지한다. 더욱이 해저의 정확한 위치에 재킷을 배치하는 것은 까다로운 작업이다.

해상 풍력 터빈은 중전압 내부 전력망으로 해상 변전소에 연결된다. 변전소는 해저 케이블을 통해 해양 터빈에서 생산된 전력을 수집, 승압, 익스포트한다. 외부 전력망은 보통 육상 변전소를 거쳐 그리드 연결 지점에 도달한다.

## 해외 공급

기초 (모노파일 및 재킷) 제작 분야에서는 Sif, Lamprell, Navantia-Windar 컨소시엄, Bladt, EEW가 유럽 및 글로벌 선도 기업이다. Eiffage Smulders도 해상 풍력 분야에서 활동하는 국제 철강 건설 기업이다. Gusto MSC는 한라 풍력, 한국 해사 기술(KOMAC, Korean Maritime Consultants) 등 한국 기업과 부유식 기초인 트라이 플로터(Tri-Floater)를 개발하고 있다 [60, 61, 62, 63, 64, 65, 66].

JDR Cable Systems, TKF Group, Nexans, Prysmian Powerlink, NSW Technology는 내부 전력망 시장의 주요 업체이다. Prysmian, NKT Group, Nexans, Hellenic Cables, LS 전선은 외부 전력망 시장의 주요 업체이다 [67, 68, 69, 70, 71, 72]. LS 전선은 다양한 분야를 수주하기 때문에 이 그림에는 포함되지 않았으나 2019년 외부 전력망 시장 점유율은 9%였다 [8]. 해상 변전소의 경우 ABB, Siemens, Alstom, CG Power가 시장을 대부분 점유하고 있다 [73, 74, 75, 76]. Hereema Fabrication Group과 HSM Offshore는 철골 제작 기업들로 변전소 구축 실적을 보유하고 있다. Semco Maritime도 변전소 설계 및 구축 서비스를 제공하며 20건 이상의 프로젝트에 참여한 실적이 있다 [77, 78, 79].

## 국내 공급

현재 국내에서 가동 중인 모든 해상 풍력 발전기에는 재킷 기초가 사용되었다. 이해 관계자 참여 조사에 따르면 풍력 단지 설치 당시 국내 모노파일 공급 능력 부족으로 모노파일 기초 대신 재킷 기초를 사용한 것으로 나타났다. 두산의 3 MW급 해상 풍력 터빈의 각 기초에는 중간 파일 (post-pile) 재킷 구조가 400 톤 정도 사용되었다 [80]. 국내 설치 프로

젝트에서는 대부분 현대 제철이 제작한 재킷을 사용하였다. 삼강 M&T도 재킷 구조를 제작해 제주 월정 시험 부지(1 기)와 대만 창화 해상 풍력 단지(21 기)에 공급했다 [81]. 국내에서는 아직 모노파일이 제작되지 않았으며 조만간 직경이 더 작은 모노파일을 국내에서 생산할 수 있을 것으로 예상된다. 한국에는 조선소가 많고 철강업이 강하기 때문에 모노파일 생산이 당연하다고 할 수 있다. 그러나 외국 OEM이 제공하는 것과 같은 대형 터빈에는 직경이 7 미터 이상인 "XL 모노파일"이 필요하다. 국내의 XL 모노파일 생산 역량은 시간이 더 걸릴 것으로 보인다.

부유식 기초의 경우 삼성 중공업과 DNV GL이 부유식 기초를 포함한 부유식 풍력 기술을 공동 개발하기로 합의했으며 2020년대 중반에 부유식 기술이 시장에 공급할 것으로 예상된다 [82].

또한 CoensHexicon과 같은 다른 한국 기업들도 해상 풍력용 부유체 개발에 적극적으로 참여하고 있다.

현대 제철은 서남해 해상 풍력 시범지에 사용될 재킷 기초 약 600 톤과 상층 980 톤으로 이루어진 해상 변전소를 제작했다 [83]. 육상 변전소의 제조 및 설치의 지역 여건의 영향을 많이 받기 때문에 대부분의 경우 국내 기업이 참여한다.

국내 해저 케이블 제조업체로는 서남해 해상 풍력 시범지에 공급 실적이 있는 대한전선과 [84] 글로벌 시장 리더 중 하나인 LS 전선이 있다.

해저 케이블 설치 실적이 있는 지역 업체는 탐라 해상 풍력의 케이블과 서남해 해상 풍력 시범지의 외부 전력망을 설치한 해천과 [85] 서남해 해상 풍력 시범지에 내부 전력망을 설치한 한국 해양 기술(KOCECO) 등이다 [86]. KT 서브마린은 해저 전력 케이블 설치 및 유지 보수를 하고 있으나 해상 풍력 실적이 없다.

### 3.1.4 설치 및 시운전

해상 풍력 프로젝트의 전 주기 동안 다양한 선박과 장비가 해양 조사, 기초 설치, 터빈 설치, 변전소 설치, 케이블 설치 등 다양한 작업을 한다. 설치와 시운전에는 터빈, 기초, 케이블 설치 등 세 가지 주요 활동이 있다. 각 과정마다 특수 장비가 필요하

며 그림 3-3은 해상 풍력 단지 건설 선박의 예시이다. 전 세계적으로 선박 137 척이 사용 가능하고 이중 82 척은 작업식 선박이며 55 척은 중량물 운반선으로 2020년 해상 풍력 터빈 설치 작업에 참여했다 [87]. 전체 선박 중 61%는 유럽에 있고 나머지 39%는 가장 큰 해상 풍력 시장인 중국에 있다 [87].



a) 토크트 바지



b) 합장 크레인



c) 반잠수식 중량물 운반선



d) DP2 중량물 운반선



e) 토크트 작업 크레인 바지



f) 자주식 작업 바지

그림 3-3 해상 풍력 단지 건설 선박 예시 [88]

해상 풍력 터빈은 대부분 단일 싱글 리프트 방식의 타워 1개, 싱글 리프트 방식의 나셀 1개, 블레이드 3개 등 5 단계로 설치된다. 부지 조건에 적합하고 경제적으로 효율적인 설치선과 장비를 고려하는 것이 중요하다. 선박은 풍력 터빈 설치선이나 작업 바지선 중에서 선택할 수 있으며 작업 바지선을 선택하면

사양에 따라 추가로 예인선, 화물 바지선, 앵커 작업 예인선 공급을 고려한다.

터빈 설치와는 달리 기초는 크기, 해저 상태, 경제성 등에 따라 중량물 운반선, 크레인선, 작업 선박 등 다양한 선박으로 설치할 수 있다.

해저 케이블 설치 장비는 크게 내부 전력망 및 외부 전력망 매설 장비로 나눌 수 있다. 내부 전력망 설치 는 두 가지 다른 방식으로 접근할 수 있는데 첫 번째 는 매설기로 단일 매설, 매립 공정을 실시하는 것이 고 두 번째는 원격 제어 무인 잠수정에서 젯팅 장비 로 표면 매설과 후속 매립을 각각 실시하는 것이다. 외부 전력망은 케이블 단락없이 단일 케이블로 해상 변전소에서 육상 변전소까지 설치해야 하므로 대형 선박이 필요하며 터빈이나 기초 설치보다 높은 수준의 기술과 장비가 필요하다.

## 해외 공급

현재 많은 장비업체가 풍력 터빈 설치용 작업 선박 을 개발하고 있다. 이 시장에는 DEME, Seajacks, Fred Olsen Windcarrier, Van Oord (MPI-Offshore), Jack-Up Barge, SEAFOX Jan de Nul, A2Sea 등 여러 업체가 활약하고 있다. [89, 90, 91, 92]

중량물 운반선 Innovation (DEME)과 Seaway Yudin (Seaway7), 크레인선 Pacific Osprey (Swire Pacific Offshore)과 Svanen (Van Oord), 작업 선박 Aeolus (Van Oord), Vole au vent (Jan De Nul) 가 유럽에서 가장 많이 적용되는 기초인 모노파일을 설치했다. 크레인, 모노파일 그리퍼, 유 압 파일 해머 등과 같은 특수 장비로 모노파일을 설 치하려면 중량물 설치선을 사용하는 경우가 많다. 재킷 구조를 설치한 선박으로는 크레인선 Reabiz, Giant 7 (Boskalis), Taklift 4 (Huisman)와 작업 선박 Victoria Mathias (Van Oord) 등이 있다 [92, 93, 94, 95, 96, 97].

유럽 도급업자의 경우 유럽 기업이 한국 시장에 진

출할 가능성은 있지만 프로젝트 규모에 따라 크게 좌우될 것이다. 이해 관계자 참여에 따르면 유럽 도 급업자는 한국 시장에 관심이 많지만 유럽과 미국에 서 대규모 프로젝트에 대한 수요가 높는데 비해 규 모가 적을 가능성이 높은 있는 한국의 프로젝트는 매력 이 떨어진다. 이해 관계자 참여에서 (1) 국산 부 품 사용 요건 (2) 향후 더 작은 장비를 사용하여 건 설할 가능성 등 두 가지 주요 사항이 한국 시장 진입 에 대한 장벽으로 작용하는 것으로 나타났다. 따라 서 글로벌 공급망 자원을 유치하려면 프로젝트 규모 가 적어도 500MW 이상이어야 한다. EBL을 보유 한 기존의 많은 해상 프로젝트는 여러 개의 소규모 프로젝트로 구성되어 있으므로 더 큰 규모의 프로젝 트로 통합하여 개발자와 해상 풍력 공급망을 대상으 로 매력을 높일 수 있다.

해저 케이블 설치 분야의 주요 공급업체는 Subsea 7이며 주요 유럽 EPC 도급업체 Boskalis와 Van Oord가 각 사업 분야에서 케이블 설치 전용 선박 을 개발했다. Van Oord의 첫 케이블 부설 선박 Nexus는 유럽의 여러 해상 프로젝트에서 내부 전 력망과 외부 전력망 매설 작업을 진행하고 있다. Ndurance, Ndeavor, Spirit과 같은 Boskalis의 다 목적 선박도 시장에서 활발히 활약하고 있다. [93, 95, 96] 덴마크의 해상 서비스 공급업체 Maersk Supply Service는 해상 풍력 발전소 운 영자를 지원하기 위해 다양한 최신 선박을 운용하 고 있다. [98] 독일의 해상 도급업체인 Heerema Marine Contractors, Van Oord, SPT Offshore 은 해상 풍력 터빈 운송과 설치 분야에서 풍부한 실 적을 보유하고 있으며 석션 파일 앵커, 기초 설치 등 을 진행하는 선도적인 해상 도급업체들이다. Royal IHC는 해상 풍력 구축과 관련하여 광범위한 설치 솔루션을 제공하고 있다 [99, 100, 101].

## 국내 공급

국내에서는 탐라 해상 풍력 단지의 풍력 발전기를 크레인이 달린 범용 작업 바지선으로 설치했다. 현대 제철 산업은 2016년 작업 바지선 (5,500t) Challenger 1을 개발하여 서남해 해상 풍력 시범지의 풍력 발전기와 기초를 설치했다. 삼성 중공업은 최근 미국 해운국, DNV, Lloyd's Register로부터 저탄소 풍력 터빈 설치선인 SLW-FUEL CELL에 대해 원칙적 승인을 취득했다. 삼성 중공업은 유럽 사업자 Swire Blue Ocean, Seajacks와 풍력 터빈 설치선 (Pacific Osprey, Pacific Orca, Seajacks Scylla) 3척의 건조 계약을 체결했다 [102, 103, 104, 105]. 지금까지 국내에는 모노파일 설치용 설치선이 없었으며 현대식 해상 풍력 단지 설치 전용선 엔지니어링과 건설에 2~3년이 소요될 것으로 예상된다. 이는 세계적으로 중량물 리프팅 장비에 대한 수요가 높아 필요한 중량물 리프팅 장비를 공급하기 위한 리드 타임이 길기 때문이다.

### 3.1.5 운영 및 유지관리

해상 풍력 발전 단지는 보통 전체 운영 주기가 25년 이상이며 O & M은 풍력 발전 단지의 전체 주기 동안 가동 중지 시간을 최소화하고 에너지 생산을 개선하기 위한 서비스를 제공한다.

풍력 발전 단지 운영은 조건을 충족하는 항구 근처의 육상 기지에서 관리된다. O&M 직원은 일상적인 작업 관리, 데이터 수집, 원격 분석과 같은 루틴을 통해 발생 가능한 장애와 오류를 모니터링하고 O&M 사이트 관리자에게 보고한다. 유지 보수 서비스를 위한 물류 관리도 선박, 인력, 전문 도구, 예비 부품 등을 포함하는 중요한 부분이다. 유지 보수는

계획된 이벤트와 계획되지 않은 이벤트로 구분되며 계획된 작업은 대부분 해상 풍력 터빈 검사, 주기적인 노후 시스템 및 부품 교체 등이다. 블레이드나 기어 박스처럼 주요 부품을 교체하려면 작업 같은 특수 선박이 필요하다. 풍력 터빈 제조업체는 대개 장기 서비스 계약을 제공하므로 해당 기간 동안의 모든 유지 보수는 제조업체가 수행한다. 따라서 터빈 유지 보수 작업은 제조업체가 담당하지만 BOP 유지 보수 작업을 국내 업체가 수행할 수도 있다. 기초에 대한 점검과 유지보수는 터빈보다 수행 빈도가 낮기는 하지만 대기, 해양, 생물학적 부식 등으로 비용이 많이 들고 수리하기 어려운 손상을 일으킬 수 있기 때문에 주기적인 구조 검사가 필요하다. 해저 케이블은 몇 년에 한 번씩 주기적으로 해저 조사를 실시해 케이블 매설 상태를 모니터링해야 한다.

해상 풍력 단지는 보통 에너지 생산을 늘리기 위해 해안에서 멀고 바람이 많이 부는 지역에 설치되기 때문에 선박이 항구 근처의 육상 기지에서 유지 보수 활동을 수행하기 어렵다. 대규모 원격 해상 풍력 발전 단지에서는 서비스 운영 선박(SOV)으로 유지 보수 작업을 수행하고 선원이 탑승한 상태로 장기간 바다에서 머무른다. 해안에서 가까워 상대적으로 이동 시간이 짧은 풍력 단지에서는 인근 O&M 항구에서 비용이 낮은 선원 이송선(CTV)이 O&M 활동을 지원한다.

풍력 발전 단지 유지 관리는 해상 풍력 발전 단지의 전체 수명 동안 장기적으로 수행되기 때문에 일반적으로 OEM이 장기적으로 현지 작업이 가능한 현지 회사와 계약을 체결해 작업을 수행할 수 있다.

### 3.1.6 공급업체 요약 및 파트너십의 잠재력

모든 기업에 대한 완전한 개요로 여기지 않아야 하며 주요 공급업체 위주로 설명한 내용이다.

#### 공급업체 요약

이 섹션에서 설명한 공급업체는 아래의 표에 분류, 요약되어 있다. 이 개요는 업계에서 활동하고 있는

이 공급업체들이 해상 풍력과 관련하여 각자 성숙도가 다르다는 점을 명심하는 것이 중요하다. 이 내용은 그림 3-5부터 그림 3-7까지 그림 3-4의 지표로 표시되어 있다.

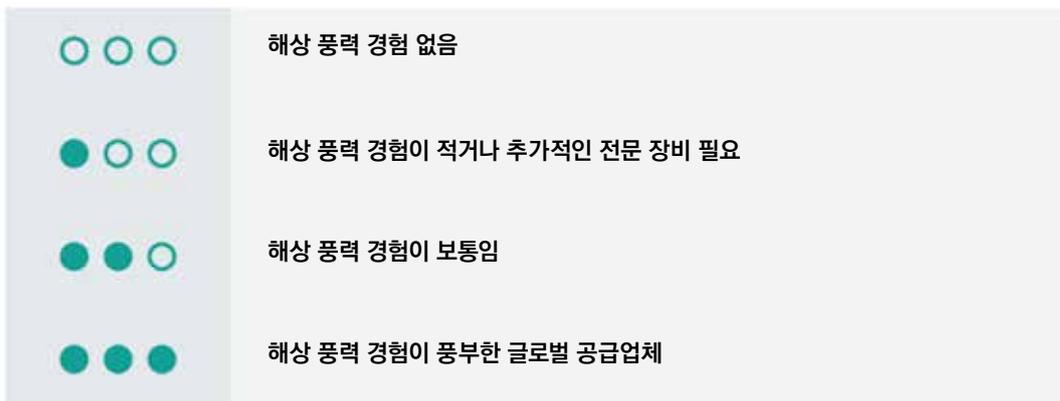


그림 3-4 성숙도 지표



그림 3-5 한국 해상 풍력 시장에서 프로젝트 개발 분야에 선정된 주요 공급업체

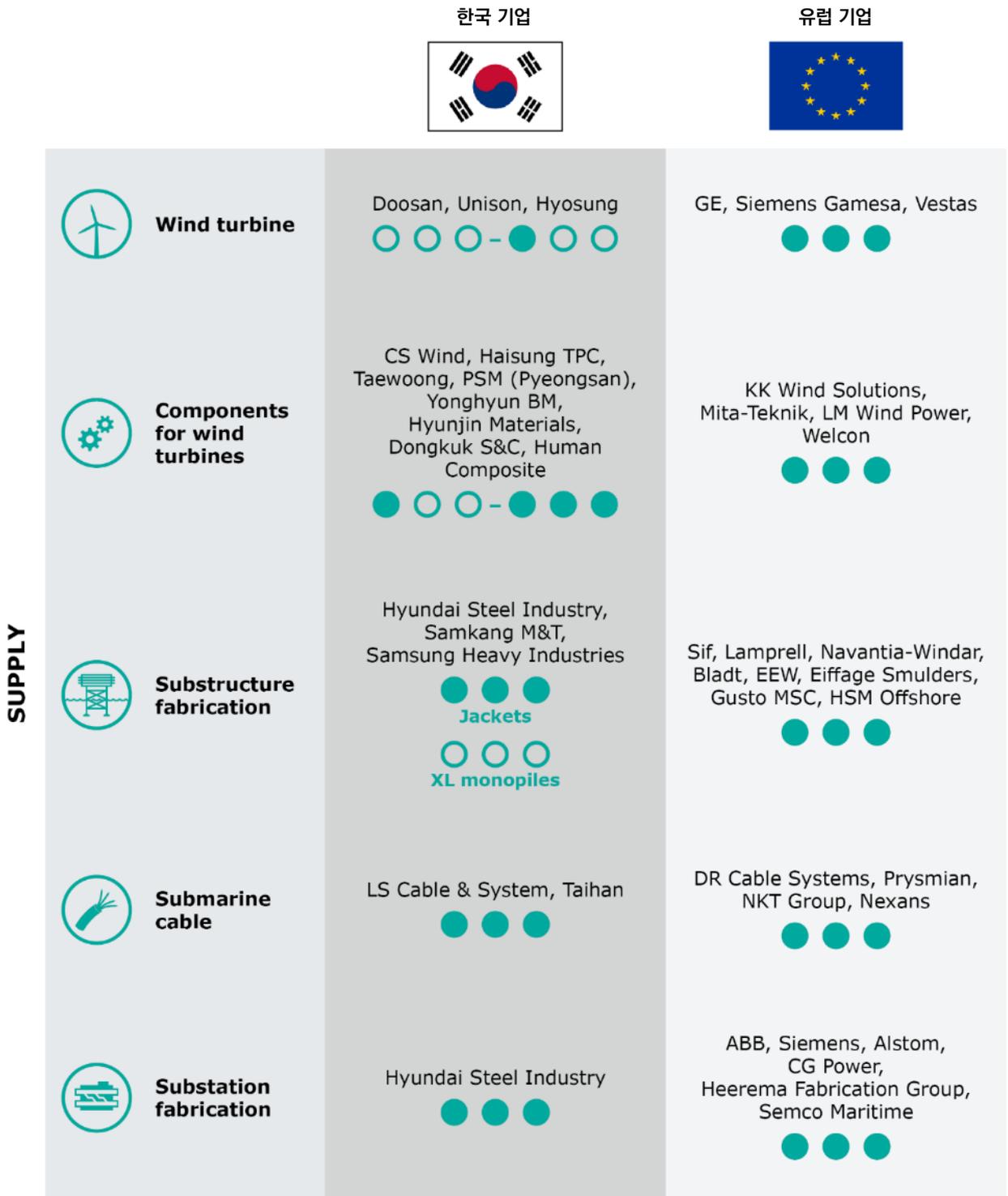


그림 3-6 한국 해상 풍력 시장에서 제작 분야에 선정된 주요 공급업체

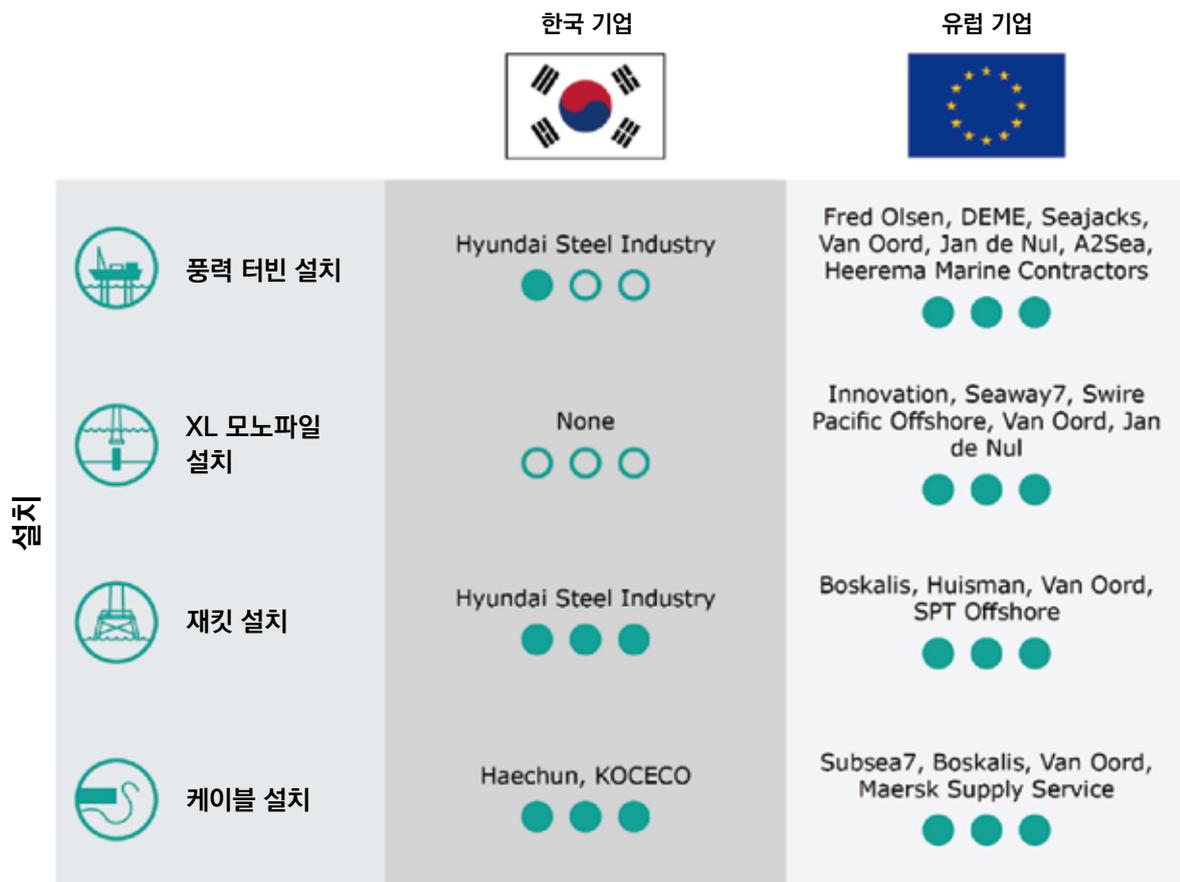


그림 3-7 한국 해상 풍력 시장에서 설치 분야에 선정된 주요 공급업체

### 파트너십의 잠재력

섹션 3.1.1부터 3.1.5 및 그림 3-5부터 3-7에서 언급된 모든 한국 및 유럽 공급업체들은 해상 풍력이나 관련 산업의 대표 기업들이며 각자 고유한 특징이 있다.

### 프로젝트 개발업체

유럽 개발업체들은 해상 풍력 산업 초기부터 선구자였으며 지금도 시장에서 선도적인 역할을 하고 있다. 여러 프로젝트를 통해 축적된 경험과 지식은 프로젝트 수행 기간 동안 위험과 예기치 못한 추가 비용을 최소화하는데 핵심적이다. 반면 한국 개발업체들은 한국의 입법 및 환경 여건에 대한 이해와 경험이

풍부하다는 장점이 있다. 한국의 입법 프레임워크와 허가 과정은 유럽과 다르며 (다른 조직 구조 및 분산된 입법 프레임워크) 환경 여건도 북해와는 다소 다르다 (다른 해저 지층 및 수력 조건). 프로젝트 개발비는 전체 프로젝트 비용에서 적은 비율에 불과하지만 프로젝트 개발업체는 풍력 단지의 성공 여부에 불균형적으로 큰 영향을 미친다. 이 기업들은 대부분 개발하는 풍력 단지를 건설, 운영하기도 하므로 포괄적인 피드백 구조를 갖추게 되며 전체적으로 모든 활동을 최적화할 수 있다. 일례로 덴마크의 개발업체인 오스테드는 2020년 말 현재 총 설치 용량의 17%를 소유했다 [8]. 2022년이 되면 오스테드는 6개국에 걸쳐 약 10GW 규모를 운영하게 된다.

국내-해외 파트너십의 가치는 세 가지 핵심 분야를 들 수 있다.

- 위험 절감 및 공유
- 신속한 추적 관리 공급 및 설치
- 최고의 지식 전수

광범위한 위험 관리 시스템은 CAPEX 비용이 수십억 유로 초반에 달하는 불과한 대규모 풍력 발전 단지에 매우 중요하다. 따라서 일부 유럽 프로젝트에서 볼 수 있듯이 관련된 청구 가치는 수익에 이를 수 있다. 유럽 개발업체들은 이러한 경험을 통해 다음과 같이 전 세계적으로 발생가능한 위험에 대비할 수 있는 조기 탐지 시스템과 품질 관리 조치를 개발했다.

- 계약 범위 차이
- 예상치 못한 지상 조건
- 다양한 공사 지연
- 장비와 노동력 공급의 병목 현상
- 공급 업체 경험 부족 또는 성과 부족
- 설치 중 기상 관측 중단

파트너십 시나리오에서는 풍력 발전 단지의 개발과 소유권이 공유되므로 나머지 모든 위험도 당사자들이 함께 공유한다. 한국 개발업체는 현지 인맥, 문화적 이해, 법률 시스템 지식을 바탕으로 위험을 줄일 수 있다.

세계적 수준의 해상 풍력 개발업체는 시장을 적극적으로 형성하여 신항 시장에서 공급망 확장을 신속하게 추적하고 설치 속도를 높일 수 있다. 개발업체들은

- 부족한 점이나 약점을 파악하기 위해 사전 예방적 공급망 평가를 수행하고
- 주요 개선 영역을 파악하기 위해 공급업체를 확보, 발굴하고

- 내부 자원을 사용하여 공급업체와 소통하고
- 요건을 달성한 후 공급업체와 계약을 체결한다.

예를 들어, 오스터드는 삼강과 이런 접근방식으로 작업했으며 삼강은 대만에 있는 오스터드의 Changhua 풍력 발전단지에 재킷 기초를 제공했다 [107].

유럽 개발업체들은 경험을 바탕으로 취약한 고리를 강화하기 위해 공급업체 간 합작 투자사 설립을 추진할 수도 있다.

한국 개발업체들은 이렇게 입증된 방법을 활용하여 신항 시장에서 공급망을 구축하고 현지 지식을 활용하여 이익을 얻을 수 있다.

끝으로 유럽 개발자들은 지식이 풍력 발전 단지 성공의 열쇠라고 생각하기 때문에 다른 시장에 대한 지식 전수에 투자한 경험이 있다. 이러한 지식 전수는 지속적인 피드백과 개선 과정을 자주 사용하는 공급 업체 확보에 적용됩니다. 풍력 발전 단지의 인적 자원에도 적용된다. 개발업체 입장에서는 풍력 발전 단지에서 함께 일하는 직원이 교육 여행, 파견, 워크샵에 참여하여 지식을 모든 참가자에게 공유하는 것이 일반적이다. 자격을 갖춘 노동력이 부족한 신항 시장에서 유럽 개발업체들은 이러한 단점을 보완하기 위한 계획에 투자했다.

예를 들어 Copenhagen Infrastructure Partners는 대만의 Chienkuo Technology University와 함께 미래의 해상 풍력 유지 보수 기술자를 교육하기 위한 견습 프로그램을 진행했다 [108]. 오스터드도 대만 Changhua 풍력 단지의 운영을 앞두고 있으며 8 월의 장기 체류 기간 동안 덴마크 풍력 단지에서 대만 기술자를 교육하고 있다 [109].

한국 개발업체들에게 이러한 지식 전수는 업계 리더들로부터 방법을 직접 배울 수 있는 기회가 되고 이 지식을 다른 시장에도 적용할 수 있다. 프로젝트 개발 파트너는 한국에서 공동 프로젝트를 성공적으로 개발한 후 다른 국가에서도 협력을 확대할 수 있다.

## 터빈

풍력 터빈 제조의 경우 유럽 OEM과 한국 부품 공급업체 간의 협력을 기대할 수 있다. 섹션 3.1.2에서 설명한 것처럼 많은 한국 기업이 특정 풍력 터빈 부품을 제조하고 유럽 및 한국 OEM에 공급할 수 있다. 한국의 국내 부품 사용 요건을 충족하기 위해 유럽 OEM이 이러한 한국 부품을 사용하는 계획도 고려해 볼 수 있다.

일반적이지는 않지만 OEM 간 직접 파트너십도 가능하다. 또다른 파트너십 접근 방식은 외국 OEM이 중공업, 전기, 재생 에너지 또는 주요 부품 공급 업체와 같이 해상 풍력 관련 분야에서 경험이 있는 업계 파트너와 파트너십을 맺는 것이다.

이번 달에 GE는 일본에서 이 접근방식을 통해 GE와 Toshiba의 전략적 계약을 체결했다. 이번 거래에 따르면 GE Haliade X 터빈의 나셀을 Toshiba가 일본에서 조립, 보관, 운송할 예정이다. GE는 조립을 위한 터빈 기술과 부품을 제공한다 [110].

이러한 형태의 계약에서 국내 파트너는 보통 다음과 같은 부분에서 기여할 수 있다.

- 현지 제조, 조립, 창고 보관, 운송 역량
- 현지 자격을 갖춘 인력
- 국내에서 해상 및 육상 풍력 에너지 경험
- 국내 규제 및 법적 부분에 대한 깊은 이해
- 주요 국내 이해 관계자와 좋은 관계
- 국내 시장에서 사업 개발 전문 지식 및 인맥

해외 파트너는 다음과 같은 부분에서 기여할 수 있다.

- 세계적 수준의 터빈 기술
- 해외 소싱이 필요하거나 유리한 성숙한 공급망 제공
- 역량이 적절하지 않은 경우 현지 인력 교육 및 자격 향상

풍력 발전 단지의 운영 및 유지 보수를 준비하는 과정에서 해외 OEM은 한국 외부의 자체 풍력 터빈에서 실습 교육을 제공할 수 있다.

전략적으로 이러한 협력은 향후 아시아 태평양 지역에 특화된 풍력 터빈 모델의 공동 개발을 위한 발판으로도 활용할 수 있다.

## BOP

한국 공급망의 탄탄한 펀더멘털과 관련 산업의 풍부한 경험을 바탕으로 단기적으로는 XL 모노파일을 제외한 대부분의 BOP 부품을 한국이 공급할 것으로 예상된다. 중기적인 수요를 충족할 수 있도록 XL 모노파일 역량을 개발해야 한다. 이를 위해 한국 기업은 해외 제조장비 생산업체 또는 제조업체와 협력할 수 있다.

세계 다른 지역에서 성숙한 공급망이 구축되어 있지 않은 부유식 기초는 한국의 입장에서 특히 흥미로운 기술이다. 한국의 강한 철강업은 가장 일반적인 기초 유형인 반잠수식 기초에서도 장점을 발휘한다. 이와 같은 잠재력은 최근 한국 정부가 2030년까지 울산에 6 GW 규모의 부유식 풍력 단지를 개발하겠다고 한 발표에 힘입어 한국이 부유식 기초 분야에서 글로벌 리더가 될 수 있는 뛰어난 입지를 확보하게 되었다. [111] 한국과 유럽 기업들은 공동으로 부유식 풍력 기술을 개발하고 있으며 2020년대 중반쯤 이 기술을 공급, 수입할 수 있을 것으로 예상된다.

파트너십은 한국이 목표를 성공적으로 달성하기 위해 속도를 급격히 높여야 하는 (섹션 3.2 참조) 설치 분야에서 특히 이익이 될 것으로 예상된다. 유럽 도 기업체들은 해상 풍력 개발에 사용할 수 있는 각종 특수 설치 선박을 갖추고 있으며 우수한 실적을 보유하고 있다. 현재 여러 한국 기업들이 전문 해상 풍력 설치선을 건조하고 있다. 이해 관계자 참여에 따르면 특수 선박 덕분에 유럽이 현재 설치 속도를 유지할 수 있는 것은 분명하지만 터빈 수천 개를 다루면서 프로세스를 최적화해온 직원들도 크게 기여하였다. 이 지식은 설치 기업 간 파트너십으로 전수받을 수 있다. 이러한 협력은 서로 상대 기업의 선박과 직원을 활용하거나 함께 실습을 진행하는 형태로 이루어질 수 있다.

### 3.2 한국의 공급망 관련 단기 전망

탐라 해상 풍력 단지와 서남해 해상 풍력 단지 개발은 한국의 공급망이 해상 풍력 발전 단지를 개발, 건설, 운영을 할 수 있지만 현재의 공급망이 성숙되지 않았고 12GW 보급 목표를 달성하기 위한 설치 시간, 위험, 개발 비용을 낮추려면 개선이 필요하다는 사실을 보여주었다.

필수적인 개선점 중 하나는 해상 풍력 단지의 전체 설치 기간을 크게 줄이는 것이다. 표 3-1은 탐라 및 서남해 해상 풍력 단지 자료를 정리한 것이다.

표 3-1 탐라 해상 풍력 및 서남해 해상 풍력 시범지 프로젝트 개요 [112, 113]

	탐라 해상 풍력	서남해 해상 풍력 시범지
풍력 터빈 개수	10	20
WF 용량 (MW)	30	60
기초 종류	재킷	재킷 19 개, 석션 버켓 1개
부지 수심 (m)	16-20 m	8-15 m
80m에서 연간 평균 풍속	7.6 m/s	6.9 m/s
해안까지의 거리 (km)	10km	0.5-1.2km
프로젝트 자금 조달	2016년 3월	2018년 10월
최초 운영일	2019년 9월	2019년 11월
토양 조건	풍화암	실트질 모래 또는 사질 실트
건설 기간	30 월	31 월
사업비, EUR	1.23 억 유로	3.74 억 유로
사업비, EUR/MW 설치 용량	487 만 유로	742 만 유로

표 3-1에 따르면 전적으로 한국 공급망을 통해 실현된 탐라 및 서남해 프로젝트의 건설 기간은 30-31월로 나타났다. 이는 탐라 프로젝트의 경우 1월에 1MW, 서남해 프로젝트의 경우 1월에 2MW가 설치되었다는 뜻이다. 이는 비슷한 유럽 해상 풍력 프로젝트의 예상 건설 기간보다 훨씬 길다. 예를 들어 네덜란드의 Borssele 1 & 2 해상 풍력 단지는 불과 8월 만에 SGRE의 SG 8.0-167DD 모델 94대 건설을 완료했다 [8]. 서남해 해상 풍력 시범지의 공급망에 대한 자세한 내용은 별첨 2에 상세히 설명되어 있다.

풍력 발전 단지 설치와 관련하여 국내 공급망은 빠르게 발전할 수 있는 잠재력이 높지만 그 실현 여부는 단기간에 건설한 프로젝트 수에 따라 크게 달라질 것이며 설치업체는 이를 통해 많은 경험을 얻을 수 있을 것이다. 이해 관계자 참여에서 터빈 설치 팀의 속도와 효율성은 팀의 실제 프로젝트 경험과 직접 관련되어 있으며 유럽에서도 이런 수준의 효율성을 개발하는 데 오랜 시간이 걸린 것으로 나타났다.

한국 풍력 터빈 제조업체의 생산 능력도 한국의 공급망이 빠르게 증가하는데 장애가 될 것으로 예상된다. 두산은 두산 5.5MW 풍력 발전기의 연간 생산 능력은 현재 약 30대로 연간 165MW에 해당하는 규모라고 발표했다 [114]. 앞으로 8년 안에 12GW를 생산하려면 생산 능력을 10배로 늘려야 한다.

또 다른 주요 단기 과제는 한국 공급망의 실적이다. 일부 한국 공급업체는 광범위한 경험을 보유하고 있고 글로벌 시장(타워 및 케이블 제조업체)에 공급하고 있지만 대부분 상대적으로 작은 규모의 프로젝트에서 제한된 실적을 보유하고 있다.

이는 한국의 풍력 터빈 제조업체에게 특히 중요하다. 두산과 유니슨 모두 대형 풍력 터빈을 개발하고 있으나 두산은 해상 풍력 발전 단지를 운영하고 있으며 현재 3MW 터빈 플랫폼으로 총 90MW의 실적을 올린 국내 유일의 OEM이다. 이렇게 낮은 실적과 최근 발생한 일련의 장애로 두산 터빈을 사용하려는 국내외 개발자는 적을 것이다 [115, 116]. 본 연구에 대한 이해 관계자 참여에 따르면 국내 풍력 터빈 제조업체의 전반적인 인상은 불확실성이 높다. 이해 관계자 참여를 통해 가격 수준의 차이를 확실하게 판단할 수는 없었지만 국내 터빈 가격이 해외 터빈 가격보다 상당히 높은 것으로 나타났다.

단기 전망에서 마지막 중요한 측면은 풍력 터빈이 프로젝트 파이낸싱에 미치는 영향이다. 풍력 단지 프로젝트에서는 비소구 프로젝트 파이낸싱이 일반적이다. 그러나 대출 기관은 프로젝트가 수익성을 입증할 수 있어야 한다고 요구하며 너무 위험하다고 여기는 프로젝트에는 자금을 지원하지 않는다. 터빈은 풍력 발전 단지의 핵심이기 때문에 터빈 기술과 계약 위험 평가가 큰 비중을 차지한다. 위험 평가는 터빈의 설계와 보장된 성능뿐만 아니라 풍력 터빈 제조업체 실적의 영향을 받는다. 국내 터빈의 낮은 실적과 최근의 고장은 투자 적격 대상으로 간주되지 않을 것이라는 의미이다. 그 결과 국내 터빈을 사용하는 프로젝트는 외국 대출 기관에서 프로젝트 자금을 조달할 가능성이 낮다. 결국 한국의 해상 풍력 산업 발전 속도를 높이기 위한 대규모 자금원에 접근할 수 없게 된다.

그러나 여기에서 논의된 사안들은 유럽을 포함하여 해상 풍력 산업 발전의 초기 단계에 있는 다른 국가에서도 흔히 볼 수 있다. 사실 세계적으로 한국의 입장은 다른 많은 신흥 해상 풍력 시장에 비해 뛰어나다. 한국은 해상 풍력 관련 산업에서 강력한 역량을 보유하고 있다. 글로벌 상위 20 대 철강 제조업체 중 두 곳은 한국 기업이고 한국의 조선업체들은 글로벌 산업에서 주도적 역할을 하고 있다. 이 산업 부문의 경험은 해상 풍력 산업에서 유용하게 사용될 수 있다. 효율성과 용량이 개선되어야 하지만 이해관계자 참여에서 한국은 해상 풍력 단지 공급망의 50~60%를 제공할 수 있는 역량을 갖춘 것으로 나타났다.

### 3.3 한국의 공급망 관련 중기 전망

중기적으로 한국의 BOP 역량은 수요에 따라 빠르게 발전할 것으로 예상된다. 그러나 내수가 낮거나 자주 변할 경우 BOP 역량 확대가 둔화될 가능성이 높다.

확대 과정에서 선박 가용성 등 몇 가지 병목 현상이 발생할 수 있다. 유럽의 해상 풍력 터빈을 설치할 때 선박이 중요한 역할을 하는 유럽 프로젝트에서 이러한 제약이 나타났다. 유럽은 명확한 시장 가시성과 프로젝트 파이프라인으로 선박 운영업체에게 매력적인 시장이기 때문에 한국은 글로벌 선박 자원을 사용하여 이러한 병목 현상을 줄일 수 없을지도 모른다. 국내에서 해상 풍력 발전소 설치용 선박은 1척에 불과하고 신규 설치선에 대한 발주 발표가 거의 없어 설치가 지연될 수 있다.

국내에서는 아직 개발되지 않았지만 중기적으로 수요가 발생할 대구경 (XL) 모노파일의 생산 능력과 시기도 불확실하다.

설치 측면에서는 설치 기간이 개선되어야 하지만 추가적인 경험을 통해 달성될 수 있을 것이다. 간단히 계산해 1) 500 MW의 풍력 발전 단지 설치 기간이 18월이고 2) 풍력 발전 단지 3곳을 동시에 건설한다고 가정하면 12GW규모의 해상 풍력을 설치하는데 12년이 걸릴 것이다. 이는 유럽에서 2006년부터 2016년까지 설치된 용량과 같은데 이 기간은 유럽 해상 풍력 산업의 램프업 (ramp up) 기간으로 볼 수 있다. 앞으로 8년 내에 12 GW를 설치하려면 설치율이 125 MW/월이어야 한다. 개별 풍력 단지의 평균 설치율을 41.6 MW/월, 전국적으로 125 MW/월이므로 12월마다 500 MW 규모의 풍력 단지 세계를 구축할 수 있다면 달성 가능할 것이다. 이 참고용 수치를 보면 한국이 목표를 달성하려면 풍력 단지당 설치 속도가 적어도 20배 빨라져야 한다는 것을 나타낸다. 이 설치율 이상은 현재 유럽에서 구축되고 있는 풍력 단지 규모에 해당한다.

평균적으로 소규모인 프로젝트도 다소 문제가 된다. 많은 소규모 프로젝트는 국내 공급망의 자원에 대해 과도한 경쟁을 유발하여 프로젝트 지연과 가격 상승으로 이어질 수 있다. 또한 설치선 공급업체와 같은 일부 국내 공급업체가 수요 증가에 부응하려면 대규모 자본 투자를 해야 한다. 그러나 프로젝트 규모가 작다는 것은 투자 수익이 불확실하거나 더 오래 걸린다는 뜻이므로 기업들은 투자 위험을 감수하는 대신 더 큰 규모의 프로젝트에 투자할 것이다.

중기적으로는 국내 공급망에서 풍력 터빈이 가장 약한 고리가 될 것으로 예상된다. 현재 국내 OEM이 개발 중인 대형 모델은 해외 터빈과 국내 터빈의 경쟁 격차를 줄이는 데 기여할 것이다. 그러나 국내 OEM이 최신 모델을 설치하고 우수한 성능을 입증할 때까지 실적과 프로젝트 개발자의 제품에 대한 신뢰 문제는 계속될 것이다.

### 3.4 공급망 시나리오

해상 풍력의 비용과 위험을 줄이는 자연스러운 방법은 국내 공급망에서 강하고 발전된 부분을 활용하고 확립된 글로벌 공급망으로 약한 부분을 보완하는 것이다. 이것은 다른 국가들이 성공적으로 이행한 접근 방식이다. 참여는 다양한 형태로 이루어질 수 있으며 몇 가지 주요 공급망을 고려한 시나리오 관점으로 생각해 보는 것이 유용하다.

본 연구에서는 해외 공급망 참여의 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 두 가지 시나리오를 설정해 향후 분석의 기반으로 사용하였다.

한국 식장은 현재 국내 공급망을 기반으로 산업을 추진하는 데 중점을 두고 있다. 표 3-2에서 이 접근 방식은 “국내 시나리오”라고 되어 있다.

국내 시나리오와 연관된 높은 위험과 불확실성을 완화하기 위해 한국 기업들은 파트너십을 체결할 수 있다.

풍력 단지에서 파트너십은 여러 분야와 형태로 이루어질 수 있다. 한국에서 관련 산업의 견고한 펀더멘털을 고려하고 (섹션 3.3에서 논의) 국내 역량이 적절하게 증가한다고 가정하면 중기적으로 고정식 풍력 단지의 경우 XL 모노파일을 제외한 모든 BOP 설치, 시운전, O&M을 한국 기업이 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 이 사례에서 XL 모노파일과 풍력 터빈은 해외 파트너십을 통해 공급된다. 부유식 풍력 단지의 경우 반잠수형 부유식 기초가 국내에서 생산될 것으로 예상된다. 표 3-2에서 이 사례는 “파트너십 시나리오”라고 표시되어 있다.

이러한 시나리오는 국내 공급망의 발전에 대한 예측을 하거나 공급망 확장의 특정 연표를 나타내려는 것이 아니며 본 연구의 영향 분석을 지원하는 도구로 사용된다.

표 3-2 공급망 시나리오 상세 분류 (F는 해외 공급(foreign supply), D는 국내 공급(domestic)을 나타냄)

항목	항목 구분		파트너십 시나리오	국내 시나리오
프로젝트 개발	시장 성숙도에 따라 풍력 단지 규모로 개발 비용 조절		D	D
터빈 공급 및 설치	공급 설치		F	D
기초 공급	고정식	모노파일 및 트랜지션 피스 공급 재킷 및 파일 공급	F	D
	부유식	부유체 (floater) 공급 육상 조립 계류 공급	D	D
기초 설치	고정식	모노파일 설치 트랜지션 피스 설치	D	D
	부유식	계류 설치 부유체 설치 (예인선으로 견인)	D	D
전력망 공급 및 설치	전력망 공급 전력망 설치		D	D
송전 및 그리드	송전 (육상 및 해상 변전소, 외부 케이블) 그리드 비용 SCADA		D	D
운영 및 유지관리	운영 및 유지 관리비 사업주비, 물류 비용, 운영비		D	D
기타	출장 및 인건비 운영 준비 건설 관리 보험		D	D

표 3-2의 각 항목은 해외 (F) 또는 국내 (D) 공급으로 표시된다. 그러나 많은 기업들이 글로벌화된 공급망을 사용하기 때문에 이 정도로 간단하지 않다는 점을 명시해야 한다. 풍력 발전 단지의 주요 부품은 "국내" 또는 "해외" 공급업체가 제조하더라도 국내외에서 공급되는 부품을 포함하는 것이 일반적이

다. 그러나 본 연구의 목적상 이러한 방식으로 공급원을 간소화해야 한다. 이러한 시나리오를 바탕으로 에너지, 경제, 일자리 창출 등 세부적인 정량 분석을 수행하였으며 그 결과는 4 장과 5 장에 설명되어 있다.

### 3.5 요약

사실 세계적으로 한국의 입장은 다른 많은 신흥 해상 풍력 시장에 비해 뛰어나다. 한국은 해상 풍력과 관련된 철강 및 조선 산업에서 강력한 역량을 보유하고 있다. 탐라 및 서남해 해상 풍력 단지는 100% 국내 공급망으로 실행되었으나 이들 프로젝트를 통해 설치 기간 개선이 특히 필요한 것으로 나타났다.

적절하고 일관된 수요가 있다고 가정하면 한국 BOP 공급망은 향후 몇 년 동안 빠르게 확장될 가능성이 높다.

중기적으로는 국내 공급망에서 풍력 터빈이 가장 약한 고리가 될 것으로 예상된다. 국내 OEM 업체 두산과 유니슨이 현재 시장에 나와있는 것보다 훨씬 더 큰 터빈 모델 (각각 8MW와 10MW)을 발표했다. 이 새로운 모델은 현재 사용 가능한 비교적 작은 해양 터빈보다 더 경쟁력이 있을 것으로 예상된다. 그러나 새로운 터빈이 널리 사용되려면 먼저 실적을 보여 업계의 신뢰를 구축해야 한다.

2030년 12GW 해상 풍력 목표를 달성하려면 해상 풍력 산업이 적극적인 활성화가 필요하지만 정부가 단독으로는 달성할 수 없다. 한국의 해상 풍력과 관련 산업의 탄탄한 기반에도 불구하고 한국은 아직 실적이 부족하고 업계는 이 다분야 산업에 적응해야 하는데 이 과정은 5년 이상 걸릴 것으로 보인다. 해외 공급망의 참여와 일부 신속하고 적극적인 정부 지원을 통해 목표를 달성할 수 있다. 100% 국내 공급망으로 목표를 달성하려고 하면 목표를 놓칠 위험

이 커진다. 이 모든 것이 품질 향상, 위험 및 비용 감소, 설치 시간 단축으로 이어질 것이다.

본 연구에서 조사한 한국 공급망의 주요 개선점은 다음과 같다.

- 해상 풍력 터빈 실적 부족
- 터빈 제조 역량 부족
- 설치선 병목 현상
- 설치 속도 및 효율 개선

유럽의 공급망은 해상 풍력, 개발, 엔지니어링, 설치, 운영에서 광범위한 경험을 쌓았다. 특히 풍력 단지 설치 분야뿐만 아니라 풍력 터빈 및 관련된 기초의 설계와 공급 분야에서도 유럽 당사자들은 한국 공급망에 관련 지식과 경험을 제공할 수 있다.

정책 분야에서는 유럽에서 배운 교훈을 바탕으로 매력적인 투자 환경과 자유 시장 경제를 창출함으로써 더 짧은 기간 동안 위험을 줄이면서 해상 풍력 발전 단지를 개발할 수 있다. 이를 통해 비용을 줄이고 해상 풍력과 관련하여 설정된 목표 달성이 가속화될 것이다.

더욱 빠르게 발전하는 한국 공급망은 미래를 위한 지속 가능한 고용 기회를 제공한다. 세계적인 공급망과 협력하여 한국 공급망의 신속한 발전에 집중함으로써 한국이 인근 시장에 대한 수출 역량을 강화하고 아시아 해상 풍력 시장의 리더가 될 수 있는 기회가 증가할 것이다.



발전 원가  
균등화 비용

## 4 발전 원가 균등화 비용

발전 원가 균등화 비용 (LCOE)은 프로젝트의 수명 주기 비용을 총당하는 데 필요한 평균 전기 가격을 말한다. 산업계와 정책 입안자들은 일반적으로 다양한 발전 기술을 비교하고 미래 에너지원에 대한 정책 결정을 지원하는 척도로 LCOE를 사용한다. 본 보고서는 LCOE를 사용하여 한국 정부의 해상 풍력 발전 로드맵 지역의 정성적 평가를 제공하고 2030년까지 12GW 목표를 실현하기 위한 추가 개발 가능 영역을 조명한다.

### 4.1 선정된 진흥 지역의 LCOE 분석

한국은 2020년 7월 발표한 '해상 풍력 협력 계획 (OSW collaboration plan)'에 따라 아래에 표시된 인천, 전라남도, 전북, 울산, 제주도 등 5개 지역의 해상 풍력 발전 단지 개발에 우선 순위를 둘 것이다. [117].

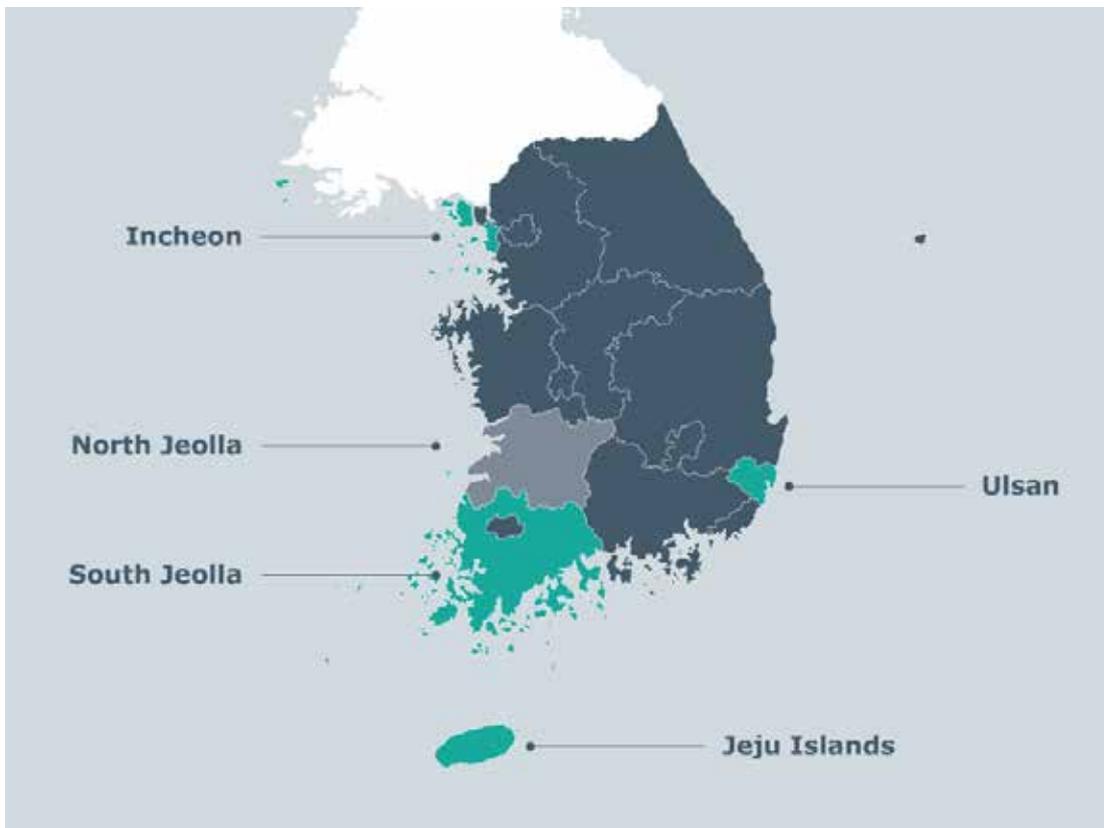


그림 4-1: 해상 풍력 발전 진흥 지역, 본 연구를 위해 선정 지역을 녹색으로 표시함

본 연구는 향후 개발에서 국내외 개발자들의 관심을 가장 많이 받는 지역인 인천, 남조 엘라, 울산 및 제주도(그림 4-1에서 녹색으로 표시)에 중점을 둔다.

#### 4.1.1 참고지의 정의

본 연구에 사용된 비용 모델은 Aegir Insights에서 제공한 것으로 업계 및 학계 파트너와 협력하여 개발한 독점적인 기술 경제적 해상 풍력 성능 모델이다.

본 연구에 사용된 비용 구분은 일반적인 업계 관행에 따른 활동과 계약 범위를 기반으로 한다. 여기에는 공급 계약과 설치 계약으로 구분한 터빈, 기초, 전력망, 변전소 등 주요 풍력 발전 단지 구성 요소가 포함된다. LCOE 평가에 적용되는 비용 구조는 별첨 C의 총 프로젝트 비용 구분을 바탕으로 한다.

해상 풍력 시장의 상업적 매력과 경제적 생존 가능성을 평가할 때 주어진 지역에서 일반 해상 풍력 프로젝트가 어떻게 수행될 것인지 보여주는 참고지를 개발한다. 이러한 부지는 해당 지역의 일반적인 조건을 대표하기 위해 선정된다. 참고지는 국내외의 서로 다른 지역과 에너지원의 LCOE 수준을 비교하는 데 적합하다.

참고지의 위치를 선정한 후 해당 부지를 최대한 정확하게 반영하도록 계산 매개변수를 조정한다. 기준 사례는 풍력 프로젝트의 가치를 주도하는 지역의 특성에 맞게 조정된다. 기술적 가정을 다른 해양 지역에 적용할 경우 가치 차이의 주요 동인은 풍속, 수심, 항구까지의 거리, 전송 그리드 등이다.

마지막으로 현지 시장 상황이 반영된다. 경쟁력 있는 국내 공급망이 있다면 운송 비용을 절감할 수 있

지만 공급망이 미성숙하다면 계약의 리스크 프리미엄이 커지며 프로젝트 전체의 우발 요인이 된다. 지역 규제 측면도 조정된다. 허가 과정은 프로젝트 승인 속도와 프로젝트 개발 비용에 영향을 미친다.

풍력 자원, 수심, 항만, 송전소 등 다른 핵심 가치 동인의 경우 공개적으로 사용 가능한 데이터를 모델에 적용하여 풍력 발전 단지의 수명 동안 건설 일정, 총 프로젝트 비용, 발전(power generation)을 시뮬레이션한다. 이 모든 사항이 기준 사례 LCOE의 기반이 된다.

#### 한국 상업 풍력 단지의 시계 (time horizon)

바람 측정 LiDAR를 설치하기 위한 공공 수역 점유 허가는 각 기상 측정 장치에서 반경 5km 이내에 있는 지역에 독점권을 부여한다. 2020년 중반 배치를 위한 최소 상업용 프로젝트 용량은 500MW로 추정된다.

풍력 발전 단지 규모를 고려할 때 500MW 급의 상업용 해상 풍력 프로젝트 배치 연도는 2026년 COD 달성이 크게 지연되지 않는다는 가정 하에 첫 번째 허가(공공 수역 점유 허가)부터 COD까지 5년으로 추정된다. 전기 사업 허가(Electricity Business License)를 취득한 후에는 LiDAR에서 최소 1년 동안 기상 데이터 수집이 필요하며 실질적인 준비 기간은 최대 4년 정도이다. 이 기간 동안 신청자는 COD를 달성하거나 기간 연장 허가를 받아야 한다. 이 경우 지연이 없다고 가정하면 승인 일정은 최소 5년이다.

## 터빈에 대한 가정

풍력 터빈 발전기 선정은 풍력 발전 단지를 개발에서 핵심 고려 사항 중 하나이다. 제조업체 및 제품 신뢰성, 생산량, 비용 요소, 가동률, 유지 보수 계약 등의 요소가 개발자의 주요 고려 사항으로 확인되었다 [118].

마찬가지로 중요한 터빈 선정 기준은 터빈 구성, 즉 발전기 용량 등급과 로터 크기이다. 제조업체는 일반적으로 IEC 시스템을 사용하여 자사 터빈이 가장 적합한 풍력 체제를 지정한다.

IEC 설계 분류 시스템은 터빈에 적합한 바람 조건을 정의하는 국제 표준이다. IEC 분류 시스템은 몇 가지 매개변수에 따라 강풍에서 저풍 체제까지 다양하다. 본 연구의 목적으로 가장 관련성이 높은 연평균 풍속(m/s)과 등급 용량 (W/m<sup>2</sup>)은 다음과 같다.

- 1 급 (고속): 10 m/s,  $\approx 350 \text{ W/m}^2$
- 2 급 (중속): 8.5m/s,  $\approx 275 \text{ W/m}^2$

- 3 급 (저속): 7.5 m/s,  $\approx 237 \text{ W/m}^2$
- S 등급: 설계자가 자유롭게 설정한 값

1급 터빈은 강풍 체제에 최적화되어 있으며 시장에서 가장 높은 발전기와 가장 높은 로터의 조합이다. 대조적으로 3급 터빈은 저풍속 지역에 최적화되어 있다. 결과적으로 3급 터빈은 1급보다 발전기 크기에 비해 로터가 더 크다. 로터와 발전기의 관계는 터빈의 특정 용량으로 나타나며 IEC 등급에 따라 다르다.

비용량은 로터 회전 면적의 평방 미터 당 와트로 표시되며 약어로 W/m<sup>2</sup>이다. 이 단위는 풍력 터빈이 발전기 용량에 비례해 풍력 터빈이 바람에서 추출한 에너지의 양을 나타낸다. 그림 4-2는 3급 터빈이 추출하는 엄청난 양의 바람을 나타낸 것이다.

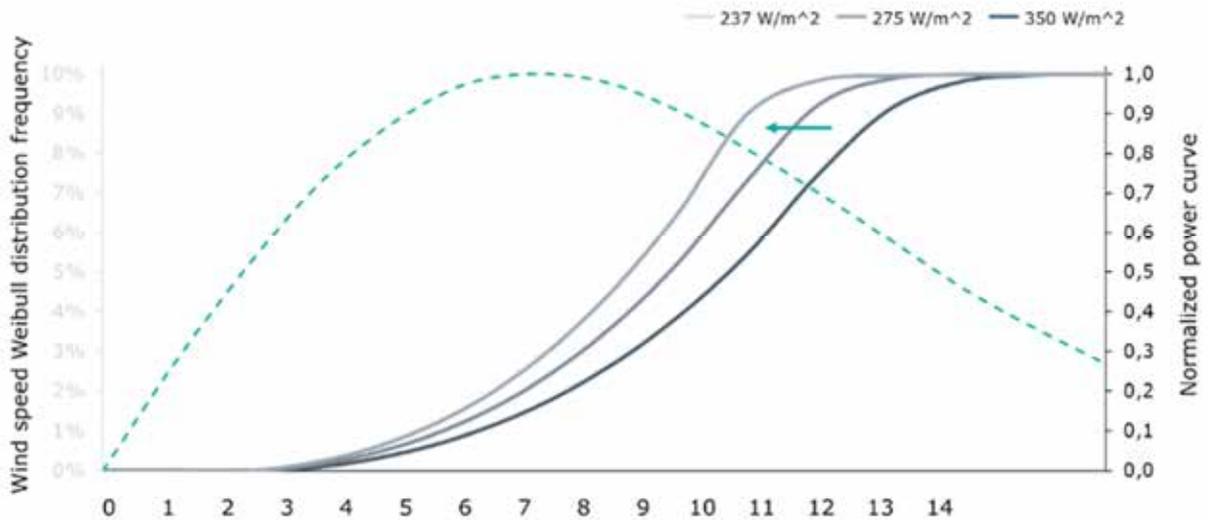


그림 4-2: 연평균 속도가 7.3m/s이고 형상 계수 (Weibull k 값)가 2인 저풍 체제 하에서 터빈 용량과 전력 곡선 성능의 상관 관계

그림 4-2는 인천 참고지의 풍속 분포이다. 특정 용량이 감소하면 전력 곡선의 경사각이 증가하여 전력 곡선이 왼쪽으로 이동하고 연간 풍속 분포를 더 많이 사용하여 용량 계수가 높아진다.

Vestas, Siemens Gamesa Renewable Energy, General Electric 등 유럽의 해상 풍력 터빈 제조업체는 일반적으로 북유럽 해역의 높은 풍속에서 운영되어 왔으므로 상위 터빈 플랫폼은 대형 로터와 발전기를 기반으로 한다. 글로벌 선도 제조업체인 베스타스는 최근 236 미터 크기의 대형 로터를 장착한 15 MW 터빈을 2025년부터 배치하겠다고 발표했다. 그러나 저풍속이 한국 풍력 체제의 특징인 만큼 글로벌 OEM들은 2026년 배치 시 자사의 초대형 플랫폼을 축소된 소형 발전기로 제공할 것이다. 즉, 외국 제조업체는 대형 로터는 유지하지만 발전기 정격을 낮추어 터빈의 비용량을 줄이고 전력 곡선을 저풍력 체제에 맞게 조정할 것이라는 의미이다. 이는 본 연구와 관련된 업계 참여에서 확인되었다.

한국 터빈 제조업체들은 현재 한국 시장을 위한 맞춤형 저풍력 터빈 개발을 추진하고 있다. 한국의 풍력 터빈 제조업체 두산은 8MW 터빈을 2022년 배치하겠다고 발표했다. 이 터빈은 205m이상의 로터 직경을 사용하여 6.5m/s의 저풍속에서도 최소 30%의 용량을 유지하도록 설계되었다. 또 다른 한국 제조업체인 유니슨은 2020년대 중반 상용화를 목표로 10MW 풍력 터빈을 발표했다. 이해관계자 참여에 따르면 발표된 국내 터빈 중 두산 8MW 터빈이 2020년대 중반에 상용화될 가능성이 현재 가장 높은 것으로 나타났다.

표 4-1은 제조업체가 제공하는 플랫폼을 기반으로 2020년대 중반 한국 시장에 출시 예정인 터빈 중 일부 공개 발표된 내용을 나타낸 것이다.

표 4-1 2020년대 중반 한국 시장에 출시 예정인 주요 터빈 관련 공개 발표

제조업체	외국			국내		
	Vestas	SGRE	GE	두산	두산	유니슨
모델명	V15-236	SG 14-222	Haliade-X 14 MW	WinDS5500	DS205- 8 MW	Hemu X
등급 (MW)	15	14	14	5.56	8	10
로터 직경 (m)	236	222	220	140	205	209
비용량 (W/m2)	343	361	368	361	242	291
상용화 예상 시기 (OEM 추정)	2025 [119]	2024 [120]	2025 [121]	2019 [122]	2022 [122]	2026 [123]

섹션 3에서 설명된 2개의 공급망 시나리오를 보면 파트너십 시나리오에서는 터빈 용량 237W/m<sup>2</sup>에 맞추기 위해 발전기를 축소해 저풍속 환경에 맞게 조정된 직경 230 미터인 로터를 장착한 대표 해외 터빈을 사용하는 것으로 가정한다. 국내 시나리오에서는 동일한 터빈 용량 237W/m<sup>2</sup>에 직경 207 미

터인 로터를 장착한 대표 국내 터빈을 사용하는 것으로 가정한다. 국내 및 해외 공급업체의 터빈 크기에 해당하는 기준 가정은 그림 4-3에 표시되어 있다.

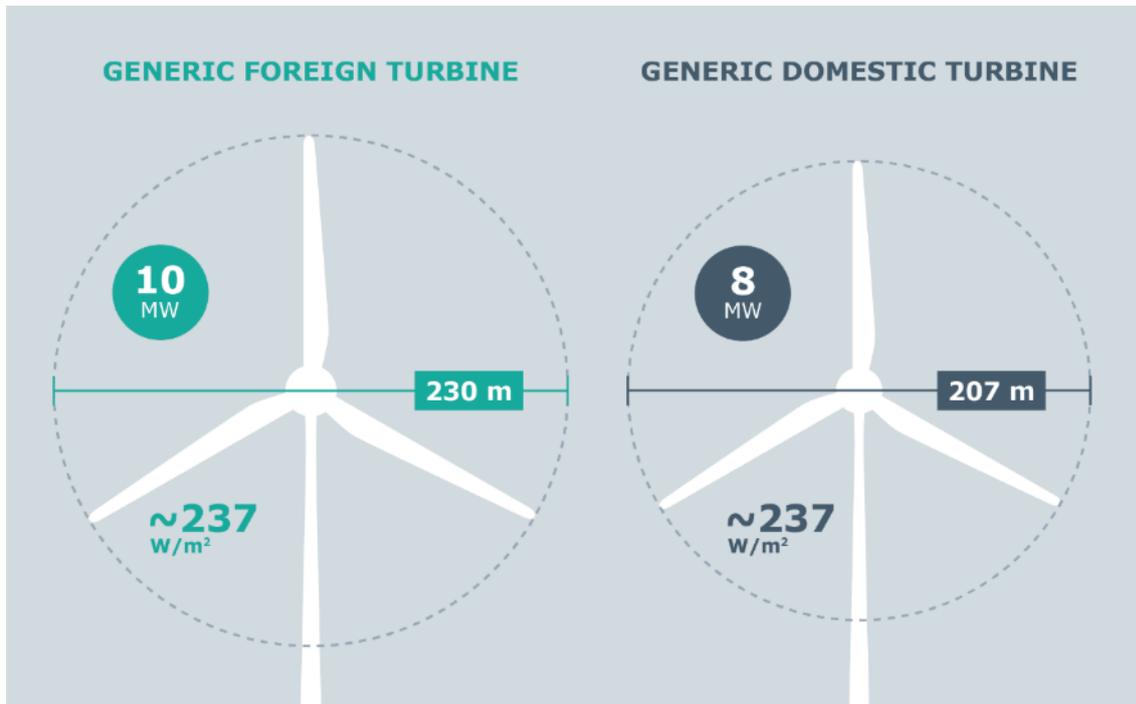


그림 4-3: 일반 국내 및 해외 터빈 구성

본 연구에서는 시나리오에서 사용된 터빈 두 개의 크기 차이와 더불어 글로벌 해외 제조업체가 소규모 국내 터빈을 사용할 경우의 경험치를 반영하기 위해 일반 국내 터빈에 일부 수정 사항을 추가로 적용하였다. 풍력 터빈은 역동적으로 상호작용하는 여러 구성요소가 포함되어 있는 복잡한 전기기계 시스템이다. 따라서 일반적으로 보면 새로운 터빈 플랫폼을 도입할 경우 학습 곡선이 가파르게 나타나며 이 플랫폼을 최적화해 신뢰할 수 있는 성능을 달성하려면 수 년이 걸린다. 그러나 이미 존재하며 오랫동안 사용되었으며 잘 입증되고 테스트된 플랫폼에서 막대한 경험을 도출할 수 있다. 한국의 국내 제조업

체들은 실적이 낮은 반면 유럽 제조업체들은 수십년에 이르는 새 터빈 플랫폼 개발 경험을 보유하고 있으며 제품을 제공하는 거대한 시장에서 이익을 얻고 있으므로 본 연구에서는 해외 터빈이 신뢰성이 높고 중지 기간이 짧다고 가정하였다. 이를 경험에 반영하기 위해 일반 국내 터빈용으로 일부 모델 매개변수를 조정하였다. 이 매개변수들은 전문가 경험, 이해 관계자 참여, 문헌 검토를 바탕으로 한다. 국내 터빈 가격 자료가 부족하기 때문에 본 연구에서는 외국 터빈과 국내 터빈의 가격 차이를 고려하지 않았다. 표 4-2는 매개변수와 그 값을 나타낸 것이다.

표 4-2 국내 시나리오용으로 선정된 매개변수 수정 사항

주요 매개변수	가정 (전부 절대 확률의 %로 표시)
수명주기	5년 감소
장기 가용성	2% 감소
터빈 우발 위험	5% 증가
OPEX	10% 증가
램프 업 가용성	첫 3년 동안 5% 감소
총 프로젝트 우발 위험	2% 증가

### 기초에 대한 가정

모노파일은 해상 풍력 산업의 초기부터 고정식 기초에 사용된 주요 기술이었다 [124]. 모노파일의 문제는 수심 30m 미만으로 얇고 매력적인 장소가 빠르게 개발되고 있다는 점이었다. 수심이 깊어지면 재킷 구조 기초가 사용될 것으로 간주되었다.

그러나 모노파일이 광범위하게 사용되면서 기술이 예상보다 빠르게 발전했다. 수년간의 점진적 설계와 제조 최적화를 통해 모노파일은 최대 약 60m 깊이의 해역에서 선호되는 기초 방식이 되었다. 결과적으로 재킷 기초 시장의 규모는 작아졌다 [8]. 현재 부유식 기초는 60m 이상의 수심에서 널리 사용되는 솔루션이 될 것으로 예상된다. 따라서 본 분석의 기준 사례에서는 모노파일과 부유식 기초만 사용된다.

본 연구는 인장 계류식 해양 구조물, 스파 (spar) 등 다른 우세한 개념들에 비해 부유식 프로젝트에서 현재 세계적으로 가장 널리 계획되고 구축되고 있으므로 일반 잠수식 및 부유식 하부구조를 전제로 한다.

반잠수식 개념은 주로 부력과 수면 영역에 의존해 정적 안정성을 유지하므로 대부분의 개념은 계류 라인을 연결하기 전에 조립지에서 풍력 터빈이 이미 설치된 부지로 견인될 수 있을 정도로 안정적이라는 체계적인 이점이 있다. 반 잠수식 기초는 스파 개념에 비해 견인 요건이 상대적으로 얇아 항구는 부두에서 조립한 후 해상 운영 부지로 견인하고 해상 작업량이 적어 유연성이 커진다. 일반적으로 기존의 반잠수식 플랫폼은 수심 50m에서 최대 1000m까지 배치될 수 있을 것으로 추정된다 [125]. 반 잠수식은 보통 계류 솔루션을 유연하게 사용할 수 있으며 기존의 전차선 계류 장치와 호환되고 차세대 세미터트 (semi-taut) 계류 또는 기타 새로운 개념도 가능하다.

2019년 현재 전 세계적으로 제안된 해상 프로젝트의 90% 이상이 반잠수식이다. 또한 부유식 개념이 발전하면 수심 측정, 토양 상태, 선박과 기반 시설의 가용성, 기타 요인 등 부지별 변수에 따라 달라질 수 있다 [126]. 그림 4-4는 기존의 반잠수식 개념을 설명한 것이다.

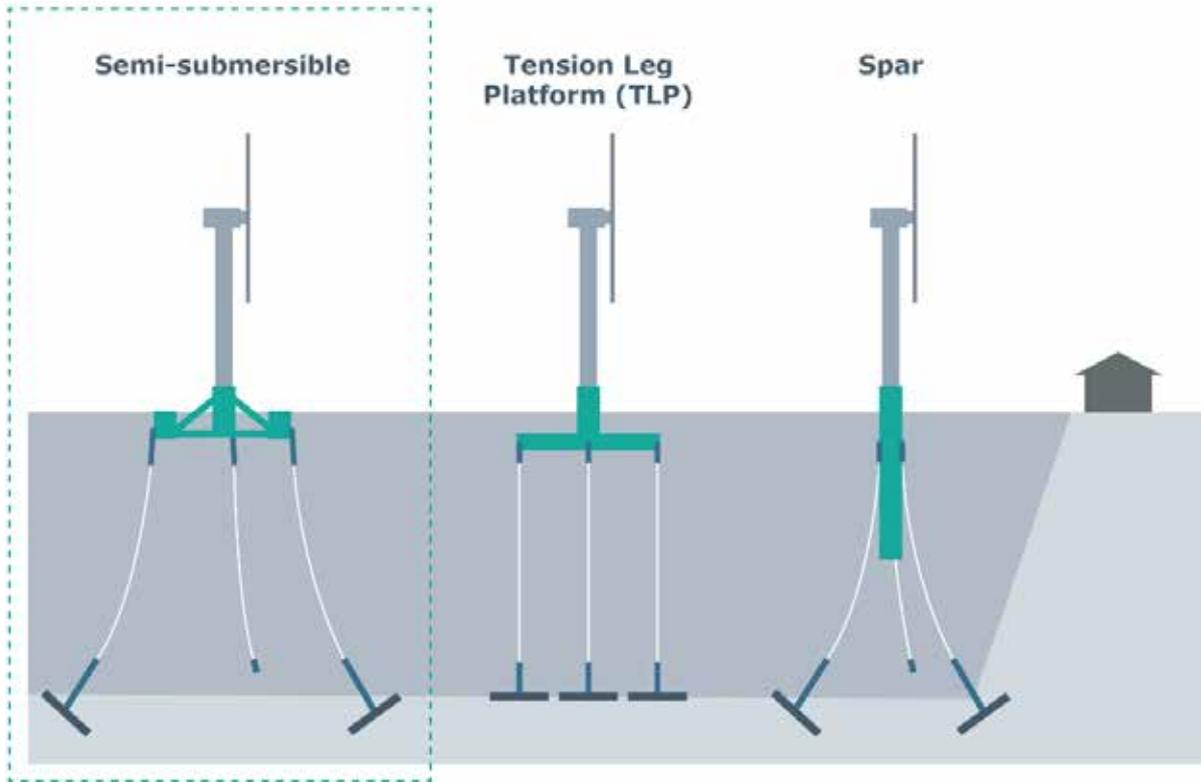


그림 4-4: 주요 부유체 개념

풍력 터빈 제조와 마찬가지로 모노파일 제작도 학습 곡선과 최적화 곡선이 가파르게 나타난다. 본 연구에 사용된 모노파일 기초의 경우 대규모 포트폴리오를 갖춘 글로벌 제조업체와 포트폴리오 규모가 작은

국내 제조업체의 경험 차이는 매우 컸다. 이 차이를 반영하기 위해 국내 시나리오에서는 모델 매개변수를 조정하였다. 표 4-3은 해당 매개변수와 값을 나타낸 것이다.

표 4-3: 국내 기초의 모노파일 수정 사항

주요 매개변수	가정 (전부 절대 확률의 %로 표시)
모노파일 제작 비용	20% 증가
모노파일 및 트랜지션 피스 우발 위험	20% 증가

## 기준 사례 개요

아래 표 4-4는 한국 상황에 맞게 조정된 기준 사례 개요로 공급망 시나리오 평가의 출발점이 제시되어

있다. 터빈에 대한 가정은 표 4-3의 일반 터빈을 반영하여 해외 공급의 경우“F”, 국내 공급의 경우“D”로 구분한다.

표 4-4: 기준 사례 가정 요약

		인천	전라남도	제주도	울산
					
풍력 단지 용량 (MW)		500	500	500	500
터빈 등급 (MW)	F <sup>1</sup>	10	10	10	10
	D <sup>2</sup>	8	8	8	8
터빈 로터 크기 (m)	F	230	230	230	230
	D	207	207	207	207
터빈 수명 (연수)	F	30	30	30	30
	D	25	25	25	25
기초 유형		모노파일	모노파일	반잠수식	반잠수식
부지 수심 (m)		25	55	105	140
해발 100m의 연평균 풍속 (m/s)		7.25	8.25	7.25	8.00
그리드까지의 거리 (km)		50	75	15	70
건설 항구까지의 거리 (nm)		55	65	40	40
상업 운영일		2026	2026	2026	2026

1 해외 공급; 2 국내 공급

### 4.1.2 LCOE 결과

표 3-2에 자세히 명시된 것처럼 본 연구에서는 두 가지 공급망 시나리오를 고려한다. 참조 사례 카테고리 1의 백분율 비용은 별첨 C에 명시되어 있다.

위의 시나리오를 표 4-4의 기준 사례 가정과 결합하여 각 기준 사례와 시나리오에 대한 수명 비용과 연간 에너지 생산을 모델링하였다. 분석에서 모든 시나리오에 대하여 할인율 7.5%를 적용하였다. 결과는 별첨 D에 요약되어 있다.

제주와 울산의 부유식 부지는 인천과 전라남도의 고정식 부지보다 건설함에 더 가깝지만 부유식 기초의 비용보다 높지 않다. 그 결과 부유식 부지의 LCOE는 98-120 EUR/MWh 범위에 속한다. 대조적으로 가장 낮은 LCOE 수준은 고정식 부지에서 75-95 EUR/MWh 범위로 나타났다. 아래 그림 4-5는 이 결과를 나타낸 것이다. 모든 부지에서 발달된 해외 터빈과 모노파일 공급망을 사용하기 때문에 파트너십 시나리오의 LCOE 값이 가장 낮다.

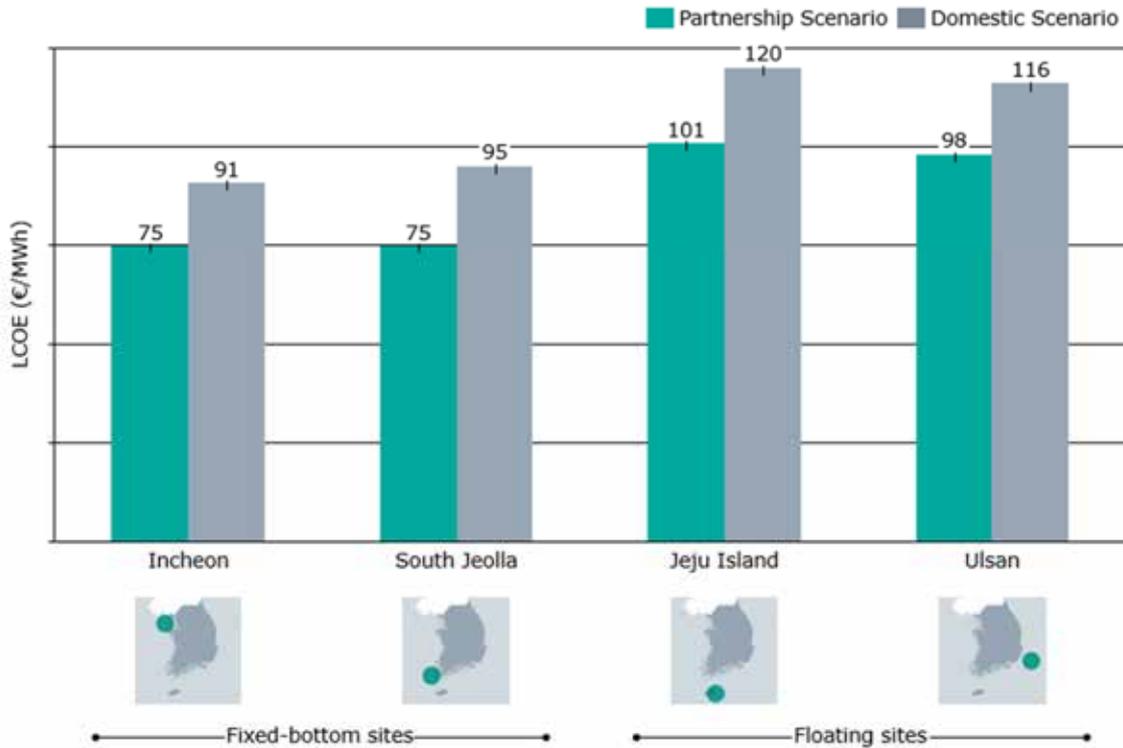


그림 4-5: 모든 시나리오에서 2026년 참고지의 LCOE (2021 가격 기준 EUR/MWh로 표시)

그림 4-6은 4개 부지 전체의 단지 이용율을 비교한 것이다. 이용율 풍속과 직접적인 상관 관계가 있기 때문에 두 시나리오 모두에서 바람 조건이 가장 좋은 전라남도의 이용율이 가장 높고 울산이 그 뒤를 잇는다. 해외 터빈 플랫폼은 다년간의 경험으로 사

용 실적이 더 낮은 터빈 플랫폼에 비해 성능이 확실하므로 해외 터빈 플랫폼의 가용성이 높고 이용율도 높다. 또한 국내 터빈은 발전기 크기가 작아 풍력 단지에 터빈을 여러 개 설치해야 하기 때문에 후류 손실이 커지고 발전량이 낮아진다.

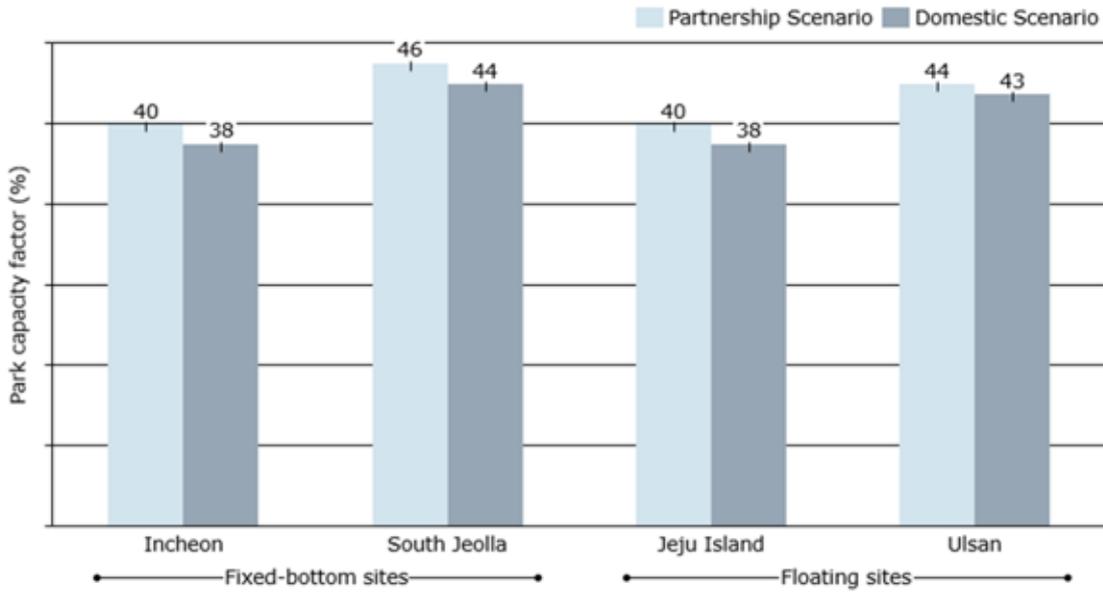


그림 4-6: 모든 시나리오에서 참고지의 이용률

그림 4-7은 네 곳의 자본 비용을 나타낸 것이다. 풍력 프로젝트에서는 터빈 및 기초 공급과 설치, 운영 비용 등 세 가지가 비용을 대부분 차지한다. 이 점을 고려하면 수심이 얕고 해안과 항구까지의 거리가 짧

은 인천의 CAPEX가 가장 낮은 것이 당연하다. 울산의 CAPEX가 가장 높은 이유도 수심이 깊기 때문이다.

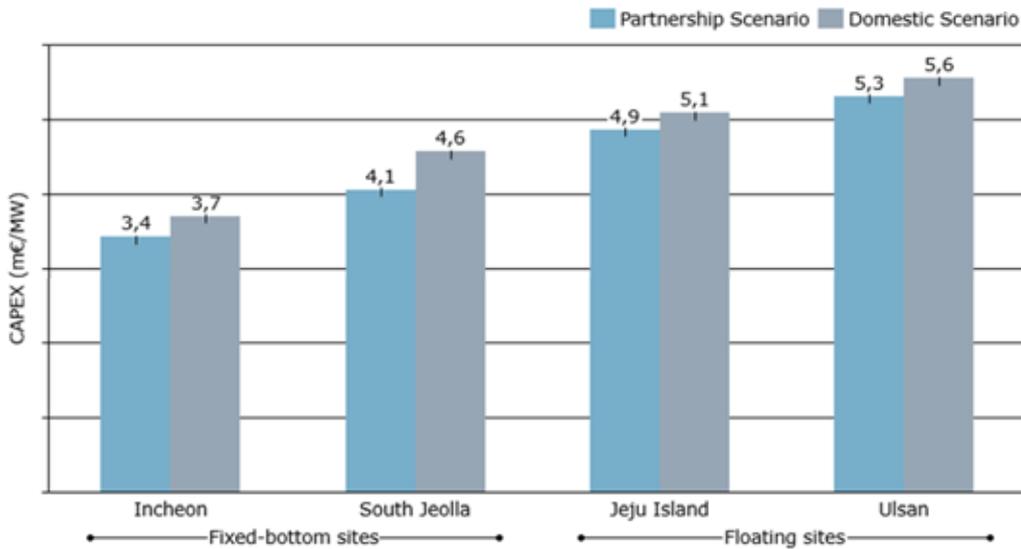


그림 4-7: 모든 시나리오의 참고지 CAPEX (2021년 가격 기준 EUR/MWh)

그림 4-8은 네 곳의 운영 비용을 나타낸 것이다. 부유식 풍력 단지는 아직 초기 개발 단계이며 운영 정보가 부족하고 문헌에서도 OPEX 부유식과 OPEX 고정식의 가격 차이가 입증되지 않았기 때문에 부

유식 부지와 고정식 부지의 운영 절차가 동일하다고 가정하였다. 따라서 OPEX는 주로 터빈의 신뢰성과 O&M 항구까지의 거리에 따라 결정된다.

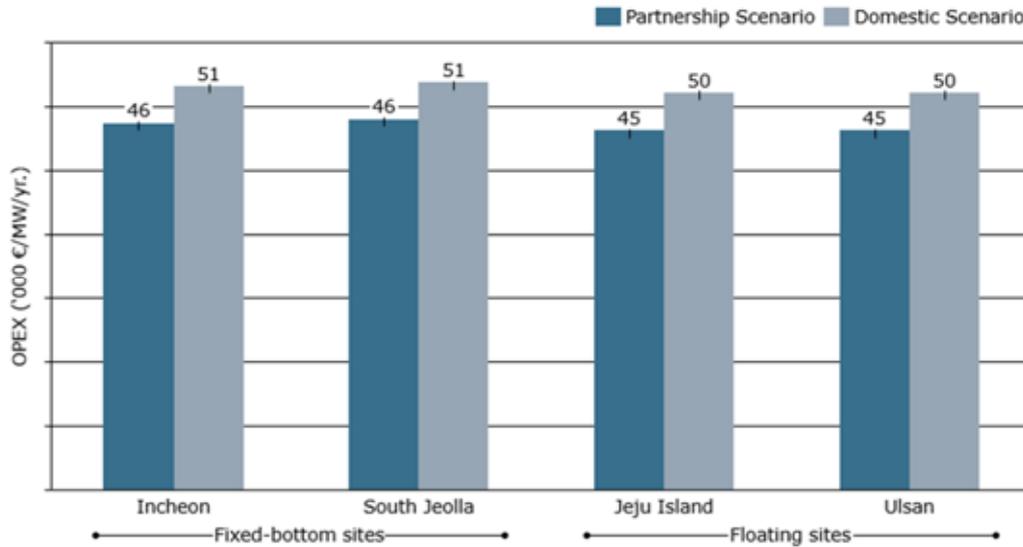


그림 4-8: 모든 시나리오의 참고지 OPEX (2021년 가격 기준 EUR/MWh)

### 고정식 부지의 누적 LCOE 차이

파트너십 시나리오와 국내 시나리오의 누적 LCOE 효과는 그림 4-9에 표시되어 있다. 두 공급망 시나리오에서 모든 하위 범주의 LCOE가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이렇게 LCOE의 차이가 큰 이유는 훨씬 발전된 해외 터빈에 비해 터빈의 크기가 작고 개발 단계이기 때문이다. 그 결과 터빈이 많이 필요하게 되어 모든 범주의 LCOE가 증가한다. 증가 폭에서 1/4 정도가 두 시나리오 사이의 풍력 발전 단지 이용률이 낮기 때문에 발생한다. 국내 시나리오의 경우 터빈이 더 많아 터빈 가용성 저하, 수명 감소, 후류 손실 증가 때문에 풍력 발전 단지 이용률이 낮다.

더 광범위한 경제적 측면에서는 500 MW 규모의 인천 풍력 단지에서 전 주기에서 LCOE 수준 차이가 약 8억 7천만 €2021에 이른다. 이 값은 장기 하

한가 (offtake price) 16.5 €/MWh에 파트너십 시나리오의 전 주기 생산량을 곱한만큼 증가한 것으로 나타난다. 규모나 기간이 다른 풍력 단지일 경우에는 두 공급망 시나리오의 차이에 영향을 미칠 수 있는 규모의 경제나 기술 향상이 고려되지 않으므로 이 값을 외삽할 수 없다는 점에 유의해야 한다.

### 부유식 부지의 LCOE 차이

그림 4-10은 파트너십 시나리오와 국내 시나리오 사이의 LCOE 누적 효과를 나타낸 것이다. 그림에는 파트너십 시나리오에서 해외 터빈이 국내 터빈으로 변경되면서 LCOE가 증가하는 것을 보여준다. 국내 터빈은 크기가 더 작기 때문에 동일한 풍력 단지 규모를 이루려면 터빈이 더 많이 필요하다. 또한 해외 터빈과 국내 터빈의 성능과 가용성이 달라 에너지 생산량이 감소한다. 결과적으로 그림 4-10에서 모든 하위 범주 가격이 상승하는 모습을 볼 수 있다.

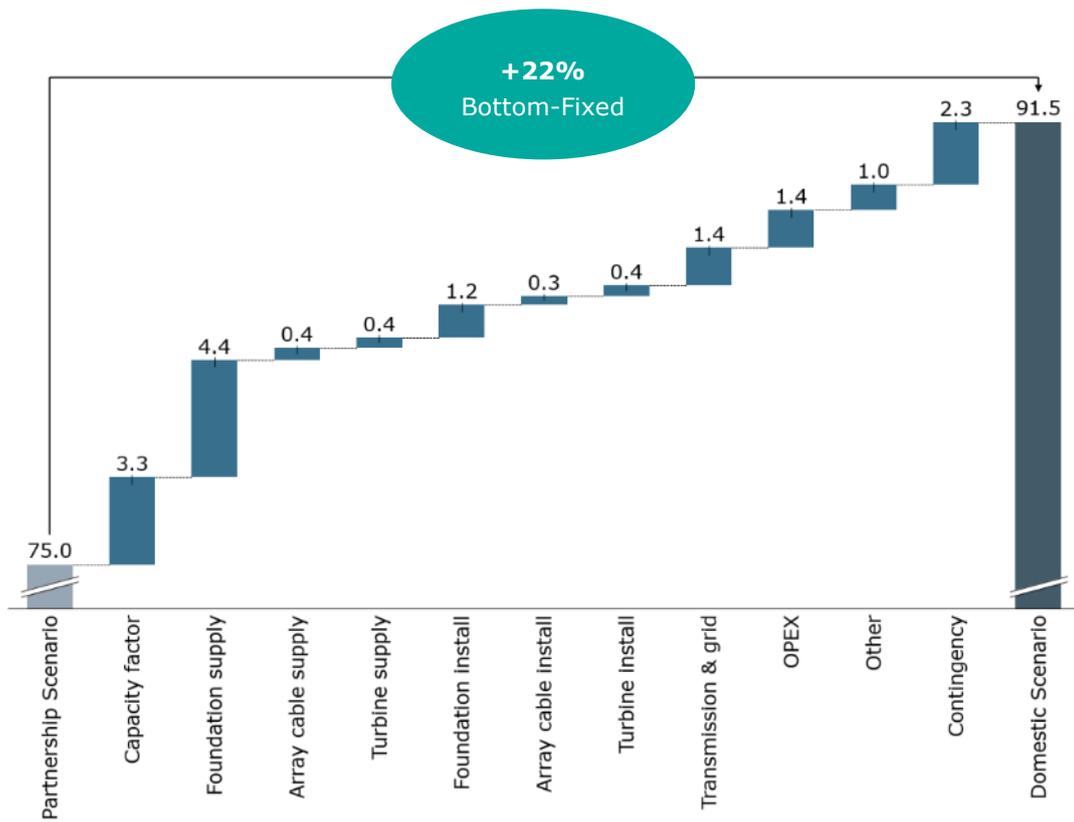


그림 4-9: 파트너십 시나리오에서 국내 시나리오로 변경될 경우 인천 참고지의 LCOE 브리지 (2021년 가격 기준 EUR/MWh)

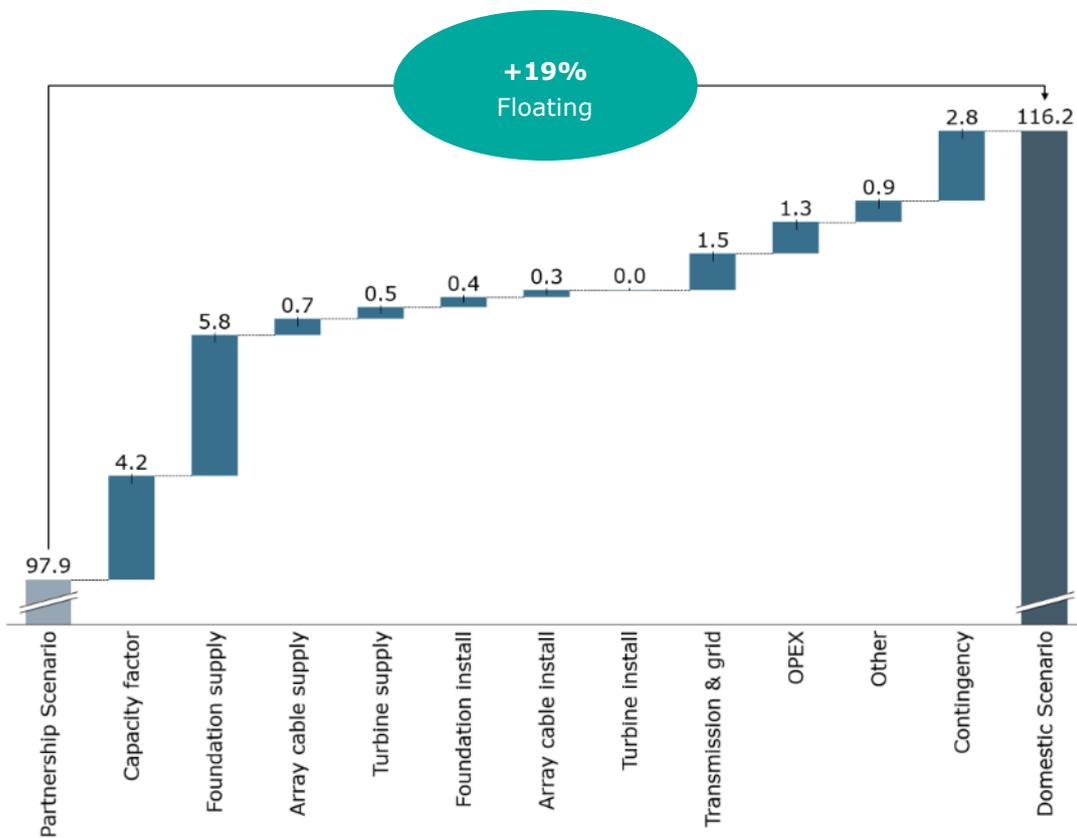


그림 4-10: 파트너십 시나리오에서 국내 시나리오로 변경될 경우 울산 참고지의 LCOE 브리지 (2021년 가격 기준 EUR/MWh)

## 4.2 국내 공급의 위험

유럽의 해상 풍력 공급망은 2013년부터 연간 1.5-3.5 GW를 공급하면서 발전했고 그 과정에서 몇 가지 주요 위험을 최소화할 수 있었다 [8]. 이러한 위험은 대부분 사용된 터빈 기술과 관련된다. 터빈 기술 위험을 경감할 수 있는 일차적인 방법은 OEM이 터빈 플랫폼 실적을 쌓은 후 이를 개선하고 지속적으로 개발하는 것이다. 터빈 플랫폼의 실적이 많을수록 지각된 기술 위험이 낮아진다.

이해 관계자 참여에 따르면 향후 개발도 대개 플랫폼이 연속되는 것으로 인지되기 때문에 본 연구에 사용된 해외 공급 터빈의 인수도 위험(delivery risk)은 낮다. 반면 이해 관계자 참여에서 국내 공급 업체의 인수도 위험은 매우 높은 것으로 드러났다. 주된 이유는 국내 공급 업체들의 해상 프로젝트 실적이 부족하고 현재 대규모 개발 단계에 있기 때문이다. 현재 해상에서 가동 중인 두산 최대 터빈의 규모는 3.3MW이며 2022년에는 8MW WTG를 공급할 계획이다. 유니슨은 4.3MW 급의 육상 풍력 터빈을 2026년까지 10MW 급의 해상 터빈으로 확대한다는 더 큰 기술 도약을 목표로 하고 있다.

이렇게 실적이 부족하기 때문에 국내 터빈 사용과

관련된 위험을 명확하게 정량화할 수 없다. 따라서 아래 분석에서는 민감도와 예시를 통해 이러한 위험의 경제적 범위를 설명하고자 한다.

### 새로운 터빈 플랫폼

새로운 터빈 플랫폼을 개발하고 출시하는 경우에는 가용성 측면에서 공급이 지연될 잠재적 위험과 성능 저하 위험이 있다. 개발자가 국내 터빈을 사용하기로 결정했는데 2020년대 중반에 사용 가능한 8MW 터빈이 없다면 국내에서 차선책으로 로터 직경 140m인 5.56 MW 규모의 국산 해상 터빈을 사용해야 한다. 이 경우 표 4-5에서 볼 수 있는 것처럼 LCOE는 131 €/MWh, 전체 주기의 에너지 생산은 32,400GWh인 반면 8MW 규모의 터빈으로 구성한다면 LCOE는 91.5 €/MWh, 전체 주기의 에너지 생산은 41,906GWh가 된다. 잠재적인 재정 증가 가치의 근사치를 LCOE 접근법으로 추정하면 500 MW 규모의 단지에 차선책을 사용하면 LCOE 증가로 12 억 5 천만 유로가 손실될 것으로 보인다. 이 값은 장기 하한가 (offtake price) 39 €/MWh에 차선책의 전 주기 생산량을 곱한만큼 증가한 것으로 나타난다.

표 4-5: 2026년 인천 참고지의 인수도 위험 가치

	터빈 등급 (MW)	터빈 로터 (m)	LCOE ( /MWh)	전 주기 생산량 (GWh)
국내 시나리오	8	207	92	41,900
차선책	5.56	140	131	32,400
차이	2.44	67	39	9500

### 4.3 한국 해상 풍력의 LCOE 히트 맵핑

가치 히트 맵핑은 해상 풍력 프로젝트를 구축할 매력적인 부지를 찾기 위해 시장을 빠르고 직관적으로 선별하는 효과적인 도구이다. 한국에서 가치 히트맵을 통해 12 GW 목표 달성을 위한 해상 풍력 배치에서 새로운 잠재적 분야를 파악할 수 있다.

가치 히트 맵핑은 본질적으로 전체 해상 풍력 시장을 대상으로 수행되는 수천개의 개별 LCOE 계산을 모은 것이다. 각 계산에는 LCOE를 결정하는 핵심 동인인 풍속, 수심, 항구까지의 거리, 해안, 송신 길이로 이루어진 고유한 조합이 있다. 특정한 장소에 따라 바뀌지 않는 요소들은 고정되어 있다. 히트맵 계산에 사용된 참조 사례는 파트너십 시나리오를 바탕으로 한다.

낮은 바람과 심해가 결합된 지역의 경우 상대적으로 높은 LCOE 수준이 산출된다. 본 섹션의 히트 맵에서 이 영역은 빨간색으로 표시된다. 반면 LCOE 값

이 낮은 매력적인 부지는 파란색/녹색으로 표시된다.

히트 맵핑에는 종종 LCOE의 단계 변화를 초래하는 기술적 티핑 포인트(tipping point)가 포함된다. 예를 들어, 수심이 60 미터 이상인 곳에서 고정식 기초를 부유식 기초로 변경하는 것이다

다음 섹션에서는 LCOE 히트 맵핑의 각 단계 (서브맵)를 제시하여 최종 맵핑 결과를 산출한다.

#### 4.3.1 풍력 자원

본 분석에 사용된 Global Wind Atlas의 한국풍 데이터 세트에는 한국 해안선에서 200km까지 해발 100m와 지표면의 풍속 잠재력(speed potential)이 포함되어 있다. [37]

데이터 세트에는 해상과 한국 배타적 경제 수역 내의 풍속만 포함하도록 잘라냈다 [127]. 그림 4-12는 풍력 자원의 결과 맵이다.

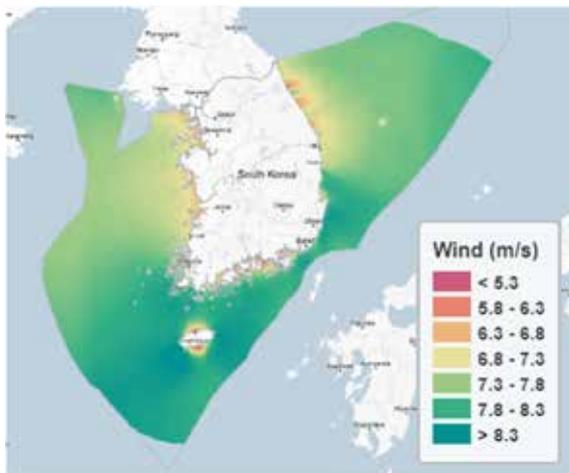


그림 4-11: 한국에서 해발 100 m의 해상 풍력 자원 [37]

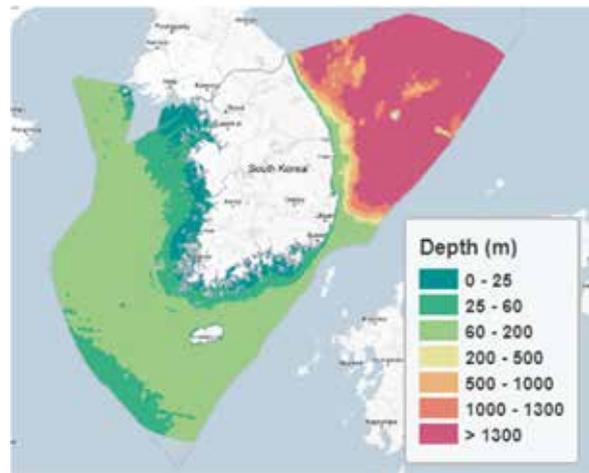


그림 4-12: 한국 바다의 수심 측량 [128]

### 4.3.2 수심 측량

이 공간 경제 분석에서는 고정식 풍력 단지의 타당한 수심을 최대 60 미터까지 가정하였다. 60 미터 이상에서는 부유식 기술을 가장 비용 최적화된 방식으로 본다 [129].

부유식 해상 풍력은 떠오르는 기술로, 상업적 용도를 위해 일부 설계 개념을 개발하는 중이어서 아직 수심 한계를 논의하고 있다. 그러나 수심이 증가함에 따라 더 긴 케이블과 계류 라인으로 비용이 증가한다.

본 분석에서는 최대 해저 수심을 2000 미터라고 가정한다. 이 제한은 산업적 제한과 무관하지만 분석에서는 귀중한 경계가 된다.

한국의 배타적 경제 수역 경계와 최대 -1300m의 해저 수심을 기준으로 할 때 적합한 수심 영역은 그림 4-12와 같다.

이 그림에서 수심이 60 미터 미만인 지역은 주로 서

해안에서 발견되며 동해안에는 경사가 심하고 깊은 해역이 많다는 것을 보여준다.

### 4.3.3 항구까지의 거리

한국에는 해상 풍력 건설을 지원할 수 있는 대규모 상업 항구가 여러 곳이 있다. 이해 관계자 참여에서 건설 항구 6곳이 해상 풍력 단지 설치에 적합할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 선정된 6개 항구는 대산, 군산, 목포, 부산, 울산, 포항이다.

6개 항구의 위치는 세계 항만 지수(세계 항만 지수)에서 수집하였다 [130].

세계 항만 지수의 데이터 양이 제한되어 있기 때문에 본 분석에서는 설치 및 O&M 모두에 대해 고정식과 부유식을 구분하지 않는다. 아래 그림 4-13과 그림 4-14는 포트까지의 거리를 보여준다. 이 거리는 섬, 군사 또는 해양 보호 구역을 고려하지 않은 직선 경로이다.

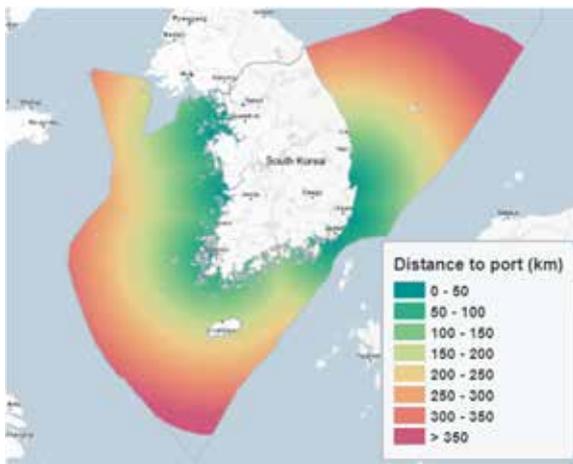


그림 4-13: 설치 항구까지의 거리

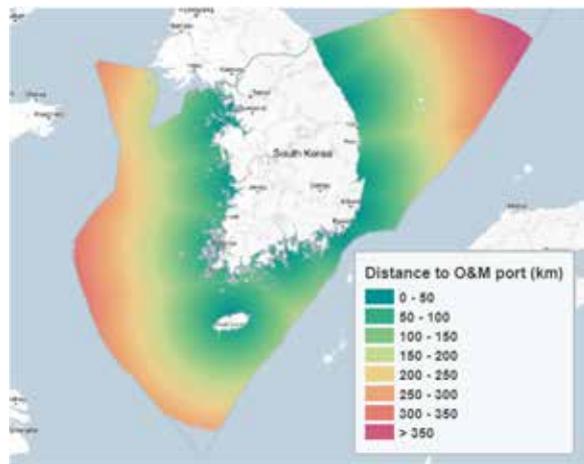


그림 4-14: O&M 항구까지의 거리

#### 4.3.4 그리드까지의 거리

외부 전력망 길이는 풍력 발전 단지에서 육상 연결 지점까지의 전송 연결 비용을 식별하기 위한 값으로 사용된다. 외부 전력망은 육상과 해상으로 나뉘며 특성이 다르다. 한국의 전력 그리드 데이터는 국

가 안보 문제로 일반에 공개되지 않는다. 따라서 해상 외부 전력망 길이는 각 해상 위치에서 해안까지의 거리로 근사값을 계산한다. 케이블 상륙 지점(landfall)에서 육상 그리드 연결 지점까지는 고정 거리를 10km로 가정한다.

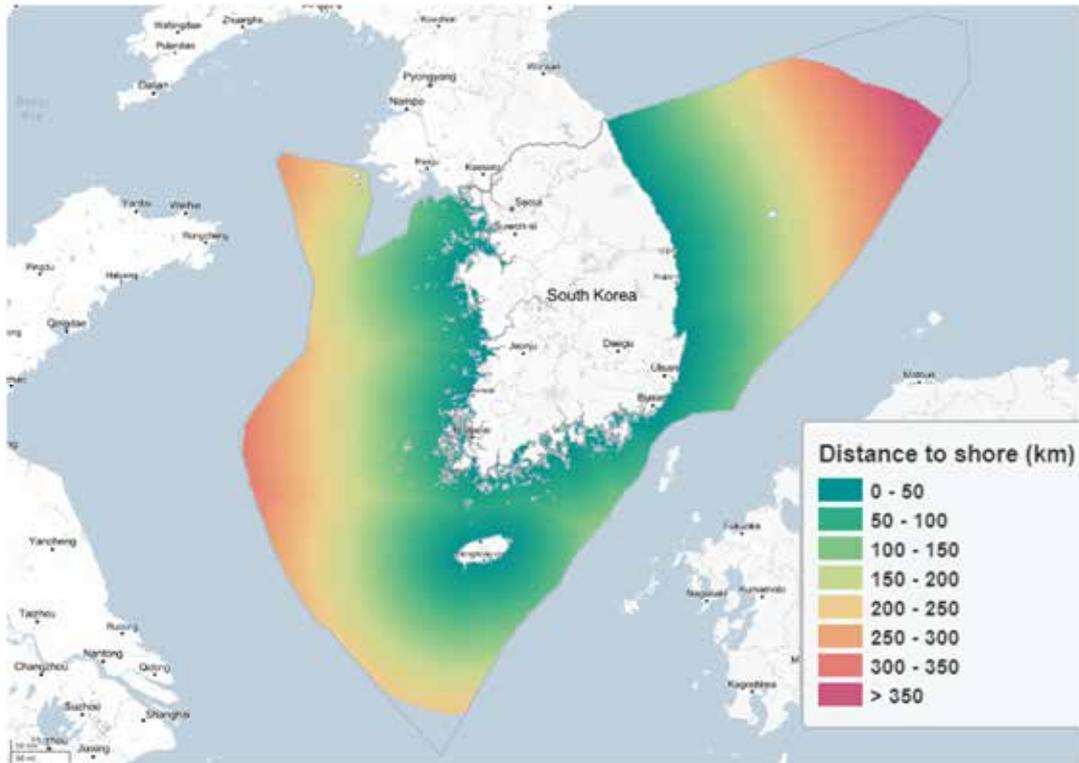


그림 4-15: 본토와 제주도 해안선까지의 거리

#### 4.3.5 LCOE 히트맵

이전 섹션에서 제시된 4개의 맵은 고정식 기초가 있는 풍력 단지와 부유식 기초가 있는 풍력 단지 모두의 LCOE 히트 맵을 계산하는 데 사용된다. 고정식 기초의 경우 평균 풍속이 7m/s 이상이고 수심이 60m 미만인 잠재적 영역과 부유식 기초의 경우 수심이 60m에서 최대 1,300m인 잠재적 영역만 고려된다. 고정식 해상풍의 경우, 그림 4-16에서 가장 낮은 LCOE 수준은 해안에 풍속이 비교적 높고 전

송 항구 거리가 짧고 수심이 얇은 동중국해의 해안과 가까운 곳에서 발견된다. 특히 제주도의 동서해안은 풍력 자원이 가장 좋은 곳으로 풍력 단지의 잠재력이 높다. 풍력 자원이 덜 유리한 황해에서는 경쟁이 덜하다.

그림 4-17에서 수심이 60 미터 이상인 부유식 위치에서 LCOE 수준과 동해안 밖의 수심은 강한 상관관계를 보인다.

그림 4-16: 고정식 풍력 프로젝트 후보지의 LCOE 맵 (수심 ≤60m, 풍속 ≥7 m/s 파트너십 시나리오)

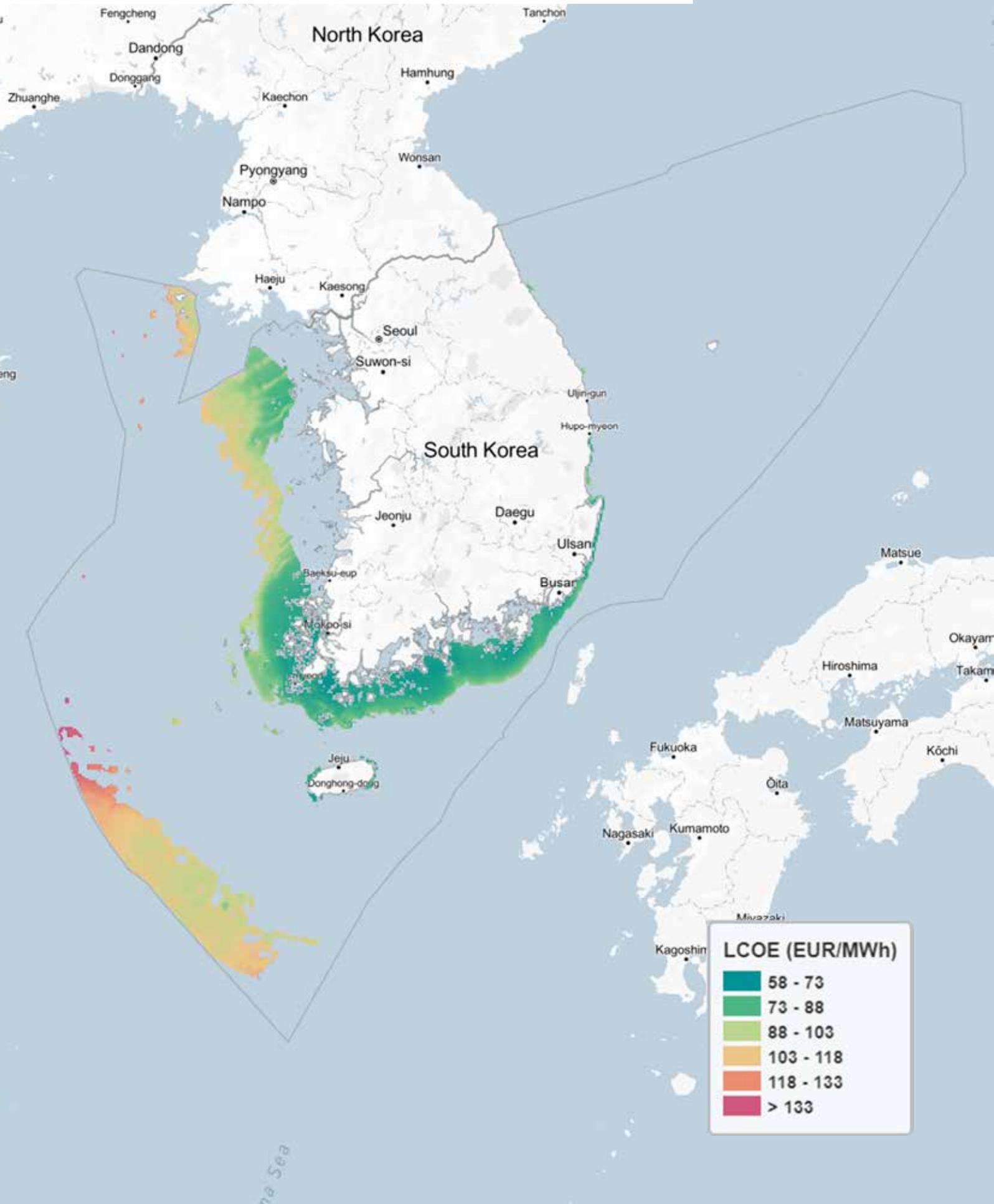
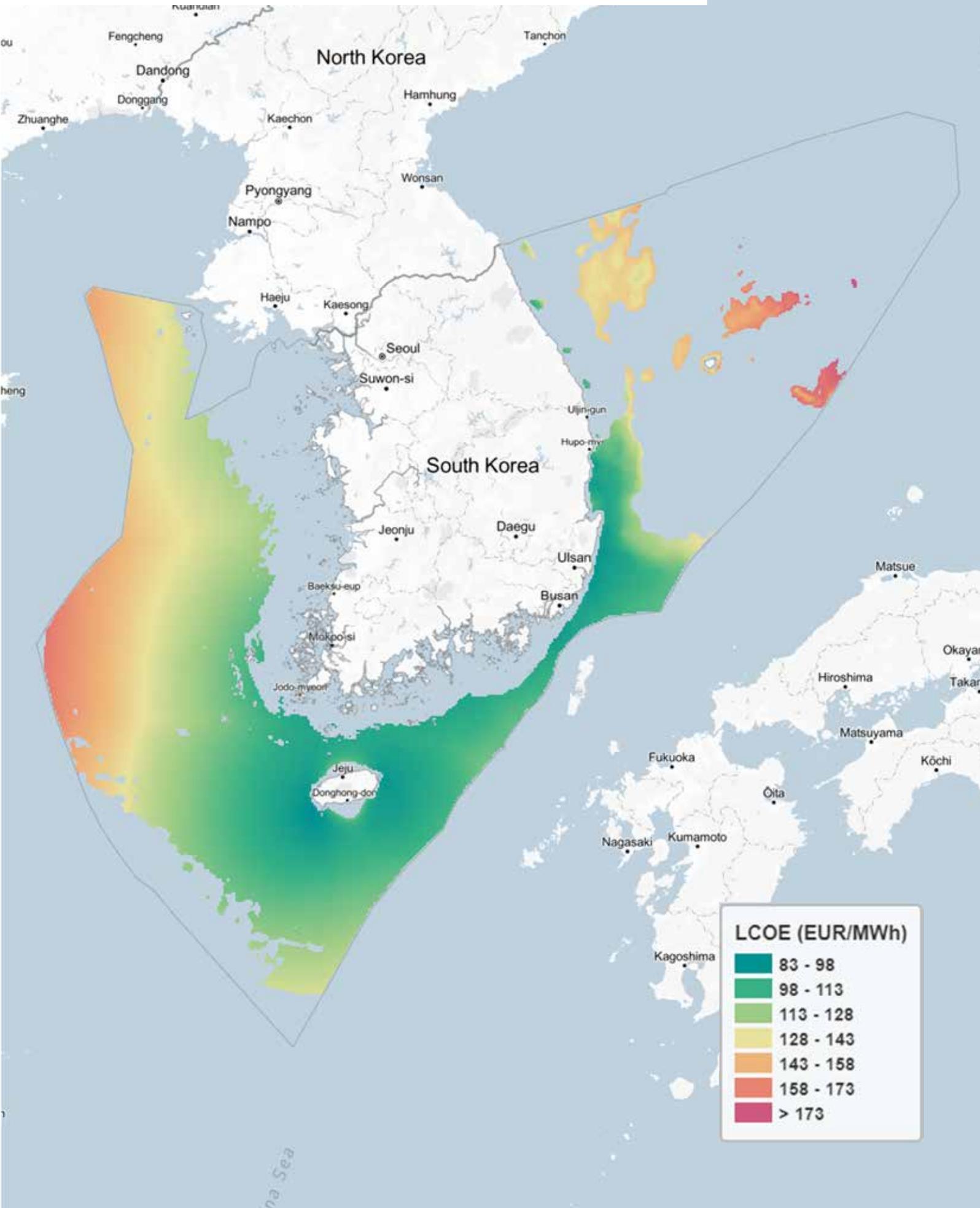


그림 4-17: 고정식 풍력 프로젝트 후보지의 LCOE 맵  
 (수심 60-1300m, 풍속  $\geq 7$  m/s 파트너십 시나리오)



## 4.4 2035년까지 비용 감축 방향

그림 4-18은 유럽의 성숙한 프로젝트와 비교하여 2020년대 중반 예정인 첫 상업 규모 프로젝트 중 고정식 해상 풍력 프로젝트의 LCOE를 2035년까지 나타낸 것이다.

고정식 풍력 프로젝트의 LCOE는 2023년 최고 80 EUR/MWh에서 2035년에는 최고 50 EUR/MWh로 40% 가까이 감소할 것으로 예상된다. 이는 다음 가정을 바탕으로 한다.

- IEC 3급 터빈 크기는 2035년에 14MW 급으로 증가할 예정이다.

- LCOE 수준은 성공적인 상업적 발달과 성숙한 국내 공급망에 달려 있다.
- 그리드 업그레이드가 필요할 경우 중요한 요소인 그리드 업그레이드는 LCOE 추정에 포함하지 않는다.
- 2035년에 고속 터빈 크기는 18MW 급으로 증가할 예정이다.
- 풍력 터빈과 기초 가격 감소와 설치 및 기술 효율성 향상으로 비용이 감소한다.

한국의 고정식 LCOE는 40% 가까이 감소할 것으로 예상되지만 풍력 조건이 더 좋고 풍력 에너지의 선두주자인 유럽 수준까지 이르지 못할 것으로 예상된다.

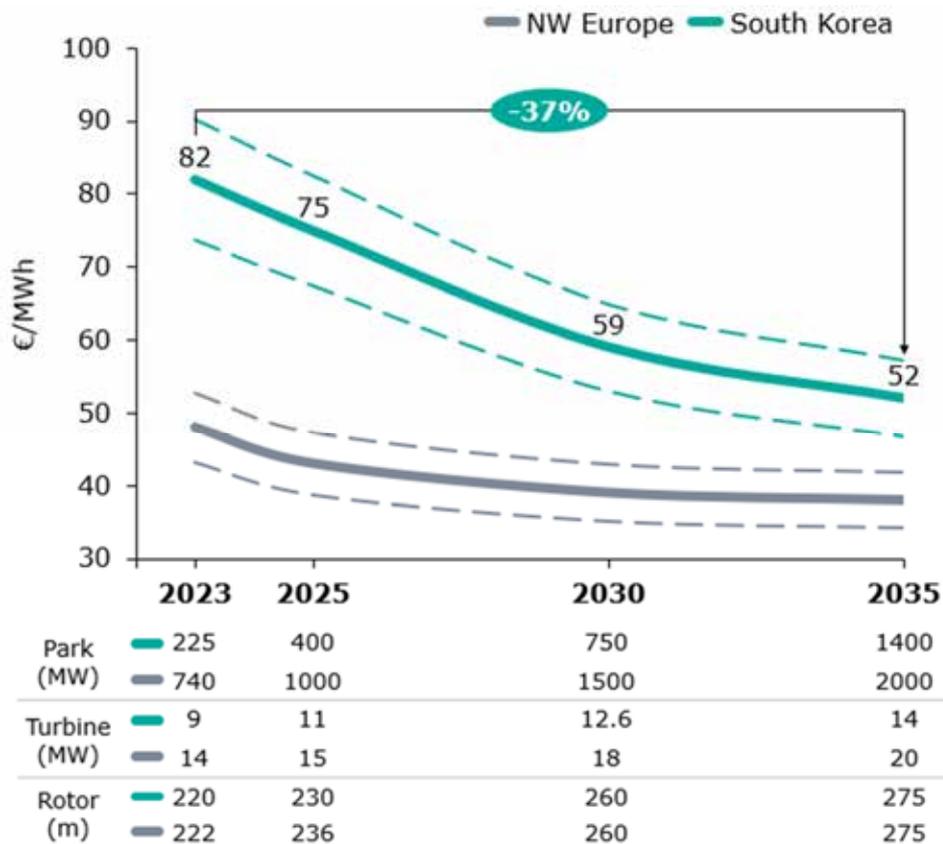


그림 4-18: 2035년까지 고정식 풍력 단지 프로젝트의 LCOE 전망

그림 4-19에 나타난 것처럼 부유식 풍력 프로젝트의 LCOE는 2025년 최고 110 EUR/MWh에서 2035년에는 60 EUR/MWh로 하락할 것으로 예상된다.

부유식 풍력은 고정식과 동일한 비용 절감을 가정했을 때 누릴 수 있는 이점이 많다. 그러나 이 기술은 아직 미숙하기 때문에 2035년 부유식 풍력 단지의 LCOE는 더 높을 것으로 예상된다.

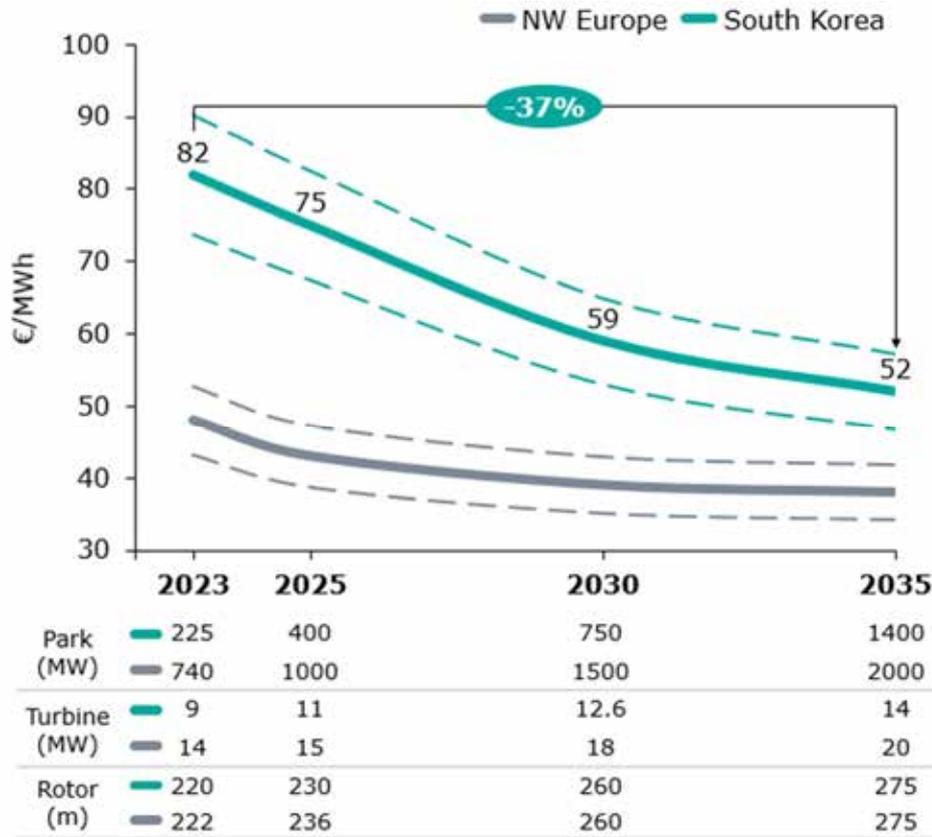


그림 4-19: 2035년까지 부유식 풍력 단지 프로젝트의 LCOE 전망

## 4.5 LCOE 예시

한국 전력 거래소는 전력 시장과 전력 시스템 운영, 실시간 전력 공급 업무, 산업통상자원부의 전력 수급 기본 계획 수립 지원 등을 담당하고 있다. 발전회사가 전기를 생산하면 한전과 지역 전력 공급자는 한국 전력 거래소가 운영하는 전력 시장에서 생산된 전기를 구매하여 최종 구매자인 전력 소비자에게 판매한다. LCOE는 전력 사업자가 한전으로부터 받는 비용(원)을 전기량 (kWh)으로 나눈 값이다.

LCOE는 발전원에 따라 크게 다르며 그 중 석탄, 석유, LNG가 연료비 변동에 가장 큰 영향을 받는다.

다음 그림 4-20은 2011-2020년의 연간 LCOE의 과거 추세를 나타낸 것이다.

한전에 따르면 10년간 발전원별 평균 LCOE는 원자력, 석탄, 수력, 가스, 신재생에너지가 각각 54.4원, 73.4원, 195.7원, 130.8원, 146.5원, 114.6원/kWh이다 [131].

기존 에너지원의 과거 LCOE를 본 연구에서 수행한 해상 풍력 단지의 LCOE 비교할 수는 없지만, 2035년부터 상업적 규모의 배치가 가능하다면 해상 풍력은 상업적으로 경쟁력 있는 에너지원이 될 가능성이 가장 높다고 할 수 있다.

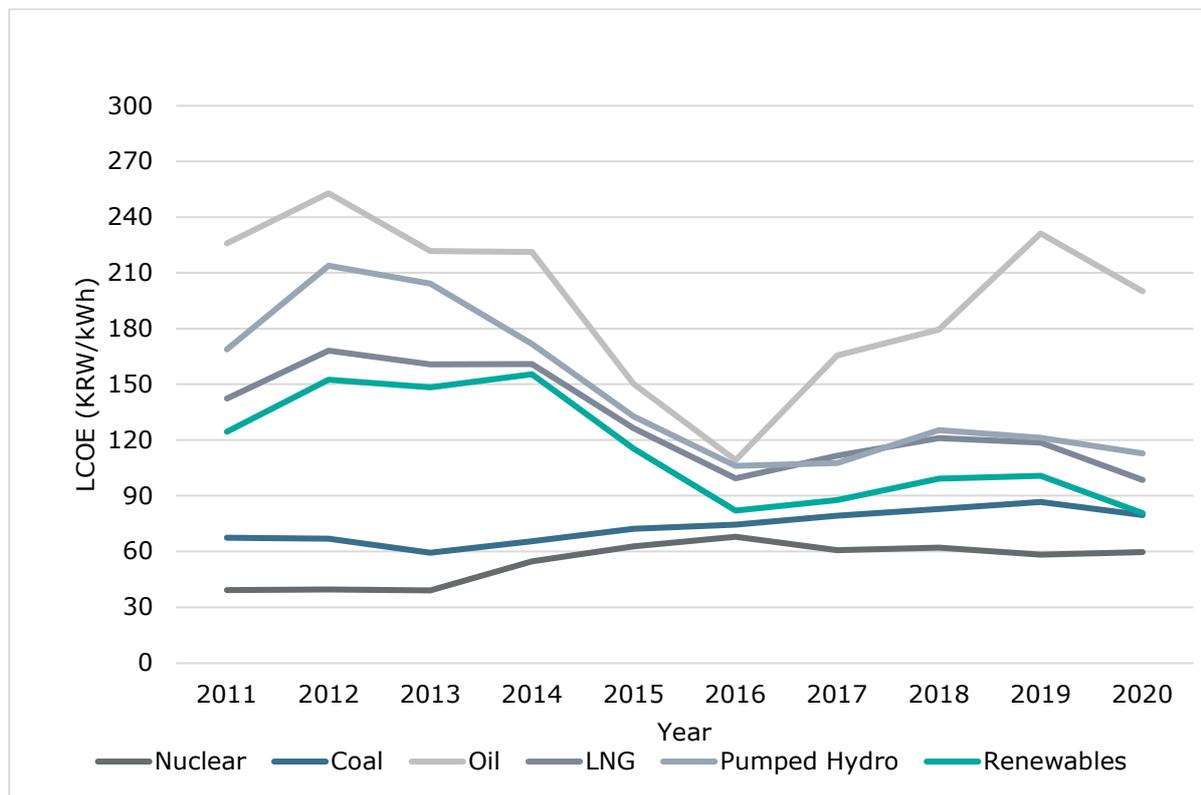


그림 4-20: 지난 10년간 발전원별 LCOE (단위: KRW/kWh) [131]

## 4.6 요약

한국의 고정식 및 부유식 풍력 단지 잠재력의 가치 히트 매핑을 통해 2030년까지 12GW 목표를 실현하기 위한 배치를 할 수 있는 매력적인 부지를 파악할 수 있다. 풍속, 수심, 항구까지의 거리, 그리드 연결까지의 거리 등 주요 LCOE 동인을 조합하면 고정식 해상 풍력 단지 배치에 가장 적합한 부지는 풍속이 상대적으로 높고 송전소 거리가 짧고 수심이 낮은 해안에 남쪽 해안가 근처이다. 제주도 주변의 바다는 최고의 풍력 자원을 보유하고 있어 매력적이다. 수심이 60m 이상인 장소의 부유식 풍력 단지의 경우 동해안과 제주도 주변에서 LCOE 수준이 가장 낮다.

선정된 추진 지역 4곳의 LCOE 평가는 2026년 COD를 포함하는 500MW 급의 상업용 해상 풍력 프로젝트를 기반으로 한다. 한국의 해상 풍력 단지에 새로운 지역 공급망이 미치는 영향을 반영하기 위해 인천, 전라남도, 울산, 제주도 등 4개 지역에서 두 가지 시나리오를 평가했다. 2026년 COD로 풍력 발전 단지 경제 분석을 수행하려면 일반 국내 터빈과 일반 해외 터빈을 정의해야 하는데 이는 OEM 및 개발자의 지원으로 확인하였다. 기초 기술의 경우 인천과 전라남도에서 발견된 수심 50~55m 부지에 모노파일을 배치할 것으로 예상된다. 울산과 제주도에 수심 60m 이상의 부지에 대해서는 육상에서 조립해 부지로 견인하는 일반적인 반잠수식 부유식 기초를 배치할 것으로 예상된다. 케이블과 변전소는 해당 지역에서 업계 표준 기술이 공급될 것으로 예상된다.

2026년까지 4개 부지에 걸친 배치와 두 가지 공급망 시나리오를 통한 LCOE 평가 결과 고정식 풍력 단지는 75~95 EUR/MWh, 부유식 단지는 101~116 EUR/MWh이다. 파트너십 시나리오를 국내 시나리오로 변경하면 고정식 부지에서 LCOE 차이는 22%, 부유식 부지에서 LCOE 차이는 19%로 이 차이의 주된 원인은 국내 터빈으로 전환했기 때문이다.

또한 새로운 터빈 플랫폼과 관련된 잠재적인 인수도 위험을 평가하였다. 2020년대 중반에 가용한 8MW 터빈이 없다면 국내에서 차선책으로 로터 직경 140m 인 5.56MW 국산 해상 터빈을 사용해야 한다. LCOE 접근법으로 잠재적인 재정 증가 가치의 근사치를 추정하면 차선책을 사용할 경우 LCOE 증가로 12 억 5 천만 유로가 손실될 것으로 보인다.

마지막으로 2035년까지 한국의 고정식 및 부유식 해상 풍력 프로젝트의 LCOE 전망을 살펴보았다. 고정식 풍력 프로젝트의 LCOE는 2023년 최고 80 EUR/MWh에서 2035년에는 최고 50 EUR/MWh로 40% 가까이 감소할 것으로 예상된다. 부유식 풍력 프로젝트의 LCOE는 2025년 최고 110 EUR/MWh에서 2035년에는 60 EUR/MWh로 하락할 것으로 예상된다. 이러한 감소는 상업적 규모의 성장과 지역 공급망의 빠른 발전을 가정한 것이다. 터빈이 커지고 터빈과 기초 공급 비용이 낮아지면 전체 비용은 낮아지고 설치와 기술의 효율성은 향상될 것이다.

# 5



## 고용 효과

## 5 고용 효과

한국의 해상 풍력 목표는 기존 에너지 시스템을 저탄소 재생 가능 시스템으로 전환하고 일자리를 창출하는 것이다. 이 섹션에서는 각 시나리오의 네 가지 참조 사례에 창출될 것으로 예상되는 일자리를 살펴보고 해상 풍력 단지의 일자리 창출 잠재력을 최대한 활용하기 위한 권장 사항을 제시한다.

참고지 4곳에 대한 투자로 인한 고용 효과를 계산하기 위해 COWI에서 산업, 국내 생산성, 급여 수준에 대해 지역에서 입출력한 데이터를 기반으로 한 모델을 사용한다. 이 경제 모델은 인천, 전라남도, 제주도, 울산 등 4개 참고지에서 각 시나리오의 총 고용 효과를 계산한다.

### 5.1 경제적 영향 계산

계산 결과는 대한민국 고용 노동부가 제공한 고용 유도 계수를 기반으로 한다 [91]. 고용 유도 계수(EIC)는 직간접 고용 효과를 모두 포함하며 특정 부문의 경제 활동 증가로 인해 발생하는 전일제 환산

(FTE; Full Time Equivalent) 연수를 정량화한 것이다. 총 고용 효과는 각 시나리오의 투자에 선정한 부문의 고용 유도 계수와 곱하여 계산한다.

FTE 연도는 한 사람이 1년 동안 일한 시간으로 측정한다. 따라서 FTE 연도는 일자리가 아니다. 20년 동안 정규직으로 일한 사람은 20 FTE 연수를 생성하지만 일자리는 하나이다. FTE 달성과 동시에 일자리가 창출되는 데 예를 들어 1년 FTE 달성 수치가 200이면 일자리 200개가 창출된다.

#### 5.1.1 가정

모델 계산은 참고지 4곳에서 세 가지 시나리오를 적용할 경우의 예상 CAPEX 및 OPEX를 바탕으로 이루어진다. 다음 표는 별첨 C에 따라 CAPEX 및 OPEX 추정치를 요약한 것이다. 풍력 단지 전체 주기 동안의 운영비인 OPEX는 국내 100%로 가정한다.

표 5-1 인천 참고지의 CAPEX와 OPEX (고정식 기초)

인천				
	총 CAPEX (백만 유로)	총 OPEX (백만 유로)	합계 (백만 유로)	전체 주기의 국내 공급%
파트너십 시나리오	1,714.2	776.6	2,491	68%
국내 시나리오	1,841.7	714.7	2,556	100%

표 5-2 전라남도 참고지의 CAPEX와 OPEX (고정식 기초)

전라남도				
	총 CAPEX (백만 유로)	총 OPEX (백만 유로)	합계 (백만 유로)	전체 주기의 국내 공급%
파트너십 시나리오	2,032.0	784.3	2,816	65%
국내 시나리오	2,268.7	720.4	2,989	100%

표 5-3 제주도 참고지의 CAPEX와 OPEX (부유식 기초)

제주도				
	총 CAPEX (백만 유로)	총 OPEX (백만 유로)	합계 (백만 유로)	전체 주기의 국내 공급%
파트너십 시나리오	2,432.6	763.2	3,196	82%
국내 시나리오	2,524.0	704.9	3,229	100%

표 5-4 울산 참고지의 CAPEX와 OPEX (부유식 기초)

울산				
	총 CAPEX (백만 유로)	총 OPEX (백만 유로)	합계 (백만 유로)	전체 주기의 국내 공급%
파트너십 시나리오	2,654.2	763.2	3,417	83%
국내 시나리오	2,754.4	704.9	3,459	100%

대한민국 고용노동부가 발표한 고용 노동 효과 지침 문서에서 고용 유도 계수는 34개 주요 부문으로 분류된다. [132] 해상 풍력 단지의 건설과 운영은 어느 한 부문과 완벽하게 일치하지 않는다. 따라서 건설, 해상 운송, 제조 부문의 가중 평균이 사용된다. 가중

치는 한국 공급망의 경험과 검토를 바탕으로 한 근사치이다. 모델에서는 아래 표 5-5의 가중치에 따라 각 부문이 풍력 단지 건설과 운영에 기여한다고 가정하였다.

표 5-5 고용 유도 계수의 부문 가중치

선택 부문	CAPEX 가중치	OPEX 가중치
건설	0.60	0.70
해상 수송	0.10	0.25
제조	0.30	0.05

CAPEX는 OPEX에 비해 제조 요소가 훨씬 많이 필요로 할 것으로 예상된다. 반면 OPEX는 O&M 단계에서 OWF를 오가는 운송이 상당한 비용 요인이

되므로 해상 운송 요소가 훨씬 많이 필요로 할 것으로 예상된다. 아래 표 5-6은 3개 관련 부문의 계수를 나타낸 것이다.

표 5-6 고용 유도 계수 표[132]에서 발췌한 표를 섹션 1의 환율에 따라 유로로 변환

산업 분류	EIC (명/1억 원)	EIC (명/유로)
건설	0.82	0.0000109434
해상 수송	0.24	0.0000032029
제조 및 산업 장비 수리	0.79	0.0000105430

고용 유도 계수는 급여 수준, 생산성, 전반적인 경제 발전 및 노동 시장 규제 등의 차이로 국가마다 다르다. 이 모델은 한국 내에서 기대되는 경제 활동, 즉 표 5-1~표 5-4의 국내 비중에 대한 고용 효과만 추정한다.

### 5.1.2 결과

다음의 표 4개는 참고지와 해당 시나리오의 총 고용 효과를 나타낸 것이다. CAPEX는 국내 투자 지분과 해외 투자 지분으로 나뉘며 OPEX는 전부 국내 투자로 본다.

최대 일자리 창출은 인천의 국내 시나리오에서 EUR 1,841 mil. OPEX EUR 715mil 조건에서 이루어졌다 (표 5-2 참조). 풍력 단지는 프로젝트 기간 동

안 한국에서 25,000 FTE 연수에 해당하는 일자리를 창출할 것으로 보인다. 일자리 창출은 몇 년 동안 18,000 FTE 연수 이상이 발생하는 건설 기간 중에 가장 많이 발생한다.

인천의 경우 파트너십 시나리오보다 국내 시나리오에서 FTE 연도가 53% 더 많이 생성될 것으로 보인

다. 이는 파트너십 시나리오의 국내 점유율 54%가 국내 시나리오에서는 100%로 증가했기 때문이다.

일반적으로 국내 시나리오 4개 부지 모두에서 가장 많은 일자리를 창출할 것으로 예상된다. 아래 표 5-7부터 표 5-10은 각 부지의 결과를 나타낸 것이다.

표 5-7 인천 - 시나리오를 바탕으로 한 고용 효과

인천			
	CAPEX의 FTE	OPEX의 FTE	국내 총 FTE
파트너십 시나리오	9,116	6,962	16,079
국내 시나리오	18,219	6,470	24,626

전라남도에서 국내 시나리오 29,000 FTE 연수에 이르는 일자리를 창출할 것으로 예상된다. 건설 기간 동안 22,000 FTE 연수 이상이 필요할 것으로 보인다. 고정식 풍력 단지 두 곳을 비교하면 전라남

도가 세 가지 시나리오 모두에서 국내 활동 점유율이 가장 높을 것으로 예상된다. 국내 시나리오에서 전라남도는 인천에 비해 4,000 FTE 연수 이상 생성될 것으로 예상된다. 이 차이는 17%로 유의하다.

표 5-8 전라남도 - 시나리오를 바탕으로 한 고용 효과

전라남도			
	CAPEX의 FTE	OPEX의 FTE	국내 총 FTE
파트너십 시나리오	10,315	7,031	17,346
국내 시나리오	22,443	6,458	28,900

제주도의 경우 국내 시나리오 31,000 FTE 연수에 이르는 일자리를 창출할 것으로 예상되며 이중 약 25,000 FTE 연수가 건설 중에 발생하고 CAPEX는 EUR 2524 mil. OPEX는 EUR 2524

mil.이다 (표 5-4 참조). 부유식 풍력 단지 두 곳을 비교하면 파트너십 시나리오에서 국내 시나리오로 변경되면 국내 일자리는 6,000 FTE연수, 즉 24%에 근접 할 것으로 예상된다.

표 5-9 제주도 - 시나리오를 바탕으로 한 고용 효과

제주도			
	CAPEX의 FTE	OPEX의 FTE	국내 총 FTE
파트너십 시나리오	18,419	6,842	25,261
국내 시나리오	24,968	6,319	31,287

울산의 경우 국내 시나리오는 34,000 FTE연수에 이르는 일자리와 27,000 FTE 연수 이상의 건설 기간을 창출할 것으로 예상된다. 부유식 풍력 단지 두 곳을 비교하면 울산은 국내에서 최대 일자리를 창

출할 것으로 예상된다. 국내 시나리오에서 제주도와 울산의 차이는 2,300 FTE 연수, 즉 7%로 예상된다. 이는 유의한 차이가 아니다.

표 5-10 울산 - 시나리오를 바탕으로 한 고용 효과

울산			
	CAPEX의 FTE	OPEX의 FTE	국내 총 FTE
파트너십 시나리오	20,611	6,842	27,452
국내 시나리오	27,247	6,319	33,566

국제적인 맥락에서 이러한 수치는 다른 연구의 결과와 일치한다. 지속가능 미래연구소는 그린피스를 대신해 해상 풍력 프로젝트의 직접 고용 창출, 즉 본 보고서에서는 고려한 간접 효과를 포함하지 않은 고용 창출을 추정한다 [133]. 이 추정치에서 건설과 제조는 근무 연수 (FTE연수와 동일) 23.6년을 창출하는 반면 O&M은 프로젝트 전체 주기에 걸쳐 MW 별, 연도별로 0.2 근무 연수를 창출한다. 500 MW 규모의 해상 풍력 단지에 이 수치를 적용할 경우 건설 기간의 FTE 연수는 11,800, O&M 기간의 FTE 연수는 2,500으로 총 14,300 FTE 연수에 해당한다. 그린피스 연구에 따르면 간접 고용은 보통 추가

적인 FTE연수가 50%에서 100%에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서 총 직접 및 간접 고용 효과는 21,000~28,000 FTE 연수에 해당해 본 연구 결과와 비슷하다.

2020년에 실시된 QBIS 연구에서 덴마크에서 향후 예정되어 있는 해상 풍력 단지의 직간접 고용 효과를 추정하였다 [134]. 결과에 따르면 GW 당 직간접 고용 효과는 FTE 연수 9,500, 즉 500W 당 FTE 연수 4,750으로 나타났다. 이러한 추정치는 FTE/CAPEX 개발에 대해 상당히 공격적인 가정을 바탕으로 한다. 기술 개발은 해상 풍력 단지 구축에 필요

한 인력의 감소를 의미한다고 본다. 총 고용의 국내 비율도 한국에서 예상되는 것보다 덴마크가 낮다. 끝으로 덴마크의 임금 수준은 한국보다 2~3배 높다 [135]. 따라서 한국의 고용 유도 계수가 덴마크의 고용 유도 계수보다 약 3배 높으므로 한국의 FTE가 높을 것으로 예상된다.

## 5.2 최대 12GW 규모의 대표 결과 외삽

프로젝트 차원의 경제적 영향 외에 국가 차원에서 해상 풍력 에너지 영향을 조사하는 것도 도움이 된다.

2030년까지 해상 풍력 발전 용량 규모 목표 12GW로 증가하는 것은 현재 참고지의 용량을 비례적으로 확장하여 모델링할 수 있다. 이를 통해 부지와 기초 유형의 조합을 시뮬레이션한다. 이 계산에서 현재 설치된 용량은 고려하지 않는다. 이러한 가정에 총 FTE는 그림 5-1과 같이 나타난다.

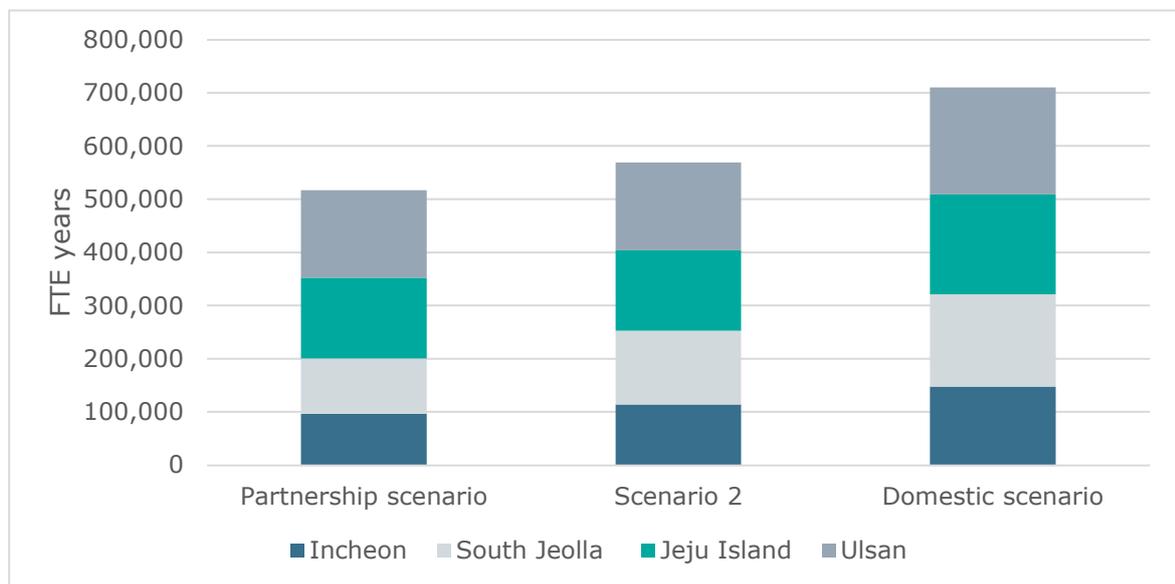


그림 5-1 참조 사례를 비례적으로 적용해 12GW 규모에서 한국의 총 FTE 연수 외삽

건설 공사에서 국내 비중이 높아질수록 한국의 전체 고용 효과도 증가한다. 참조 프로젝트의 파트너십 시나리오에서 각각 고정식 풍력 발전 단지와 부유식 풍력 발전 단지 공급의 65-68%, 82-83%가 각각 국내 공급으로 이루어졌다.

국내 시나리오에서는 공급망의 100%가 국산이다. 3장에서 논의한 바와 같이 용량이 12GW로 빠르게 증가하면 단기 및 중기 국내 공급망이 부족할 수 있

다. 신속한 램프업 상황에서는 한국 해상 풍력 발전 산업이 필요한 자격을 갖춘 노동력을 유지하고 제공하기 어려울 것이다.

기술 및 노동에 대한 수요를 충족하는 국내 인프라의 능력은 용량 규모가 증가 속도에 따라 다르다. 너무 빨리 구현되면 파트너십 시나리오와 같이 국산 부품 공급이 수요를 따라갈 수 없기 때문에 국산화 비율이 낮을 수 있다. 국내 시나리오의 구현 속도가

느려 국내 시장이 전체 수요에 대응할 수 있는 상황이다.

국내 시나리오를 실현할 수 있으면 파트너십 시나리오에 비해 국내 FTE 연수가 38% 증가한다.

### 5.3 가치 확보와 장기 보유를 위한 경제적 권장 사항

전 세계적으로 해상 풍력은 더 낮은 비용으로 에너지를 공급하도록 압력을 받고 있다. 또한 풍력 발전 단지가 설치되는 국가들은 풍력 발전 단지의 제조 및 설치와 더불어 낮은 에너지 비용으로 이익을 얻는 것을 목표로 하고 있다. 이 과정에서 LCR(국산 부품 사용 요건)은 목표 달성을 위한 일반적인 정치 수단이 되었다.

경제적 관점에서 LCR은 본질적으로 자유 무역을 제한하는 것이기 때문에 논란의 여지가 있다. LCR로 인해 풍력 발전 단지는 세계 시장 가격보다 높은 가격으로 부품을 구매해야 하고 이러한 비용이 결국 전기 소비자에게 전가되어 에너지 가격이 높아진다는 비판이 가장 일반적이다. 또 다른 비판은 LCR이 특정 부문의 호황과 불황을 유발할 수 있다는 것이다. LCR 시행이 유리한 부문은 LCR이 사라지면 글로벌 경쟁력이 사라진다는 뜻이다.

글로벌 공급망을 자유롭게 선택할 수 있다면 풍력 단지 개발업체들은 당연히 LCOE가 가장 낮은 공급망을 사용할 것이다. 따라서 성숙한 해상 풍력 산업을 보유한 국가에서는 해상 풍력 공급망을 반드시 100% 국산화하지 않아도 된다. 특히 철강처럼 공산품 가격과 밀접한 저기술 부품은 생산지를 쉽게 이전해 저비용을 달성할 수 있다. 이는 최근 프랑스의 에너지 대기업 EDF가 Scottish Nearth na Gaoithe 풍력 단지(450 MW)의 재킷 생산을 대부분 스코틀랜드 대신 인도네시아에서 생산하기로 결

정한 사례에서 볼 수 있다 [136].

본 보고서는 한국이 국산 부품을 적어도 65% 제공할 수 있다고 추정한다. 전 세계적으로 비교하면 이미 최상위 수준이다. 유럽 시장을 주도하는 국가 중 하나인 영국은 10.2GW를 설치한 후 50%에 가까운 국산화 비율을 달성했으며 현재 목표를 약 60%로 한다 [137]. 국내 시나리오에서 제안된 국산 부품 수준을 달성하려면 신중한 계획과 인내가 필요하다.

배치 기술 선택은 국산 부품 비중에 영향을 미칠 수 있다. 반잠수식 부유식 기초는 철강산업이 강한 한국에 유리하며 형식 증명이 가능하므로 주된 수출 후보이다. 부유식 기초 부지에 중점을 두어 한국의 해상 풍력 단지를 개발하면 현지 일자리 창출과 수출 증가에 도움이 될 수 있다.

현지 일자리 창출에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 사항은 풍력 단지의 크기이다. 풍력 단지는 가장 적합한 단일 규모가 존재하지 않는다. 최적의 규모는 한국의 해상 산업이 개발되면서 발전할 것이다. 해상 풍력 경험이 적은 초기 단계에서는 소규모 풍력 단지를 추진해야 소규모 기업들이 시장에 진출해 경험을 쌓을 수 있다. 한국의 해상 풍력 산업이 탄력을 받게 되면 규모가 큰 단지들이 풍력 산업이 성장하고 견고해질 수 있는 안정성과 용량을 제공하게 된다.

최적의 파이프라인을 설계하기 위한 권장 사항으로는 빠르고 즉각적인 성장보다 안정적인 파이프라인을 목표로 하는 것이 좋다. 파이프라인이 안정적으로 유지되면 해당 부문은 계속 작동하고 성장은 더디더라도 경제에 장기적인 영향을 미칠 것이다. 빠른 성장은 종종 일시적 효과에만 머물러 장기간 실업 상태가 계속된다. 안정적인 파이프라인은 지역 공급망을 유지할 가능성도 높여 국산 부품 공급 비율이 높아질 것이다.

## 5.4 요약

위에 제시된 모델을 기반으로 참고지 4곳의 총 고용 효과는 파트너십 시나리오-3의 국산 부품 공급 수준에 따라 달라진다.

- 인천: 16,079 FTE - 24,626 FTE
- 전라남도: 17,346 FTE - 28,900 FTE
- 제주도: 25,261 FTE - 31,287 FTE
- 울산: 27,452 FTE - 33,566 FTE

이 고용 수치는 QBIS 연구와 같이 향후 경제적, 기술적 개발이 결과에 큰 영향을 미칠 수 있지만 국제 연구의 결과와 비교할 수 있다. 향후 제조 과정 자동화, 임금 수준 차이, 국내 일자리 점유율을 보면 한국에 비해 덴마크에서는 고용 효과가 매우 낮다.

고용 효과의 지역 비중을 높이려면 투자 시점을 살펴볼 필요가 있다. 한국 공급업체가 수요를 충족하지 못하고 노동력을 제공할 수 없다면 외국인 노동력을 고용하고 더 많은 기술을 도입해야 한다. 이는 단기간에 다량의 해상 풍력 단지를 실현하기 위한 야심찬 계획을 고려하고 있는 경우에 특히 중요하다.

강력한 공급망 구축은 대규모 파이프라인 구축에 관한 장기적인 정치적 계획에 따라 크게 달라진다. 해상 풍력의 제조와 설치의 자본집약적이며 자금 회수 기간이 길다. 해상 풍력에 대한 목표가 불안정하고 자주 변경될 것이라고 간주되면 현지 공급망에 대한 투자는 더 위험한 것으로 인식될 것이다.

해상 설치와 O&M을 지원할 수 있는 현지 항구도 현지 일자리를 창출할 수 있다. 유럽의 경험에 따르면 조립 항구에서 풍력 단지까지의 거리가 중요하기는 하지만 설치 기간에는 크 중요하지 않다. 이 거리는 O&M 기간 동안 더 중요하다. 두 경우 모두 가까울수록 좋으며 위치가 뛰어나고 잘 갖춰진 항구를 제공하면 설치와 O&M 활동의 국내 유치에 도움이 될 것이다.

기술 선택도 일자리 창출에 도움이 된다. 부유식 풍력 단지는 철강산업이 강한 한국에 유리하다. 풍력 단지 현지화 및 설계 계획을 수립할 때 현지의 제조 강점과 약점을 고려하면 현지 일자리 창출과 수출 증가에 도움이 될 수 있다.



Photo: Vestas

전망

## 6 전망

한국은 해상 풍력 산업이라는 흥미롭고 야심찬 여정을 앞두고 있다. 본 연구는 현황에 대한 비판적인 분석을 바탕으로 2030년까지 12GW 보급 목표를 지원하고 다음의 분야에서 파악된 도전 과제에 대한 솔루션을 제시하고자 한다.

- **정책 환경:** 단일화된 허가 시스템 결여, 개방형 프로젝트 개발, 사업 사례의 수익 측면을 압박하는 REC 가격 감소로 개발자들의 리스크 프로필이 높다.
- **공급망:** 한국은 뛰어난 출발선에 있지만 현재까지 국내 공급망으로 완성된 풍력 단지를 보면 설치 기간과 효율성을 크게 개선해야 한다. 대부분의 BOP는 한국에서 제공할 수 있지만 일부 부문은 선박과 같은 신규 장비와 추가적인 역량에 대한 자본을 투자하고 일부 부문은 XL 모노파일 제조 등을 개발해야 한다. 터빈 기술은 공급망의 핵심이며 글로벌 리더들과 국내 제조업체들의 격차는 아직 크다. 또한 이해관계자 참여에 따르면 국내 터빈을 사용할 경우의 위험이 엄청나게 높다고 인식되어 있다. 끝으로 규모의 경제를 달성하고 글로벌 공급망을 유치하려면 현재 풍력단지의 평균 규모인 180 MW를 크게 확대해야 한다.
- **LCOE:** 부유식 기초의 가격이 높기 때문에 부유식 부지의 LCOE(98-120 유로/MW)가 고정식 부지의 LCOE(75-95 유로/MW)보다 높다. 국내 공급망에만 의존하면 고정식 프로젝트의 경우 LCOE가 22% 증가하고 부유식 프로젝트의 경우 LCOE가 19% 증가한다. 이 차이는 500 MW 규모의 인천 (고정식) 참고지의 프로젝트 비용이 8억 7천 유로(1조 160억원) 증가하는 것과 같다. 이러한 가격 차이는 국내 터빈 사용으로 발생한다. 또한 국내 공급업체가 추진하는 새로운 터빈 플랫폼 개발과 관련된 인수도 위험도 높다. 해외 공급업체는 일반 터빈과 매우 비슷한 터빈을 공급할 수 있지만 국내 공급업체는 등급 차이가 큰 새로운 플랫폼을 개발해야 하는 위험을 안고 있다. 개발자들이 국내 터빈을 사용하고 차선책인 5.5 MW 터빈을 사용해야 할 경우 500 MW규모 프로젝트의 전 주기 동안 12억 5천 유로의 손실이 발생할 것이다. 반면 공급망 문제를 해결하고 구축 속도가 빨라지면 LCOE 수준이 2020년대 중반부터 2035년까지 40% 하락할 것으로 예상된다.

- **고용 효과:** 본 연구 결과 해상 풍력은 많은 우수한 일자리를 창출할 수 있는 것으로 나타났다. FTE는 투자 금액과 연계되어 있으므로 참조 사례에서는 국내 시나리오가 일자리를 가장 많이 (24,626 -33,566 FTE) 창출할 것으로 예상된다. 그러나 완전한 국내 시나리오를 추진할 경우 현재 공급망 제약을 감안하면 2030년까지 한정된 수의 프로젝트만 완성할 가능성이 높다. 동일한 참조 사례에서 파트너십 시나리오는 16,079-27,452 FTE, 즉 국내 시나리오에서 창출되는 일자리의 약 65%-80%가 창출된다. 가능한 한 우수한 일자리를 창출하고 유지하려면 해상 풍력 작업의 파이프라인을 안정적으로 유지하는 것이 중요하다. 순환 주기(호황과 불황)는 경제적인 손실이 크기 때문에 피해야 한다. 국내 및 해외 이해관계자 모두 대규모 인프라 프로젝트의 투자 및 구축 위험을 명확하고 현실적인 정책 로드맵으로 뒷받침하면 해외 풍력 산업에 투자할 것이다. 공급업체들이 공급망에 대한 투자를 입증하고 추가적인 참여를 끌어들이려면 초기 단계에 대규모 투자에 이어 안정적으로 예상 가능한 자금 조달이 이루어져야 한다.

## 문제 해결

한국 정부는 앞에서 설명한 문제를 해결하기 위한 계획을 이미 수립하였다.

- 명확하고 조율된 허가 프로세스 구축
- 개발자 위험 프로필 감소
- 규모의 경제를 확보할 수 있도록 풍력 단지 크기 확대

- 2030년 이후에도 안정적이고 가시적인 파이프라인 구축

이와 같은 문제를 해결하기 위한 개혁과 이니셔티브는 신속하고 공식적으로 이행되어야 한다. 본 연구에서는 위에서 제시한 사항 외에도 기존 계획과 이니셔티브에서 적절하게 다루지 않은 우려 분야를 파악하였다. 한국이 완전한 국내 시나리오를 추진할 경우 다음과 같은 문제에 직면할 것이다.

- 우수한 성과와 신뢰도를 갖춘 최소 8 MW급 국내 터빈의 적시 상용화
- 평균 국내 생산 역량 (MW/년) 10배 확대
- 평균 풍력 단지 설치율 20배 (MW/월) 증가
- 설치선 병목 현상
- 제조, 설치, 서비스 분야의 인적 자원 고용 및 자격 확보
- 프로젝트 개발, XL 모노파일, 터빈 설치, 모노파일 설치 등 국내 공급망의 취약 부분에 막대한 램프업 발생

---

**이러한 도전 과제에는 명확한 메시지가 드러난다. 한국이 계속 현재 상태를 유지하면 2030년 해상 풍력 12 MW 보급 목표를 달성하지 못할 가능성이 높다. 또한 파트너십 시나리오에 비해 향후 해상 풍력 단지 구축도 지연되고 비용은 19-22% 증가한다.**

---

## 파트너십의 장점

이러한 문제를 극복할 수 있는 자연스럽고 효과적인 방법은 해외-국내 파트너십 체결이며 이를 통해 다음을 달성할 수 있다.

- 글로벌 리더들이 입증된 풍력 터빈 기술 제공
- 공급업체에 지속 가능한 속도로 국내 공급을 통해 자본 투자 및 인적 자원 자격 확보
- 교육 역량 구축 및 인적 자원 자격 확보 지원
- 경험이 풍부한 직원과 선박을 활용해 풍력 단지 설치 비용 증가
- 최신 풍력 단지의 교육 및 지식 전수 기회 제공

좋은 파트너십은 기업이 함께 발전할 수 있는 강력한 엔진이다. 국내 파트너는 현지 지식으로 순조로운 시장 진출을 지원하고 해외 파트너는 지식과 기술을 전수한다. 그 결과 한국 기업들은 동급 최강으로 발전할 수 있다. 한국은 해상 풍력 단지를 더욱 효율적이고 낮은 비용으로 신속하게 구축함으로써 이득을 얻을 수 있다.

파트너십은 시간이 흐르면서 달라질 수 있다. 파트너십은 역동적이며 국내 역량과 용량이 발전하면 부문별, 시기별로 조절할 수 있다. 일례로 프로젝트 개발은 핵심 파트너십이다. 초기에는 지식 전수와 협력

구축에 중점을 두어 해외 측의 지원이 훨씬 클 것이다. 시간이 흐르면서 한국 파트너가 직접 실습을 하게 되면 전문 지식과 인력의 균형이 국내 쪽으로 기울 것이다.

풍력 터빈도 또다른 핵심 파트너십이다. 프로젝트 개발과 달리 터빈은 반드시 해결해야 하는 제조분야이다. 한국은 터빈 부품을 상당량 제공할 수 있는 뛰어난 위치이지만 복잡한 제조 과정을 추진하려면 시간이 걸린다. 파트너십은 한국의 역량과 용량을 최대한 활용하고 시간이 지나면서 전략적으로 확대할 수 있다.

본 연구는 분석을 수행하기 위해 시나리오 두 개를 설정하였지만 실제로는 양자 택일이 아니고 훨씬 폭넓을 것이다. 어떤 파트너십의 목표는 국내 터빈 제조업체 지원 및 경험을 통한 경쟁력 향상일 수 있다. 어떤 프로젝트는 국내 제약으로 대부분 해외 공급을 통해 구축해야 할 수도 있다. 전체적으로 보면 한국에서 성숙된 해상 풍력 공급망의 참여를 확대함으로써 2030년 12GW 목표를 가장 잘 달성할 수 있다.

---

**파트너십 공급망은 속도를 높이면서 비용을 낮추는 동시에 한국 파트너의 경쟁력을 세계적 수준으로 신속하게 향상할 수 있다.**

---



Photo: Siemens Gamesa

약어

## 7 약어

약어/ 두문자어	용어
BOP	Balance of plant
CAPEX	Capital expenditure
COD	Commercial operation date
CTV	Crew transfer vessel
DEA	Danish Energy Agency
EBL	Electric Business License
EIC	Employment induction coefficient
GE	General Electric Renewable Energy
GENCOs	State-owned power generation companies
FTE	Full time equivalent
KEPCO	Korean Electric Power Corporation
LCOE	Levelized cost of energy
LCR	Local content requirement
MOE	Ministry of Environment
MOF	Ministry of Oceans and Fisheries
MOTIE	Ministry of Trade, Industry and Energy
OEM	Original equipment manufacturer
OPEX	Operational expenditure
O&M	Operation and maintenance
PPA	Power purchase agreement
RE3020	Renewable Energy 3020 Implementation Plan
REC	Renewable energy certificate(s)

RPS	Renewable Energy Portfolio Standard
RVO	Netherlands Enterprise Agency
SGRE	Siemens Gamesa Renewable Energy
SMP	System Marginal Price
SOV	Service operation vessel
SPV	Special purpose vehicle



Photo: Vestas

## 참고 자료

## 8 참고 자료

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Renewable Energy 3020 Plan (Korean)," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, "3rd Energy Masterplan (Korean)," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2019.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, "9th Basic Electric Power Supply and Demand Plan (2020-2034; Korean)," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020.
- [4] Ministry of Trade, Industry and Energy, "The first step in the Green New Deal toward a carbon-neutral society (Korean)," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2020.
- [5] Ministry of Oceans and Fisheries, "Announcement of offshore wind power generation plan to be with residents and coexist with fisheries (korean)," Ministry of Oceans and Fisheries, 2020.
- [6] Electricity Regulatory Commission, "Ledger of electricity generation business license exceeding 3MW (Korean)," March 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/33mxLm8>. [Accessed 6 May 2021].
- [7] "Status of domestic wind power generator installation (Korean)," Korea Wind Energy Industry Association, 2020.
- [8] L. Ramírez, D. Fraile and G. Brindley, "Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2020," 2021.
- [9] 4C Offshore, "4C Offshore Wind Farms Database," 4C OFFSHORE, 2021.
- [10] Jeju Special Self-Governing Province, *Ordinance on wind power generation business license and district designation in Jeju Special Self-Governing Province (Korean)*, 2020.
- [11] Netherlands Enterprise Agency (RVO), "Offshore wind energy in the Netherlands," Netherlands Enterprise Agency (RVO), Utrecht, 2015.
- [12] New and Renewable Energy Center, Korea Energy Agency, "Renewable Energy Portfolio Standard (RPS)," [Online]. Available: [https://www.knrec.or.kr/business/rps\\_guide.aspx](https://www.knrec.or.kr/business/rps_guide.aspx). [Accessed 8 February 2021].
- [13] Korea Power Exchange (KPX), "SMP (System Marginal Price) (Korean)," [Online]. Available: <https://www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=225>. [Accessed 26 2 2021].
- [14] Korea Power Exchange (KPX), "REC trading volume and trading price (Korean)," [Online]. Available: <https://www.kpx.or.kr/www/selectBbsNttList.do?bbsNo=8&key=100&searchCtgy=REC+%EA%B1%B0%EB%9E%98%EC%8B%9C%EC%9E%A5+%EC%8B%A4%EC%A0%81>. [Accessed 26 2 2021].
- [15] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Renewable energy can be purchased in Korea from 2021!," 5 January 2021. [Online]. Available:

- [https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs\\_cd\\_n=81&bbs\\_seq\\_n=163695](https://www.motie.go.kr/motie/ne/presse/press2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=163695). [Accessed 8 February 2021].
- [16] WindEurope, "World's first offshore wind farm without subsidies to be built in the Netherlands," 20 March 2018. [Online]. Available: <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/worlds-first-offshore-wind-farm-without-subsidies-to-be-built-in-the-netherlands/>. [Accessed 23 April 2021].
- [17] RECHARGE, "Vattenfall wins 760MW of Dutch zero-subsidy offshore wind," 10 July 2019. [Online]. Available: <https://www.rechargenews.com/wind/vattenfall-wins-760mw-of-dutch-zero-subsidy-offshore-wind/2-1-636547>. [Accessed 23 April 2021].
- [18] WindEurope, "Combined offshore wind/hydrogen project wins Dutch Hollandse Kust Noord tender," 30 July 2020. [Online]. Available: <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/combined-offshore-wind-hydrogen-project-wins-dutch-hollandse-kust-noord-tender/>. [Accessed 23 April 2021].
- [19] Catapult & BVG Associates, "Wind farm costs," [Online]. Available: <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs>. [Accessed April 2021].
- [20] Ørsted, "Ørsted aims to develop offshore wind projects in South Korea," 24 November 2020. [Online]. Available: <https://orsted.com/en/media/newsroom/news/2020/11/727710179118245>. [Accessed 10 May 2021].
- [21] Northland Power, "Northland Power Expands Offshore Wind Pipeline in Asia With Acquisition of Development Company in South Korea," 24 February 2020. [Online]. Available: <https://www.northlandpower.com/en/news/northland-power-expands-offshore-wind-pipeline-in-asia-with-acquisition-of-development-company-in-so.aspx>. [Accessed 10 May 2021].
- [22] Green Investment Group, "Green Investment Group and Total partner to develop 2.3 GW floating offshore wind portfolio in Korea," 01 September 2020. [Online]. Available: <https://www.greeninvestmentgroup.com/en/news/2020/green-investment-group-and-total-partner-to-develop-floating-offshore-wind-portfolio-in-korea.html>. [Accessed 10 May 2021].
- [23] wpd, "wpd Korea Ltd.," [Online]. Available: <https://www.wpd-group.kr/en/wpd-korea-ltd/>. [Accessed 14 May 2021].
- [24] offshoreWIND.biz, "South Korean Floating Wind Attracts Big Names," 28 January 2019. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2019/01/28/south-korean-floating-wind-attracts-big-names/>. [Accessed 10 May 2021].
- [25] AkerSolutions, "Aker Solutions and EDP Renewables to Develop Floating Wind Farm in Ulsan, South Korea," 18 October 2019. [Online]. Available: <https://www.akersolutions.com/news/news-archive/2019/aker-solutions-and-edp-renewables-to-develop-floating-wind-farm-in-ulsan-south-korea/>. [Accessed 10 May 2021].
- [26] EDP Renewables, "EDPR and Aker Solutions to Develop Floating Wind Farm in Ulsan, South Korea," 18 November 2019. [Online]. Available: <https://www.edpr.com/en/news/2019/10/18/edpr-and-aker-solutions-develop-floating-wind-farm-ulsan-south-korea>. [Accessed 10 May 2021].
- [27] Equinor, "Floating offshore wind project in South Korea," 11 July 2019. [Online]. Available: <https://www.equinor.com/en/news/2019-07-11-floating-offshore-wind-project-in-south-korea.html>. [Accessed 10 May 2021].
- [28] Pondera Consult, "Pondera/Hanmi Global enter Korean Offshore Wind project," 29 August 2019. [Online]. Available:

- <https://ponderaconsult.com/en/ponderacontent/pondera-hanmi-global-enter-korean-offshore-wind-project/>. [Accessed 10 May 2021].
- [29] offshoreWIND.biz, "K2 Management Enters South Korean Offshore Wind Deal," 28 June 2019. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2019/06/28/k2-management-enters-south-korean-offshore-wind-deal/>. [Accessed 10 May 2021].
- [30] Deltares, "Deltares," [Online]. Available: <https://www.deltares.nl/en/>. [Accessed 10 May 2021].
- [31] KCI the engineers, "Renewables, Offshore wind solutions," [Online]. Available: <https://aboutengineering.com/en/kci/markets/renewables>. [Accessed 10 May 2021].
- [32] Fugro, "Offshore Wind," [Online]. Available: <https://www.fugro.com/your-industry/renewables/offshore-wind>. [Accessed 10 May 2021].
- [33] Iv-Groep, "Contractors," [Online]. Available: <https://iv-groep.nl/en/markten/offshore-energie/contractors>. [Accessed 10 May 2021].
- [34] Future Wind, "Groundbreaking Ceremony at Future Haliade-X 12 Mw Prototype Site in Rotterdam," 1 April 2019. [Online]. Available: <https://www.futurewind.nl/2019/04/01/ground-breaking-ceremony-at-future-haliade-x-12-mw-prototype-site-in-rotterdam/>. [Accessed 9 February 2021].
- [35] Siemens Gamesa, "SG 14-222 DD Offshore wind turbine," [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>. [Accessed 9 February 2021].
- [36] A. Durakovic, "Vestas Launches 15 MW Offshore Wind Turbine," offshorewind.biz, 10 Feb 2021. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2021/02/10/vestas-launches-15-mw-offshore-wind-turbine/>.
- [37] GWA, "Global Wind Atlas 3.0, Technical University of Denmark in partnership with the World Bank Group, utilizing data provided by Vortex. Additional information available at: <https://globalwindatlas.info/>," 2021. [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/>. [Accessed March 2021].
- [38] KK Wind Solutions, "Products & Services," [Online]. Available: <https://www.kkwindolutions.com/products-services>. [Accessed 11 May 2021].
- [39] Mita-Teknik, "Complete Solution for Wind," [Online]. Available: <https://www.mita-teknik.com/solutions/wind/>. [Accessed 11 May 2021].
- [40] LM Wind Power, "LM Wind Power at a glance," [Online]. Available: <https://www.lmwindpower.com/en/about/business-highlights>. [Accessed 11 May 2021].
- [41] Welcon, "Shaping Tomorrow," [Online]. Available: <https://www.welcon.dk/references/>. [Accessed 11 May 2021].
- [42] Goldwind, "Goldwind Products," [Online]. Available: <http://www.goldwindglobal.com/product/>. [Accessed 9 February 2021].
- [43] Shanghai Electric Wind Power Equipment, "Shanghai Electric Wind Power Equipment," [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/manufacturers/92-sewind-shanghai-el.> [Accessed 9 February 2021].
- [44] Mingyang Smart Energy, "Products," [Online]. Available: <http://www.myse.com.cn/en/cpyjs/index.aspx>. [Accessed 9 February 2021].
- [45] Envision, "Combine the Spirit of Art and Science, Meet Our New Smart Wind Turbine," [Online]. Available: <https://www.envision-group.com/en/windturbines.html>. [Accessed 9 February 2021].

- [46] Doosan Heavy Industries, "Wind Power: New Paradigm, WinDS3000, 3300, WinDS5500, WinDS8000+," [Online]. Available: [http://www.doosanheavy.com/download/pdf/products/energy/DHI\\_Wind\\_Power\\_Brochure\\_Eng.pdf](http://www.doosanheavy.com/download/pdf/products/energy/DHI_Wind_Power_Brochure_Eng.pdf). [Accessed 23 April 2021].
- [47] K Renewables, "Distressed Doosan Secures A Turbine Deal In Jeju," 30 April 2020. [Online]. Available: <https://k renewables.com/wind/distressed-doosan-secures-a-turbine-deal-in-jeju/>. [Accessed 23 April 2021].
- [48] offshoreWIND.biz, "Doosan to Develop Korea's Largest Offshore Wind Turbine," 29 June 2018. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2018/06/29/doosan-to-develop-koreas-largest-offshore-wind-turbine/>. [Accessed 23 April 2021].
- [49] Today Energy, "Unison's 10MW to lead the floating wind market," 27 October 2020. [Online]. Available: <https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=230153>. [Accessed 23 April 2021].
- [50] Hyosung Heavy Industries, "Wind Turbine," [Online]. Available: [http://www.hyosungheavyindustries.com/en/business/wind\\_power.do](http://www.hyosungheavyindustries.com/en/business/wind_power.do). [Accessed 21 April 2021].
- [51] CS wind, "RECORDS: 9,619 utility towers delivered globally," [Online]. Available: <http://www.cswind.com/eng/?page=company|historesult|result>. [Accessed 23 April 2021].
- [52] Haisung TPC, "Haisung TPC," [Online]. Available: <http://english.haisung.co.kr/>. [Accessed 13 February 2021].
- [53] Taewoong, "Taewoong," [Online]. Available: <http://www.taewoong.com/eng/>. [Accessed 13 February 2021].
- [54] PSM, "PSM," [Online]. Available: <http://www.psminc.co.kr/en/>. [Accessed 13 February 2021].
- [55] Hyunjin Materials, "Hyunjin Materials," [Online]. Available: <http://hjmco.co.kr/eng/index.html>. [Accessed 13 February 2021].
- [56] Dongkun S&C, "Dongkun S&C," [Online]. Available: <http://www.dongkuksnc.co.kr/en/>. [Accessed 13 February 2021].
- [57] Human Composite, "Human Composite," [Online]. Available: <http://www.humancomposites.com/ENG/>. [Accessed 13 February 2021].
- [58] J.-M. Franssen, "Are Simple Calculation Models always on the Safe Side?," *Festschrift Peter Schaumann*, pp. 1-6, 2014.
- [59] C. Westra, Offshore Wind-Clean Energy from the Sea.
- [60] Sif Offshore Foundations, "Wind foundations," [Online]. Available: <https://sif-group.com/en/wind/foundations>. [Accessed 10 February 2021].
- [61] Lamprell, "EPC(I)," [Online]. Available: <https://www.lamprell.com/our-business/epc/epci.aspx>. [Accessed 10 February 2021].
- [62] Windar Renovables, "Offshore foundations," [Online]. Available: <https://www.windar-renovables.com/product-offshore-foundations/en>. [Accessed 10 February 2021].
- [63] Bladt Industries, "Offshore Foundations," [Online]. Available: <https://www.bladt.dk/offshore-foundations.aspx>. [Accessed 10 February 2021].
- [64] EEW Group, "Offshore wind," [Online]. Available: <https://eew-group.com/industries/offshore-wind/>. [Accessed 10 February 2021].
- [65] Eiffage Smulders, "Passionate about Steel," [Online]. Available: <https://www.smulders.com/en/>. [Accessed 10 May 2021].

- [66] GustoMSC, "GustoMSC signs MoU," 28 September 2016. [Online]. Available: <https://www.gustomsc.com/news/gustomsc-signs-mou>. [Accessed 11 May 2021].
- [67] JDR Cable Systems, "JDR Cable Systems," [Online]. Available: <https://www.jdr cables.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [68] Prysmian Group, "Prysmian Group," [Online]. Available: <https://www.prysmiangroup.com/en>. [Accessed 10 February 2021].
- [69] NKT, "NKT," [Online]. Available: <https://www.nkt.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [70] Nexans, [Online]. Available: <https://www.nexans.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [71] LS Cable & System, "LS Cable & System," [Online]. Available: <https://www.lscns.com/en/main.asp>. [Accessed 10 February 2021].
- [72] L. Ramírez, D. Fraile and G. Brindley, "Offshore wind in Europe: Key trends and statistics 2019," 2020.
- [73] ABB, "Substation," [Online]. Available: <https://new.abb.com/innovation/substations>. [Accessed 10 February 2021].
- [74] Siemens Energy, "High-voltage substations," [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/substations.html>. [Accessed 10 February 2021].
- [75] Alstom, "Alstom," [Online]. Available: <https://www.alstom.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [76] CG Power, "CG Power," [Online]. Available: <http://www.cgglobal.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [77] Heerema Fabrication Group, "About," [Online]. Available: <https://hfg.heerema.com/about>. [Accessed 10 May 2021].
- [78] HSM Offshore, "Offshore Renewables," [Online]. Available: <https://www.hsmoffshore.com/en/projects/offshore-renewables/>. [Accessed 10 May 2021].
- [79] Semco Maritime, "Wind farm substations," [Online]. Available: <https://www.semcomaritime.com/renewables-wind-farm-substations>. [Accessed 11 May 2021].
- [80] Hyundai Steel Industries, "Offshore/Industrial Facility Business (Korean)," [Online]. Available: [http://www.hesi.co.kr/Enterprise/Marine4.asp?BN=3002&CD=020303&SQC=ZB\\_154902016120182359](http://www.hesi.co.kr/Enterprise/Marine4.asp?BN=3002&CD=020303&SQC=ZB_154902016120182359). [Accessed 24 April 2021].
- [81] Samkang M&T, "Experiences," [Online]. Available: [https://www.samkang.com/kr2\\_en/01\\_the\\_ocean/07\\_the\\_ocean.php](https://www.samkang.com/kr2_en/01_the_ocean/07_the_ocean.php). [Accessed 24 March 2021].
- [82] offshoreWIND.biz, "Samsung Heavy Industries, DNV GL to Develop New Floating Wind Platforms," 26 October 2020. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2020/10/26/samsung-heavy-industries-dnv-gl-to-develop-new-floating-wind-platforms/>. [Accessed 10 April 2021].
- [83] Today Energy, "Southwest Sea offshore wind power, 'first shovel' in 6 years (Korean)," 15 May 2017. [Online]. Available: <https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=123479>. [Accessed 15 April 2021].
- [84] Taihan, "Taihan," [Online]. Available: <https://www.taihan.com/en/>. [Accessed 10 February 2021].

- [85] J. Seo, "2016 Information Analysis Report: Submarine Cable Installation Industry Trends," Korea Institute of Science and Technology Information, 2016.
- [86] Electric Power Journal, "Generation Start at Southwest Sea Offshore Wind Demonstration Complex-Korea Ocean Engineering & Consultants (Korean)," 27 June 2019. [Online]. Available: <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=22367>. [Accessed 23 April 2021].
- [87] Global Wind Energy Council, "GWEC Market Intelligence releases Global Offshore Wind Turbine Installation Vessel Database," 30 September 2020. [Online]. Available: <https://gwec.net/gwec-market-intelligence-releases-global-offshore-wind-turbine-installation-database/>. [Accessed 9 February 2021].
- [88] D. Ahn, S.-c. Shin, S.-y. Kim, H. Kharoufi and H.-c. Kim, "Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 45-54, 2017.
- [89] Fred. Olsen, "Fred. Olsen Windcarrier," [Online]. Available: <https://windcarrier.com/>. [Accessed 9 February 2021].
- [90] Van Oord, "Offshore wind installation vessel," [Online]. Available: <https://www.vanoord.com/en/equipment/offshore-wind-installation-vessel/>. [Accessed 9 February 2021].
- [91] Jan De Nul, "Offshore Jack Up Installation Vessels," [Online]. Available: <https://www.jandenul.com/fleet/offshore-jack-installation-vessels>. [Accessed 9 February 2021].
- [92] DEME, "Offshore," [Online]. Available: <https://www.deme-group.com/activities/offshore>. [Accessed 9 February 2021].
- [93] Seaway, "Our Fleet," [Online]. Available: <https://www.seaway7.com/our-fleet/>. [Accessed 9 February 2021].
- [94] Kund E. Hansen, "Pacific Orca & Pacific Osprey," [Online]. Available: <https://www.knudehansen.com/reference/pacific-orca-pacific-osprey/>. [Accessed 9 February 2021].
- [95] Boskalis, "Heavy Lift Vessels," [Online]. Available: <https://boskalis.com/about-us/fleet-and-equipment/offshore-vessels/heavy-lift-vessels.html>. [Accessed 9 February 2021].
- [96] Van Oord, "Hopper barge and pushbuster," [Online]. Available: <https://www.vanoord.com/en/equipment/hopper-barge-and-pushbuster/>. [Accessed 9 February 2021].
- [97] R. Lacal-Arántegui, Y. José M and D.-N. A. José, "Offshore wind installation: Analysing the evidence behind improvements in installation time," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 133-145, 2018.
- [98] Maersk Supply Service, "Industries," [Online]. Available: <https://www.maersksupplyservice.com/industries/#wind>. [Accessed 10 May 2021].
- [99] Heerema Marine Contractors, "Offshore Wind," [Online]. Available: <https://hmc.heerema.com/activities/offshore-wind>. [Accessed 10 May 2021].
- [100] SPT Offshore, "About us," [Online]. Available: <https://www.sptoffshore.com/about-us/>. [Accessed 10 May 2021].
- [101] Royal IHC, "Offshore Wind," [Online]. Available: <https://www.royalihc.com/en/products/offshore-wind>. [Accessed 11 May 2021].

- [102] offshoreWIND.biz, "Approval Galore for South Korean Wind Turbine Installation Vessel," 8 April 2021. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2021/04/08/approval-galore-for-south-korean-wind-turbine-installation-vessel/>. [Accessed 10 April 2021].
- [103] offshoreWIND.biz, "Seajacks Scylla," [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/vessels/seajacks-scylla/>. [Accessed 23 April 2021].
- [104] offshoreWIND.biz, "Pacific Osprey," [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/vessels/pacific-osprey/>. [Accessed 23 April 2021].
- [105] offshoreWIND.biz, "Pacific Orca," [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/vessels/pacific-orca/>. [Accessed 23 April 2021].
- [106] Ørsted, "Our offshore wind farms: where we operate," [Online]. Available: <https://orsted.com/en/our-business/offshore-wind/our-offshore-wind-farms>. [Accessed 14 May 2021].
- [107] A. Durakovic, "Ørsted Orders Changhua Jackets in South Korea," offshoreWIND.biz, 11 June 2019. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2019/06/11/orsted-orders-changhua-jackets-in-south-korea/>.
- [108] Taipei Times, "NTU, CIP sign wind power agreement," 05 July 2018. [Online]. Available: <http://www.taipeitimes.com/News/biz/archives/2018/07/05/2003696087>.
- [109] Ørsted, "Post on Ørsted LinkedIn page," 12 May 2021. [Online]. Available: [https://www.linkedin.com/posts/orsted\\_meet-taiwans-pioneering-force-activity-6797814798735216640-NVjt](https://www.linkedin.com/posts/orsted_meet-taiwans-pioneering-force-activity-6797814798735216640-NVjt).
- [110] GE, "GE Renewable Energy and Toshiba Announce Strategic Partnership Agreement on Offshore Wind in Japan," 11 May 2021. [Online]. Available: GE will provide the Haliade-X technology, provide parts and components for nacelle assembly, and support Toshiba in jointly developing a local supply chain as well as completing assembly of the nacelles with best-in-class quality standards. Toshiba will a.
- [111] A. Durakovic, "South Korea Unveils EUR 27 Billion Floating Wind Project," offshoreWIND.biz, 7 May 2021. [Online]. Available: <https://www.offshorewind.biz/2021/05/07/south-korea-unveils-eur-27-billion-floating-wind-project/>.
- [112] Tamra Offshore Wind, "Project overview (Korean)," [Online]. Available: <http://tamra-owp.co.kr/2019/sub0201.php>. [Accessed 10 February 2021].
- [113] Korea Offshore Wind Power, "Introduction to demonstration site," [Online]. Available: <http://www.kowp.co.kr/business/advertise01.asp>. [Accessed 10 February 2021].
- [114] Doosan Heavy Industries, "Doosan Heavy Industries & Construction completes construction of Wind Turbine Shop #2 in Changwon," 26 March 2021. [Online]. Available: <http://www.doosanheavy.com/en/media/news-view/?seq=21000236&pageNo=1&searchword=>. [Accessed 23 April 2021].
- [115] 연 기자, "文 대통령 방문도 했는데... 서남해 해상풍력 단지, 지난해 발전기 날개 잇따라 부러져," biz.chosun.com, 7 10 2020. [Online]. Available: [https://biz.chosun.com/site/data/html\\_dir/2020/10/07/2020100701946.html](https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2020/10/07/2020100701946.html).
- [116] KCTVeNews JEJU, "201111 KCTV Jeju English News - Another Wind Turbine Catches Fire," Nov 12 2020. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=0C3xWHf\\_rcc](https://www.youtube.com/watch?v=0C3xWHf_rcc).
- [117] Kim and Chang, "Plan for Offshore Wind Power Generation in Collaboration with Local Residents and the Fishing Industry (주민과 함께하고, 수산업과 상생하는 해상풍력 발전 방안)," 2020.

- [118] J. Sarja and V. Halonen, "Wind turbine selection criteria: A customer perspective," *Journal of Energy and Power Engineering*, 2013.
- [119] Vestas, "V236-15.0 MW," 2021. [Online]. Available: [https://www.vestas.com/en/products/offshore%20platforms/v236\\_15\\_mw](https://www.vestas.com/en/products/offshore%20platforms/v236_15_mw). [Accessed 04 2021].
- [120] Siemens Gamesa, "SG 14-222 DD," 2021. [Online]. Available: <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>. [Accessed 04 2021].
- [121] GE, "This Offshore Wind Turbine Is Full Of Energy: Meet The Haliade-X 14 MW," GE, 2021. [Online]. Available: <https://www.ge.com/news/reports/this-offshore-wind-turbine-is-full-of-energy-meet-the-haliade-x-14-mw>. [Accessed 04 2021].
- [122] Doosan, "Shortcut menu," 2020. [Online]. Available: <http://www.doosanheavy.com/en/products/portfolio/renewable-energy/#tab02>. [Accessed 04 2021].
- [123] Electric Power Journal, "Unison to develop 10MW offshore wind turbine," 2020. [Online]. Available: <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=26177>. [Accessed 04 2021].
- [124] M. Esteban, J.-S. Lopez-Gutierrez, V. Negro and L. Sanz, "Riprap Scour Protection for Monopiles in Offshore Wind Farms," 2019.
- [125] M. Optis, O. Rybchuk, N. Bodini, M. Rossol and W. Musial, "https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77642.pdf," National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO, 2020.
- [126] W. Musial, P. Beiter and J. Nunemaker, "Cost of Floating Offshore Wind Energy Using New England Aqua Ventus Concrete Semisubmersible Technology (Technical Report)," NREL, 2020.
- [127] Marine Regions, "MarineRegions.org," [Online]. Available: <https://www.marineregions.org/>. [Accessed March 2021].
- [128] GEBCO, "GEBCO\_2020 grid," GEBCO, 2020.
- [129] NREL, "An Assessment of the Economic Potential of Offshore Wind in the United States from 2015 to 2030," 2017.
- [130] National Geospatial Intelligence Agency, "World Port Index," 2021. [Online]. Available: <https://msi.nga.mil/Publications/WPI>. [Accessed march 2021].
- [131] Korea Electric Power Corporation, "The Monthly Report on Major Electric Power Statistics (Korean)," Korea Electric Power Corporation, 2010-2019.
- [132] Ministry of Employment and Labor, "Guidelines for Evaluating Job Creation by Government Investment Project, 2020 (2020년 재정사업 고용영향평가 가이드라인)," 2020. [Online]. Available: <http://www.moel.go.kr/english/main.jsp>. [Accessed November 2020].
- [133] Institute for Sustainable Futures, "Calculating Global Energy Sector Jobs," Greenpeace, 2015.
- [134] QBIS, "Socio-economic Impact Study of Offshore Wind," QBIS, Copenhagen, Denmark, 2020.
- [135] Ministry of Oceans and Fisheries, Amendment on the 3rd National Port Master Plan (2016-2020), Ministry Public Notice No. 2016-122, Korean Ministry of Oceans and Fisheries, 2016. 9. 29.

- [136] renews.biz, "Union 'blasts' move to make Neart jackets in Asia," 28 November 2019. [Online]. Available: <https://renews.biz/56710/union-blasts-move-to-make-neart-jackets-in-asia/>. [Accessed February 2021].
- [137] N. Ford, "UK faces tough pricing choices to fill offshore wind supply gaps," *Reuters Events*, 9 December 2020.
- [138] Korea Electric Power Corporation, "Major electricity rate system > What is the differential rate plan for each use? (Korean)," [Online]. Available: <http://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/H/C/CYHCHP00201.jsp>. [Accessed 8 February 2021].
- [139] Statista, "Weighted average cost of installed offshore wind energy worldwide from 2010 to 2019," June 2020. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/506756/weighted-average-installed-cost-for-offshore-wind-power-worldwide/>. [Accessed 8 February 2021].
- [140] ETS & K, "Offshore wind farms in the North Sea: projects construction cost and EPC contract - <https://engineeringtsk.com/en/articles/wind-energy/offshore-wind-farms-in-the-north-sea-projects-construction-cost-and-epc-contract/>," [Online]. Available: <https://engineeringtsk.com/en/articles/wind-energy/offshore-wind-farms-in-the-north-sea-projects-construction-cost-and-epc-contract/>. [Accessed 8 February 2021].
- [141] Logistics Institute Data Observatory, "Hornsea Project 1," [Online]. Available: [https://lido.hull.ac.uk/Industry/WindFarmSite/Hornsea\\_Project\\_1](https://lido.hull.ac.uk/Industry/WindFarmSite/Hornsea_Project_1). [Accessed 8 February 2021].
- [142] Power Technology, "Global Tech I Offshore Wind Farm," [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/global-tech-i-offshore-wind-farm/>. [Accessed 8 February 2021].
- [143] MHI Vestas Offshore Wind, "Offshore Wind Turbines," [Online]. Available: <https://www.mhivestasoffshore.com/>. [Accessed 9 February 2021].
- [144] Doosan Heavy Industries & Construction, "Green Energy," [Online]. Available: <http://www.doosanheavy.com/en/products/energy/green/>. [Accessed 9 February 2021].
- [145] Hyundai Steel Industry, "Hyundai Steel," [Online]. Available: <https://www.hyundai-steel.com/en/index.hds>. [Accessed 10 February 2021].
- [146] Haechun, "Haechun," [Online]. Available: <http://www.haechuncorp.com/>. [Accessed 10 February 2021].
- [147] Korea Ocean Engineering & Consultants Co., Ltd., "Korea Ocean Engineering & Consultants," [Online]. Available: <http://www.koceco.co.kr/>. [Accessed 10 February 2021].
- [148] Ministry of Trade, Industry and Energy, "8th Basic Electric Power Supply and Demand Plan (2017-2031; Korean)," Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017.
- [149] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Rational electricity bill system reform such as raw material price-linked rate system (Korean)," 2020.
- [150] Ministry of Trade, Industry and Energy, *Management and operation guidelines for the mandatory supply of new and renewable energy and the mandatory mixing of fuels (Korean)*, 2020.
- [151] V. N. Dinh and E. McKeogh, "Offshore wind energy: technology opportunities and challenges," in *Vietnam Symposium on Advances in Offshore Engineering*, 2019.
- [152] Accenture, "Changing the Scale of Offshore Wind: Examining Mega-Projects in the United Kingdom," Accenture, 2017.

- [153] The E&M, "THE E&M (Korean)," [Online]. Available: <https://www.theenm.com/>. [Accessed 13 February 2021].
- [154] Hyosung Heavy Industries, "Wind Turbine," [Online]. Available: [http://www.hyosungheavyindustries.com/en/business/wind\\_power.do](http://www.hyosungheavyindustries.com/en/business/wind_power.do). [Accessed 13 February 2021].
- [155] Unison, "Products," [Online]. Available: <http://www.unison.co.kr/product>. [Accessed 13 February 2021].
- [156] News1, "Unison "In development of a 10MW offshore wind power model" (Korean)," 27 October 2020. [Online]. Available: <https://www.news1.kr/articles/?4099931>. [Accessed 13 February 2021].
- [157] Hanjin Industries, "Hanjin Industries (Korean)," [Online]. Available: <http://hanjinind.co.kr/>. [Accessed 13 February 2021].
- [158] Electric Power Statistics Information System, "Electricity Market > Unit Cost > by Fuel," [Online]. Available: <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaUpsBftChart.do?menuId=040701&locale=eng>. [Accessed 15 February 2021].
- [159] Netherlands Enterprise Agency (RVO), "Wind farms on the North Sea," 13 January 2021. [Online]. Available: <https://www.rvo.nl/onderwerpen/duurzaam-ondernehmen/duurzame-energie-opwekken/windenergie-op-zee/windparken-op-de-noordzee>. [Accessed 26 February 2021].
- [160] Power Technology, "Borssele III and IV Offshore Wind Farm," [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/borssele-iii-iv-offshore-wind-farm/#:~:text=The%20Dutch%20Minister%20of%20Economic,financial%20closure%20in%20June%202018..> [Accessed 26 February 2021].
- [161] R. Damiani, K. Dykes and G. Scott, "A comparison study of offshore wind support structures with monopiles and jackets for US waters," 2016.
- [162] M. Kausche, F. Adam, F. Dahlhaus and J. Großmann, "Floating offshore wind- Economic and ecological challenges of a TLP solution," 2018.
- [163] Unison, [Online]. Available: <http://www.unison.co.kr/main>. [Accessed 24 March 2021].
- [164] NOAA National Geophysical Data Center, "ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model.," NOAA National Centers for Environmental Information, 2009.
- [165] Asian Development Bank, "Republic of Korea: Input-Output Economic Indicators," ADB Data Library, 2017. [Online]. Available: <https://data.adb.org/dataset/republic-korea-input-output-economic-indicators>. [Accessed November 2020].
- [166] BVG Associates, "UK offshore wind supply chain: capabilities and opportunities," Department for Business, Innovation and Skills, 2014.
- [167] K. Freeman, C. Frost, G. Hundleby, A. Roberts, B. Valpy, H. Holttinen, L. Ramírez and I. Pineda, "Our energy, our future: How offshore wind will help Europe go carbon-neutral," Wind Europe, 2019.
- [168] Doosan, "Doosan," [Online]. Available: <https://www.doosan.com/en>. [Accessed 8 April 2021].
- [169] offshoreWIND.biz, "Vessels," [Online]. Available: [https://www.offshorewind.biz/vessels/?fwp\\_vessel\\_builder\\_dropdown=samsung-heavy-industries](https://www.offshorewind.biz/vessels/?fwp_vessel_builder_dropdown=samsung-heavy-industries). [Accessed 10 April 2021].

9



Photo: Vestas

별첨

## 9 별첨

## 별첨 A 해상 풍력 단지에 발급된 전력 사업 허가증 목록

표 9-1 해상 풍력 단지에 발급된 전력 사업 허가증(EBL) 목록 (2021년 3월 기준) [6]

면허 번호	프로젝트	개발자	용량(kW)	취득일
02016-76	신안 증도	Win Wind Power	33,000	30-Oct-2019
2015-165	새만금 해상	Saemangeum Offshore Wind Power	98,800	13-May-2019
2016-073	영광 두리	Jewon Energy	99,100	31-May-2016
2017-007	통영 소초	Young Dong Development	9,900	28-Dec-2020
2017-050	염산	Daemyeong GEC	38,400	07-Feb-2018
2017-052	압해 1	Abhae Wind Power	40,000	26-Feb-2020
2017-053	압해 2	Abhae Wind Power	20,000	26-Feb-2020
2017-065	전남 신안 자운도	SK E&S	96,000	31-Jul-2018
2017-083	부산 해기 청사포	G Wind Sky	40,000	02-Dec-2019
2017-084	전남 신안1	POSCO Energy and KOEN	300,000	31-Aug-2018
2018-018	풍력 터빈 시험지	Jeonnam Techno Park	12,300	20-Nov-2018
2018-075	남동해 연안	SK E&c	136,000	21-Sep-2018
2018-081	영광 야월	Daehan Green Energy	49,800	21-Sep-2018
2018-082	칠산	CWNRE	151,200	21-Sep-2018
2018-100	전남 완도	Wando Offshore Wind Power	148,500	19-Jul-2019
2018-101	완도 금일	KOEN and KOSEP	200,000	21-Nov-2018
2019-009	영광 낙월	Myungwoon Development	354,480	30-Jan-2019
2019-018	통영 욱지	Yokji Wind Power	352,000	26-May-2020
2019-033	안마도	Anma Offshore Wind Power	224,000	27-Jul-2020
2019-036	신안 우이	Hanhwa E&C, SK D&D and KOEN	396,800	02-Jul-2019
2019-037	신안 어울	Shinan Eoul Wind Power	99,000	02-Mar-2021
2019-076	안산 풍도	Seohae Green Power	200,000	19-Jul-2019

면허 번호	프로젝트	개발자	용량(kW)	취득일
2019-090	영광 약수	Jeonnam Development Corporation	4,300	30-Oct-2019
2020-038	Cheinsaewoi	Cheinsaewoi Offshore Wind Power	99,000	02-Mar-2020
2020-039	영광 아월2	YoungGwang Yawol 2 Offshore Wind Power	10,000	27-Apr-2020
2020-046	전남 해상 풍력	SK E&S	96,000	27-Apr-2020
2020-049	해남 매월	Haenam Maewol Offshore Wind Power	96,000	26-May-2020
2020-055	부산 해상 풍력 발전	Busan Offshore Wind Power	96,000	27-Jul-2020
2020-056	안마도	Anma Offshore Wind Power	304,000	27-Jul-2020
2020-065	전남 여수 삼산	Samhae Development	288,000	22-Sep-2020
2020-069	인천 옹진	C&I Leisure	233,500	22-Sep-2020
2020-089	전남 여수 삼산	Jeonnam Yeosu Samsan Offshore Wind Power	320,000	30-Nov-2020
2020-090	전북 고창	Dongchon Wind Power	69,300	30-Nov-2020
2020-092	전남 영광	Jeonnam Techno Park	8,000	18-Dec-2020
2020-130	충남 당진	Wind Way	210,000	30-Nov-2020
2021-001	한국 해상 풍력 발전	Korea Offshore Wind Power	400,000	02-Feb-2021
2021-002	신안 대광 해상 풍력 발전	Sinan Daegwang Offshore Wind Power	400,000	02-Feb-2021
2021-003	금일 해상 풍력 발전	KOEN	400,000	02-Feb-2021
2021-006	전남 신안 자은도	SK E&S	399,000	02-Feb-2021
2021-009	태안 풍력 발전	Taeon Wind Power	504,000	02-Mar-2021
2021-014	전남 신안 자은도	SK E&S	399,000	02-Feb-2021
2021-015	공항 해상 풍력 발전	Gunghang Offshore Wind Power	240,000	02-Mar-2021

## 별첨 B 서남해 해상 풍력 시범지의 공급망

서남해 해상 풍력 시범지의 공급망

풍력 터빈/ 하부 구조	하부 구조의 구조 상세 설계	Doosan Heavy Industries & Construction (Seil Eng.)
	풍력 터빈 생산	Doosan Heavy Industries & Construction (나셀, 허브: Doosan Heavy Industries & Construction) (블레이드: Human Composite, 타워: Win&P/Dongkuk S&C)
	하부 구조 제조/설치 풍력 터빈 설치	Hyundai E&C (하부 구조 생산/상부 설치: Hyundai Steel Industry) (하부 구조 설치: Gwanak Industry) [하부 구조 R&D: KEPRI (Advact), POSCO (Hyundai Steel)]
해상 변전소	기초/상부 구조물	KEPCO (제조/설치: Hyundai Steel Industry)
	변전소 장비 공급/설치	KEPCO (변압기: Hyundai Heavy Industries) (23kV GIS: Intec, 154kV GIS: LSIS)
해저 케이블	외부 전력망	KEPCO (제조: Sumitomo, 설치: Seacheon)
	내부 전력망 (R&D 3 TBs)	KERI (제조: Taihan, 설치: KOCECO)
	내부 전력망 (17 TBs)	KERI (제조: Taihan, 설치: KOCECO)

<b>프로젝트 관리</b>	건설 프로젝트 관리 (감독 기관)	KECC/Shinhan A&E
	기술 경영 자문 (Owners Engineering)	Yooshin
	프로젝트 인증	Korean Register of Shipping
<b>허가</b>	인허가 지원	Sekwang Eng.
	해양 환경 및 기초 생태계 조사	Sekwang Eng.
<b>어업 보상</b>	보상 대행 및 위탁	Korea Appraisal Board
	어업 손해 조사	Chonnam National University Fisheries Science Research Institute
	어업권 평가	Daeil Appraisal Board, Onnuri Appraisal Corporation
<b>프로젝트 자금 조달</b>	재정 자문	Woori Bank
	경영주 자문	Jipyong, KISTEP, K2M
	사업 타당성 분석	Sejong, DNV-GL, Marsh Korea
<b>건설 보험</b>	보험사	Hyundai Marine & Fire Insurance, etc.
	재보험사	Swiss Re, etc.
	MWS	LOC

## 별첨 C 고정식 및 부유식 참조 부지의 백분율 비용 구분

참조 사례에 대하여 전체 주기의 백분율 비용을 분류하였다.

항목	항목 구분	%, 고정식 풍력 단지	%, 부유식 풍력 단지
프로젝트 개발	시장 성숙도에 따라 풍력 단지 규모로 개발 비용 조절	1-2%	1%
터빈 공급 및 설치	공급 설치	20-23%	17-18%
기초 공급	고정식 모노파일 및 트랜지션 피스 공급 재킷 및 파일 공급	10-16%	
	부유식 부유체 (floater) 공급 육상 조립 계류 공급		31-33%
기초 설치	고정식 모노파일 설치 트랜지션 피스 설치	4%	
	부유식 계류 설치 부유체 설치 (예인선으로 견인)		1%
전력망 공급 및 설치	전력망 공급 전력망 설치	3%	3-4%
송전 및 그리드	송전 (육상 및 해상 변전소, 외부 케이블) 그리드 비용 SCADA	16-17%	9-13%
운영 및 유지관리	운영 및 유지 관리비 사업주비, 물류 비용, 운영비	25-28%	20-21%
기타	출장 및 인건비 운영 준비 건설 관리 보험	12%	11-12%

## 별첨 D 참조 사례 및 결과 요약

주: 전체 주기의 국내 공급 비율은 부지별 매개변수를 사용하여 계산하므로 현장과 시나리오에 따라 다르다.

### 인천

	파트너십 시나리오	국내 시나리오
전 주기 에너지 생산(GWh P50)	52,678	41,726
풍력 단지 이용율	40	38
전 주기 비용 (real mil. )	2,490,8	2,556,4
CAPEX - 해외	792,6	0,0
CAPEX - 국내	921,6	1,841,7
OPEX - 국내	776,6	714,7
전체 주기의 국내 공급 비율	68%	100%
LCOE ( /MWh)	75	91

### 전라남도

	파트너십 시나리오	국내 시나리오
전 주기 에너지 생산(GWh P50)	60,705	48,109
풍력 단지 이용율	46	44
전 주기 비용 (real mil. )	2,816,3	2,989,0
CAPEX - 해외	989,2	0,0
CAPEX - 국내	1,042,7	2,268,7
OPEX - 국내	784,3	720,4
전체 주기의 국내 공급 비율	65%	100%
LCOE ( /MWh)	75	95

## 제주도

	파트너십 시나리오	국내 시나리오
전 주기 에너지 생산(GWh P50)	52,516	41,595
풍력 단지 이용율	40	38
전 주기 비용 (real mil. )	3,195,9	3,228,8
CAPEX - 해외	570,7	0,0
CAPEX - 국내	1,861,9	2,524,0
OPEX - 국내	763,2	714,9
전체 주기의 국내 공급 비율	82%	100%
LCOE ( /MWh)	101	120

## 울산

	파트너십 시나리오	국내 시나리오
전 주기 에너지 생산(GWh P50)	58,471	46,335
풍력 단지 이용율	44	43
전 주기 비용 (real mil. )	3,417,4	3,459,2
CAPEX - 해외	570,7	0,0
CAPEX - 국내	2,083,5	2,754,4
OPEX - 국내	763,2	704,9
전체 주기의 국내 공급 비율	83%	100%
LCOE ( /MWh)	98	116

# GET IN TOUCH:

**Rikke Nørgaard**  
Managing Director

[rikke.noergaard@aegirinsights.com](mailto:rikke.noergaard@aegirinsights.com)  
[aegirinsights.com](http://aegirinsights.com)



**Lisa Keaton**  
Senior  
Wind Energy Advisor

[LSKT@COWI.com](mailto:LSKT@COWI.com)  
[cowi.com](http://cowi.com)



**Eric Arends**  
Managing Partner  
/ Director

[E.Arends@ponderaconsult.com](mailto:E.Arends@ponderaconsult.com)  
[ponderaconsult.com](http://ponderaconsult.com)

