SFO°C
Solutions for Our Climate

GESI
Green Energy Strategy Institute

° Report



해상풍력 보급 목표 달성에 필요한 해양공간 면적 연구

SFO°C
Solutions for Our Climate

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.

GESI
Green Energy Strategy Institute

녹색에너지전략연구소(GESI)는 한국의 에너지시스템을 발전시키고 재생에너지를 확대하기 위한
전문성을 제공하기 위해 2009년에 설립된 비영리 민간 싱크탱크입니다.

발간월	2026년 10월
발행처	기후솔루션(SFOC) · 녹색에너지전략연구소(GESI)
저자	김보람	녹색에너지전략연구소 부연구위원 오현영	녹색에너지전략연구소 부연구위원 윤성권	녹색에너지전략연구소 부연구위원
도움주신 분들	이수현	기후솔루션 김은지	기후솔루션 양예빈	기후솔루션
디자인	Nature Rhythm

해상풍력 보급 목표 달성에 필요한 해양공간 면적 연구

요약

한국 정부는 2035년까지 해상풍력 25 GW 보급 목표를 제시하고, 「해상풍력 중장기 입찰 이행안」을 통해 2026~2035년 총 55 GW의 입찰물량과 발전지구 경쟁입찰 도입 계획을 확정하였다. 해상풍력특별법 시행으로 정부 주도의 계획입지 체계가 본격화됨에 따라, 향후 해상풍력 보급 확대에 필요한 해양공간의 규모와 확보 가능성을 사전에 정량적으로 검토하는 중요성이 커지고 있다. 그러나 국내에서는 GIS 기반 적정 입지 및 배제영역 분석에 비해, 목표 설비용량을 필요 면적으로 환산하는 핵심 지표인 설비용량 밀도(MW/km²)의 경험적 근거에 대한 검토가 상대적으로 부족하다. 이에 본 연구는 국내외 해상풍력 단지 데이터베이스를 구축하여 설비용량 밀도의 분포와 영향요인을 분석하고, 이를 바탕으로 2035년과 2050년 보급목표에 따른 총 해양공간 수요와, 향후 계획입지를 통해 새로 확보해야 할 발전지구 지정면적 및 확보 가능성을 구분하여 분석하였다.

해외 55개 단지와 국내 34개 단지를 분석한 결과, 설비용량 밀도는 단일한 기술값이 아니라 단지 규모, 기초형식, 터빈 배치와 면적 산정 기준, 해양공간 규제가 복합적으로 작용하는 변수로 확인되었다. 특히 단지 규모가 커질수록 밀도가 낮아지는 경향이 나타나 대규모 발전지구 중심의 계획입지에 소규모 단지의 높은 밀도를 그대로 적용하기 어렵다. 이에 본 연구는 사업면적 기준 기본밀도를 보수(저밀도·고여유)–기준–공간효율화(고밀도·저여유)의 세 가지 시나리오(고정식 해상풍력 단지 4.5/6.5/7.5 MW/km², 부유식 해상풍력 단지 4.5/5.5 MW/km²)로 설정하고, 계획입지 여유계수와 부유식 계류계수를 반영한 발전지구 지정면적 기준 유효밀도(고정식 3.8/5.9/7.1 MW/km², 부유식 3.4/4.8 MW/km²)로 환산하였다.

2035년은 정부 보급목표인 25 GW를 적용하고, 2050년은 정부 입찰계획과 사업 리드타임을 바탕으로 로드맵 완전 이행 경로 59.4 GW와 탄소중립 경로 98 GW를 설정하였다. 분석 결과, 각 보급목표 시점까지 준공되는 물량(기존 단지, 기선정 사업, 경쟁입찰 및 발전지구 물량)을 유효밀도 기준으로 환산한 누적 해양공간 수요는 2035년 약 3,700~6,660 km²(기준 시나리오 약 4,340 km²), 2050년 로드맵 완전 이행 경로에서 약 9,180~16,000 km²(기준 약 10,530 km²), 탄소중립 경로에서 약 15,400~26,520 km²(기준 약 17,530 km²)로 전망된다.

이와 별도로, 2035년까지 공고가 예정된 발전지구 경쟁입찰 물량 24 GW(본 연구 가정 기준 고정식 18 GW, 부유식 6 GW)를 수용하기 위해서는 약 3,800~6,500 km²(기준 약 4,300 km²)의 신규 발전지구 지정이 필요하다. 해당 물량은 사업 리드타임을 고려할 때 2040년대 중반까지 순차적으로 준공될 것으로 예상된다. 이를 현행 계통 조건에서 확인되는 예비지구 가능해역과 형식별로 비교하면 고정식 소요면적은 고정식 가능해역의 약 29~54%, 부유식 소요면적은 심해 가능해역의 약 16~23%에 해당하여 면적 기준으로는 수용 가능한 범위로 나타났다. 다만 가능해역의 분절된 분포와 군사시설에 따른 추가 배제 가능성, 계통 여건 등을 고려하면 실제 활용 가능한 공간은 이보다 제한적일 수 있다. 또한 최초 발전지구 경쟁입찰이 2029년 하반기로 예정된 만큼 최초 발전지구 지정은 해당 입찰 이전에 완료될 필요가 있으며, 2031년부터는 기준 시나리오상 연평균 약 700 km²의 신규 지정이 입찰에 선행되어야 한다.

장기 발전지구 확보 조건을 살펴보면, 2050년 98 GW 탄소중립 경로에서는 고정식 해상풍력 개발 가능해역의 부족이 주요 공간적 제약으로 나타난다. 정부가 2035년 이후의 개발방식별 계획을 제시하지 않은 점을 고려하여 추가 보급 물량을 모두 발전지구를 통해 수용할 경우, 발전지구의 누적 물량은 약 62.6 GW(본 연구 가정 기준 고정식 45.0 GW, 부유식 17.6 GW)에 이른다. 부유식은 심해 가능해역에서 상대적으로 수용 여력이 큰 반면, 고정식의 소요 면적은 현재 확인되는 고정식 가능해역의 72~135%에 달하고, 해상변전소로 계통을 확충하는 경우에도 63~118%로, 보수적 밀도에서는 가용 면적을 초과할 수 있다. 따라서 장기적으로는 군사훈련구역 등 조정 가능한 공간 제약을 완화하여 고정식 가능해역을 확대하는 동시에, 부유식 비중 확대와 이를 뒷받침하는 부유식 상용화 및 해상계통 확충을 병행할 필요가 있다.

본 연구는 해상풍력 목표의 공간적 실현 가능성이 설비용량 밀도뿐 아니라 실제로 발전지구로 지정할 수 있는 해역의 규모와 적기 확보 여부에 의해 결정됨을 시사한다. 이에 입찰 일정과 연계한 중장기 발전지구 지정계획의 수립, 절대 배제구역과 협의·조정 가능한 공간 제약의 구분 및 조기 협의, 부유식 보급 확대와 해상계통 확충을 연계한 장기 공간전략의 마련을 제안한다.



목차

1. 배경 1
   1) 해상풍력 설비용량 밀도 정의 및 산정방법 2
   2) 계획입지에서 설비용량 밀도는 어떻게 활용되는가 3

2. 해외 해상풍력 설비용량 밀도 사례 분석 5
   1) 해외 해상풍력 설비용량 밀도 사례 5
   2) 설비용량 밀도에 영향을 미치는 주요 요인 8
   3) 소결: 해외 사례의 시사점 11

3. 국내 해상풍력 목표 달성을 위한 해양공간 수요 전망 13
   1) 2035·2050 해상풍력 보급 목표 용량 설정 13
   2) 국내 해상풍력 단지 자료 검토 18
   3) 국내 정책과 해상풍력 면적 활용 21
   4) 국내 해상풍력 설비용량 밀도 시나리오 설정 24
   5) 보급목표별 해양공간 수요 30

4. 신규 발전지구 지정 소요 및 확보 가능성 32
   1) 발전지구 물량 및 소요면적 32
   2) 예비지구 가능해역과 비교 33

5. 결론 37
   1) 주요 분석 결과 37
   2) 목표 이행을 위한 정책 제언 38

부록I. 주요 수식 및 산정 예시 40

부록II. 국내외 데이터베이스(DB) 46

참고문헌 53

표 목차

[표 1] 해상풍력단지 면적의 정의 및 적용 기준 2
[표 2] 해외 해상풍력 설비용량 밀도 통계 5
[표 3] 기초형식별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55) 6
[표 4] 단지 면적 구간별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55) 7
[표 5] 설비용량 구간별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55) 7
[표 6] Hernando et al. (2023)의 설비용량 밀도 영향요인 10
[표 7] 주요국의 MSP 구역 외 해상풍력 개발 허용 여부 10
[표 8] 정부 공표 해상풍력 보급 계획 (누적 설치 용량) 13
[표 9] 10년간 해상풍력 중장기 입찰 물량 (단위: GW) 14
[표 10] 2035 및 2050 해상풍력 보급용량 시나리오 14
[표 11] 2026~2030년 입찰 세부 물량 전망 (단위: GW) 16
[표 12] 고정식·부유식 해상풍력 보급용량 설정 17
[표 13] 국내 해상풍력 단지 분류 18
[표 14] 국내 해상풍력 설비용량 밀도 통계 18
[표 15] 기초형식별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34) 19
[표 16] 단지 면적 구간별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34) 19
[표 17] 설비용량 구간별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34) 19
[표 18] 국내 정책·규제가 해상풍력 공간 활용에 미치는 영향 23
[표 19] 시나리오 설계 원칙 25
[표 20] 시나리오 설정의 통계적 근거 26
[표 21] 사업면적 기준 기본밀도(D_{base}) 시나리오 27
[표 22] 계획입지 여유계수(F_{zone})의 산정 근거 28
[표 23] 부유식 계류계수($F_{mooring}$)의 산정 근거 28
[표 24] 발전지구 총면적 기준 유효밀도($D_{effective}$) 29
[표 25] 고정식·부유식 해상풍력 보급용량 가정 30
[표 26] 보급목표별 총 해양공간 수요 31
[표 27] 발전지구 물량별 해양공간 수요 33
[표 28] 시나리오별 예비지구 가능해역 면적 (황태건 외, 2026) 33
[표 29] 제주 한림 해상풍력단지 터빈 평면좌표 42
[표 30] 제주 한림 해상풍력단지의 면적 및 설비용량 밀도 비교 43

[표 31] 국내외 DB 정보수집 항목 46
[표 32] 해외 해상풍력단지 설비용량 밀도 조사 (n=59) 47
[표 33] 국내 해상풍력단지 설비용량 밀도 조사 (n=30) 50
[표 34] 국내 발전사업허가 해상풍력 단지 규모 추세 52

그림 목차

[그림 1] 해외 해상풍력단지 면적과 설비용량 밀도의 관계 7
[그림 2] 상업운전 개시연도별 해외 해상풍력 설비용량 밀도 8
[그림 3] 해상풍력 누적 보급 전망(2025~2050) 15
[그림 4] 국내 해상풍력단지 면적과 설비용량 밀도의 관계 20
[그림 5] 기초형식별 발전지구 소요면적과 예비지구 가능해역 비교 35
[그림 6] 제주 한림 해상풍력단지 주요 정보 41
[그림 7] 제주 한림 해상풍력단지의 터빈 배치와 들로네 삼각분할 42
[그림 8] 해상풍력 발전사업허가 설비용량 추이 52

1. 배경

한국의 해상풍력 정책은 이제 목표 확대의 차원을 넘어, 이를 어디에 얼마나 설치할 수 있는지의 문제로 옮겨가고 있다. 「탄소중립기본법」과 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 통해 2050년 탄소중립 목표가 법제화되면서 해상풍력 보급 확대의 필요성은 분명해졌지만, 정작 목표 설비용량을 달성하기 위해 필요한 해양공간의 규모와 확보 가능성은 여전히 충분히 검토되지 않고 있다.

2026년 3월에 시행된 해상풍력특별법은 정부 주도의 계획입지 체계로 전환하기 위한 제도적 기반을 마련하였으나, 발전지구 지정 규모 및 시기에 대한 중장기 로드맵은 여전히 불확실하다. 정책의 실효성과 목표 달성 가능성을 판단하기 위해서는, 목표 설비용량과 이를 수용하는 데 필요한 해양공간 간의 정합성을 사전에 정량적으로 검토할 수 있는 기준이 요구된다.

이러한 검토는 국내 보급 잠재량과 실제 설치 가능 면적에 대한 과학적 산정을 전제로 한다. 정부 차원에서도 GIS 기반 공간 분석 등을 통해 풍력 잠재량 산정 근거가 제시되어 왔다. 다만 적정 입지와 배제 영역 산정에 비해, 잠재량을 좌우하는 핵심 가정 중 하나인 풍력발전 설비의 설치 밀도는 상대적으로 근거가 충분히 제시되지 않은 측면이 있다(김건훈 외, 2023; 황태건 외, 2026).

해상풍력 설비용량 밀도(Offshore Wind Capacity Density, MW/km²)는 목표 설비용량과 필요한 해양공간 간의 관계를 설명하는 핵심 지표이다. 유럽의 해양공간계획(MSP, Maritime Spatial Planning) 관련 연구(Borrmann et al., 2018)와 미국 국립재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)[1]의 연구(Hernando et al., 2023, 2024)에서도 국가 단위의 해상풍력 보급목표와 해양공간 확보 간 정합성을 검토하는 데 설비용량 밀도가 활용되고 있다. 국내에서는 「신·재생에너지 백서」와 같이 5 MW/km² 수준의 단일 밀도를 적용하는 경우가 있으나(산업통상자원부·한국에너지공단, 2020), 실제 설비용량 밀도는 단지 형태와 규모, 터빈 이격거리, 기초형식, 해양공간 이용 규제 등 다양한 요인의 영향을 받으므로 보다 세분화된 검토가 필요하다.

이에 본 연구에서는 국내 및 해외 주요국 해상풍력단지 사례를 분석하여 국내에 적용 가능한 설비용량 밀도를 검토하고, 이를 바탕으로 **2035년과 2050년 보급목표에 따른 총 해양공간 수요를 산정하였다. 이어 향후 계획입지를 통해 새로 확보해야 할 발전지구 지정면적을 별도로 산정하고, 예비지구 가능해역과 비교하여 공간적 확보 가능성을 검토하였다. 이러한 분석은 보급목표와 해양공간 수요 간의 관계를 정량화하고, 계획입지 발전지구의 지정 규모와 확보 조건을 판단하는 근거로 활용될 수 있다.**

1 미국 국립재생에너지연구소(NREL)는 2025년 12월 National Laboratory of the Rockies(NLR, 미국 로키국립연구소)로 개칭되었다.

1) 해상풍력 설비용량 밀도 정의 및 산정방법

풍력발전단지의 설비용량 밀도(capacity density)는 단지의 정격 설비용량을 부지 면적으로 나눈 값으로 정의되며, 제곱킬로미터당 메가와트(MW/km²)로 표시된다.

$$p_{A_{WF}} = \frac{P_{rated,WF}}{A_{WF}}$$

$p_{A_{WF}}$: 풍력발전단지 설비용량 밀도 [MW/km^2]
$P_{rated,WF}$: 풍력발전단지 정격 설비용량 [MW]
A_{WF} : 풍력발전단지 부지 면적 [km^2]

설비용량 밀도 산정에서 분모인 단지 면적의 정의는 결과값을 크게 좌우한다. 동일한 단지라도 터빈 배열이 실제로 차지하는 면적, 공유수면 점용·사용 허가 면적 또는 사업계획상 부지 면적 가운데 어떤 값을 적용하는지에 따라 밀도가 상이하게 산정될 수 있다. 따라서 단지 간 밀도를 비교하거나 해양공간 수요를 추정할 때에는 면적의 정의와 산정 기준을 일관되게 적용해야 한다. 본 연구에서는 사업 추진 단계와 자료 가용성을 고려하여 단지 면적을 다음 세 가지 방식으로 구분하였다(표 1).

[표 1] 해상풍력단지 면적의 정의 및 적용 기준

면적 정의	적용 단계	특징 및 한계	제주 한림 적용 예시
풍력 터빈 좌표 기반 면적	설치 완료 단지 또는 터빈 좌표가 공개된 단지	터빈의 위·경도 좌표를 이용해 실제 배열 범위를 산정하므로 단지의 공간적 배치를 가장 직접적으로 반영한다. 들로네 삼각분할을 적용할 수 있으며, 외곽부 보정식을 통해 단지 형상에 따른 편차를 완화하고 완충구역을 포함할 수 있다. 다만 개별 터빈의 좌표를 확보할 수 있는 사업이 제한적이다.	좌표기반 면적: 4.67 km² 명목 밀도: 21.43 MW/km² 보정 밀도: 14.29 MW/km²
공유수면 점용·사용면적	환경영향평가 협의·완료 또는 착공 단계	인허가 자료를 통해 확인할 수 있으나, 사업별로 허가 경계와 포함 범위가 일관되지 않다. 일부 사업은 단지 전체가 아니라 터빈 기초 또는 개별 시설의 점용 면적만 포함하므로 실제 개발 면적을 대표하지 못할 수 있다.	점용·사용 면적: 0.326 km² 밀도: 306.99 MW/km²
사업계획서상 부지 면적	환경영향평가 및 공유수면 점용·사용 허가 이전의 사업 초기 단계	사업 초기에도 활용할 수 있으나, 터빈 배치와 완충구역 포함 여부가 명확하지 않을 수 있다. 사업이 구체화되는 과정에서 부지의 면적이나 형태가 변경될 가능성도 있다.	부지 면적: 5.470 km² 밀도: 18.30 MW/km²

Borrmann et al. (2018)에서 활용한 들로네 삼각분할(Delaunay triangulation)은 각 터빈의 위·경도 좌표를 평면 좌표로 변환한 후, 인접한 터빈을 서로 중첩되지 않는 삼각형으로 연결하고 그 면적을 합산하는 방식이다. 다만 삼각분할 면적만 사용할 경우 외곽 터빈의 바깥쪽 공간이 포함되지 않으므로 단지 면적이 과소 산정될 수 있다. 이를 보완하기 위

해 외곽 터빈의 면적 점유분을 반영하는 (n*) 보정식을 적용하면 단지의 크기와 형상에 따른 편차를 줄이고 단지 간 비교 가능성을 높일 수 있다.

Hernando et al. (2023)은 설비용량 밀도 산정 시 실제 개발이 이루어지는 구역인 풍력개발면적(wind development area)을 우선적으로 적용하고, 해당 자료를 확보할 수 없는 경우에는 임대구역 면적(lease area)을 활용한다. 이는 사업별 자료 가용성에 따라 서로 다른 면적 기준이 적용될 수 있으며, 밀도 비교 시 이러한 차이를 명확히 밝혀야 한다는 점을 보여준다.

제주 한림 해상풍력단지(100 MW)는 면적 기준에 따라 밀도 값이 크게 달라지는 대표적인 사례이다. 터빈 좌표를 이용해 산정한 단지 면적은 4.67 km^2이며, 이에 따른 명목 설비용량 밀도는 21.43 MW/km^2, 외곽부를 보정한 밀도는 14.29 MW/km^2이다. 반면 공유수면 점용·사용 면적은 0.326 km^2로, 터빈 18기의 기초 면적만을 포함한 값으로 판단된다. 이를 적용하면 설비용량 밀도는 306.99 MW/km^2로 산정된다. 사업계획서상의 부지면적은 5.470 km^2이며, 이에 따른 설비용량 밀도는 18.30 MW/km^2로 산정된다. 제주 한림 단지의 상세 밀도 산정 절차는 부록 I에 수록하였다.

본 연구에서는 터빈 좌표와 배열 정보를 이용해 산정한 면적을 우선적으로 적용하였다.[2] 해당 자료를 확보할 수 없는 경우에는 공유수면 점용·사용 면적 또는 사업계획상 부지 면적을 활용하되, 자료의 정의와 포함 범위를 함께 검토하였다.

면적 자료와 함께 설비용량 밀도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 국내외 주요 해상풍력단지 데이터베이스(DB)를 구축하였다. 국내 DB는 상업운전·착공·환경영향평가 완료·협의 단계의 34개 단지를, 해외 DB는 운영·인허가·계획 단계의 유럽·미국·아시아 등 11개국의 59개 단지를 대상으로 한다. 자료는 환경영향평가서와 사업자 공개자료를 중심으로 수집하였으며, 부족한 정보는 언론자료와 개발사 및 관련 협회의 자문을 통해 보완하였다. 세부 정보수집 항목 및 국내외 개별 단지의 세부 자료는 부록 II에 수록하였다.

그룹별 평균 밀도는 개별 단지 밀도의 단순평균이 아니라, 해당 그룹에 포함된 단지의 설비용량 합계를 총면적 합계로 나눈 가중평균 설비용량 밀도(weighted average capacity density)로 산정하였다. 가중평균은 소규모 단지의 높은 밀도 값이 전체 평균을 과도하게 높이는 영향을 줄이고, 그룹 전체의 설비용량과 점유 면적 간 관계를 보다 적절하게 나타낸다. 이상의 면적 산정, DB 구축 및 평균값 산출 기준은 이후 국내외 해상풍력단지 사례 분석에 공통으로 적용하였다.

2) 계획입지에서 설비용량 밀도는 어떻게 활용되는가

계획입지(정부 주도 사전지정) 체계에서 설비용량 밀도(MW/km^2)는 '목표 설비용량(MW)'과 '지정 면적(km^2)'을 연결하는 환산계수로 기능한다. 즉, 정부가 목표로 제시한 누적 보급용량을 달성하기 위해 사전에 얼마만큼의 해양공간을 발전지구로 지정·확보해야 하는지를 역산하는 데 직접 활용된다. 필요 면적은 목표 용량을 설비용량 밀도로 나눈 값으로 산정되므로, 밀도 가정값이 달라지면 동일한 목표 용량에 대해 요구되는 해양공간 면적이 크게 달라진다.

2 다만, 본 연구에서는 터빈 좌표를 확보할 수 있는 사례가 제한적이므로, 분석의 일관성을 위해 평균 설비용량 밀도 산정 시 완충면적을 반영한 보정 밀도는 적용하지 않았다.

이 때문에 설비용량 밀도는 계획입지 단계에서 두 가지 정책적 기능을 갖는다. 첫째, 목표–면적 간 정합성(consistency) 점검 기능이다. 정부가 지정하였거나 지정할 예정인 발전지구의 총면적이 목표 용량을 수용하기에 충분한지를 사전에 정량적으로 검증할 수 있다. 둘째, 발전지구 지정 규모 산정(area sizing)의 기준 기능이다. 향후 추가로 지정해야 할 해양공간의 최소 규모를 추정하는 근거가 되며, 이는 어업·항행·환경·국방 등 경합하는 해양이용과의 조정 범위를 사전에 가늠하게 한다.

해외 주요국과 국제기구도 동일한 방식으로 이 지표를 활용한다. 유럽연합의 해양공간계획(MSP) 및 미국 국립재생에너지연구소(NREL)는 국가·주(州) 단위 보급목표를 해양공간 수요로 환산할 때 표준 밀도값을 적용한다. 특히 NREL은 사업 세부설계가 확정되지 않은 단계의 리스(lease) 구역의 잠재 설비용량을 추정할 때 보수적 기준으로 4.0 MW/km² 를 일괄 적용하고 있으며, 이는 과거 3.0 MW/km² 기준을 상향 조정한 값이다(Hernando et al., 2023). 이처럼 계획 초기 단계에서는 '표준 밀도값'을 통해 목표와 면적의 정합성을 빠르게 점검하고, 사업이 구체화될수록 단지별 실측 밀도로 정밀화하는 단계적 접근이 일반적이다.

따라서 본 연구에서 계획입지 관점의 설비용량 밀도 검토는 단순한 기술 지표 산정을 넘어, 해상풍력 보급목표에 따른 전체 해양공간 수요를 가늠하고, 별도로 향후 계획입지를 통해 새로 확보해야 할 발전지구의 규모와 공간적 확보 가능성을 검토하는 정량적 기준을 마련하는 데 의의가 있다.

2. 해외 해상풍력 설비용량 밀도 사례 분석

본 장에서는 해외 주요국의 운영·인허가·계획 단계 해상풍력단지를 대상으로 구축한 DB를 바탕으로, 설비용량 밀도의 분포와 통계 특성을 분석한다. 이어 밀도 값에 영향을 미치는 주요 요인을 검토하여 국내 설비용량 밀도 시나리오 설정의 근거로 활용한다.

1) 해외 해상풍력 설비용량 밀도 사례

본 절에서는 구축한 해외 해상풍력단지 DB를 바탕으로 설비용량 밀도(MW/km²)를 단지 유형 및 설계 특성별로 비교·분석한다. 해외 DB에 포함된 단지의 설비용량 밀도 통계는 표 2와 같다. 개별 단지의 세부 자료는 부록 II에 수록하였다.

[표 2] 해외 해상풍력 설비용량 밀도 통계

MW/km²	주요 분석대상 (n=55)
최솟값	2.00
평균(가중평균)	4.34
최댓값	19.20

주: 주요 통계는 실증 4개 단지를 제외한 55개 단지를 대상으로 산정하였다.

DB 결과는 단지별 설비용량 밀도의 편차가 크다는 점을 보여준다. 이는 국내 신재생에너지백서 등에서 흔히 적용되어 온 5 MW/km²의 단일값이 실제 단지의 다양성을 충분히 반영하지 못함을 시사한다. Hernando et al. (2023)은 터빈 배열 정보가 공개된 미국 고정식 17개 사업의 계획 밀도가 약 2~9 MW/km², 가중평균이 4.4 MW/km²라고 분석하였으며, 유럽 선행연구의 평균 범위(4.9~5.9 MW/km²)와도 대체로 부합한다고 평가하였다. 이러한 국제 비교는 본 DB의 결과를 해석하는 준거점이 된다.

본 연구의 해외 DB에는 덴마크·독일·영국·미국·네덜란드·대만·프랑스·일본·아일랜드·노르웨이·포르투갈 등 11개국의 해상풍력단지 59개가 포함되며, 이 중 고정식이 54개, 부유식이 5개이다. 단지 선정은 상업운전·건설·인허가(환경영향평가) 등 추진 단계별 주요 단지 가운데 단지 면적과 터빈 배열 등 설비용량 밀도 산정에 필요한 핵심 정보가 공개 자료로 확인되는 사업을 선별하는 방식으로 이루어졌다. 상업용 해상풍력단지의 일반적인 공간밀도를 비교하기 위한 주요 통계에서는 부유식 기술의 실증을 주된 목적으로 조성한 Kincardine, Hywind Scotland, WindFloat Atlantic, Provence Grand Large를 제외하였다. 이에 따른 주요 분석대상 55개 단지의 명목 설비용량 밀도는 가중평균 4.34 MW/km², 최소 2.00 MW/km², 최대 19.20 MW/km²로 나타났다. 단순평균은 6.73 MW/km²이나, 소규모 단지의 높은 밀도가 평균을 끌어올리는 효과가 있어 단지 규모를 반영한 가중평균이 보다 대표성 있는 값이다. 이 가중평균은 NREL이 사업 미확정 구역에 적용하는 보수적 기준(4.0 MW/km²)과도 근접한다(Hernando et al., 2023).

기초형식별 비교 결과는 표 3과 같다. 주요 분석대상에 포함된 고정식 54개 단지의 가중평균은 4.34 MW/km²(최소 2.00, 최대 19.20 MW/km²)이다. 부유식 중 상업적 운용 성격이 뚜렷한 Hywind Tampen의 명목 밀도는 4.19 MW/km²이다. 별도의 부유식 해석을 위해 실증 4개를 포함한 5개 단지를 모두 살펴보면 가중평균은 4.12 MW/km²인 반면 단순평균은 11.53 MW/km², 범위는 2.00~32.31 MW/km²로 편차가 매우 크다. 이는 소수 터빈과 특수한 배치·계류방식을 적용한 실증 단지가 상업 규모 단지의 일반적인 공간 이용 특성을 대표하기 어렵다는 점을 보여준다. 따라서 부유식 실증 단지는 분포 그림과 부록 DB에는 참고용으로 포함하되, 시나리오와 연결되는 주요 통계에서는 제외하였다.

단지 규모와 밀도 간에는 뚜렷한 음(-)의 관계가 관찰된다(표 4·표 5, 그림 1). 그림 1의 점선은 실증 4개를 제외한 55개 단지의 면적 로그값과 밀도의 관계를 나타낸 선형 추세선으로, 면적 증가에 따라 밀도가 낮아지는 전반적 경향을 보여준다. 면적이 50 km² 미만인 단지군의 가중평균 밀도는 8.65 MW/km²인 반면, 50~150 km²는 6.59 MW/km², 150~400 km²는 3.08 MW/km², 400 km² 이상 대규모 단지군은 2.96 MW/km²로 낮아진다. 설비용량 구간에서도 1,000 MW 이상 단지군의 가중평균 밀도(3.49 MW/km²)는 200~500 MW 단지군(7.34 MW/km²)의 절반 이하이다(표 5). 단지 면적과 명목 밀도의 상관계수는 약 -0.63, 총 설비용량과의 상관계수는 약 -0.32로, 단지 규모가 커질수록 단위면적당 밀도가 낮아지는 경향을 정량적으로 확인할 수 있다.[3] 이는 국내 대규모 계획입지 단지의 밀도를 가정할 때 소규모 단지에서 관찰되는 높은 밀도값을 그대로 적용해서는 안 됨을 시사한다.

국가별로는 독일 단지의 가중평균이 10.08 MW/km²로 상대적으로 높고, 영국은 2.84 MW/km²로 낮게 나타난다. 이는 영국의 Hornsea·Dogger Bank·Seagreen 등이 면적 수백 km²에 이르는 대형 사업인 반면, 독일 단지는 상대적으로 조밀하게 배치된 데 기인한다. 이러한 국가 간 편차에는 단지 규모뿐 아니라 해양공간 이용에 관한 제도적 차이도 작용한다. Borrmann et al. (2018)에 따르면 덴마크는 용량당 단지 면적을 최대 0.22 km²/MW로 제한하여 최소 약 4.55 MW/km²의 설비용량 밀도를 확보하도록 하고 있으며, 네덜란드는 단지별로 약 6.05~8.02 MW/km² 범위의 밀도를 적용하도록 규정하고 있다. 반면 독일·벨기에 등은 한정된 해역의 집약적 이용을 유도하는 규제로 상대적으로 높은 밀도가 나타나는 것으로 분석된다.

면적은 대다수 단지에서 터빈 배열을 포괄하는 단지 해역 면적을 기준으로 산정하였으며, 미국 단지는 해상 임대구역(lease area) 또는 풍력개발구역(WDA)을, 일부 단지는 항만·점용 면적을 사용하였다. 이처럼 면적 산정 기준(단지 해역 면적·임대구역·배열 면적 등)이 단지마다 상이한 점은 국가 간 직접 비교 시 유의해야 할 한계이다. 다만 본 연구에서는 밀도 산정의 정확성과 비교 가능성을 높이기 위해 공개자료에서 확인 가능한 범위 내에서 터빈 배열을 실제로 포괄하는 개발면적을 우선적으로 조사·적용하였다.

[표 3] 기초형식별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55)

구분	단지 수	가중평균 (MW/km²)	범위 (MW/km²)
전체	55	4.34	2.00~19.20
고정식	54	4.34	2.00~19.20
부유식	1	4.19	4.19

주: 부유식 주요 통계는 Hywind Tampen 1개 사례이며, 별도 부유식 해석에는 실증 4개를 포함한 5개 단지를 활용하였다.

3 설비용량 밀도는 면적을 분모로 하는 비율지표이므로 면적과의 상관에는 정의상 음의 편향이 개입할 수 있으나, 분자인 총 설비용량과도 음의 상관(−0.32)이 확인되고 면적 구간별 가중평균 추이가 일관되어, 규모–밀도 역관계는 강건한 것으로 판단된다.

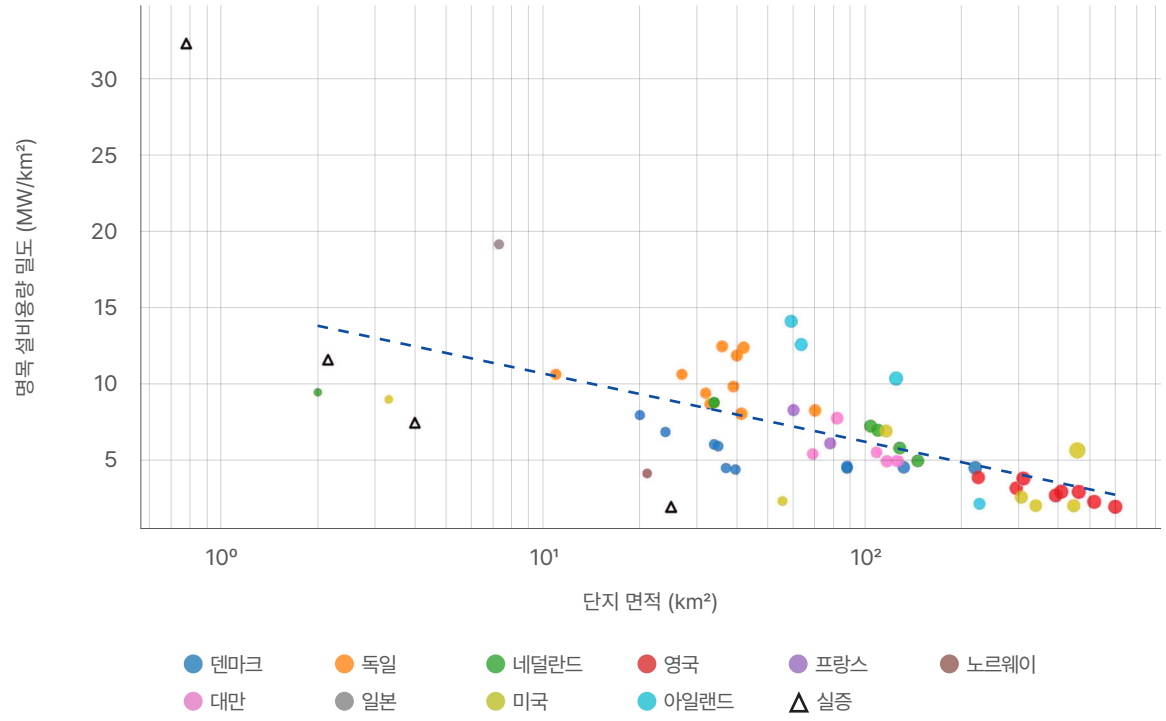
[표 4] 단지 면적 구간별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55)

단지 면적 구간	단지 수	가중평균 (MW/km²)	구간 내 설비용량 범위 (MW)
50 km² 미만	21	8.65	19~522
50~150 km²	20	6.59	132~1,300
150~400 km²	8	3.08	500~1,200
400 km² 이상	6	2.96	924~2,600

[표 5] 설비용량 구간별 설비용량 밀도 (해외 DB, n=55)

설비용량 구간(MW)	단지 수	가중평균 (MW/km²)	구간 내 면적 범위 (km²)
200 미만	10	5.42	2.00~55.44
200~500	15	7.34	27.00~88.00
500~1,000	21	4.51	42.00~444.96
1,000 이상	9	3.49	125.00~599.00

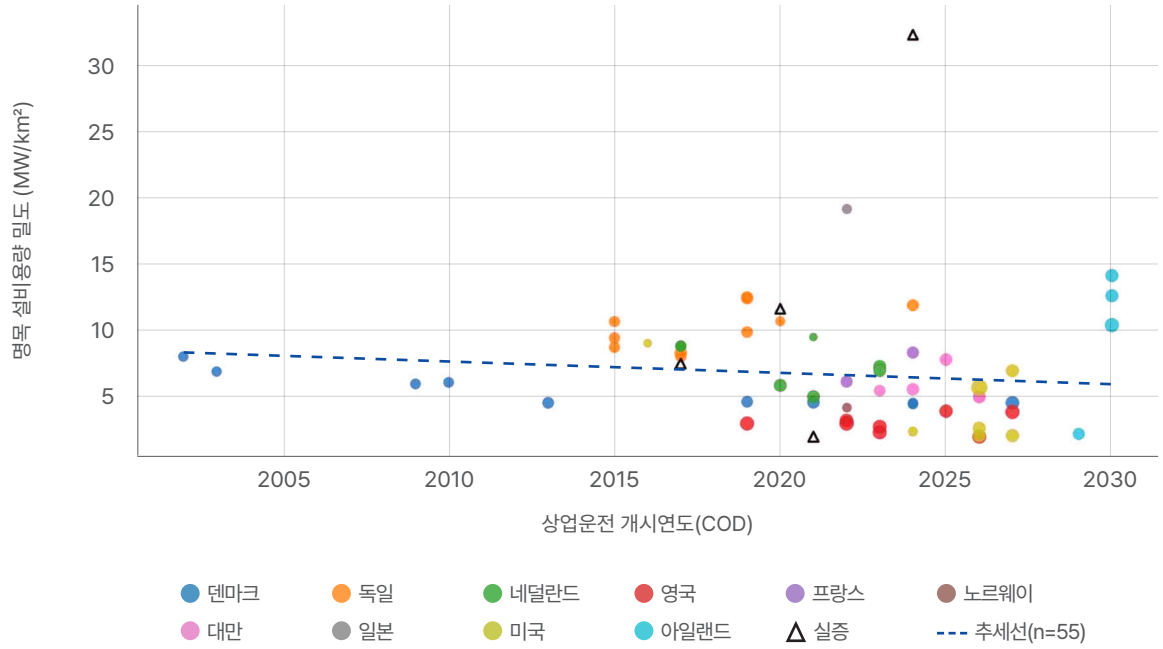
[그림 1] 해외 해상풍력단지 면적과 설비용량 밀도의 관계



주: 점선은 실증 4개를 제외한 55개 단지의 로그 선형 추세선이다.

자료: 본 연구 해외 해상풍력단지 DB (n=59; 실증 4개는 삼각형으로 표시).

[그림 2] 상업운전 개시연도별 해외 해상풍력 설비용량 밀도



자료: 본 연구 해외 해상풍력단지 DB (전체 표시 n=59; 추세선·상관분석은 실증 4개를 제외한 n=55).

그림 2에서 상업운전 개시연도와 설비용량 밀도 간 상관계수는 주요 분석대상 55개 단지에서 약 -0.14로 나타나, 연도에 따른 뚜렷한 상승 또는 하락 추세는 확인되지 않았다. 이는 터빈 대형화에 따른 단위 출력 증가가 로터 직경 확대에 비례한 이격거리 증가로 상당 부분 상쇄되고, 단지 규모·임대구역 형상·국가별 이격 규정 등 사업별 조건의 영향이 더 크게 작용하기 때문으로 해석된다.[4]

2) 설비용량 밀도에 영향을 미치는 주요 요인

설비용량 밀도는 단일한 기술 상수가 아니라, 물리적 입지 조건·터빈 설계·면적 산정 기준·제도적 규제가 복합적으로 작용하여 결정되는 변수이다. 본 절의 영향요인은 선행연구(Borrmann et al., 2018; Hernando et al., 2023)에서 공통적으로 제시된 결정요인을 본 연구 해외 DB 분석 결과와 대조하여, 문헌과 사례에서 함께 확인되는 요인을 중심으로 선정하였다. 이를 종합하면 밀도에 영향을 미치는 주요 요인은 다음과 같이 정리된다. 선행연구가 제시한 전체 영향요인과 본 연구에서 중점적으로 검토한 요인의 관계는 표 6에 정리하였다.

① 터빈 이격거리 및 배치(후류 손실) — 후류(wake) 손실을 줄이기 위해 터빈 간격을 넓히면 단위면적당 밀도가 낮아진다. 미국 매사추세츠·로드아일랜드 구역은 항행 안전을 위해 1×1해리(nm) 격자 배치가 적용되어, 11 MW급 터빈 기

4 명목 밀도는 외곽 터빈 바깥의 이격공간이 면적 산정에서 제외되어 특히 소규모 단지의 밀도를 높게 산정하는 경향이 있다. Borrmann et al. (2018)의 외곽부 보정 밀도를 적용하면 이러한 규모·형상 효과가 상당 부분 완화된다. 다만 일부 사업의 공표 면적은 터빈 배열 바깥의 완충·유보 공간을 포함하므로, 자료의 면적 정의에 따라 명목 밀도의 편의 방향과 크기는 달라질 수 있다.

준 약 3.2 MW/km² 수준까지 밀도가 낮아진 대표적 사례이다. 다만 본 연구 해외 DB에서는 터빈 이격거리 항목의 결측이 많아, 이격거리 요인은 정량 분석보다 문헌과 대표 사례에 근거한 정성적 수준에서 다루었다.

② 단지 규모 및 인접 풍력단지 — 단지 규모가 커질수록 설비용량 밀도가 낮아지는 경향이 나타난다(본 연구 DB에서 단지 면적과 명목 밀도의 상관계수 약 -0.63). 특히 대규모 발전지구를 여러 사업구역으로 분할 개발할 경우, 인접 단지 간 후류와 이격공간뿐 아니라 공용 회랑 등 비개발 공간도 함께 고려해야 하므로 실제 적용 가능한 밀도가 낮아질 수 있다. Hernando et al. (2023)은 인접 풍력단지의 후류가 주변 단지의 터빈 배치에 영향을 미치며, 후류 손실을 줄이기 위한 배치 조정이 설비용량 밀도를 낮출 수 있다고 설명한다. 따라서 대규모 계획입지 단지의 밀도를 소규모 단지에서 관찰된 높은 값으로 가정해서는 안 됨을 시사한다.

③ 터빈 정격용량 — 터빈 정격용량이 설비밀도에 영향을 줄 수 있으나, 용량이 커진다고 해서 밀도가 일반적으로 높아지는 것은 아니다. Hernando et al. (2023)에 따르면 신규 단지 설계에서는 터빈이 대형화될수록 로터 직경에 비례하여 이격거리도 함께 확대되므로 설비용량 밀도는 대체로 유사하게 유지되며, 이격거리나 터빈 배치가 고정된 경우(예: 미국 매사추세츠·로드아일랜드의 1×1해리 격자)에 한하여 대형 터빈 적용 또는 리파워링(repowering)이 밀도 증가로 이어질 수 있다.

④ 면적 산정 기준 — 밀도값은 분모인 '면적'을 무엇으로 보는지에 따라 크게 달라진다. 터빈 좌표 기반 면적(들로네 삼각분할 등 밀도 보정 적용), 공유수면 점용면적, 사업계획상 부지면적은 완충구역(buffer) 포함 여부가 달라 동일 단지라도 상이한 밀도값을 산출한다. 따라서 사례 비교 시 면적 기준의 정합성 확보가 전제되어야 한다.

⑤ 수심 및 기초형식(고정식/부유식) — 부유식은 계류선(mooring)·앵커 설치공간이 추가로 필요하여 고정식보다 단위면적당 밀도가 낮아지는 경향이 있다. 수심이 깊어질수록 계류선과 앵커가 차지하는 공간 및 단지 경계와의 이격공간이 확대될 수 있어, 가용 개발면적과 설비용량 밀도에 영향을 미친다.

⑥ 국가 해양공간 규제(MSP) 및 경합 이용 — 각국의 해양공간계획(MSP) 제도는 개발 가능 구역 자체를 제한할 뿐 아니라, 어업·항행·군사·환경보호 구역과의 경합을 조정하는 과정에서 단지 형상과 이격거리를 규정하여 밀도에 영향을 준다. 표 7과 같이 본 연구의 해외 DB 대상국 대부분은 사전 지정구역 내 개발만을 허용하고 있어, 밀도 산정의 전제가 되는 가용 해양공간이 제도적으로 결정되는 구조임을 확인할 수 있다.

⑦ 단지 레이아웃(터빈 배치 형태) — 터빈 배치 형태(Layout)는 그 자체보다 형태를 규정하는 이격 규칙을 통해 밀도에 작용한다. 항행 안전을 위해 동서·남북 1해리 격자가 강제된 미국 북동부 단지군(Vineyard Wind 1, Revolution, Sunrise, South Fork)은 명목 밀도가 2.08~2.63 MW/km²에 그쳐 전체 최저 수준을 보인다. 반면 후류 손실을 고려해 불규칙·최적화 배치를 적용한 단지는 상대적으로 높은 밀도를 나타낸다. 즉, 레이아웃은 독립적 결정요인이라기보다 규정 이격거리와 해역 형상이 공간에 투영된 결과에 가깝다.

⑧ 임대구역 형상 및 임대비용 — Hernando et al. (2023)은 임대구역 형상과 임대료를 밀도 영향요인으로 제시한다. 본 연구 DB에서 단위면적당 임대료(원/km²)가 확인되는 사례는 미국 BOEM 상업리스(약 112만 원/km²·년), 네덜란

드 Hollandse Kust Zuid(약 1,555만 원/km²·년), 아일랜드 MAC 개발부담금(약 3,463만 원/km²·년) 등 일부 제도권에 한정된다. 이들 값과 밀도 사이에는 일관된 관계가 나타나지 않으며(임대료가 가장 높은 아일랜드 단지의 밀도는 2.20~14.14 MW/km²로 편차가 가장 큼), 이는 임대료가 대체로 면적 단가가 아니라 입찰·지원제도에 결합되어 부과되기 때문이다. 따라서 임대비용은 밀도의 직접적 결정요인으로 보기 어려우며, 단지 형태와 가용 해역의 제약이 밀도에 미치는 영향이 더 크다.

[표 6] Hernando et al. (2023)의 설비용량 밀도 영향요인

설비용량 밀도 영향요인	원문 (Table ES-1)
터빈 이격거리	Turbine spacing
터빈 정격용량	Turbine generator rating
인접 풍력단지	Adjacent wind farms
설치 불가 터빈 위치	Unfeasible turbine positions
부유식 계류·앵커 점유 면적	Area lost from anchor placement in floating systems
임대구역(단지) 형상	Lease area geometry
이해관계자 고려사항	Stakeholder considerations
전력 인수계약	Offtake agreements
규정된 터빈 이격거리	Prescribed turbine spacing
임대구역 가격(임대료)	Lease area prices
재생에너지 정책	State renewable energy policy

주: 음영은 Borrmann et al. (2018)와 Hernando et al. (2023)에서 공통적으로 강조되거나, 본 연구의 단지 규모·기초형식·면적 정의 및 시나리오 분석과 직접 연계되는 핵심 요인이다.

[표 7] 주요국의 MSP 구역 외 해상풍력 개발 허용 여부

국가	MSP 구역 외 개발	핵심 사유 및 예외 사례 (해외 DB 기준)
덴마크	불가	과거 예외제도('오픈도어')가 있었으나 2023년 전면 폐지
네덜란드	불가	철저한 국가 주도로 사전 지정된 구역 내에서만 입찰 진행
독일	불가	연방해양청(BSH)의 해양공간계획 구역 외 개발 절대 불가
프랑스	불가	정부가 공론화를 거쳐 사전에 지정한 구역에 한정
일본	불가	정부가 사전에 지정한 '촉진구역' 내에서만 상업용 개발 허용
대만	불가	민간 제안이 있더라도 정부의 엄격한 해양공간 제한(Red Zone) 적용

국가	MSP 구역 외 개발	핵심 사유 및 예외 사례 (해외 DB 기준)
영국	상업용 불가	상업용은 불가하나, 소규모 부유식 실증사업(Hywind Scotland)은 예외 추진
노르웨이	상업용 불가	상업용은 불가하나, 해양 석유·가스시설 전력공급용 특수목적(Hywind Tampen) 예외
포르투갈	상업용 불가	상업용은 불가하나, 초기 기술확인용 부유식 실증사업(WindFloat Atlantic) 예외

자료: Durakovic(2023), Ministry of Economic Affairs and Climate Policy(2015), BSH(2025), CNDP(2024), Government of Japan(2018), MOEA(2015), The Crown Estate(2023), Equinor(2017), Norwegian Ministry of Energy(2024), North Sea Wind Power Hub(2022), Ocean Winds(2025), 이승문(2023)을 바탕으로 저자 작성.

대부분의 주요국은 정부가 사전 지정한 해양공간 구역 내에서만 상업용 해상풍력 개발을 허용하며, 구역 외 개발은 원칙적으로 불가하다. 영국·노르웨이·포르투갈에서 확인되는 구역 외 개발 사례는 모두 부유식 실증 또는 석유·가스시설 전력공급 등 특수목적에 한정된 예외로, 상업용 보급에는 적용되지 않는다. 이는 가용 해양공간 자체가 제도적으로 한정됨을 의미하며, 목표 용량 달성에 필요한 면적을 산정할 때 설비용량 밀도와 함께 '지정 가능한 구역의 제약'을 동시에 고려해야 함을 시사한다.

3) 소결: 해외 사례의 시사점

해외 단지 분석에서 확인되는 사실은 다섯 가지로 요약된다.

첫째, 단일 밀도값으로는 해상풍력의 공간 소요를 대표할 수 없다. 주요 분석대상 해외 단지의 밀도는 2.00~19.20 MW/km²에 걸쳐 분포한다. 국내에서도 5 MW/km²와 같은 단일값을 적용하기보다 시나리오 구간으로 밀도를 설정하여, 목표–면적 정합성의 불확실성 범위를 함께 제시하는 것이 타당하다.

둘째, 단지 규모와 밀도는 역관계를 보인다. 해외 DB에서 단지 면적과 밀도의 상관계수는 약 -0.63이며, 400 km² 이상 단지군의 가중평균은 2.96 MW/km², 1,000 MW 이상 단지군은 3.49 MW/km²로 소형단지의 절반 이하 수준이다. 대규모 발전지구를 여러 사업구역으로 분할 개발할 경우 인접 단지 간 후류와 이격공간, 공용 회랑 및 기타 비개발 공간이 발생하여 실제 적용 가능한 밀도가 낮아질 수 있다. Hernando et al. (2023)이 터빈 배치가 확정되지 않은 구역의 계획에 4.0 MW/km²를 적용하는 것도 이러한 계획 초기 단계의 불확실성을 고려한 보수적 접근이다. 따라서 국내 계획 입지의 필요 면적 산정에서도 소규모 독립 단지의 높은 밀도를 그대로 적용하기보다 대규모·분할 개발의 공간 이용 특성을 반영한 보수적 밀도 가정이 필요하다.

셋째, 규모 통제는 국제 비교의 전제다. 전체 가중평균(4.34 MW/km²)은 초대형 리스의 면적 가중치가 지배적으로 반영된 값이므로 국가 간·단지 간 비교의 기준으로 부적절하며, 규모 구간을 통제해야 의미 있는 준거가 된다. 국내 계획단지의 전형적 규모에 해당하는 50~150 km² 구간의 해외 가중평균은 6.59 MW/km²이며, 제3장에서 국내 관측치와 비교하는 기준값으로 활용한다.

넷째, 밀도의 상·하한은 상당 부분 제도가 결정한다. 덴마크는 지정 해역에 4.55 MW/km² 이상, 네덜란드는 6.05~8.02 MW/km²의 밀도 기준을 운용하여 공간 효율을 제도적으로 담보한다. 반대로 미국 북동부는 어업·항행 공존을 위한 1×1해리 격자 배치 규정으로 단지 밀도가 2~3 MW/km² 수준에 머물러 있다. 어업 밀집도가 높은 국내 해역에서도 공존 규칙의 설계 방식이 실현 가능한 밀도 수준에 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

다섯째, 밀도 기반 산정 면적은 순(純) 개발면적의 하한이다. 본 연구의 해외 DB는 공개자료에서 확인 가능한 범위 내에서 터빈 배열을 실제로 포괄하는 개발면적을 우선 적용하므로, 목표 용량을 밀도로 나눈 값은 터빈과 내부 이격공간이 차지하는 순 개발면적에 가깝다. 반면 분석 대상 주요국의 사전 지정·할당 구역에는 항로·어업·환경·군사 제약, 외곽 완충공간 및 공용 회랑 등 터빈을 설치할 수 없는 공간이 포함될 수 있다. 따라서 이와 같이 산정된 면적은 실제 확보해야 할 발전지구 총면적이 아니라 최소 개발면적으로 해석해야 하며, 계획입지 단계에서는 비개발 공간을 별도 계수로 반영해야 한다.

이상의 분석 결과는 제3장에서 국내 밀도 시나리오를 설정하고, 최소 개발면적을 발전지구 총면적으로 환산하는 근거로 활용된다.

3. 국내 해상풍력 목표 달성을 위한 해양공간 수요 전망

본 장에서는 국내에서 상업운전 중이거나 착공·환경영향평가 단계에 있는 해상풍력단지를 대상으로 DB를 구축하고, 국내외 사례와 정책 여건을 바탕으로 설비용량 밀도 시나리오를 설정한다. 이를 토대로 2035년 및 2050년 해상풍력 보급 목표 달성에 필요한 해양공간 면적을 산정한다.

1) 2035·2050 해상풍력 보급 목표 용량 설정

(1) 정부 목표와 보급용량 시나리오

현재 국내 해상풍력 누적 설치용량은 약 350 MW 수준이다. 가장 최근 발표된 보급 목표는 「해상풍력 인프라 확충 및 보급계획」에 제시되어 있으며, 2030년까지 10.5 GW를 보급·착공하고 2035년까지 누적 25 GW를 보급하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 2035년 25 GW를 중기 목표로 적용하였다.

표 8은 정부의 주요 에너지·전력 정책 및 계획에 제시된 해상풍력 보급 관련 수치를 정리한 것이다. 문서별로 해상풍력 단독 용량, 육상·해상풍력 합계, 보급·착공 물량 등 기준이 다르므로 수치 비교 시 유의할 필요가 있다.

[표 8] 정부 공표 해상풍력 보급 계획 (누적 설치 용량)

공식 문서	공표일정	2026	2030	2035	2036	2038	2050
현재 설치량	-	350 MW	-	-	-	-	-
재생에너지 3020	2017	-	12 GW	-	-	-	-
2050 탄소중립 시나리오	2021. 10	-	-	-	-	-	41 GW[5]
10차 전기본	2023	-	14.3 GW[6]	-	육상·해상 합 34.1 GW	-	-
11차 전기본	2025	-	13.5 GW (비공개)	-	-	육상·해상 합 40.7 GW	-
해상풍력 인프라 확충 및 보급계획	2025.12	-	3 GW 보급, 7.5 GW 착공 (2030년까지 연 4 GW 보급)	25 GW	-	-	-
해상풍력 중장기 입찰 이행안(로드맵)	2026.06	-	• 10년간(2026~2035년) 총 55 GW 규모의 해상풍력 입찰물량을 제시 • 발전지구 경쟁입찰은 2035년까지 총 24 GW 규모 추진 계획				

자료: 산업통상자원부(2017; 2023; 2025), 관계부처 합동(2021), 기후에너지환경부(2025; 2026), 이승문(2023), 박윤석(2025)을 바탕으로 저자 작성.

5 2050 탄소중립 시나리오 B안의 해상풍력 41GW는 『2020 신·재생에너지 백서』의 시장잠재량을 기준으로 한 설정값이다.

6 제10차 전력수급기본계획의 2030년 풍력 총량은 육상·해상 합 19.3GW이다.

정부의 해상풍력 보급계획에는 2050년 목표가 별도로 제시되어 있지 않아, 본 연구에서는 2050년 보급 규모를 두 가지 경로로 설정하였다(표 10). 첫째, **정부 로드맵 완전 이행 경로**는 「해상풍력 중장기 입찰 이행안(로드맵)」(기후에너지환경부, 2026)에 제시된 2026~2035년 총 55 GW의 입찰물량이 모두 계획대로 준공되는 경우를 가정하였다(표 9). 기존 설치·선정물량을 포함할 경우 2050년 누적 보급량은 약 59.4 GW로 산정된다. 둘째, **탄소중립 경로**는 2050년 탄소중립 달성에 필요한 재생에너지 확대 수준을 반영하기 위해 「대한민국 2050 탄소중립 시나리오 K-Map 2.0」(녹색에너지전략연구소 외, 2024)에서 제시한 해상풍력 필요 용량 98 GW를 적용하였다. K-Map 2.0은 2035년 보급량을 별도로 제시하지 않으므로, 2035년에는 두 경로 모두 정부의 보급목표인 25 GW를 동일하게 적용하였다.

[표 9] 10년간 해상풍력 중장기 입찰 물량 (단위: GW)

연도	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'33	'34	'35	합계
기존 경쟁입찰 물량	4.0	5.0	6.0	5.0	4.0	3.0	2.0	2.0	-	-	31.0
발전지구 경쟁입찰	-	-	-	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	24.0
합계 (공고물량)	4.0	5.0	6.0	7.0	6.0	7.0	6.0	6.0	4.0	4.0	55.0

자료: 기후에너지환경부(2026)

[표 10] 2035 및 2050 해상풍력 보급용량 시나리오 (단위: GW)

시나리오 구분	2035	2050
정부 로드맵 완전 이행 경로	25	59.4
탄소중립 경로(K-Map 2.0 준용)		98

(2) 리드타임 설정과 준공 경로

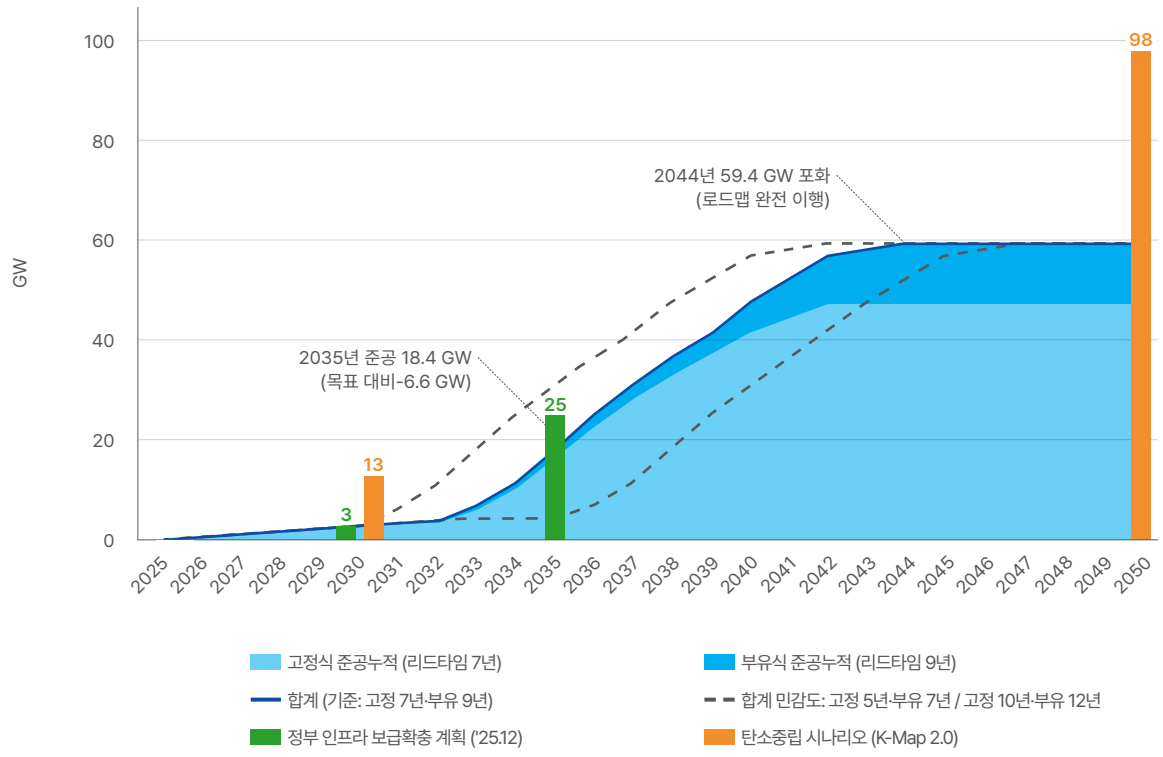
입찰물량이 실제 보급으로 이어지는 시점을 추정하기 위해 리드타임(입찰 공고~준공)을 적용하였다. 현행 경쟁입찰 제도는 300 MW 초과 사업의 설치 기한을 계약 후 78개월(6.5년)로 규정하고 회당 12개월 이내, 최대 3회까지 연장을 허용한다. 따라서 제도상 준공기한은 공고 기준 약 7년에 해당하고 연장 시 최대 10년까지 늘어난다. 본 연구는 고정식에 7년을 적용하고, 부유식은 부유체 제작과 계류설비 설치에 시간이 더 걸리는 점을 고려하여 2년을 더한 9년을 적용하였다. 이미 선정된 물량 4.1 GW (고정식 3.35 GW, 부유식 0.75 GW)[7]는 별도로 처리하여, 고정식은 정부의 2030년 보급 목표(기존 포함 누적 3 GW)에 맞춰 2030년까지 2.65 GW가 준공되고 잔여분은 2031년에 준공되는 것으로, 울산 부유식은 2032~2033년에 준공되는 것으로 가정하였다.

7 국내 해상풍력 경쟁입찰의 연도별 공고물량(MW)은 ('22) 550 → ('23) 1,500 → ('24) 1,500 → ('25) 1,250 → ('26.上) 1,800이며, 실제 선정물량(MW)은 ('22) 96 → ('23) 1,431 → ('24) 1,886(고정식 1,136, 부유식 750) → ('25) 689 → ('26.上) 1,786(고정식 1,254, 부유식 532)이다. '22~'25년 누적 선정물량은 약 4.1 GW로 같은 기간 공고물량(4.8 GW)의 85.5%이다. 본 연구의 준공 경로 산정에는 공고물량이 아닌 선정물량을 사용하였고, '26년 하반기 이후 공고분은 전량 선정·이행(실현율 100%)을 가정하였다. 자료: 한국에너지공단 풍력 고정가격계약 경쟁입찰 결과, 기후에너지환경부(2026).

이 리드타임으로 기존 설치·선정물량과 입찰 일정을 준공 시점으로 환산한 결과, 2035년 누적 준공용량은 고정식 16.6 GW, 부유식 1.9 GW 등 총 18.4 GW로 정부 목표 25 GW보다 6.6 GW 부족하다. 고정식 리드타임을 7년에서 6년으로 단축하면 누적 용량은 24.9 GW로 목표에 근접하고, 부유식까지 8년으로 단축하면 25.4 GW로 목표를 상회한다.[8] 따라서 2035년 목표를 달성하려면 사업들이 연장 없이 준수할 필요가 있다. 2035년 공고되는 마지막 부유식 물량은 2044년 준공되어, 로드맵 물량 59.4 GW는 2050년 이전에 모두 준공되는 것으로 전망된다.

그림 3은 정부의 연도별 입찰계획에 리드타임을 적용하여 고정식·부유식 해상풍력의 누적 준공 경로를 추정하고, 이를 정부 보급목표 및 2050년 탄소중립 필요 용량과 비교한 결과이다. 점선은 리드타임 변화에 따른 준공 경로의 민감도를 나타내며, 2035년 목표 달성을 위해 사업기간 단축과 준공 일정 관리가 중요함을 보여준다.

[그림 3] 해상풍력 누적 보급 전망(2025~2050)



8 준공 경로는 각 연도 공고물량에 리드타임을 더한 시점을 준공연도로 보아 산정하였다. 따라서 2035년 누적에는 고정식은 2028년까지, 부유식은 2026년까지 공고되는 물량이 포함된다. 고정식 16.6 GW는 기존 상업운전 0.35 GW와 기선정물량 3.35 GW에 2026~2028년 공고분 12.85 GW를 더한 값이며, 부유식 1.9 GW는 울산 기선정물량 0.75 GW와 2026년 공고분 1.13 GW의 합이다. 고정식을 6년으로 단축하면 2029년 공고분 6.5 GW가, 부유식까지 8년으로 단축하면 2027년 공고분 0.5 GW가 추가되어 목표를 상회한다. 연도별 공고물량은 「해상풍력 중장기 입찰 이행안」의 기존 경쟁입찰과 발전지구 경쟁입찰 물량을 합산한 값이며, 기술별 배분은 2030년까지 로드맵 세부표를 적용하고 2031년 이후는 배분이 제시되지 않아 부유식 비중 30%를 가정하였다.

(3) 고정식과 부유식 보급용량 구분

고정식과 부유식은 공간 이용 특성과 적용되는 설비용량 밀도가 서로 다르므로, 해양공간 수요를 산정하기 위해 보급용량을 기초형식별로 구분할 필요가 있다. 그러나 정부는 장기적인 고정식·부유식 보급 비중을 별도로 제시하지 않고 있으며, 현재 정부 계획에서 기초형식별 물량이 구체적으로 제시된 것은 2026~2030년 경쟁입찰 계획이다. 해당 기간의 경쟁입찰 물량 24 GW 가운데 고정식은 21 GW, 부유식은 3 GW로 제시되어 있다(표 11).

[표 11] 2026~2030년 입찰 세부 물량 전망 (단위: GW)

구분	'26.上	'26. 下	'27.上	'27.下	'28.上	'28.下	'29.上	'29.下	'30년	소계
경쟁입찰 물량	1.8	1.7~3.0	1.5~3.5	1.5~3.5	2.0~4.0	2.3~4.5	2.0~3.5	1.5~3.5	3.0~4.5	24.0
└ 고정식	1.4	1.3~2.0	1.5~2.5	1.5~2.5	2.0~3.0	2.3~3.5	2.0~2.5	1.5~2.5	2.5~3.5	21.0
└ 부유식	0.4	0.4~1.0	0.5~1.0		0.5~1.0		0.5~1.0		0.5~1.0	3.0
└부유식 비중 (최소~최대)	22.2%	16.7~ 43.5%	9.1~25.0%		7.1~18.9%		9.1~22.2%		12.5~ 28.6%	12.5%
발전지구 경쟁입찰	-	-	-	-	-	-	-	2.0	2.0	4.0
총계	1.8	1.7~3.0	1.5~3.5	1.5~3.5	2.0~4.0	2.3~4.5	2.0~3.5	3.5~5.5	5.0~6.5	28.0

주: 1) 최소~최대 범위는 이전 입찰 선정 물량에 따라 조정될 수 있으며, 각 회차별 범위이므로 모든 회차에서 최대 물량이 동시에 선정되는 것을 의미하지 않는다.
2) 비중의 최소값은 부유식 하한/(부유식 하한+고정식 상한), 최대값은 부유식 상한/(부유식 상한+고정식 하한)으로 산정하였다.
3) 부유식 비중은 형식별 물량이 제시된 경쟁입찰 24GW를 기준으로 산정하였으며, 형식이 구분되지 않은 발전지구 경쟁입찰 4GW는 제외하였다.

자료: 기후에너지환경부(2026)를 바탕으로 저자 작성.

2026~2030년 경쟁입찰 물량 전체에서 부유식이 차지하는 비중은 12.5%이다. 다만 회차별 물량이 범위로 제시되어 있어 부유식 비중은 상당한 범위에서 변동할 수 있으며, 고정식과 부유식의 상·하한을 교차 적용하면 약 7.1~43.5%의 범위가 나타난다. 특히 2030년 입찰에서는 부유식 비중이 최대 28.6%까지 가능하다. 이러한 범위는 정부가 장기적인 기초형식별 보급목표를 제시하지 않은 상황에서 향후 부유식 비중을 설정하기 위한 참고 기준으로 활용하였다.

2035년 정부 목표 25GW의 형식별 용량은 기준 리드타임을 적용한 2035년 기초형식별 준공 구성비를 기준으로 구분하였다. 앞 절의 준공 전망에 따르면 기준 리드타임 적용 시 2035년 누적 준공용량 18.4 GW는 고정식 16.6 GW와 부유식 1.9 GW로 구성되며, 구성비는 각각 89.8%와 10.2%이다.[9] 본 연구는 25 GW 목표 달성을 위한 사업기간 단축이 고정식과 부유식에 유사하게 작용한다고 가정하고, 이 구성비를 정부 목표 25 GW에 적용하였다. 이에 2035년 보급용량은 고정식 22.4 GW, 부유식 2.6 GW로 설정하였다.

9 2026~2030년 입찰물량에서의 부유식 비중 12.5%와 2035년 보급용량의 부유식 비중 10.2%는 서로 다른 개념으로, 전자는 입찰물량 기준이고 후자는 형식별 리드타임을 반영한 준공용량 기준이다.

2031년 이후 입찰물량은 정부가 고정식과 부유식의 구분을 제시하지 않아 별도의 가정이 필요하다. 본 연구에서는 2031년 이후 공고물량의 30%를 부유식으로 가정하였다. 이는 표 11에서 확인되는 2030년 입찰의 부유식 비중 상단 28.6%를 반올림한 값으로, 현재 정부 계획에서 확인 가능한 부유식 비중의 상단 수준을 참고하여 설정한 것이다. 이 가정은 2050년 정부 로드맵 완전 이행 경로의 2031~2035년 입찰물량과 탄소중립 경로의 추가 보급 물량에 공통적으로 적용하였다.[10]

2050년 정부 로드맵 완전 이행 경로는 기존 설치·선정 물량과 2026~2035년 입찰물량이 모두 준공되는 경우를 가정하였다. 2026~2030년에는 정부가 제시한 형식별 입찰물량을 적용하고, 2031년 이후에는 부유식 비중 30% 가정을 적용하였다. 그 결과 2050년 누적 59.4 GW 가운데 고정식은 47.4 GW, 부유식은 12.0 GW로 산정되며, 부유식 비중은 20.2%이다.

2050년 탄소중립 경로는 K-Map 2.0의 총량 98 GW 가운데 로드맵 완전 이행 물량 59.4 GW를 우선 반영하고, 이를 초과하는 38.6 GW에도 동일한 부유식 비중 30%를 적용하였다. 이에 추가 물량 38.6 GW 중 약 11.6 GW를 부유식으로 배분하였으며, 최종적으로 고정식 74.4 GW, 부유식 23.6 GW로 설정하였다. 전체 98 GW에서 부유식이 차지하는 비중은 24.1%이다.

표 12는 이상의 가정을 바탕으로 각 목표 및 시나리오의 고정식·부유식 보급용량과 비중, 설정 근거를 정리한 것이다.

[표 12] 고정식·부유식 해상풍력 보급용량 설정

구분	총용량	고정식	부유식	부유식 비중	설정 근거
2035년 정부 목표	25.0 GW	22.4 GW	2.6 GW	10.2%	정부 총량 목표에 리드타임 반영 준공 구성비(고정 89.8%, 부유 10.2%)를 적용
2050년 정부 로드맵 완전 이행 경로	59.4 GW	47.4 GW	12.0 GW	20.2%	기존·선정물량 및 2026~2035년 입찰물량의 전량 준공, 2031년 이후 부유식 비중 30% 가정
2050년 탄소중립 경로	98.0 GW	74.4 GW	23.6 GW	24.1%	K-Map 2.0 총량; 로드맵 초과분 38.6 GW에 부유식 비중 30% 가정

주: 1) 형식별 보급용량은 정부의 공식 목표가 아니라 기존 물량, 입찰계획 및 리드타임을 반영한 본 연구의 추정치이다.
2) 부유식 비중은 반올림 전 값을 기준으로 산정하였다. 표기된 용량은 소수점 첫째 자리에서 반올림한 값이므로 표기 값으로 재계산한 비중과 미세한 차이가 있을 수 있다.

이하에서는 표 12의 기초형식별 보급용량에 적용할 설비용량 밀도를 설정하기 위해, 국내 해상풍력단지 자료를 바탕으로 실제 밀도 수준과 주요 특성을 검토한다. 이를 토대로 국내 적용 설비용량 밀도 시나리오를 설정하고, 각 보급목표 달성에 필요한 해양공간 수요를 산정한다.

10 부유식은 계류·앵커 등 추가적인 공간 이용을 고려해야 하며, 심해역 수요에 영향을 미치는 주요 가정이다. 본 연구에서 로드맵 초과분의 부유식 비중을 30%로 설정한 것은 장기적인 부유식 확대 가능성을 반영하는 동시에 해양공간 수요를 과소 추정하지 않기 위한 것이다. 다만 이는 정부의 공식 기술별 보급목표가 아니며, 실제 부유식 보급 수준은 기술 상용화, 공급망, 항만·설치선박 및 계통 여건 등에 따라 달라질 수 있다.

2) 국내 해상풍력 단지 자료 검토

2026년 9월 기준, 국내 해상풍력단지는 상업운전 중 5개, 착공 중 2개, 환경영향평가(EIA) 및 해역이용평가 완료 28개, 환경영향평가 협의 중 2개 등 총 37개로 파악된다. 이 중 상업운전 중인 제주 탐라와 전남 영광 해상풍력단지, 환경영향평가를 완료한 신안 압해 해상풍력단지는 일자형 배치 구조로 인해 설비용량 밀도 산정에 적합하지 않다고 판단하여 분석 대상에서 제외하였다.[11] 이에 따라 총 설비용량 14.28 GW에 이르는 34개 단지를 조사 대상으로 선정하였으며, 기초형식별로는 고정식 25개와 부유식 9개로 구성된다. 표 13은 분석 대상 단지를 추진 단계별로 분류한 결과이며, 개별 단지의 세부 자료는 부록 II에 수록하였다.

[표 13] 국내 해상풍력 단지 분류

추진 단계	단지 수	용량(MW)
상업운전 (터빈 배열·좌표)	3	256
착공	2	755
EIA 및 해역이용평가 완료	27	11,803
EIA 협의 중	2	1,470
총	34	14,284

단지 면적은 터빈 좌표와 배열 정보를 활용하여 산정한 실제 개발 면적을 우선적으로 적용하였다. 다만 이러한 정보는 대체로 사업이 구체화되거나 상업운전 단계에 가까워져야 확인할 수 있어, 자료가 없는 경우에는 공유수면 점용·사용 면적 또는 사업계획상의 부지 면적을 활용하였다. 공유수면 점용·사용 면적은 사업별 적용 범위와 정의가 일관되지 않으므로, 실제 단지 전체 면적을 대표하지 못한다고 판단되는 값은 분석에서 제외하였다. 따라서 이하의 국내 밀도 통계는 서로 다른 사업 단계와 면적 자료를 바탕으로 산정된 잠정치라는 점에 유의할 필요가 있다.

국내 DB의 전체 설비용량 밀도는 가중평균 6.39 MW/km²로 산정되었다(표 14). 개별 단지의 밀도는 최소 4.69 MW/km²인 문무바람과 울산 한국부유식·이스트블루파워 해상풍력단지에서 최대 21.43 MW/km²인 제주 한림 해상풍력단지까지 비교적 넓게 분포하였다.

[표 14] 국내 해상풍력 설비용량 밀도 통계

MW/km²	주요 분석 대상(n=34)
최솟값	4.69
평균(가중평균)	6.39
최댓값	21.43

11 Borrmann et al. (2018)에서도 일자형 배치구조를 제외하였다.

기초형식별로는 고정식 단지의 가중평균 밀도가 7.16 MW/km², 부유식 단지가 5.50 MW/km²로 나타났다(표 15). 부유식은 계류선과 앵커 설치를 위한 추가 공간이 필요하므로 고정식보다 밀도가 낮아질 가능성이 있다. 다만 국내 부유식 표본은 통합 기준 5개에 불과하고 모두 대규모 계획사업이므로, 이러한 차이를 기초형식만의 영향으로 단정하기는 어렵다.

[표 15] 기초형식별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34)

구분	단지 수	가중평균 (MW/km²)	범위 (MW/km²)
전체	34	6.39	4.69~21.43
고정식	25	7.16	5.00~21.43
부유식	9	5.50	4.69~6.25

단지 규모별로도 밀도 차이가 확인되었다. 가중평균 밀도는 면적 50 km² 미만 단지에서 10.27 MW/km², 50~150 km²에서 6.51 MW/km², 150~300 km²에서 4.85 MW/km²로 감소하였다(표 16). 설비용량 구간에서는 200 MW 미만 단지가 11.94 MW/km²로 높았을 뿐, 200~500 MW(6.45 MW/km²)와 500~1000 MW(6.37 MW/km²)는 차이가 크지 않았다(표 17). 다만 구간별 표본이 적어 용량 자체의 영향은 사례가 축적된 이후 재확인할 필요가 있다.

단지 면적과 명목 설비용량 밀도의 상관계수는 –0.61로, 단지 면적이 커질수록 밀도가 낮아지는 경향이 나타났다. 그림 4의 점선은 34개 단지의 면적을 로그 변환하여 밀도와의 관계를 나타낸 선형 추세선으로, 이러한 전반적인 경향을 보여준다. 이는 대규모 계획입지의 해양공간 수요를 산정할 때 소규모 단지에서 관찰되는 높은 밀도값을 그대로 적용하는 데 주의가 필요함을 시사한다.

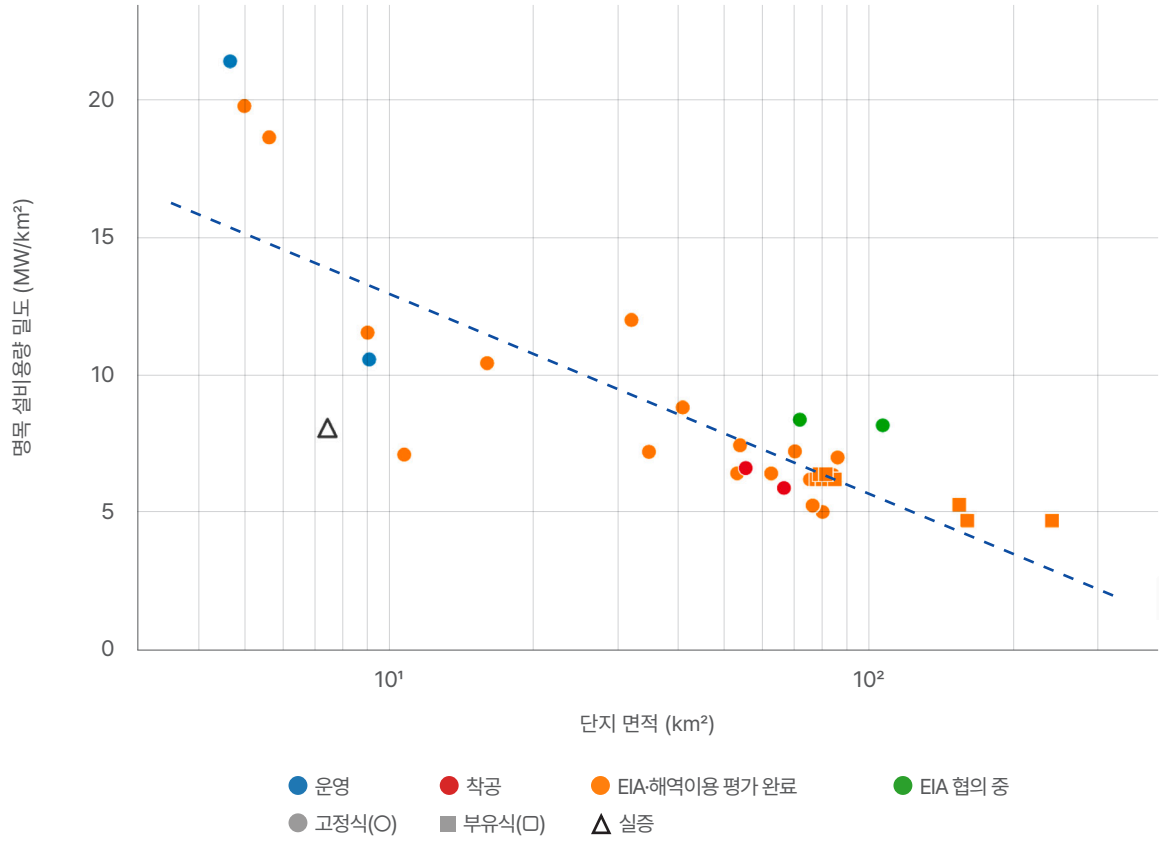
[표 16] 단지 면적 구간별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34)

단지 면적 구간	단지 수	가중평균 (MW/km²)	구간 내 설비용량 범위 (MW)
50 km² 미만	11	10.27	60~384
50~150 km²	20	6.51	340~870
150~300 km²	3	4.85	750~1,125

[표 17] 설비용량 구간별 설비용량 밀도 (국내 DB, n=34)

설비용량 구간	단지 수	가중평균 (MW/km²)	구간 내 면적 범위 (km²)
200 MW 미만	8	11.94	4.67~16.00
200~500	15	6.45	32.00~80.00
500~1000	10	6.37	70.00~160.00
1000 MW 이상	1	4.69	240.00

[그림 4] 국내 해상풍력단지 면적과 설비용량 밀도의 관계



주: 1) 본 연구 DB에 포함된 상업운전 단지는 전북 서남권 실증단지를 포함해 총 3건이다. 따라서 국내 상업운전 사례가 제한적인 점을 고려하여 해외사례 분석과 달리 실증단지를 분석에 포함하였다.

2) 점선은 34개 단지의 로그 선형 추세선이다.

자료: 본 연구 국내 해상풍력단지 DB (n=34).

터빈 정격용량과 명목 밀도는 음의 상관관계(r=-0.48)를 보였으나, 이는 대형 터빈이 주로 대형 단지에 적용되는 데 따른 규모 효과로 판단된다. 단지 면적을 통제하면 두 변수 간 관계는 통계적으로 유의하지 않았다. 일반적으로 터빈이 대형화되면 로터 직경에 비례해 이격거리도 증가하므로 밀도는 크게 변하지 않는다. 다만 이격거리가 고정된 경우에는 대형 터빈 적용이 밀도 증가로 이어질 수 있다(Hernando et al., 2023). 공시지가와 명목 밀도는 양의 상관을 보이나 점·사용료 부담에 따른 실질적 고밀 배치인지 소규모 사업의 지표 편향인지는 명목 밀도로는 정확하게 식별되지 않는다.[12]

국내 DB는 현재 추진 중인 사업의 규모와 설비용량 밀도 분포를 파악하는 데 유용하지만, 그 가중평균값을 국내 해상풍력의 대표 밀도로 직접 적용하는 데에는 한계가 있다. 최종 분석 대상 34개 단지 중 상업운전 중인 단지는 3개에 불과하

12 Hernando et al. (2023)은 임대구역의 총가격과 면적당 가격이 높을수록 설비용량 밀도가 높아지는 경향을 확인하였다. 높은 임대비용이 동일 면적에 더 많은 설비를 배치하려는 유인으로 작용할 수 있으나, 터빈 이격거리와 인허가 조건 등 다른 요인의 영향도 크므로 직접적인 인과관계로 해석하기는 어렵다.

며, 나머지 대부분은 착공 또는 환경영향평가 단계에 있어 사업 추진 과정에서 터빈 배치, 단지 면적 및 설비용량이 변경될 수 있다. 상업운전 예정 시점(COD)이 확인되는 단지도 23개에 그치며, 나머지 8개는 구체적인 일정이 제시되지 않았다. 따라서 국내 DB의 가중평균 밀도인 6.39 MW/km²는 확정된 운영 실적이라기보다 현재 공개된 사업계획을 기준으로 산정한 잠정치로 해석할 필요가 있다.

명목밀도를 기준으로 하면 국내 DB의 가중평균 6.39 MW/km²는 해외 DB의 4.34 MW/km²보다 약 47.2% 높아 국내 단지가 상대적으로 조밀하게 계획된 것으로 보인다. 그러나 국내외 단지마다 면적의 정의와 산정 기준이 달라 이를 실제 배치 밀도의 차이로 해석하기는 어렵다. 보다 일관된 비교를 위해서는 유사한 면적 규모의 단지를 비교하거나, 제1장에서 제시한 들로네 삼각분할과 외곽부 보정을 적용한 보정밀도를 활용할 필요가 있다.[13]

국내 단지 DB는 환경영향평가 협의 단계 이상으로 면적 등 세부 정보가 확보된 사업으로 구성하였으며, 발전사업허가만 받은 단지는 제외하였다. 다만 향후 입찰 대상 단지의 규모와 추세를 파악하기 위해 전체 허가 단지를 별도로 분석한 결과, 최근 약 5년간(2021년 이후) 허가된 단지의 87%가 200 MW 이상이며, 평균 설비용량은 375 MW로 2021년 이전(163 MW)의 2.3배에 해당한다. 밀도 시나리오 설정 시 이러한 단지 대형화 추세를 고려하였다(부록 II, 표 34, 그림 8).

3) 국내 정책과 해상풍력 면적 활용

본 절에서는 국내 정책과 규제가 해상풍력의 가용면적과 실제 적용 가능한 설비용량 밀도에 미치는 영향을 검토한다. 설비용량 밀도는 동일한 면적에 설치할 수 있는 발전설비의 규모를 나타내며, 터빈 이격거리의 영향을 크게 받는다. 국내에는 단지 내부의 터빈 간 최소 이격거리를 일률적으로 적용하는 기준이 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 해상풍력의 공간 활용에 영향을 미치는 주요 국내 정책·규제를 크게 세 가지 측면으로 구분하여 검토하였다.

① 항로 이격기준에 따른 개발 가능 면적 감소

「해상교통안전법」에 따른 해상교통안전진단에서는 선박의 안전한 통항을 위해 항로와 해상풍력단지 사이에 일정한 거리를 확보하도록 하고 있다. 이격거리는 선박의 크기와 항로 조건에 따라 달라지며, 대형 선박이 통항하는 주요 항로에서는 상당한 면적이 터빈 배치에서 제외될 수 있다(박윤석, 2022).

개발 가능 면적이 줄어들면 사업자는 터빈 수와 단지 설비용량을 줄이거나, 기존 용량을 유지하기 위해 터빈을 더 촘촘하게 배치해야 한다. 그러나 터빈을 지나치게 조밀하게 배치하면 후류 손실이 증가하여 실제 발전량이 감소할 수 있다. 따라서 항로 이격 기준은 개발 가능한 해역뿐 아니라 해당 해역에서 확보할 수 있는 설비용량과 발전량에도 영향을 미친다.

13 보정밀도 산정이 가능한 국내 3개와 해외 11개 단지의 가중평균은 각각 6.07 MW/km²와 5.90 MW/km²로, 국내가 2.9% 높았다. 이는 명목밀도 기준 격차(52.1%)보다 크게 축소된 결과이나, 국내 표본이 적고 값의 편차(4.22~14.29 MW/km²)가 커 일반화에는 한계가 있다.

② 군 작전성 검토와 공급망 정책에 따른 터빈 선택 및 공간 활용 제약

설비용량 밀도는 적용 터빈의 정격용량뿐 아니라 터빈 수와 배치 조건에 따라 달라지므로, 터빈 크기와 기종의 선택을 제약하는 요인은 단지의 공간 활용에 직접적인 영향을 미친다. 국내에서는 군 작전성 검토와 공급망 정책이 이러한 터빈 선택에 영향을 미치는 주요 요인으로 작용한다.

「군사기지 및 군사시설 보호법」에 따른 행정기관 처분 협의 과정에서는 해상풍력 사업이 군사작전에 미치는 영향을 검토한다. 군 작전성 검토에서는 해상풍력발전기의 위치와 높이 등이 군 레이더 및 감시체계 등에 미치는 영향 등을 확인한다. 이 과정에서 제시되는 500피트(152.4 m) 높이 제한은 모든 사업에 일률적으로 적용되는 법정 기준이 아니라 개별 사업의 협의 과정에서 제시되는 검토 조건이다.

신안 우이 해상풍력 사업은 당초 군에서 발전기 높이를 500피트 이하로 낮출 것을 요구하면서 15MW급 대형 터빈 적용에 어려움이 예상되었다. 그러나 사업자가 보완레이더 설치를 통해 차폐 문제 해소방안을 제시하여 국방부와 조건부 합의에 이르렀고, 현재 신안 우이는 계획된 규모를 유지하며 2026년 7월 착공에 들어갔다(김대훈, 2026). 반면 영광 안마 해상풍력 사업은 사업 부지가 군 관련 부지와 중첩되면서 국방부와 협의에 어려움을 겪었고, 관련 인허가 절차가 지연되었다. 이후 하부구조물 공급계약이 일시 중단되고, 터빈 공급계약 기간이 만료되는 등 당초 계획한 사업 추진의 불확실성이 커지고 있다(이경주, 2026).

공급망 정책도 터빈 기종 선택에 영향을 미칠 수 있다. 과거에는 국산 부품 사용 비율에 따라 추가 REC 가중치를 부여하였으나, 해당 제도는 EU의 통상 압박 등을 배경으로 2023년에 폐지되었다. 현재 해상풍력 경쟁입찰에서는 국내 투자·고용 및 공급망 기여 등을 평가하고 있어, 이러한 기준이 사업자의 터빈 기종 선택에 영향을 줄 수 있다. 본 연구 DB에 포함된 상업운전 단지의 경우 국산 터빈의 최대 정격용량은 두산에너빌리티(Doosan Enerbility)의 5.56 MW로, 국제적으로 상용화된 15 MW급과는 상당한 격차가 있다.[14]

군 작전성 검토나 공급망 정책의 영향으로 상대적으로 작은 터빈을 선택하게 되더라도, 배치를 자유롭게 조정할 수 있다면 터빈 수를 늘려 단지의 설비용량 밀도를 유사한 수준으로 유지할 수 있다. 그러나 이 경우 더 많은 터빈과 기초구조물, 해저케이블 등이 필요해져 자본비용과 유지비용이 증가하며, 이는 균등화발전비용(LCOE, Levelized Cost of Energy)[15]을 상승시키는 요인으로 작용한다. 또한 터빈 수 증가에 따른 후류손실이나 대형 터빈의 높은 허브 높이와 넓은 로터가 제공하는 이점을 충분히 활용하지 못해 같은 면적에서 생산되는 발전량이 감소할 경우, 이 역시 LCOE를 상승시키는 요인이 된다.

14 2026년 기준 국내 해상풍력단지에 설치된 터빈 가운데 단일 터빈의 최대 정격용량은 9.6 MW로, 지멘스가메사(Siemens Gamesa) 제품이다. 국산 터빈 중 최대 정격용량은 5.56 MW로, 두산에너빌리티(Doosan Enerbility) 제품이다. 또한 환경영향평가 협의를 완료하고 터빈 공급계약을 체결한 단지 가운데 최대 정격용량은 15 MW로, 베스타스(Vestas) 제품이 적용될 예정이다. 한편 두산에너빌리티와 유니슨(Unison) 등 국내 기업도 10 MW급 터빈 기술을 확보하였으나, 아직 상용화 실적은 없다.

15 균등화발전비용(LCOE)은 프로젝트 수명 동안 발생하는 비용의 현재가치를 같은 기간 발전량의 현재가치로 나눈 값이다.

반면 터빈의 위치와 개수가 이미 확정되어 배치를 조정하기 어려운 사업에서는 터빈의 정격용량이 낮아질 경우 단지의 총설비용량과 설비용량 밀도가 함께 감소할 수 있다.

두 경우 모두 동일한 설비용량 또는 발전량 목표를 달성하기 위해 추가적인 해양공간을 필요로 하며, 해양공간 이용 효율을 저하시킬 수 있다. 다만 이러한 영향이 나타나는 방식과 정도는 사업 단계와 터빈 수·배치의 조정 가능성에 따라 달라진다.

③ 전력망 접속 제약

전력망 접속 여건은 해상풍력 사업의 실현 가능성을 좌우하는 중요한 요인이다. 접속 가능 용량이 부족하거나 계통 보강이 지연되면, 개발 가능한 해역이 충분하더라도 계획한 설비용량을 제때 접속·운영하기 어렵다. 전력망 제약은 터빈 간격이나 단지 면적을 직접 결정하지는 않지만, 실제 설치 가능한 용량과 사업 일정, 출력제한 가능성에 영향을 미친다. 표 18은 이상의 주요 정책·규제 요인이 해상풍력의 공간 활용에 미치는 영향을 영향 대상별로 정리한 것이다.

[표 18] 국내 정책·규제가 해상풍력 공간 활용에 미치는 영향

영향 대상	주요 정책·규제 요인	해상풍력 공간 활용에 미치는 영향
개발 가능 면적	항로 이격기준	터빈 배치 가능 면적 감소, 설비용량 축소 또는 조밀한 배치 유도
터빈 크기·기종	군 작전성 검토, 공급망·산업 기여도 평가	대형 터빈 및 기종 선택에 영향, 터빈 수·비용·발전량 변화
사업 실현	전력망 접속 용량과 보강 시기	실제 설치용량과 준공 시기, 출력제한 가능성에 영향

종합하면, 항로 이격기준은 개발 가능한 해역을 축소하고, 군 작전성 검토와 공급망 정책은 터빈의 크기와 기종 선택에 영향을 미친다. 이러한 제약은 단지의 배치 여건에 따라 동일한 면적에서 확보할 수 있는 설비용량이나 발전량을 감소시킬 수 있으며, 경우에 따라 국가 해상풍력 보급목표 달성을 위해 해양공간의 소요 면적을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이는 어업·항행·환경보전 등 다른 해양 이용과의 공간 경합을 심화시킬 수 있다. 반면 전력망 접속 제약은 필요한 해역을 직접 늘리기보다는 계획한 설비용량의 접속·운영 시기를 늦춰 지정된 해역의 실제 활용을 제한한다. 따라서 계획입지 단계에서는 군 작전성, 터빈 조달 및 계통 접속 등의 고려 요소 등을 사전에 검토하여, 실제 개발 가능한 면적과 적용 가능한 설비용량 밀도, 사업 실현 가능성을 종합적으로 판단할 필요가 있다.

다음 절에서는 국내외 사례와 이러한 정책 여건을 종합하여 설비용량 밀도 시나리오를 설정한다.

4) 국내 해상풍력 설비용량 밀도 시나리오 설정

해상풍력 설비용량 밀도는 하나의 고정된 기술값이 아니라 단지 규모와 기초형식, 터빈 배치와 이격거리, 인접 단지의 후류 영향, 면적 산정 기준 및 해양공간 규제 등이 복합적으로 작용하여 결정된다. 국내 해상풍력사업은 대부분 계획 또는 인허가 단계에 있어 향후 터빈 배열과 사업구역이 변경될 가능성도 크다. 따라서 현재 관찰되는 평균 밀도를 장기 전망에 일률적으로 적용하기보다, 국내외 사례에서 확인되는 밀도 범위와 미래 개발 여건을 반영한 시나리오 접근이 필요하다.

본 연구의 밀도 시나리오는 개별 단지의 최적 터빈 배치를 예측하기 위한 기술설계값이 아니라, 국가 해상풍력 보급목표를 수용하기 위해 어느 정도의 해양공간을 발전지구로 확보해야 하는지를 추정하기 위한 계획지표이다. 이를 위해 먼저 국내외 단지에서 관찰되는 사업면적 기준의 기본밀도(D_{base})를 시나리오별로 설정하고, 발전지구 지정 단계에서 추가로 필요한 공간을 반영하여 유효밀도($D_{effective}$)로 환산하였다.

(1) 시나리오 분석 구조: 기본밀도와 유효밀도

해상풍력의 공간 범위는 터빈 배열면적 < 사업면적 < 발전지구 지정면적의 세 층위로 구분할 수 있다.[16] 국내외 해상풍력 단지에서 일반적으로 확인되는 설비용량 밀도는 대부분 사업면적을 분모로 산정된다. 본 연구에서는 이러한 사업면적 기준 설비용량 밀도를 기본밀도(D_{base})로 정의하였다.

그러나 국가 차원에서 확보해야 하는 발전지구의 면적은 개별 사업면적의 단순 합계보다 커질 수 있다. 발전지구에는 개별 사업구역 외에도 외곽 완충공간, 사업구역 간 여유공간, 공용 케이블 및 회랑, 불규칙한 경계 등 실제 발전설비 배치에 활용되지 않는 공간이 포함될 수 있기 때문이다. 부유식 해상풍력의 경우에는 계류선과 앵커 배치로 인한 추가 공간도 고려할 필요가 있다. 이러한 사업면적과 발전지구 지정면적 간의 차이는 기본밀도에 포함하지 않고, 계획입지 여유계수(F_{zone})와 부유식 계류계수($F_{mooring}$)를 통해 별도로 반영하였다.

따라서 발전지구 지정면적 기준의 유효밀도($D_{effective}$)는 다음과 같이 산정된다.

$$\text{고정식 해상풍력 단지 유효밀도} : D_{effective} = \frac{D_{base}}{F_{zone}}$$

$$\text{부유식 해상풍력 단지 유효밀도} : D_{effective} = \frac{D_{base}}{F_{zone} \times F_{mooring}}$$

16 터빈 배열면적, 사업면적, 발전지구 지정면적은 포함하는 공간의 범위가 서로 다르며, 구체적인 포함 요소는 사업과 면적 산정 기준에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 이를 고려하여 개별 사업면적 안에서 이미 반영된 공간 이용 특성과, 발전지구 지정 단계에서 추가로 고려해야 할 공간을 구분하여 반영하였다. 터빈 간 이격거리와 후류 영향을 고려한 배치 등 단지 내부의 공간 이용 특성은 실제 사업면적을 기준으로 산정한 기본밀도에 반영된 것으로 보았다. 반면 발전지구를 지정할 때는 개별 사업면적 외에도 외곽 여유공간, 단지 간 간격, 공용 회랑 등이 추가로 필요할 수 있으며, 부유식의 경우 계류설비에 따른 추가 공간 수요도 발생할 수 있다고 가정하였다. 이러한 추가 공간은 계획입지 여유계수와 부유식 계류계수를 통해 별도로 반영하였다. 이는 동일한 공간 요소가 기본밀도와 추가 계수에 중복 반영되는 것을 최소화하기 위한 분석상의 구분이다.

최종적으로 목표 설비용량을 유효밀도로 나누어 해당 목표를 수용하기 위해 필요한 발전지구 지정면적을 산정한다.

$$\text{발전지구 지정 면적}(km^2) = \frac{\text{목표 설비용량}(MW)}{D_{effective}(\frac{MW}{km^2})}$$

본 연구에서는 보수(저밀도·고여유)·기준·공간효율화(고밀도·저여유) 시나리오를 설정하여 기본밀도와 발전지구 추가 면적에 대한 가정값을 각각 다르게 설정하였다. 기본밀도는 국내외 사례에서 관찰되는 밀도 수준을 바탕으로 보수 시나리오에는 하단값, 기준 시나리오에는 대표값, 공간효율화 시나리오에는 상단값을 적용하였다. 반면 계획입지 여유계수는 추가 공간이 클수록 값이 증가하므로 보수 시나리오에는 상단값, 기준 시나리오에는 대표값, 공간효율화 시나리오에는 하단값을 적용하였다. 부유식 계류계수 역시 보수 및 기준 시나리오에 각각 상단값과 대표값을 적용하였다. 이렇게 설정한 계수를 기본밀도에 적용하여 시나리오별 유효밀도를 산정하였다. 시나리오별 설계 원칙은 표 19와 같다.

[표 19] 시나리오 설계 원칙

구분	분석 기준	보수 시나리오	기준 시나리오	공간효율화 시나리오
기초형식	고정식·부유식 특성 구분	고정식·부유식	고정식·부유식	고정식
① 기본밀도 설정	사업구역 내부의 공간 이용효율	국내외 대형·저밀도 사례를 반영한 낮은 사업면적 기준밀도	현재 국내 계획사업에서 관찰되는 대표적인 사업면적 기준밀도	터빈 배치 최적화 및 밀도 하한 적용을 전제로 한 높은 사업면적 기준밀도
② 계획입지 여유	사업구역 외 발전지구 내 추가 공간	복수 사업구역의 분할 개발, 사업구역 간 여유공간, 외곽 완충 및 불규칙한 경계 등을 보수적으로 반영[17]	평균적인 계획입지 여유 적용	정형화된 구역 및 공용시설 배치를 통해 추가 공간을 최소화
③ 부유식 계류	계류설비로 인한 추가 공간	계류방식·앵커 배치의 불확실성을 보수적으로 반영	대표적인 계류조건 적용	자료 부족으로 미설정

주: 기본밀도는 개별 사업구역 내부의 공간 이용효율을 나타내며, 유효밀도 환산계수는 사업구역 외 발전지구 차원에서 추가로 필요한 공간을 반영한다.

17 발전지구 내 인접 단지에 의한 후류 간섭은 별도로 계량하지 않았다. 사례자료에서 산정한 기본밀도에는 이러한 영향이 일부 반영되어 있을 가능성이 있으나, 실제 영향은 단지 간 거리와 배치 형태 등에 따라 달라질 수 있다.

(2) 사업면적 기준 기본밀도(D_{base}) 시나리오

첫 번째 단계에서는 국내외 해상풍력단지 DB에서 관찰되는 사업면적 기준 설비용량 밀도를 바탕으로 시나리오별 기본밀도를 설정하였다. 기본밀도 시나리오는 단지 규모와 기초형식, 국내 계획사업에서 관찰되는 밀도 수준 및 해외 사례를 종합하여 설정하였다. 기본밀도 설정에 활용한 국내외 통계와 참고값은 표 20과 같다.[18]

[표 20] 시나리오 설정의 통계적 근거

근거 자료	밀도(MW/km²)	시나리오 활용
국내 고정식 50 km² 이상	6.63	중대형 계획단지의 대표값
국내 고정식 200 MW 이상	6.88	최근 허가단지의 용량 규모와 유사
해외 50~150 km²	6.59	국내외 중규모 단지 값의 교차검증
국내 150~300 km²	4.85	대형 단지의 보수적 관측값
NREL 사업 미확정 구역	4.00	계획 초기 단계의 보수적 기준
국내 부유식 단지	5.50	부유식 기준 시나리오
Hywind Tampen	4.19	해외 상업 규모 부유식 참고 사례

기준 시나리오의 고정식 기본밀도 6.5 MW/km²는 국내 고정식 50 km² 이상 단지의 가중평균 6.63 MW/km², 200 MW 이상 단지의 6.88 MW/km² 및 해외 50~150 km² 단지의 6.59 MW/km²가 유사한 수준으로 수렴한다는 점에 근거한다. 최근 발전사업허가 단지의 용량분포를 국내 규모 구간별 밀도에 적용한 결과도 약 6.5~6.9 MW/km²로 나타나 기준값의 타당성을 뒷받침한다.

보수 시나리오의 고정식 기본밀도 4.5 MW/km²는 국내 150~300 km² 단지의 가중평균인 4.85 MW/km²와 NREL이 사업계획이 확정되지 않은 구역에 적용하는 4.0 MW/km²를 함께 고려하여 설정하였다(Hernando et al., 2023). 이는 국내외 대형·저밀도 사례에서 관찰되는 사업면적 기준밀도의 하단을 반영한 값으로, 후류손실을 방지하기 위한 이격거리 등으로 인해 내부 터빈 배치의 공간 효율이 낮아지는 경우를 대표한다.

공간효율화 시나리오의 고정식 7.5 MW/km²는 국내 고밀도 사례와 네덜란드의 밀도 규정 범위인 6.05~8.02 MW/km²를 참고한 조건부 정책 시나리오이다. 이는 미래 해상풍력단지의 일반적인 평균값을 의미하지 않으며, 밀도 하한 기준과 터빈 배치 최적화 등을 통해 사업구역 내부의 공간 이용효율을 높이는 경우에 한정하여 적용한다.

부유식은 국내 계획단지의 가중평균인 5.5 MW/km²를 기준값으로 적용하였다. 보수값 4.5 MW/km²는 국내 최저 관측치 4.69 MW/km²와 해외 상업 규모 참고사례인 Hywind Tampen의 4.19 MW/km²를 함께 고려하였다. 다만 국내

18 단지 규모와 명목 설비용량 밀도 사이에서 관찰되는 음의 관계를 시나리오 범위 설정의 경험적 근거로 활용하되, 단지 대형화 자체가 밀도 하락을 직접 유발하는 인과관계로 해석하지 않았다.

표본이 울산권의 소수 통합사업에 집중되어 있고 실제 계류선과 앵커 배치자료도 충분하지 않으므로 별도의 공간효율화 시나리오는 설정하지 않았다.

이상의 기본밀도 시나리오는 표 21과 같다.

[표 21] 사업면적 기준 기본밀도(D_{base}) 시나리오

구분	보수	기준	공간효율화	설정 근거
계획 조건	대형 발전지구의 후류·이격 영향 반영	현재 계획사업의 대표 조건	밀도 하한 적용 및 배치 최적화	• 공간효율화는 미래 평균이 아니라 정책적 상단
고정식 (MW/km²)	4.5	6.5	7.5	• 4.5: 국내 대형구간 4.85와 NREL 계획기준 4.0 고려 • 6.5: 국내 중대형 단지 6.63~6.88, 해외 50~150 km² 6.59 • 7.5: 국내 상단 관측치와 네덜란드 6.05~8.02 범위
부유식 (MW/km²)	4.5	5.5	—	• 4.5: 국내 최저 4.69와 Hywind Tampen 4.19 참고 • 5.5: 국내 부유식 계획단지 가중평균 • 공간효율화 시나리오는 근거 부족으로 미설정

자료: 본 연구 국내외 해상풍력 DB; Borrmann et al. (2018); Hernando et al. (2023); Hernando et al. (2024).

(3) 발전지구 지정면적 기준 유효밀도($D_{effective}$) 환산

앞서 설정한 기본밀도는 국내외 DB에서 확인되는 개별 사업면적을 기준으로 한다. 따라서 발전지구 지정면적을 산정하기 위해 사업면적 외 추가 공간을 반영하여 기본밀도를 유효밀도로 환산하였다.

이에 따라 사업면적 외 추가 공간을 반영하는 계획입지 여유계수와 부유식 계류선 및 앵커 설치에 따른 추가 공간을 반영하는 계류계수를 적용하였다. 두 계수는 보편적인 기술상수가 아니라, 국내 사례와 선행연구를 바탕으로 설정한 계획단계의 민감도 가정이다. 또한, 해당 공간이 사업면적에 이미 포함된 경우에는 해당 계수를 1.0으로 적용하여 이중계상을 방지한다.

계획입지 여유계수는 국내 1개(제주 한림)와 해외 11개 단지의 관측치를 참고하여 보수 1.20, 기준 1.10, 공간효율화 1.05로 설정하였다(표 22). 보수 시나리오는 외곽 완충공간, 사업구역 사이의 공간 및 불규칙한 경계 등에 따른 추가 면적을 상대적으로 크게 가정하고, 기준 시나리오는 평균적인 계획입지 여건을 적용한다. 공간효율화 시나리오는 정형화된 구역 설정, 내부 경계 공유 및 공용시설의 계획적 배치를 전제로 추가적인 공간 손실을 최소화하는 경우를 가정한다. 다만 국내 발전지구 지정 실적이 없는 현 단계에서는 확정된 계수가 아니라, 실제 지정면적과 이용률이 확인되기 전까지 적용하는 계획단계의 가정으로 해석할 필요가 있다.

[표 22] 계획입지 여유계수(F_{zone})의 산정 근거

시나리오	여유계수	산정 근거	해석 및 적용
보수	1.20	해외 명목–보정밀도 병기 단지 11개의 총 초과분 분포(약 1.1~1.5)	외곽의 완충공간, 사업구역 간 여유공간, 공용 케이블과 항로 및 회랑, 불규칙한 경계와 터빈 설치가 어려운 위치 등 추가 공간의 상단 민감도
기준	1.10	제주 한림에서 사업계획 지구면적이 좌표 기반 배열면적을 이미 17% 초과(5.47/4.67 = 1.17). 국내 사업면적이 일부 여유공간을 이미 포함하고 있을 가능성을 고려하여, 발전지구 지정까지의 추가 여유 10% 적용	평균적인 계획입지 여건
공간효율화	1.05	정형화된 구역, 내부 경계 공유 및 공용시설 최적화를 전제로 최소한의 추가 여유 적용	구역 형상과 시설 배치가 최적화되는 정책적 상단 조건

부유식에는 계류선과 앵커 설치에 필요한 공간을 반영하기 위해 계류계수를 추가로 적용하였다. Hernando et al. (2024)은 55° taut 계류방식에서 터빈 중심과 구역 경계 간 최소거리를 수심의 0.35배로 제시한다. 다만 해당 분석 수심은 500~3,000m로 국내 예정 해역보다 깊으므로, 본 연구에서는 이를 국내 계류설계의 직접적인 기준이 아니라 면적 증가 규모를 추정하기 위한 참고식으로 활용하였다.

단지 면적을 A의 정사각형으로 단순화하고, 터빈과 경계 간 거리 b를 수심의 0.35배로 적용하면 계류공간을 반영한 면적 증가계수는 다음과 같다.

$$F_{mooring} = \frac{(\sqrt{A} + 2b)^2}{A}$$

국내 대표 단지의 면적 80~240 km²와 수심 130~275 m를 적용하면 계류공간에 따른 면적 증가는 약 1.2~4.4%로 나타난다. 이에 기준계수는 1.05로 상향 반올림하고, 보수계수는 계류방식·앵커 배치·구역 형상의 불확실성을 추가로 고려하여 1.10으로 설정하였다(표 23).

[표 23] 부유식 계류계수($F_{mooring}$)의 산정 근거

부유식	계류계수	산정 근거	적용 원칙
보수	1.10	Taut 계류 적용 시 산정되는 면적 증가에 계류방식·앵커 배치·구역 형상의 불확실성을 추가 반영	실제 계류배치 자료를 확보하지 못한 경우에 적용
기준	1.05	Hernando et al. (2024)의 경계 이격식을 국내 대표 수심과 단지 규모에 적용한 결과를 상향 반올림	계류공간이 사업면적에 포함된 경우 1.0 적용

이상의 두 계수를 각 시나리오의 기본밀도에 적용하면 발전지구 총면적 기준 유효밀도가 도출된다. 유효밀도는 고정식 3.8~7.1 MW/km², 부유식 3.4~4.8 MW/km²로 산정되었으며, 세부적인 환산 결과는 표 24와 같다.

[표 24] 발전지구 지정면적 기준 유효밀도($D_{effective}$)[19]

형식	기본밀도 (MW/km²)	여유계수	계류계수	유효밀도 (MW/km²)	1GW당 면적	적용 조건
고정식 보수	4.5	1.20	1.00	**3.8**	263 km²	낮은 밀도와 보수적 계획입지 여유
고정식 기준	6.5	1.10	1.00	**5.9**	169 km²	현재 대표적인 밀도와 계획입지 여건
고정식 공간효율화	7.5	1.05	1.00	**7.1**	141 km²	밀도 하한 적용과 최소 계획입지 여유
부유식 보수	4.5	1.20	1.10	**3.4**	294 km²	낮은 밀도와 계획입지·계류 불확실성을 보수적으로 반영
부유식 기준	5.5	1.10	1.05	**4.8**	208 km²	현재 자료에서 확인되는 대표 조건

주: 유효밀도는 소수점 둘째 자리에서 반올림한 값이다.

목표 설비용량을 이 유효밀도로 나눈 값이 곧 소요면적이 된다. 다음 절에서는 유효밀도 시나리오를 2035년과 2050년의 고정식·부유식 보급용량에 각각 적용하여, 목표 달성에 필요한 면적의 범위를 산정한다.

19 여유계수와 계류계수는 발전지구 총면적의 불확실성을 보여주는 민감도 계수이다. 실제 발전지구 경계, 터빈 좌표 및 계류배치가 확보되면 사업별 공간자료로 대체해야 하며, 이미 포함된 공간을 다시 가산하지 않는다. Borrmann et al. (2018)의 n* 보정은 단지 간 비교를 위한 외곽부 보정이므로 본 연구의 면적 증가계수와 동일한 방법으로 해석하지 않는다.

5) 보급목표별 해양공간 수요

본 절에서는 앞서 도출한 유효밀도를 2035년과 2050년 해상풍력 보급목표에 적용하여 각 보급목표 시점까지 필요한 누적 해양공간 수요를 산정한다. 고정식과 부유식은 유효밀도가 서로 다르므로 형식별 보급용량을 먼저 구분한 후 각각의 필요 면적을 합산하였다.

2035년 25 GW와 2050년 59.4~98 GW의 보급용량을 고정식과 부유식으로 구분하고(표 25), 앞 절에서 설정한 기초형식별 유효밀도를 적용하여 총 해양공간 수요를 산정하였다. 산정 결과는 각 보급목표 시점까지 전체 보급물량(기존 상업운전 단지와 기선정 사업뿐 아니라 향후 경쟁입찰 및 발전지구)을 동일한 유효밀도 기준으로 환산한 누적 공간 수요이다.[20]

$$총면적_t = \frac{C_{고정식,t}}{D_{effective\ 고정식}} + \frac{C_{부유식,t}}{D_{effective\ 부유식}}$$

여기서 C는 t까지의 누적 보급용량, t는 보급 목표 연도, $D_{effective}$는 발전지구 지정면적 기준 유효밀도를 의미한다.

[표 25] 고정식·부유식 해상풍력 보급용량 가정

구분	총용량	고정식	부유식
2035년 정부 목표	25.0 GW	22.4 GW (89.8%)	2.6 GW (10.2%)
2050년 로드맵 완전 이행	59.4 GW	47.4 GW (79.8%)	12.0 GW (20.2%)
2050년 탄소중립 경로	98.0 GW	74.4 GW (75.9%)	23.6 GW (24.1%)

주: 고정식·부유식 간 보급용량 배분은 정부가 제시한 기초형식별 목표가 아니라, 입찰 일정과 사업 리드타임, 향후 부유식 해상풍력의 확대 가능성을 반영하여 설정한 분석 가정이다. 2031년 이후 입찰 물량 중 부유식 비중을 30%로 가정하였으며, 해당 비중이 달라질 경우 기술별 보급 규모와 해양공간 수요도 달라질 수 있다.

분석 결과, 2035년 보급 목표 달성에 필요한 총 해양공간은 약 3,700~6,660 km²로 산정되며, 기준 시나리오에서는 약 4,340 km²가 필요하다. 2050년에는 로드맵 완전 이행 경로에서 약 9,180~16,000 km², 탄소중립 경로에서는 약 15,400~26,520 km²로 확대된다(표 26).

20 기존 상업운전 단지와 기선정 사업은 실제 사업면적을 확인할 수 있으며, 2035년까지의 입찰물량도 기존 경쟁입찰과 발전지구 경쟁입찰로 구분되어 있다. 다만 2035년 이후에는 개발방식별 계획이 제시되어 있지 않아 장기 보급물량에 서로 다른 면적 기준을 적용하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 2035년과 2050년의 총 해양공간 수요를 동일한 기준으로 비교하기 위해 전체 보급물량에 유효밀도를 적용하였다. 따라서 산정 결과는 개별 사업의 실제 점유면적 합계가 아니라 각 보급목표가 요구하는 해양공간 규모를 동일한 기준으로 환산한 계획상 기준값으로 해석할 필요가 있다. 향후 개발방식별 세부계획이 구체화되면 이를 반영하여 보완할 필요가 있다.

[표 26] 보급목표별 총 해양공간 수요

형식	유효밀도(MW/km²)		필요 면적(km²)		
	고정식	부유식	2035년 (정부 목표)	2050년 (로드맵 완전 이행)	2050년 (탄소중립 경로)
보수	3.8	3.4	약 6,660	약 16,000	약 26,520
기준	5.9	4.8	약 4,340	약 10,530	약 17,530
공간효율화	7.1	4.8*	약 3,700	약 9,180	약 15,400

주: *부유식에는 별도의 공간효율화 밀도를 설정하지 않았으므로 공간효율화 시나리오에도 기준 유효밀도인 4.8 MW/km²를 적용하였다.

이상의 결과는 2035년과 2050년 보급목표 시점까지 필요한 총 해양공간 수요를 나타낸다. 이는 설비용량으로 제시된 보급목표를 공간 규모로 환산하여, 보급 확대에 따라 요구되는 해양공간의 전체적인 규모와 밀도 가정에 따른 변동 범위를 파악하는 데 활용될 수 있다. 발전지구 지정 소요 및 확보 가능성은 다음 장에서 별도로 검토한다.

4. 신규 발전지구 지정 소요 및 확보 가능성

앞 장에서는 기존 단지와 기선정 사업 및 향후 경쟁입찰 및 발전지구를 포함하여 2035년과 2050년 보급목표 달성에 필요한 총 해양공간 수요를 산정하였다. 본 장에서는 이와 구분하여, 향후 계획입지를 통해 새로 지정·확보해야 할 발전지구 면적을 산정하고, 이를 예비지구 가능해역과 비교하여 공간적 확보 가능성을 검토한다.

정부가 2026년 6월 공표한 「해상풍력 중장기 입찰 이행안」은 기존 경쟁입찰을 2033년까지 31 GW 규모로 운영하는 한편, 2029년 하반기부터 발전지구 경쟁입찰을 도입하여 2035년까지 총 24 GW를 공고하는 이원화된 입찰체계를 제시한다. 발전지구 경쟁입찰은 정부가 예비지구와 발전지구를 사전에 지정한 후 사업자를 선정하는 방식이므로, 연도별 입찰에 앞서 해당 물량을 수용할 해양공간을 단계적으로 확보할 필요가 있다. 따라서 본 장에서 2035년은 보급 완료 시점이 아니라 발전지구 경쟁입찰 물량의 공고가 완료되는 시점을 의미한다.

한편 정부는 2035년 이후 발전지구를 포함한 개발방식별 입찰계획을 제시하지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 2035년까지는 정부가 제시한 발전지구 경쟁입찰 물량을 기준으로 실제 지정 필요 면적과 확보 가능성을 검토하고, 2050년은 탄소중립 경로의 추가 보급물량을 발전지구를 통해 공급하는 경우를 가정하여 장기적인 공간 확보 조건을 분석하였다.

1) 발전지구 물량 및 소요면적

2035년까지 공고가 예정된 발전지구 경쟁입찰 물량 24 GW를 고정식 18 GW와 부유식 6 GW로 구분하였다.[21] 해당 물량은 사업 리드타임을 고려할 때 2040년대 중반까지 순차적으로 준공될 것으로 예상된다. 앞 장에서 산정한 유효밀도를 적용하면 필요한 발전지구 면적은 고정식 약 2,500~4,700 km², 부유식 약 1,250~1,800 km²이며, 총 약 3,800~6,500 km²가 필요한 것으로 추정된다.

2050년 탄소중립 경로의 목표용량 98 GW는 정부의 2026~2035년 입찰계획이 모두 이행되는 경우의 누적 보급량인 59.4 GW보다 38.6 GW 많다. 정부가 2035년 이후의 개발방식별 입찰계획을 제시하지 않은 점을 고려하여, 본 연구에서는 이 추가 물량 38.6 GW를 모두 발전지구를 통해 공급하는 경우를 가정하였다. 이에 따라 기존에 계획된 발전지구 물량 24 GW를 포함한 2050년 발전지구 누적 물량은 약 62.6 GW이며, 본 연구의 기초형식별 비중 가정을 적용하면 고정식 45.0 GW, 부유식 17.6 GW에 해당한다.[22] 유효밀도를 적용할 경우 필요한 발전지구 면적은 고정식 약 6,300~11,800 km², 부유식 약 3,700~5,200 km²로, 총 10,000~17,000 km²가 필요한 것으로 추정된다.

표 27은 2035년까지 계획된 발전지구 경쟁입찰 물량 24 GW와 2050년 탄소중립 경로에서 가정한 발전지구 물량 62.6 GW에 필요한 면적을 기초형식별·시나리오별로 비교한 것이다.

---

21 로드맵은 2031년 이후 공고물량의 기술별 배분을 제시하지 않는다. 이에 본 연구는 3장 1절과 동일하게 2031~2035년 공고분에 부유식 비중 30%를 적용하였다. 발전지구 물량 중 2031~2035년 공고분 20 GW의 30%인 6 GW를 부유식으로, 나머지 14 GW와 2029~2030년 공고분 4 GW를 고정식으로 구분하였다.

22 2050년 탄소중립 경로의 추가 물량 38.6 GW(98 GW-59.4 GW)에는 부유식 비중 30%를 적용하였다. 이에 추가 물량은 고정식 약 27.0 GW, 부유식 약 11.6 GW로 구분되며, 기존 발전지구 물량 18 GW와 6 GW를 더하면 각각 약 45.0 GW와 17.6 GW가 된다.

[표 27] 발전지구 물량별 해양공간 수요

형식	유효밀도(MW/km²)		발전지구 소요면적(km²)					
	고정식	부유식	2035년까지 발전지구 경쟁입찰 물량 24 GW			2050년 탄소중립 경로 발전지구 가정 물량 62.6GW		
			고정식	부유식	합계	고정식	부유식	합계
보수	3.8	3.4	4,737	1,765	6,502	11,847	5,171	17,018
기준	5.9	4.8	3,051	1,250	4,301	7,631	3,663	11,293
공간효율화	7.1	4.8*	2,535	1,250	3,785	6,341	3,663	10,003

주: *부유식에는 별도의 공간효율화 밀도를 설정하지 않았으므로 공간효율화 시나리오에도 기준 유효밀도인 4.8MW/km²를 적용하였다.

산정 면적은 계획입지 여유와 부유식 계류공간을 반영한 발전지구 지정면적의 추정치이며, 실제 지정면적은 해역별 경계 형상과 항로, 환경·군사 제약 및 이해관계 조정 결과에 따라 달라질 수 있다.

2) 예비지구 가능해역과 비교

표 27에서 산정한 발전지구 소요면적의 확보 가능성은 황태건 외(2026)의 예비지구 가능해역 분석 결과와 비교하여 검토하였다. 해당 연구는 전국 해역을 1해리 격자로 구분하고, 수심 60 m·200 m와 육상변전소 거리 75 km·150 km를 조합한 네 가지 공간 시나리오에 법·제도, 항행, 조업 및 군사훈련 제약을 단계적으로 적용하였다. 모든 규제요인을 반영한 가능해역은 고정식과 현행 계통 조건을 적용한 A-3에서 8,779 km², 부유식 해역을 포함한 B-3에서 16,369 km², 해상변전소를 반영한 C-3에서 10,080 km², 부유식과 해상변전소를 모두 반영한 D-3에서 43,164 km²로 산정되었다(표 28). 해당 면적은 2025년 6월 기준 발전사업 허가단지를 제외하고 산정된 신규 개발 가능 해역이므로, 본 연구에서 추정한 신규 발전지구 지정 소요면적과 비교할 수 있다.

[표 28] 시나리오별 예비지구 가능해역 면적 (황태건 외, 2026)

		공간적 시나리오			
		A수심 ~60 m 거리 75 km	B수심 ~200 m 거리 75 km	C수심 ~60 m 거리 150 km	D수심 ~200 m 거리 150 km
		45,670 km²	**70,339 km²**	**50,313 km²**	**126,140 km²**
법·정책적 시나리오	0. 법·제도	25,306 km² (55.4%)	46,910 km² (66.7%)	29,084 km² (57.8%)	100,579 km² (79.7%)
	1. 법·제도+항행	17,893 km² (39.2%)	28,993 km² (41.2%)	21,613 km² (43.0%)	75,667 km² (60.0%)
	2. 법·제도+항행+조업	15,872 km² (34.8%)	25,469 km² (36.2%)	19,365 km² (38.5%)	67,133 km² (53.2%)
	3. 법·제도+항행+조업+군사훈련	8,779 km² (19.2%)	16,369 km² (23.3%)	10,080 km² (20.0%)	43,164 km² (34.2%)

주: 괄호 안의 숫자는 분석 영역의 총면적 대비 예비지구 가능해역의 면적 비율이다.

자료: 황태건 외(2026).

소요면적과 가능해역을 비교할 때에는 고정식과 부유식이 이용할 수 있는 수심 구간을 구분할 필요가 있다. 고정식은 수심 60 m 이내 해역을 대상으로 하므로 A-3와 C-3를 고정식의 수용 가능 공간으로 적용하였다. 부유식은 수심 60 m 이상의 심해 구간을 대상으로 하므로, 부유식 포함 가능해역에서 고정식 가능해역을 제외하여 산정하였다. 이에 따라 현행 계통 조건에서는 (B-3)−(A-3)인 7,590 km², 해상변전소를 반영할 경우에는 (D-3)−(C-3)인 33,084 km²를 부유식의 심해 가능해역으로 적용하였다. 따라서 이하에서는 고정식과 부유식의 소요면적을 각각 해당 기초형식이 이용할 수 있는 가능해역과 비교한다.

(1) 2035년까지의 발전지구 확보 가능성

2035년까지 정부가 제시한 발전지구 입찰 24 GW는 면적 총량을 기준으로 할 때 현재 확인되는 가능해역 내에서 수용 가능한 범위로 나타난다. 고정식 18 GW에 필요한 면적(약 2,500~4,700 km²)은 현행 계통 기준 고정식 가능해역인 A-3(8,779 km²)의 약 29~54%에 해당한다. 부유식 6 GW의 소요면적(약 1,250~1,800 km²)은 현행 계통 기준 심해 가능해역 7,590 km²의 약 16~23% 수준이다.

다만 이는 가능해역의 총면적을 기준으로 한 비교라는 점에 유의할 필요가 있다. 황태건 외(2026)의 가능해역은 배제조건을 적용한 1차 공간 스크리닝 결과로, 대규모 단지 개발이 어려운 분절된 해역도 포함한다. 또한 군사시설 등에 따른 추가적인 공간 제약과 전남지역의 제한적인 계통 수용 여건 등을 고려하면 실제 발전지구로 활용할 수 있는 면적은 이보다 작을 수 있다. 기존 경쟁입찰 물량의 사업화가 계획에 미달할 경우 발전지구가 추가로 수용해야 하는 물량도 증가할 수 있다.

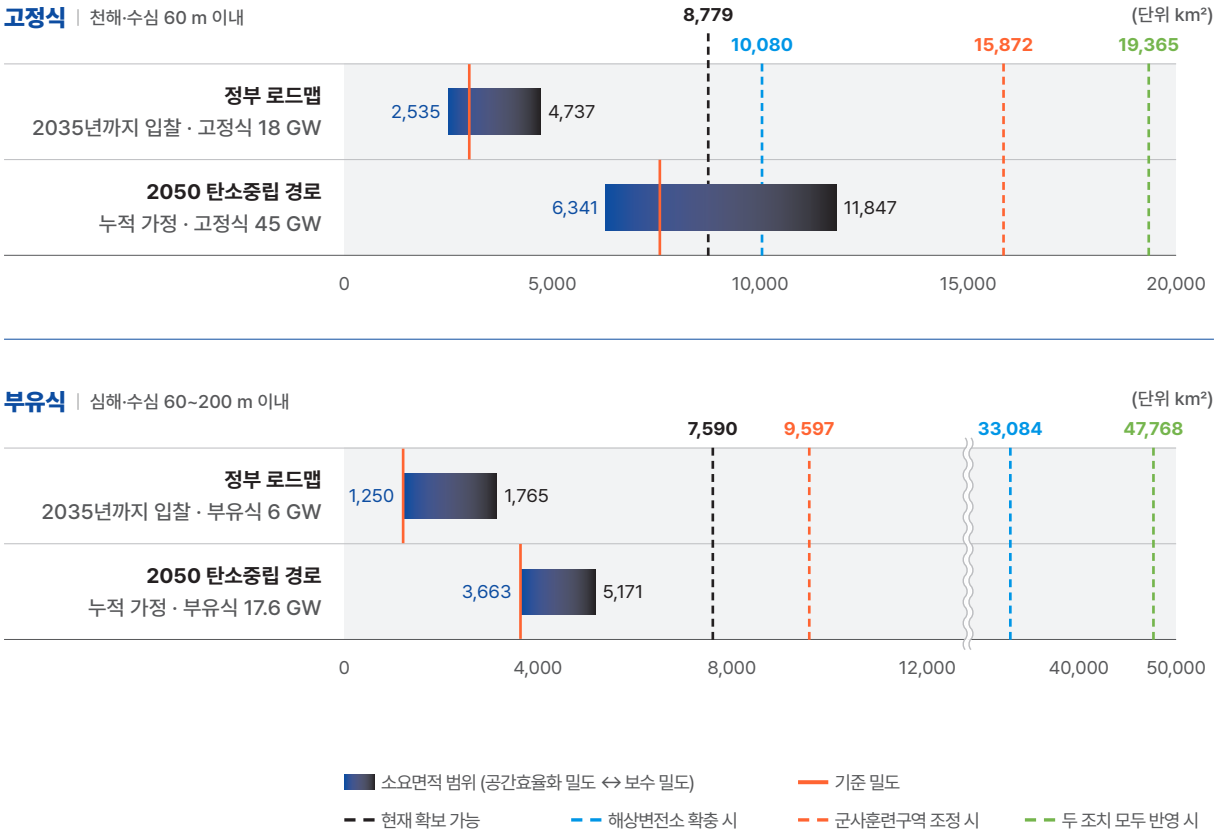
공간의 총량뿐 아니라 확보 시점도 중요하다. 최초 발전지구 경쟁입찰이 2029년 하반기로 예정되어 있으므로 최초 발전지구 지정은 해당 입찰 이전에 완료되어야 한다. 또한 2031년부터는 연간 4 GW의 발전지구 경쟁입찰이 예정되어 있어, 기준 시나리오에서는 연평균 약 700 km² 규모의 신규 발전지구 지정이 입찰에 선행되어야 한다. 따라서 분석 결과는 2035년까지 정부가 계획한 발전지구 경쟁입찰 물량을 이행하기 위해 그 이전에 선제적으로 확보해야 할 공간의 규모와 확보 가능성을 보여준다.

(2) 2050년 탄소중립 경로의 장기 공간 확보 조건

2050년 탄소중립 경로에서는 고정식 해상풍력의 공간 확보가 주요 병목으로 나타난다. 부유식 17.6 GW의 소요 면적(약 3,700~5,200 km²)은 현행 계통의 심해 가능해역(7,590 km²)의 48~68%에 해당한다. 해상변전소 확충을 통해 심해 가능해역이 33,084 km²로 확대될 경우에는 약 11~16% 수준으로 낮아져 상대적으로 충분한 공간적 여유를 확보할 수 있다. 반면 고정식 45 GW의 소요 면적(약 6,300~11,800 km²)은 현행 계통 기준 고정식 가능해역(A-3)의 72~135%에 해당한다. 기준 시나리오에서도 87%로 가능해역의 분절된 분포를 고려하면 실질적 여유가 크지 않다. 해상변전소를 추가한 C-3(10,080 km²)를 기준으로 하더라도 고정식 소요면적은 가능해역의 63~118%에 이르며, 낮은 밀도가 나타나는 보수 시나리오에서는 가용 면적을 초과할 수 있다.

그림 5는 이상의 분석을 종합하여 발전지구 소요면적과 예비지구 가능해역을 기초형식별로 비교한 것이다. 고정식의 경우 2035년까지의 발전지구 경쟁입찰 물량은 현재 가능해역 내에서 수용 가능한 범위에 있으나, 2050년 탄소중립 경로에서는 소요면적의 일부가 현재 가능해역은 물론 해상변전소를 반영한 가능해역까지 넘어설 가능성이 있다. 군사훈련구역 제약을 조정할 경우 고정식 가능해역이 확대되어 장기적인 공간 여유가 커진다. 반면 부유식은 2035년 입찰물량과 2050년 가정물량 모두 현행 계통 기준 심해 가능해역 내에 머물며, 해상변전소 확충 시 장기적인 수용 여력은 더욱 확대된다.

[그림 5] 기초형식별 발전지구 소요면적과 예비지구 가능해역 비교



주: 1) 발전지구 소요면적은 해당 발전지구 물량을 유효밀도로 나누어 산정하였으며, 막대는 공간효율화 밀도와 보수 밀도를 적용한 범위를, 막대 내 세로선은 기준밀도를 적용한 값을 나타낸다. 부유식은 별도의 공간효율화 유효밀도를 설정하지 않아 공간효율화 시나리오에도 기준 유효밀도를 동일 적용하였다.

2) 가능해역은 황태건 외(2026)의 예비지구 가능해역 분석 결과이다(표 28). '현재 확보가능'은 법·제도, 항행, 조업, 군사훈련 제약을 모두 반영한 면적이며, '+군사훈련구역 조정'은 이 중 군사훈련 제약을 제외한 면적(법·제도 + 항행 + 조업)이다. 고정식은 수심 60 m 이내 해역으로, 현행 계통에서 A-3(8,779 km²)와 군사훈련구역 조정 시 A-2(15,872 km²), 해상변전소 반영 시 C-3(10,080 km²)와 두 조치를 모두 반영한 C-2(19,365 km²)에 해당한다. 부유식은 부유식 포함 가능해역에서 고정식 해역을 제외한 심해 구간으로, 현행 계통에서 (B-3)−(A-3) = 7,590 km²와 군사훈련구역 조정시 (B-2)−(A-2) = 9,597 km², 해상변전소 반영 시 (D-3)−(C-3) = 33,084 km²와 두 조치를 모두 반영한 (D-2)−(C-2) = 47,768 km²이다.

자료: 황태건 외(2026)를 바탕으로 저자 작성.

이러한 결과는 2050년 탄소중립 경로에서 필요한 발전지구 물량을 확보하기 위해서는 두 가지 방향을 함께 검토할 필요가 있음을 보여준다. 첫째, 군사훈련구역 등 조정 가능한 공간 제약을 완화하여 고정식 개발 가능해역을 확대하는 방안이다. 둘째, 부유식 비중을 확대하여 고정식에 집중되는 공간 수요를 심해로 분산하는 방안이다.

다만 부유식 비중이 확대될수록 해상변전소 등 심해 구간의 계통 인프라 확충이 병행되어야 한다. 결국 두 경로는 해양공간 이용 규제의 조정과 부유식 보급 확대와 해상계통 확충을 어떻게 조합할 것인지의 문제이며, 한쪽의 추진이 지연될수록 다른 쪽에 요구되는 수준은 높아진다. 따라서 예비지구 지정 단계부터 두 경로의 실현 가능성을 함께 검토할 필요가 있다.

5. 결론

1) 주요 분석 결과

본 연구는 국내외 해상풍력 단지 분석을 바탕으로 설비용량 밀도 시나리오를 설정하고, 이를 적용하여 2035년과 2050년 보급목표에 따른 총 해양공간 수요를 분석하였다. 또한 향후 계획입지를 통해 새로 확보해야 할 발전지구 지정 면적을 별도로 산정하고, 예비지구 가능해역과 비교하여 공간적 확보 가능성을 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 설비용량 밀도 범위

국내외 단지 분석을 바탕으로 사업면적 기준의 기본밀도를 보수(저밀도·고여유)–기준–공간효율화(고밀도·저여유) 시나리오로 설정하였다. 고정식 해상풍력 단지는 4.5/6.5/7.5 MW/km², 부유식 해상풍력 단지는 4.5/5.5 MW/km²로 설정하였으며, 부유식의 공간효율화 시나리오는 별도로 설정하지 않았다. 여기에 발전지구 지정 단계에서 추가로 고려되는 외곽 여유공간, 단지 간 간격, 공용 회랑 등과 부유식 계류공간을 반영한 발전지구 지정면적 기준 유효밀도는 고정식 3.8/5.9/7.1 MW/km², 부유식 3.4/4.8 MW/km²로 산정된다. 대규모 발전지구에서는 단지 규모와 공간 제약을 고려할 때 밀도 범위의 하단을 적용하는 것이 현실적이다.

(2) 총 해양공간 수요

각 보급목표 시점까지의 전체 보급물량(기존 단지, 기선정 물량, 경쟁입찰 및 신규 발전지구)을 동일한 유효밀도 기준으로 환산한 누적 해양공간 수요는 2035년 약 3,700~6,660 km², 2050년 정부 입찰 로드맵 완전 이행 경로에서 약 9,180~16,000 km², 탄소중립 경로에서 약 15,400~26,520 km²로 전망된다. 기준 설비용량 밀도 시나리오에서는 각각 약 4,340 km², 10,530 km², 17,530 km²가 필요한 것으로 산정된다.

(3) 신규 발전지구 지정 소요

2035년까지 예정된 발전지구 경쟁입찰 물량 24 GW를 수용하기 위해서는 약 3,800~6,500 km²의 신규 발전지구 지정이 필요하며, 기준 시나리오에서는 약 4,300 km²가 필요한 것으로 산정된다. 이는 황태건 외(2026)가 현행 계통 여건을 기준으로 제시한 예비지구 가능해역과 비교할 때, 고정식 가능해역(8,779 km²)의 약 29~54%, 심해 부유식 가능해역(7,590 km²)의 약 16~23%에 해당한다. 따라서 면적 총량을 기준으로 할 때 정부가 2035년까지 제시한 발전지구 경쟁입찰 물량은 현재 확인되는 가능해역 내에서 수용 가능한 범위로 나타난다.

다만 가능해역이 분절되어 있고 실제 계통 접속 여건도 상이해 실제 활용 가능한 면적은 이보다 제한적일 수 있다. 또한, 첫 발전지구 경쟁입찰이 2029년 하반기로 예정되어 있어 최초 발전지구 지정은 사실상 향후 2~3년 내 이루어져야 하며, 2031년부터는 연평균 약 700 km² 규모의 신규 지정이 입찰에 선행되어야 한다. 기존 경쟁입찰을 통한 보급 실적이 계획에 미달하거나 유찰이 발생할 경우 추가로 확보해야 할 발전지구 면적은 더욱 늘어날 수 있다.

(4) 탄소중립 수준(2050년 98 GW) 공간 확보 조건

2050년 탄소중립 경로의 목표용량 98 GW는 정부 입찰계획을 완전히 이행하는 경우의 59.4 GW보다 약 38.6 GW 높은 수준이다. 정부가 2035년 이후의 개발방식별 계획을 제시하지 않은 점을 고려하여 이 추가 물량을 모두 발전지구를 통해 수용한다고 가정할 경우, 2035년까지 예정된 24 GW를 포함한 누적 발전지구 물량은 약 62.6 GW(본 연구 가정 기준 고정식 45.0 GW, 부유식 17.6 GW)에 이른다. 공간 확보의 핵심 병목은 고정식에서 발생한다. 부유식은 심해 가능해역 내 수용 여력이 있는 반면, 고정식은 필요 면적이 현재 가능해역의 72~135%에 달해 사실상 여유가 크지 않으며, 해상변전소로 계통을 확충하는 경우에도 63~118%로, 보수적 밀도에서는 가용 면적을 초과할 수 있다.

따라서 탄소중립 수준의 장기 보급을 위해서는 군사훈련구역 등 공간 제약을 조정하여 고정식 개발 가능 해역을 확대하는 동시에, 부유식 비중 확대와 이를 뒷받침할 해상계통 확충을 병행할 필요가 있다. 예비지구 지정 단계부터 두 경로의 실현 가능성을 함께 검토해야 한다.

2) 목표 이행을 위한 정책 제언

본 연구의 분석 결과는 해상풍력 보급목표 달성을 위해서는 입찰 물량에 상응하는 해양공간을 사전에 확보하고, 장기적으로 고정식 개발 가능 해역의 제약을 해소하는 것이 핵심 과제임을 보여준다. 이에 다음과 같은 정책적 대응이 필요하다.

첫째, 입찰 일정과 연계한 중장기 발전지구 지정계획을 마련해야 한다. 2035년까지 예정된 발전지구 경쟁입찰 물량을 수용하기 위해서는 약 3,800~6,500 km²의 신규 발전지구 지정이 필요하다. 특히 첫 경쟁입찰이 2029년 하반기로 예정되어 있어 최초 발전지구는 향후 2~3년 내 지정되어야 하며, 2031년부터는 연평균 약 700 km²의 신규 지정이 입찰에 선행되어야 한다. 따라서 입찰용량뿐 아니라 이를 수용하기 위한 연도별 발전지구 면적과 지정 일정을 함께 관리하는 중장기 로드맵이 필요하다. 발전지구 지정 단계에서 계통 접속 가능성과 연계 경로도 함께 검토하여 공간 확보와 계통계획 간 불일치를 최소화해야 한다.

둘째, 고정식 개발 가능 해역을 확대하기 위해 절대 배제구역과 협의·조정 가능한 공간 제약을 구분하고, 예비지구 검토 초기부터 관계부처 협의를 추진해야 한다. 2050년 탄소중립 경로에서 가장 큰 공간적 병목은 고정식 가능해역의 부족으로 나타났다. 특히 분석 결과, 군사훈련구역에 대한 제약을 조정할 경우 고정식 가능해역은 8,779 km²에서 15,872 km²로 약 81% 확대될 수 있다. 조정 방식으로는 구역 재배치뿐 아니라, 해상풍력 설비를 설치하되 군사 시험 등 특정 국방활동 시 터빈 운영을 일시 제한하는 조건부 이용도 검토할 수 있다. 미국에서도 군사 시험과의 간섭이 예상되는 해상풍력 임대구역에 대해 시험기간 중 터빈 운영 제한을 조건으로 제시한 사례가 있다(BOEM, 2024).

따라서 군사·항행·조업 등 다른 해양 이용과 중첩된다는 이유만으로 해당 해역을 일률적으로 배제하기보다, 실제 이용 빈도와 중요도, 공간 중첩 정도를 고려하여 공동이용이나 조건부 이용 가능성을 검토할 필요가 있다. 과거 육상풍력에서도 개발 가능 지역과 생태자연도 1등급 권역의 중첩 문제가 제기되자 환경성평가 지침을 조정하여 일부 지역에 대해 조건부 사업 가능성을 열어둔 사례가 있다. 이는 공간적 제약을 획일적인 배제로만 다루기보다 보호 필요성과 정책 목표를 함께 고려하여 이용 가능성을 세분화할 수 있음을 보여준다.

셋째, 2050년 장기 공간계획은 고정식 가능해역 확대와 부유식·해상계통 확충을 함께 고려해야 한다. 2050 탄소중립 경로에서는 고정식 45 GW의 필요 면적이 현재 고정식 가능해역의 72~135%(기준 87%)에 달해, 계통을 확충하더라도 충분한 공간 확보가 어려울 수 있다. 반면 부유식은 심해 해역에 상대적인 공간 여력이 있으므로, 고정식에 집중된 공간 수요의 일부를 부유식으로 전환할 수 있다. 다만 부유식 확대가 커질수록 심해 구간의 해상변전소와 계통 인프라 확충이 함께 이루어져야 한다. 고정식 가능해역을 얼마나 추가 확보할 수 있는지와 부유식으로 얼마나 전환할 수 있는지를 동시에 검토하고, 이에 맞춰 해상계통 확충 경로를 사전에 설계할 필요가 있다.

넷째, 설비용량 밀도를 보급목표와 해양공간을 연계하는 계획지표로 활용해야 한다. 본 연구에서 확인했듯 설비용량 밀도는 단일한 기술값이 아니며 단지 규모, 기초형식, 공간 제약 등에 따라 달라진다. 따라서 기존의 단일 밀도값을 일률적으로 적용하기보다, 발전지구 지정 시 기초형식과 단지 규모를 고려한 밀도 범위와 면적 산정 기준을 명시하고 이를 통해 목표용량에 필요한 공간을 사전에 검증할 필요가 있다. 특히 대규모 발전지구에서는 높은 밀도를 일률적인 목표로 설정하기보다 현실적인 밀도 범위를 적용하고, 실제 사업자료가 축적됨에 따라 기준을 지속적으로 보완해야 한다. 나아가 설비용량 밀도는 단위면적당 설치 규모를 나타낼 뿐 실제 발전량까지 반영하지는 못하므로, 향후에는 후류 손실과 설비이용률을 함께 고려한 단위면적당 발전량을 포함한 공간 이용효율 평가가 필요하다.

종합하면, 2035년까지는 예정된 입찰에 앞서 필요한 발전지구를 적기에 확보하는 것이 핵심이며, 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해서는 고정식 가능해역의 구조적 부족을 해소하는 것이 중요한 과제가 된다. 이를 위해 단기적으로는 발전지구 지정과 계통계획을 입찰 일정에 맞춰 선제적으로 추진하고, 중장기적으로는 공간 제약 조정을 통한 고정식 가능해역 확대와 부유식·해상계통 확충을 병행해야 한다. 설비용량 밀도는 이러한 보급목표와 공간 확보 간 정합성을 지속적으로 점검하는 계획지표로 활용할 필요가 있다.

부록I. 주요 수식 및 산정 예시

부록 I은 본문에서 활용한 설비용량 밀도, 가중평균 밀도 및 해양공간 수요 산정식을 정리하고, 제주 한림 해상풍력단지를 사례로 터빈 좌표 기반 면적과 보정 밀도의 계산 과정을 제시한다. 또한 설비용량 밀도와 연간 발전량의 관계를 구분하여 설명한다.

1) 설비용량 밀도 및 해양공간 수요 산정

(1) 단지별 설비용량 밀도

해상풍력단지의 설비용량 밀도는 단지의 정격 설비용량을 부지 면적으로 나눈 값으로, 제곱킬로미터당 메가와트(MW/km²)로 표시한다.

$$p_{A_{WF}} = \frac{P_{rated,WF}}{A_{WF}}$$

$p_{A_{WF}}$: 풍력발전단지 설비용량 밀도 [MW/km^2]
$P_{rated,WF}$: 풍력발전단지 정격 설비용량 [MW]
A_{WF} : 풍력발전단지 부지 면적 [km^2]

(2) 그룹별 가중평균 설비용량 밀도

국가, 기초형식 또는 단지 규모별 평균 밀도는 개별 단지 밀도의 단순평균이 아니라, 해당 그룹의 총설비용량을 총면적으로 나눈 가중평균으로 산정한다.

$$\bar{p}_{A_{WF}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{rated,i}}{\sum_{i=1}^{N} A_i}$$

(3) 목표 설비용량 달성에 필요한 해양 공간

설비용량 밀도 시나리오별 필요 해양공간은 목표 설비용량을 적용 밀도로 나누어 산정한다.

$$A_{required} = \frac{P_{target}}{p_{A,S}}$$

$A_{required}$: 필요 해양공간 [km^2]

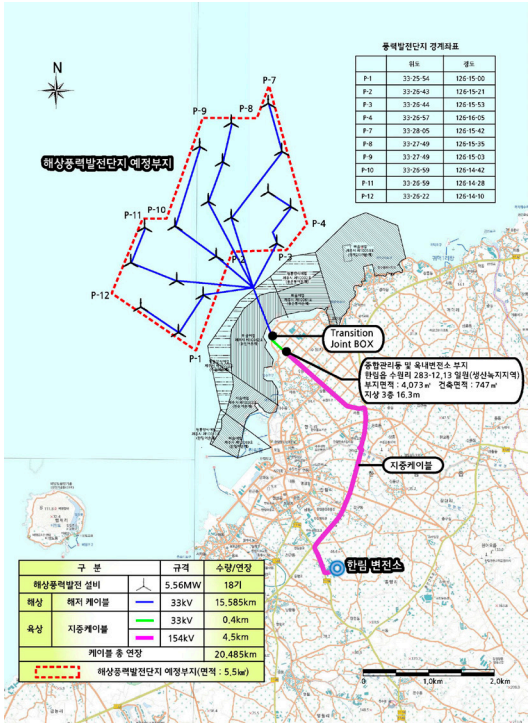
P_{target} : 목표 해상풍력 설비용량 [MW]

$p_{A,S}$: 시나리오 S의 설비용량 밀도 [MW/km^2]

2) 설비용량 밀도 산정 예시: 제주 한림 해상풍력단지

제주 한림 해상풍력단지는 동일한 사업에 대해 공유수면 점용·사용 면적, 사업계획상 지구지정 면적 및 터빈 좌표를 모두 확인할 수 있어, 면적 기준에 따른 설비용량 밀도의 차이를 비교하기에 적합하다. 본 절에서는 세 가지 면적 기준으로 밀도를 산정하고, 터빈 좌표를 이용한 들로네 삼각분할 및 외곽부 보정 과정을 제시한다. 그림 6은 제주 한림 해상풍력단지의 사업 개요와 면적 정보를 정리한 것이다.

[그림 6] 제주 한림 해상풍력단지 주요 정보



구분	내용
상업운전 개시일(COD)	2025년 12월
단지 정격 설비용량	100.08 MW
터빈당 정격용량	5.56 MW
로터 직경	140 m
총 터빈 수	18기
사업계획상 지구지정 면적	5.47 km^2
공유수면 점용·사용 면적	0.326 km^2

자료: 제주한림해상풍력 조성사업 사후환경영향평가조사결과 통보서

(1) 터빈 좌표와 들로네 삼각분할

Borrmann et al. (2018)는 Danish Energy Agency(2016)가 제안한 들로네 삼각분할 방법을 이용하여 해상풍력단지의 면적을 산정하였다. 이 방법은 각 터빈의 X·Y 평면좌표(표 29)를 이용하여 인접한 터빈을 서로 중첩되지 않는 삼각형으로 연결한 후, 각 삼각형의 면적을 합산하는 방식이다.

다만 단지의 오목한 형상이나 터빈 간 거리가 큰 구간까지 하나의 삼각형으로 연결될 경우 실제 터빈 배열 범위보다 면적이 과대 산정될 수 있다. 이를 방지하기 위해 Borrmann et al. (2018)의 기준에 따라 외접원 반지름의 제곱이 2 km² 미만인 삼각형만 유효 삼각형으로 분류하고, 해당 삼각형의 면적을 합산하였다.

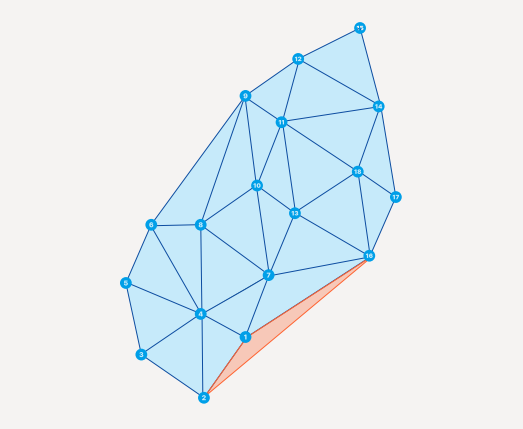
[표 29] 제주 한림 해상풍력단지 터빈 평면좌표

No.	X	Y	No.	X	Y
1	244,451	3,703,370	10	244,551	3,704,791
2	244,065	3,702,809	11	244,785	3,705,389
3	243,498	3,703,207	12	244,932	3,705,976
4	244,052	3,703,595	13	244,902	3,704,542
5	243,357	3,703,886	14	245,691	3,705,530
6	243,580	3,704,412	15	245,501	3,706,263
7	244,664	3,703,952	16	245,591	3,704,128
8	244,041	3,704,427	17	245,816	3,704,688
9	244,441	3,705,623	18	245,473	3,704,921

자료: 제주한림해상풍력 조성사업 사후환경영향평가조사결과 통보서

전체 들로네 삼각형의 면적은 4.843 km²로 산정되었다. 이 가운데 외접원 반지름 제곱이 기준값인 2 km²를 초과한 삼각형의 면적 0.173 km²를 제외하면, 최종 적용 면적은 4.670 km²이다(그림 7).

[그림 7] 제주 한림 해상풍력단지의 터빈 배치와 들로네 삼각분할



전체 들로네 삼각형 면적	4.843 km²
기준 초과 삼각형 면적	0.173 km²
최종 적용 면적	4.670 km²
명목 설비용량 밀도	21.43 MW/km²

자료: 좌표 기반 저자 작성

(2) 외곽부 보정 설비용량 밀도

들로네 삼각분할 면적은 외곽 터빈의 중심을 연결하여 산정되므로, 외곽 터빈 바깥쪽의 점유공간이 포함되지 않는다. 이로 인해 터빈 수가 적거나 단지 형상이 불규칙한 경우 실제 공간 점유 범위에 비해 면적이 작게 산정되고, 명목 설비용량 밀도는 높게 나타날 수 있다.

이를 보완하기 위해 외곽 경계에 위치한 터빈 수를 고려한 보정 터빈 수 n^*을 적용하여 보정 밀도를 산정한다.

$$n^* = n - \left(\frac{m}{2} + 1\right), \quad p^*_{A_{WF}} = \frac{n^* \times P_{rated,T}}{A_{WF}}$$

n^* : 단지의 보정 터빈 수

n : 단지의 전체 터빈 수

m : 단지 외곽 경계에 위치한 터빈 수

$p^*_{A_{WF}}$: 풍력발전단지 설비용량 보정 밀도 [MW/km^2]

$P_{rated,T}$: 풍력 터빈 정격 설비용량 [MW]

제주 한림의 전체 터빈 수는 18기이며, 외곽 경계에 위치한 터빈은 10기이다. 이에 따른 보정 터빈 수는 12기로 산정된다. 해당 보정 터빈 수를 적용한 보정 밀도는 아래 표 30과 같다.

[표 30] 제주 한림 해상풍력단지의 면적 및 설비용량 밀도 비교

면적 산정 방식	적용 면적 (km²)	명목 밀도 (MW/km²)	보정 밀도 (MW/km²)	본 연구 적용
공유수면 점용·사용 면적	0.326	306.99	-	제외
지구지정 면적 (사업계획)	5.470	18.30	-	참고
들로네 기준 초과 삼각형 제외	4.670	21.43	14.29	적용

공유수면 점용·사용 면적은 사업계획상 지구지정 면적의 약 6%에 불과하며, 이를 적용한 밀도는 306.99 MW/km²로 산정된다. 이는 터빈 좌표 기반 명목 밀도 21.43 MW/km² 보다 약 14.3배, 보정 밀도보다 약 21.5배 높은 수준이다. 해당 면적은 단지 전체가 아니라 터빈 기초 등 개별 시설의 직접 점용 면적을 중심으로 산정된 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

사업계획상 지구지정 면적 5.47 km²는 터빈 좌표 기반 면적 4.67 km²보다 약 17% 크며, 이를 기준으로 한 밀도는 18.30 MW/km²로 산정된다. 한편 좌표 기반 보정 밀도를 적용하면 단지 면적은 약 7 km²로 확대된다. 본 연구에서는

단지 간 비교의 일관성과 재현 가능성을 고려해 들로네 삼각분할로 산정한 터빈 좌표 기반 면적을 적용하고, 지구지정 면적은 참고값으로 활용하였다.

3) 설비용량 밀도와 발전량의 관계

설비용량 밀도는 단위 해양공간에 설치되는 정격 설비용량을 나타내지만, 실제 발전량이나 발전효율을 직접 나타내는 지표는 아니다. 동일한 설비용량 밀도를 가진 단지라도 풍황, 터빈 출력곡선, 터빈 간 이격거리, 후류 손실, 설비 이용률 및 출력제한 등에 따라 연간 발전량이 달라질 수 있다.

(1) 터빈 비출력과 상대적 이격거리

터빈의 비출력(specific power)은 터빈의 정격용량을 로터 회전면적으로 나눈 값으로, 로터가 포집한 바람의 운동에너지를 발전기가 얼마나 집약적으로 활용하도록 설계되었는지를 나타낸다. 비출력이 낮을수록 동일한 정격용량에 비해 로터 면적이 크다는 의미이며, 일반적으로 저풍속에서도 더 많은 에너지를 포집하는 데 유리하다. 반면 통상 300 W/m² 이상인 고비출력 터빈은 발전기 용량에 비해 로터 면적이 상대적으로 작으며, 풍속이 높고 비교적 일정한 지역에서 운전하기에 적합하다.

$$p_{A_{rotor}} = \frac{P_{rated,T}}{A_{rotor,T}}, \quad A_{rotor,T} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$p_{A_{rotor}}$: 터빈 비출력 [W/m^2]
$P_{rated,T}$: 터빈 정격 설비용량 [W]
$A_{rotor,T}$: 로터 회전면적 [m^2]
D : 로터 직경 [m]

동일한 터빈이 규칙적인 격자 형태로 배치된다고 가정하면 설비용량 밀도는 터빈당 정격용량과 터빈 간 이격거리로 표현할 수 있다. 여기서 $d_{\parallel}$와 $d_{\perp}$는 각각 주풍향 및 주풍향에 수직인 방향의 이격거리를 로터 직경 D로 나눈 상대 이격거리이다.

$$p_{A_{WF}} = \frac{P_{rated,T}}{D_{\parallel} \times D_{\perp}} = \frac{\pi}{4} \times \frac{p_{A_{rotor}}}{d_{\parallel} \times d_{\perp}}$$

이 식은 설비용량 밀도가 터빈 정격용량 자체보다 터빈 비출력과 로터 직경 대비 이격거리의 영향을 받는다는 점을 보여준다. 터빈 정격용량과 로터 직경이 함께 증가하고 이격거리도 로터 직경에 비례하여 확대되면, 터빈 수가 감소하더라도

설비용량 밀도는 유사하게 유지될 수 있다. 반면 터빈 위치나 절대 이격거리가 고정된 상태에서 정격용량만 증가하면 설비용량 밀도는 높아질 수 있다.

(2) 연간 발전량과 면적당 발전량

연간발전량(AEP, Annual Energy Production, MWh)은 단지의 정격 설비용량과 설비이용률(CF, Capacity Factor)을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$AEP = P_{rated,WF} \times 8{,}760(hours) \times CF$$

설비용량 밀도와 발전량의 관계를 직접 비교하기 위해서는 면적당 연간발전량을 함께 살펴볼 필요가 있다.

$$e_{A,WF} = \frac{AEP}{\mathrm{A_{WF}}} = p_{A_{WF}} \times 8{,}760(hours) \times CF$$

$e_{A,WF}$: 면적당 연간 발전량 [*MWh/km²·*년]

동일한 설비용량 밀도를 가진 단지라도 설비이용률이 상이하면 면적당 연간발전량은 달라진다. 예를 들어 터빈을 조밀하게 배치하면 설비용량 밀도는 높아질 수 있지만, 후류 손실이 증가하여 설비이용률이 낮아질 수 있다. 이 경우 면적당 연간발전량의 증가 폭은 설비용량 밀도의 증가 폭보다 작을 수 있다. 따라서 설비용량 밀도만으로 단지의 발전 성능을 평가하기는 어렵다.

정책 목표가 정격 설비용량이 아니라 연간발전량으로 설정되는 경우에는 설비용량 밀도와 설비이용률을 함께 고려하여 필요한 해양공간을 산정해야 한다. 본 연구에서는 설비용량 기준의 입찰 물량을 토대로 분석하였으나, 후속 연구에서는 이러한 다양한 요소를 종합적으로 고려하여 탄소중립 목표 달성에 필요한 해상풍력 면적을 분석할 수 있을 것이다.

부록II. 국내외 데이터베이스(DB)

부록 II는 본 연구의 분석에 활용한 DB의 정보수집 항목을 제시하고, 국내외 해상풍력 밀도 조사 DB를 수록한다.

1) DB 정보수집 항목

[표 31] 국내외 DB 정보수집 항목

[기본 정보]
프로젝트명
고정식/부유식
주소 / 위치 (위도, 경도)
개발사
사업 상태 (계획 / 인허가 / 시공/ 운영)
COD (상업운전 개시일)
[설계 변수]
단지 총 설비용량 (MW)
단지 면적 (km^2)
면적 유형 (구체적으로 기재: 예) 허가구역(Lease) 면적/ 실개발면적/ 유효개발면적 등)
터빈 정격용량 (MW)
로터 직경 D (m)
총 터빈 수
터빈 모델명 (업체)
평균 터빈 간격 (nD) / 주풍향 방향 간격 / 횡방향 간격
Layout 형태 (직사각형, 마름모 등)
Layout 확인 가능 여부
수심 (m)
평균 풍속 (m/s)
[정책/기타]
계획입지 여부 (Y/N)
터빈 간격 제한 (제한이 있을 경우 구체적으로 제시)
입지 임대 비용 (단위면적)
인접 단지 여부 (+ 거리)
전기 구매계약 형태
해역 이용 제한 (환경·군사·어업)
기타 인허가 및 규제

2) 해외 해상풍력 단지 DB

[표 32] 해외 해상풍력단지 설비용량 밀도 조사 (n=59)

No.	국가	단지명	형식	운전 연도	총용량 (MW)	면적 (km^2)	명목밀도/ 보정밀도* (MW/km^2)	출처
1	덴마크	Horns Rev 1	고정식	2002	160	20.00	8.00 / 6.4	Ørsted / Borrmann et al. (2018)
2	덴마크	Nysted	고정식	2003	165.6	24.00	6.90 / 5.6	Ørsted / Borrmann et al. (2018)
3	덴마크	Rødsand 2	고정식	2010	207	34.00	6.09 / 4.9	RWE / Borrmann et al. (2018)
4	덴마크	Horns Rev 2	고정식	2009	209	35.00	5.97 / 5.3	Ørsted / Borrmann et al. (2018)
5	덴마크	Horns Rev 3	고정식	2019	407	88.00	4.62	Vattenfall
6	덴마크	Kriegers Flak	고정식	2021	604.8	132.00	4.58	Vattenfall
7	덴마크	Anholt	고정식	2013	400	88.00	4.55 / 3.0	Tethys / Borrmann et al. (2018)
8	덴마크	THOR	고정식	2027	1,000	220.00	4.55	RWE
9	덴마크	Vesterhav Syd	고정식	2024	168	37.00	4.54	Vattenfall
10	덴마크	Vesterhav Nord	고정식	2024	176	39.60	4.44	Vattenfall
11	독일	Borkum Riffgrund 2	고정식	2019	450	36.00	12.50 / 8.4	Ørsted
12	독일	Hohe See	고정식	2019	521.85	42.00	12.43	EnBW
13	독일	Baltic Eagle	고정식	2024	476	40.00	11.90	Iberdrola
14	독일	Albatros	고정식	2020	117.6	11.00	10.69	EnBW
15	독일	EnBW Baltic 2	고정식	2015	288	27.00	10.67 / 7.8	EnBW / Borrmann et al. (2018)
16	독일	Arkona	고정식	2019	385	39.00	9.87 / 7.7	RWE / Borrmann et al. (2018)
17	독일	Amrumbank West	고정식	2015	302	32.00	9.44 / 7.4	RWE / Borrmann et al. (2018)
18	독일	Butendiek	고정식	2015	288	33.00	8.73 / 7.4	wpd / Borrmann et al. (2018)
19	독일	Gode Wind 1 & 2	고정식	2017	582	70.00	8.31 / 6.3	Ørsted / Borrmann et al. (2018)
20	독일	Nordsee One	고정식	2017	332.1	41.30	8.04	RWE
21	네덜란드	Borssele V Innovation Site	고정식	2021	19	2.00	9.50	RVO
22	네덜란드	Gemini – Buitengaats	고정식	2017	300	34.00	8.82	Gemini

No.	국가	단지명	형식	운전 연도	총용량 (MW)	면적 (km^2)	명목밀도/ 보정밀도* (MW/km^2)	출처
23	네덜란드	Gemini – ZeeEnergie	고정식	2017	300	34.00	8.82	Gemini
24	네덜란드	Hollandse Kust Zuid I & II	고정식	2023	759	104.20	7.28	RVO
25	네덜란드	Hollandse Kust Zuid III & IV	고정식	2023	770	109.80	7.01	Noordzeeloket
26	네덜란드	Borssele I & II	고정식	2020	752	128.30	5.86	Ørsted
27	네덜란드	Borssele III & IV	고정식	2021	731.5	146.00	5.01	Blauwwind
28	영국	Hywind Scotland	부유식	2017	30	4.00	7.50	Tethys
29	영국	Moray West	고정식	2025	882	225.00	3.92	Marine Scotland
30	영국	Moray East	고정식	2022	950	295.00	3.22	Tethys
31	영국	Hornsea 2	고정식	2022	1,386	462.00	3.00	VolkerStevin
32	영국	Hornsea One	고정식	2019	1,218	407.00	2.99	PowerTechnology
33	영국	Seagreen	고정식	2023	1,075	391.00	2.75	SSE
34	영국	Dogger Bank A	고정식	2023	1,200	515.00	2.33	Dogger Bank
35	영국	Dogger Bank C	고정식	2027	1,200	311.00	3.86	Dogger Bank
36	영국	Dogger Bank B	고정식	2026	1,200	599.00	2.00	Dogger Bank
37	영국	Kincardine	부유식	2021	50	25.00	2.00	Principle Power
38	프랑스	Provence Grand Large	부유식	2024	25.2	0.78	32.31	Provence Grand Large
39	프랑스	Fécamp	고정식	2024	500	60.00	8.33	skyborn
40	프랑스	Saint-Nazaire	고정식	2022	480	78.00	6.15	Tethys
41	노르웨이	Hywind Tampen	부유식	2022	88	21.00	4.19	Tethys
42	포르투갈	WindFloat Atlantic	부유식	2020	25	2.15	11.63	WindFloat
43	대만	Yunlin	고정식	2025	640	82.00	7.80	Yunlin
44	대만	Greater Changhua 1 (Southeast)	고정식	2024	605.2	108.70	5.57	Ørsted
45	대만	Formosa 2	고정식	2023	376	68.81	5.46	Formosa 2
46	대만	Greater Changhua 2 (Southwest: 2a+2b)	고정식	2026	631.9	126.30	5.00	Ørsted
47	대만	Greater Changhua 4 (Northwest)	고정식	2026	582.9	117.00	4.98	Ørsted
48	일본	Akita-Noshiro	고정식	2022	140	7.29	19.20	Marubeni
49	미국	Block Island	고정식	2016	30	3.32	9.04	Tethys
50	미국	Empire Wind 1	고정식	2027	810	116.30	6.96	Empire Wind
51	미국	CVOW Commercial	고정식	2026	2,600	456.50	5.70	CVOW
52	미국	Vineyard Wind 1	고정식	2026	806	306.00	2.63	Iberdrola
53	미국	South Fork Wind	고정식	2024	132	55.44	2.38	BOEM

No.	국가	단지명	형식	운전 연도	총용량 (MW)	면적 (km^2)	명목밀도/ 보정밀도* (MW/km^2)	출처
54	미국	Sunrise Wind	고정식	2027	924	444.96	2.08	BOEM
55	미국	Revolution Wind	고정식	2026	704	339.12	2.08	BOEM
56	아일랜드	Dublin Array	고정식	2030	834	59.00	14.14	RWE
57	아일랜드	Arklow Bank Wind Park 2	고정식	2030	800	63.40	12.62	SSE
58	아일랜드	Codling Wind Park	고정식	2030	1,300	125.00	10.40	Codling
59	아일랜드	North Irish Sea Array (NISA)	고정식	2029	500	226.90	2.20	Statkraft

주: 1) 명목밀도는 단지 총 설비용량을 공표 단지면적으로 나눈 값이다.

2) 보정밀도*는 Borrmann et al. (2018)가 당시 터빈 좌표 기반 들로네 면적과 당시 설비용량으로 산정한 참고값으로, 본 표의 최신 공개자료 기반 명목밀도와 산정 기준이 다르며, 해당 값이 확인되는 11개 단지에 한해 참고 수치로 제시하였다.

3) 운전연도는 상업운전 개시연도(COD)이며 건설·계획 단계는 예정연도이다.

4) 국가별·밀도 내림차순으로 정렬하였고, 음영은 주요 통계에서 제외한 실증 단지(Kincardine, Hywind Scotland, WindFloat Atlantic, Provence Grand Large)를 뜻한다.

자료: 본 연구 해외 해상풍력단지 DB. 개별 출처는 표 내 출처명에 하이퍼링크로 연결하였다.

3) 국내 해상풍력 단지 DB

[표 33] 국내 해상풍력단지 설비용량 밀도 조사 (n=30)

No.	단지명	형식	운전연도	총용량 (MW)	면적 (km^2)	명목밀도/ 보정밀도* (MW/km^2)	출처
1	제주 한림	고정식	2025	100.08	4.67	21.43 / 14.29	환경영향평가서
2	전북 서남권 실증	고정식	2019	60	7.45	8.05 / 4.83	한국해상풍력 사업시행계획
3	전남 해상풍력 1단지	고정식	2025	96	9.09	10.56 / 4.22	전남해상풍력
4	제주 한동평대	고정식	2031	105	5.63	18.65	환경영향평가서
5	영광 낙월	고정식	2026	364.8	55.3	6.60	낙월해상풍력 환경영향평가서
6	부산 다대포	고정식	2028	99	5	19.80	다대포해상풍력 공유수면점사용변경허가고시문
7	전북 서남권 시범	고정식	2032	400	80	5.00	한국해상풍력 환경영향평가서
8	태안	고정식	2029	495	80	6.19	태안풍력발전 환경영향평가서
9	신안우이	고정식	2029	390	66.4	5.87	환경영향평가서
10	영광야월	고정식	2030	104	9.02	11.53	환경영향평가서
11	영광안마	고정식	2028	532	83.9	6.34	안마해상풍력 환경영향평가서
12	고창동촌	고정식	2028	76.2	10.75	7.09	해역이용영향평가서
13	반딧불	부유식	2033	810	154	5.26	환경영향평가서
14	완도 금일	고정식	2029	600	86	6.98	환경영향평가서
15	욕지	고정식	2030	384	32	12.00	환경영향평가서
16	완도 장보고	고정식	2030	400	53.8	7.43	환경영향평가서
17	굴업도	고정식	2030	250	34.79	7.19	환경영향평가서
18	영광한빛	고정식	2029	340	53.1	6.40	한빛해상풍력 환경영향평가서
19	신안 해송1	고정식	2031	504	70	7.20	환경영향평가서
20	신안 해송3	고정식	2031	504	80	6.30	
21	여수 금오도	고정식	2030	166.8	16	10.43	금오도해상풍력 환경영향평가서
22	욕지 좌사리	고정식	2031	360	40.9	8.80	환경영향평가서

No.	단지명	형식	운전연도	총용량 (MW)	면적 (km^2)	명목밀도/ 보정밀도* (MW/km^2)	출처
23	문무바람	부유식	2030	750	160	4.69	문무바람 환경영향평가서
24	울산 한국부유식/이스트블루파워	부유식	NA	1125	240	4.69	KFW 환경영향평가서
25	울산 해울이 1·2·3	부유식	2031	1500	240	6.25	HAEWOORI 환경영향평가서
26	울산 귀신고래 1·2·3	부유식	NA	1500	240	6.25	BADAENERGY 환경영향평가서
27	전남 해상풍력 2단지	고정식	NA	399	76.3	5.23	전남해상풍력 환경영향평가서
28	전남 해상풍력 3단지	고정식	NA	399	62.5	6.38	전남해상풍력 환경영향평가서
29	인천해상풍력 1호	고정식	NA	870	106.6	8.16	인천해상풍력 환경영향평가서
30	인천해상풍력 2호	고정식	NA	600	71.7	8.37	

주: 1) 울산 귀신고래 1·2·3과 울산 해울이 1·2·3은 개별 단지 면적이 제시되어 있지 않아 전체 면적을 균등 배분하여 밀도를 추정하였다. 울산 한국부유식(이스트블루파워) 단지는 3개 구역으로 구분되어 있으나, 구역별 면적과 용량 정보가 공개되지 않았고 구역 간 면적의 균등성도 확인되지 않아 단일 단지로 처리하였다.

2) 보정밀도*는 터빈 좌표를 기반으로 산정한 값이며, 좌표가 확인되는 3개 단지에 한해 참고 수치로 제시하였다.

3) 운전연도는 상업운전 개시연도(COD)이며 건설·계획 단계 단지는 예정연도이다.

자료: 본 연구 국내 해상풍력단지 DB. 2025년도 하반기 발전소 건설사업 추진현황(전력거래소, 2025), 환경영향평가서, 해역이용영향평가서를 재구성하였으며, 개별 출처는 표 내 출처명에 하이퍼링크로 연결하였다.

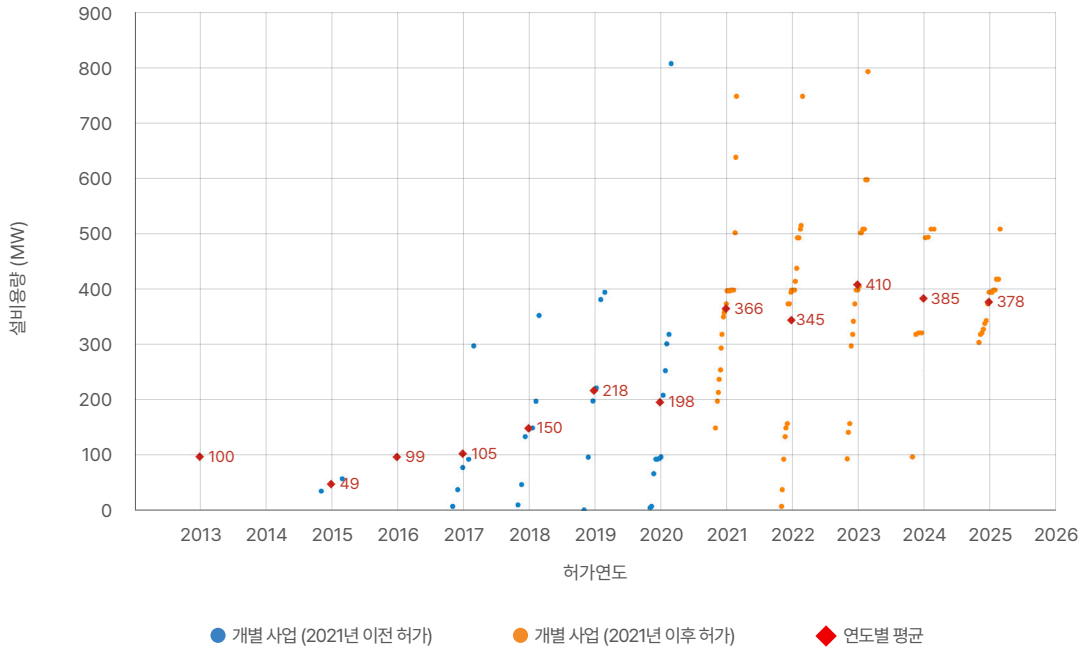
4) 국내 발전사업허가 해상풍력 단지 분석

향후 입찰 대상 단지의 규모와 추세를 파악하기 위해 발전사업허가 단지 전체를 별도로 분석하였다. 최근 허가된 단지일수록 총 설비용량이 커지는 경향이 나타나며(그림 8), 2021년 이후 허가 단지 중 200 MW 이상 단지가 약 87%를 차지한다. 평균 설비용량도 2020년까지 허가된 단지의 163 MW에서 2021년 이후 375 MW로 증가하였다(표 34). 밀도 시나리오는 이러한 단지 대형화 추세를 고려하여 설정하였다.

[표 34] 국내 발전사업허가 해상풍력 단지 규모 추세

설비용량 구간	2013~2020년 허가 단지 수(%)	2021~2025년 허가 단지 수(%)
200 MW 미만	22 (65%)	11 (13%)
200~500 MW	11 (32%)	55 (67%)
500~1000 MW	1 (3%)	16 (20%)
합계	34	82
평균 설비용량 (MW)	163 MW	375 MW

[그림 8] 해상풍력 발전사업허가 설비용량 추이



자료: 전기위원회 「3MW 초과 발전사업 허가대장」

참고문헌

- Borrmann, R., Rehfeldt, K., Wallasch, A.-K., & Lüers, S. (2018). *Capacity densities of European offshore wind farms* (Report No. SP18004A1). Deutsche WindGuard GmbH. https://maritime-spatial-planning.ec.europa.eu/practices/capacity-densities-european-offshore-wind-farms
- Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). (2024, July 1). *Atlantic Wind Lease Sale 10 (ATLW-10) for commercial leasing for wind power development on the U.S. Central Atlantic Outer Continental Shelf—Final sale notice (89 FR 54506)*. https://www.federalregister.gov/documents/2024/07/01/2024-14462/atlantic-wind-lease-sale-10-for-commercial-leasing-for-wind-power-development-on-the-us-central
- Commission nationale du débat public (CNDP). (2024). *Public debate - Maritime spatial planning*. https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2024-02/Synthese_DMO__SA_Nouvelle-Aquitaine-gb.pdf
- Danish Energy Agency. (2016). *Area calculation for offshore wind farms*.
- Durakovic, A. (2023, June 7). Denmark kills off open door offshore wind scheme, 24 projects cancelled. *OffshoreWIND.biz*. https://www.offshorewind.biz/2023/06/07/denmark-kills-off-open-door-offshore-wind-scheme-24-projects-cancelled/
- Equinor. (2017). *Hywind Scotland: The world's first floating wind farm*.
- Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH). (2025). *Site Development Plan (Flächenentwicklungsplan - FEP)*.
- Government of Japan. (2018). *Act on Promoting the Utilization of Sea Areas for the Development of Marine Renewable Energy Power Generation Facilities (Act No. 89 of 2018)*.
- Hernando, D., Musial, W., Duffy, P., & Shields, M. (2023). *Capacity density considerations for offshore wind plants in the United States* (NREL/TP-5000-86933). National Renewable Energy Laboratory. https://doi.org/10.2172/2274825
- Hernando, D., Duffy, P., Cooperman, A., Housner, S., & Hall, M. (2024, September 24–25). *Capacity density considerations for floating offshore wind farms in ultradeep waters* (NREL/PR-5000-90811) [Conference presentation]. American Floating Offshore Wind Technical Summit (AFloat), Portland, ME, United States. https://docs.nlr.gov/docs/fy24osti/90811.pdf
- Ministry of Economic Affairs and Climate Policy. (2015). *Offshore Wind Energy Act (Wet windenergie op zee)*. Government of the Netherlands.
- Ministry of Economic Affairs (MOEA). (2015). *Directions of Zone Application for Planning Phase of Offshore Wind Power*. Government of Taiwan (R.O.C.).
- Norwegian Ministry of Energy. (2024). *Offshore wind*. Government.no. https://www.regjeringen.no/en/topics/energy/renewable-energy/havvind/id2830329/
- North Sea Wind Power Hub. (2022). *Planning & Permitting study for North Sea Windpower Hub – concerning the Norwegian sector*.
- Ocean Winds. (2025). *WindFloat Atlantic: 5 Years of Operations*. https://oceanwinds.com/wp-content/uploads/2025/05/Cinco-Anos-WindFloat-Atlantic-EN.pdf
- The Crown Estate. (2023). *Capacity Increase Programme*. https://www.thecrownestate.co.uk/our-business/marine/capacity-increase-programme
- 관계부처 합동. (2021). 『2050 탄소중립 시나리오』.
- 기후에너지환경부. (2025년 12월 10일). 「해상풍력 2030년까지 연간 4GW 보급 기반 구축한다」 [보도자료]. https://www.mcee.go.kr/home/web/board/read.do;jsessionid=fAgzDdTe7Mlr6sphL53_OjeR5bjf4vc0uMEi4BHI.mehome2?pagerOffset=530&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchValue=&menuId=10598&orgCd=&boardId=1826910&boardMasterId=939&boardCategoryId=&decorator=
- 기후에너지환경부. (2026년 6월 30일). 「해상풍력 중장기 입찰 이행안(로드맵) 공개」 [보도자료]. https://www.mcee.go.kr/home/web/board/read.do?boardId=1874130&boardMasterId=939&menuId=10598
- 기후에너지환경부 전기위원회. (2026년 4월 17일). 『3MW 초과 발전사업 허가대장』. 기후에너지환경부. https://www.korec.go.kr/notice/selectNoticeList.do#moveNoticeDetail

- 김건훈, 김진영, 황수진, 윤창열, & 김현구. (2023). 「데이터 플랫폼내 풍력잠재량에 적용되는 풍력설비의 적정 용량 밀도에 대한 분석」. 『한국태양에너지학회 논문집』, 43(2), 13–23. https://doi.org/10.7836/kses.2023.43.2.013
- 김대훈. (2026년 7월 16일). 「좌초 위기 넘긴 '신안우이 해상풍력' 착공…K-풍력 표준 될까」. 『한국경제』. https://www.hankyung.com/article/202607169916i
- 녹색에너지전략연구소, 녹색전환연구소, 사단법인 넥스트, & Agora Energiewende. (2024). 『대한민국 2050 탄소중립 시나리오 K-Map 2.0: 탄소중립 경제를 위한 기술 리더십 강화 방안』.
- 박윤석. (2022년 5월 26일). 「해상풍력터빈 이격거리 제한에 업계 당혹」. 『일렉트릭파워』. https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=30540
- 박윤석. (2025년 12월 11일). 「새 정부 첫 해상풍력 보급 계획 실행에 방점」. 『일렉트릭파워』. https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=37574
- 산업통상자원부. (2017). 『재생에너지 3020 이행계획(안)』.
- 산업통상자원부. (2023). 『제10차 전력수급기본계획(2022~2036)』.
- 산업통상자원부. (2025). 『제11차 전력수급기본계획(2024~2038)』.
- 산업통상자원부, & 한국에너지공단. (2020). 『2020 신·재생에너지 백서』.
- 이경주. (2026년 5월 1일). 「LS전선·대한전선, 안마해상풍력 '종료'와 '중단'의 차이」. 『THE STOCK』. https://www.the-stock.kr/news/articleView.html?idxno=32460
- 이승문. (2023). 『해상풍력 적기 보급을 위한 해외 송전망 연계 전략 연구』 (수시연구보고서 2022-07). 에너지경제연구원.
- 황태건, 이상혁, 김지윤, & 육근형. (2026). 「해상풍력법에 따른 입지 규제요인의 공간적 적용과 예비지구 가능해역의 변화 분석」. 『에너지경제연구』, 25(1), 161–184. https://doi.org/10.22794/keer.2026.25.1.005

SFO°C
Solutions for Our Climate

GESI
Green Energy Strategy Institute

기후솔루션은 전 세계 온실가스 감축 및 올바른 에너지 전환을 위해 활동하는 비영리법인입니다.
리서치, 법률, 대외 협력, 커뮤니케이션 등의 폭넓은 방법으로 기후위기를 해결할 실질적 솔루션을 발굴하고,
근본적인 변화를 위한 움직임을 만들어 나갑니다.

녹색에너지전략연구소(GESI)는 한국의 에너지시스템을 발전시키고 재생에너지를 확대하기 위한
전문성을 제공하기 위해 2009년에 설립된 비영리 민간 싱크탱크입니다.