



한독 에너지 파트너십 팀
Energiepartnerschaft - Team
DEUTSCHLAND - KOREA

연구보고서

한국과 독일의 재생 에너지 잠재량

다양한 재생 에너지원별 개요



관련 정보

출판: 한독에너지파트너십팀

이행:

아델피 컨설팅 (adelphi consult GmbH)
Alt-Moabit 91
10559 Berlin
T +49 (30) 8900068-0
F +49 (30) 8900068-10
office@adelphi.de
www.adelphi.de

저술:

Seitz, Hannes; Sieler, Roman; Narita, Jana

인용:

Seitz, Hannes; Sieler, Roman; Narita, Jana (2023): Renewable energy potential in Korea and Germany. An overview of different renewable energy sources. Berlin: adelphi.

버전:

09/2023

본 출판물은 저작권법의 보호를 받으며, 모든 사용은 Adelphi Consult 의 승인을 받아야 합니다.



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

본 출판물은 연방경제기후보호부의 의뢰로 작성되었으며, 아델피(adelphi)는 에너지 전환의 틀 내에서 에너지 및 기후 정책 목표를 구현하기 위한 다양한 프로젝트에서 연방 정부를 지원합니다.

목차

1	핵심 요약	4
2	서론	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
3	한국과 독일의 에너지 소비 동향	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
4	재생 에너지원 - 종류, 기술, 및 효율성	7
5	태양 에너지	9
5.1	목표, 정책, 및 현황.....	9
5.2	세계 태양 지도(Global Solar Atlas, GSA)에 따른 잠재량.....	9
5.3	국가 차원 연구에 따른 구체적 잠재량.....	11
5.4	비교	12
6	육상 풍력	13
6.1	목표, 정책, 및 현황.....	13
6.2	독일과 한국의 전반적인 잠재량	13
6.3	국가 차원 연구에 따른 구체적 잠재량.....	14
6.4	비교	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
7	해상 풍력	17
7.1	목표, 정책, 및 현황.....	17
7.2	독일과 한국의 전반적인 잠재량	17
7.3	국가 환경과 전망을 고려한 구체적인 잠재량	18
7.4	비교	19
8	기타 재생 에너지원	20
8.2	기타 재생 에너지 잠재량 비교.....	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
9	결론	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
	표 목록	29

1 핵심 요약

글로벌 기후 위기 대응 부담을 공유하기 위한 노력에 있어 국가적 기여를 충실히 이행하기 위해 독일과 한국은 각각 2045 년과 2050 년까지 탄소중립을 달성하고자 하는 목표를 세웠다.

탈탄소 경제로의 전환은 독일과 한국에게 비슷한 도전과제를 안겨주고 있다. 양국 모두 전체 에너지 소비량이 탄소중립 원년에 감소할 것으로 예상되지만, 전기화와 전반적인 탈탄소화 필요성으로 인해 재생 에너지원의 급속한 확장이 요구된다. 양국에서 에너지 수요를 더욱 줄이기 위해서는 에너지 효율성 조치를 통해 양국의 재생 에너지로의 전환을 보완해야 한다. 이 같은 노력은 양국 모두에게 유효하지만, 현재 독일보다 1 인당, GDP 단위당 에너지 소비량이 훨씬 높은 한국의 경우 특히 중요하다. 양국의 탄소중립 달성연도의 최종에너지 소비 전망 평균을 보면 한국은 2050 년 1,620TWh 로 독일의 2045 년 1,468TWh 보다 높은 수치를 보이고 있다.

글로벌 및 국가 차원의 연구를 검토한 본 메타 연구는 양국이 미래 에너지 수요의 전부는 아닐지라도, 대부분을 공급할 수 있는 잠재량을 가진 다양한 국내 재생 에너지원을 활용할 수 있음을 보여준다.

양국의 지리적 여건에 따라 개별 재생 에너지원의 잠재량은 다양하다. 한국은 일사량이 더 강해 단위면적당(m²) 태양 에너지 잠재량이 더 높지만, 국토 면적은 독일의 3 분의 1 에 불과해 총 태양 에너지 잠재량은 독일이 더 높다. 또, 더 높은 평균 풍속과 더불어 적합 지역의 더 높은 가용성으로 인해 독일의 육상 풍력에 대한 잠재량이 비교적 더 높다. 다만 해상풍력 에너지의 경우, 한국의 해양 면적이 약 8 배나 넓기에 전체적으로 독일보다 훨씬 더 높은 잠재량을 갖고 있다.

한국의 광역 해양 지역은 조력이나 파력 에너지와 같은 미래 해양 에너지 기술에 대한 많은 기회를 제공하지만, 이와 관련하여, 독일은 잠재량이 거의 없는 것으로 평가된다. 해양에너지 기술에 대한 한국의 기술적 잠재량은 현재의 전력 수요를 감당하기 충분할 것으로 예측되지만, 해당 잠재량을 발휘하기 위해서는 연구 개발을 늘리고 유리한 규제 체계를 채택해야 한다.

규제 및 시장의 체계를 고려하지 않은 각국의 태양 에너지 기술 잠재량 대한 예측치는 해당 국가의 탄소 중립 연도에 발생할 것으로 예상되는 최종 에너지 소비량을 크게 초과한다. 독일의 현재 정책 체계를 고려해보면, 2045 년 독일의 최종 에너지 소비 수요의 과반이 육상 풍력을 통해 공급될 수 있다. 독일의 육상 풍력 기술 잠재량은 2045 년 총 최종 에너지 수요를 크게 초과한다. 한국의 경우에도, 해상 풍력 기술 잠재량 예측치의 중간값이 한국의 2050 년 최종 에너지 소비 예상량을 초과한다.

본 연구에서 취합한 한국과 독일의 상당한 재생 에너지 잠재량 예측에도 불구하고, 양국 모두 기술의 실행 가능성과 경제적 효율성 때문에 여전히 일부 에너지를 수입할 것이다. 하지만 독일(갈탄 제외)과 한국이 거의 모든 화석 연료를

수입하고 있는 현재와 비교하면, 기존 재생 에너지 잠재량이 실현되며 양국의 수입 의존도는 훨씬 작아질 것이다.

전체적으로 본 메타 연구는 독일과 한국 모두 자국 내에서 재생 에너지 잠재량을 활용하여 청정 에너지 전환의 다양한 이점을 얻을 수 있는 기회를 갖고 있다고 결론 지었다. 따라서 독립적이고, 비용 효율적이며, 기후 친화적인 에너지 보급은 현재의 정책 결정, 연구 개발 및 해당 변화에 대한 사회적 수용 여부에 달려 있다.

2 서론

기후 위기의 영향이 악화되고 전 세계 배출량이 계속 증가함에 따라, 다수의 국가에서는 최악의 결과를 피하기 위해 탄소중립(net-zero) 목표를 설정했다. 대한민국(한국)과 독일도 이에 속하며, 각각 2050 년과 2045 년까지 탄소 중립을 달성하겠다는 목표를 발표했다. 해당 목표는 2021 년에 각각 6 억 1600 만 톤과 6 억 7400 만 톤의 이산화탄소(CO₂)를 배출한 양국의 탄소 집약도가 높은 에너지, 모빌리티 및 산업 체계를 고려하면 의욕적인 목표임이 분명하다. (Ritchie et al. 2020b, 2020a). 양국의 그 어떤 부문보다도 많은 각각 약 3 억 6 천만 톤과 2 억 6 천만 톤이 전기 및 열 생산으로 인해 배출된다. 이와 동시에 교통 등 타 부문의 전파(electrification)로 인해 향후 전력 수요는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 즉, 전력 부문의 신속하고 지속적인 탈탄소화 없이는 달성할 수 없는 탄소 중립 목표를 달성하기 위한 모든 노력의 핵심에 에너지 전환이 자리하고 있다.

점차 증가하는 기후 위기의 여파를 해결하는 것 외에도 양국 에너지 부문의 탈탄소화는 다양한 추가 이점을 제공한다. 한국은 화석 가스, 석유 및 석탄 수입 의존도가 국가 중 높은 순위를 차지하고 있다. (Welder et al. 2023). 독일은 역사적으로 러시아 가스에 의존해왔기 때문에 러시아의 우크라이나 침공 이후 심각한 경제적 어려움을 겪기도 하였다. 에너지 자립도를 높이는 것 외에도, 재생 에너지의 구현은 한국과 독일 양국에서 무수한 경제적 이익과 함께 지역 가치 창출로 이어질 것이다. (Welder et al. 2023; Lutz et al. 2018). 최근 몇 년간의 개선에도 불구하고, 한국의 대기질은 2022 년 환경성과지수 (Environmental Performance Index 2023)에서 분석한 180 개국 중 30 위에 불과하다. 따라서 보다 깨끗한 형태의 에너지로의 전환은 호흡기 질환 및 오염과 관련된 조기 사망을 예방하는 데 기여할 수 있다. (Jung 2017)

전력 부문의 혁신적인 탈탄소화는 현재 기술로 달성 가능하다. 최근 몇 년간의 기술 발전과 비용 절감으로 인해, 태양열 및 풍력 발전과 같은 재생 에너지는 신규 화석 연료 발전소나 원자력보다 저렴한 경우가 많다. (U.S. Energy Information Administration 2022; Kost et al. 2021). 그러나 대부분의 재생 가능 에너지원의 구현은 중앙 집중식 화석 또는 핵 에너지원과 근본적으로 다르며, 분산 방식으로 전개되어야 한다. 또한 설치 공간 및 전송 및 저장과 관련된 인프라의 개선도 필요하다.

이러한 요건으로 인해 종종 한국이나 독일과 같이 밀도가 높은 선진 경제의 공간과 요건때문에, 필요한 에너지 수요를 재생 에너지로 충족시키기에는 부족할 것이라는 우려가 야기된다. 해당 우려는 재생 에너지의 포괄적이고 신속한 보급을 지연시킬 수 있으므로, 다음 연구에서는 독일과 한국의 재생 에너지원과 각 잠재량에 대한 전반적인 설명을 제공함으로써 이에 대한 해결책을 제시하였다. 즉, 문제에 대한 다차원적인 문헌을 이해하고 양국의 상황에 대한 전반적인 개요를 제시하는 짧은 지침서이다.

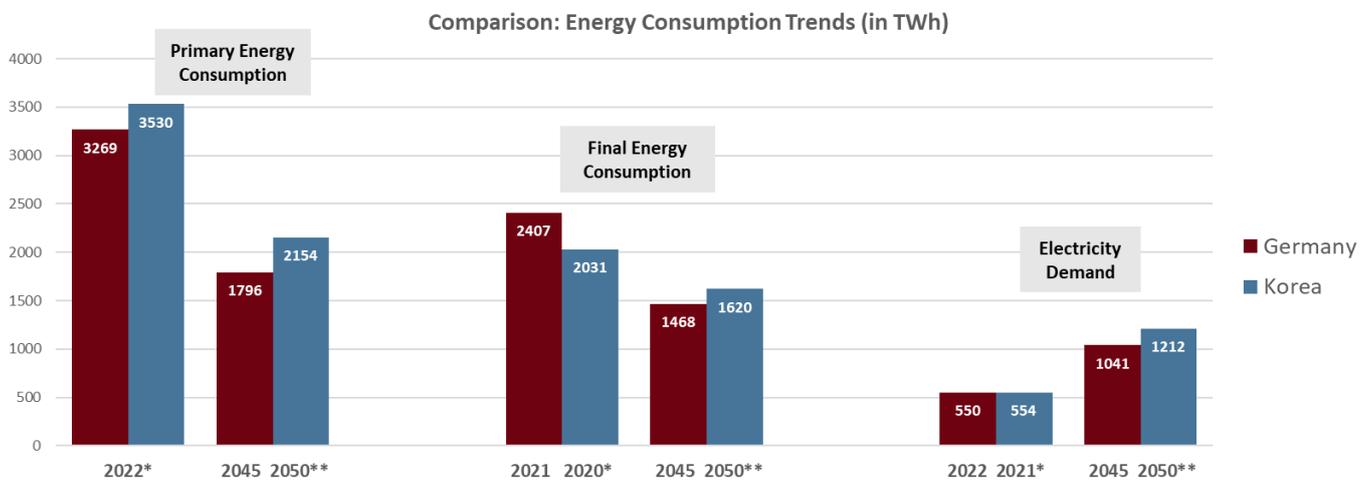
본 연구에서는 양국의 재생 에너지 생산의 필요성에 대한 맥락을 제공하기 위해 현재 및 예상 에너지 소비 트렌드를 먼저 보여준다. 이어서, 관련성이 가장 높은 재생 에너지 기술

옵션을 설명한 후, 한국과 독일에서 가장 유용한 재생 에너지원인 태양광, 육상 및 해상 풍력 에너지의 잠재량을 자세히 살펴볼 것이다. 그 후에는 나머지 재생 에너지 옵션의 잠재량에 대한 간략한 개요를 기술하였다.

3 한국과 독일의 에너지 소비 동향

절대치를 기준으로 한국과 독일은 전 세계적으로 가장 많은 에너지를 소비하는 국가이다. 탈탄소 미래는 운송 및 난방 부문의 전기화 등을 통해 에너지 소비 패턴에 상당한 변화를 가져올 것이다. 이로 인해 전력수요는 증가하는 반면, 에너지 효율성과 에너지 저감 노력으로 인해 총 에너지 소비량은 감소할 것이다.

시각화한 것이다. 그림에 표시된 숫자는 독일과 한국의 다양한 탄소 중립 시나리오에서 파생된 평균치이다. 이는 현재 및 예상되는 1차 에너지 소비(PEC), 최종 에너지 소비(FEC) 및 전력 수요와 관련하여 국가 간 유사점과 차이점을 보여준다. 독일은 한국보다 국토, 인구, 경제 규모가 크지만, 현재 양국의 총 에너지 소비량과 전력 수요는 비슷하다. 그러나 독일은 GDP 단위당(PPP) 에너지 소비량이 한국의 거의 절반 수준이며, 독일의 1인당 전력 소비량은 한국의 약 70%에 정도이다. (World Bank Open Data 2023) 이는 독일의 에너지 효율성 향상으로 설명할 수 있으며, 해당 분야에서 한국의 잠재량을 시사한다. 절대적 기준으로 볼 때, 한국은 전 세계 1차 에너지 소비량에서 세계 8위, 독일은 11위를 기록했다. (Enerdata 2023d)



* Year with most recent data available.

** Forecasts for 2045/2050 are based on different scenario studies; values shown represent averages of the different estimates.

그림 1: 현재 및 탄소중립연도의 독일과 한국의 에너지 동향

현재 소비량 자료 출처: (AG Energiebilanzen 2023; Umweltbundesamt 2022), (Umweltbundesamt 2022), (Ritchie and Roser 2023), (Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth 2021), (IEA 2023)

Data for projections: (Ariadne 2021), (Prognos et al. 2021), (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021), (Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) 2021), (Green Energy Strategy Institute et al. 2022), (International Energy Agency (IEA) and Korean Energy Economics Institute (KEEI) 2021)

광범위한 분야의 전기화 증대로 인해 전력 수요가 증가하면서 탈탄소화가 에너지 체계의 성격을 변화시킬 것이다. 그러나 동시에 보다 효율적인 에너지 사용으로 인해 1차 및 최종 에너지 소비가 감소하여, 에너지 비용도 절감될 것으로 예상된다. 에너지 소비 감소가 일어나고 자국 내 재생 에너지 생산의 비중이 높아지면, 현재 에너지 수입에 크게 의존하고 있는 한국과 독일과 같은 국가의 경우, 가격 및 공급 충격에 대한 취약성이 줄어든다. (Clean Energy Wire 2023; EIA 2023)

그림 1은 한국과 독일의 현재 전력 및 에너지 소비량을 각 국가의 탄소 중립 달성연도의 예상 소비량과 비교하여

최근 데이터에 따르면 2022년 한국은 3,269TWh를 소비한 독일에 비해 3,530TWh를 사용해 독일보다 더 많은 1차 에너지를 소비한 것으로 나타났다. 반면, FEC는 2020년 한국의 2,031TWh에 비해 독일은 2021년에 2,407TWh를 사용해 한국보다 높다. 이는 현재 한국이 독일보다 에너지 손실이 더 높다는 것을 보여준다.

에너지 효율성에 대한 독일의 더 높은 의지는 탄소 중립 달성연도의 예상 수요량을 보면 더욱 분명해진다. 수요량은 세 가지 범주 모두에서 독일보다 한국이 더 높게 책정되어 있다. 한국의 전반적인 에너지 효율성 개선 규모가 작기에, FEC는 현재 2,031TWh에서 2050년 1,620TWh로 비교적 적게 감소할 것으로 예상된다. 독일의 경우, FEC는 2021년 2,407TWh에서 2045년까지 평균 1,468TWh로 감소할 것으로 예측된다. 하지만 PEC는 연료 전환과 에너지 효율성 증대 조치를 통해 양국 모두에서 급격하게 감소할 것으로 추정된다.

위에서 설명한 바와 같이, 탈탄소 에너지 시스템 내에서는 전력 수요가 증가할 것이다. 독일의 2022년 전력수요는 550TWh에서 2045년 평균 1,041TWh로 증가할 것으로 예상된다. 한국의 경우 2021년 554TWh에서 2050년 1,212TWh로 더욱 크게 증가할 것으로 예측된다.

4 재생 에너지원 - 종류, 기술, 및 효율성

에너지 전환은 탄소중립 목표를 달성하기 위한 중요한 첫 단계이며, 한국과 독일 모두 재생 에너지 발전을 빠르게 확대해야 하는 필요에 직면해 있다. 다음 연구에서 재생 가능성에 대해 더 자세히 논의하기에 앞서, 재생 에너지 확장을 위한 기존의 기술적 옵션을 살펴보는 것이 바람직하다.

재생 가능 에너지에 대한 관심이 높아지고 탈탄소화를 향한 전 세계적 노력이 증가함에 따라 태양광 및 풍력 에너지는 상대적으로 저렴한 비용과 효율성 향상으로 인해 특히 인기 있는 선택지가 되었다. 태양 에너지는 광전지나 태양열을 활용할 수 있으며, 전자가 더 널리 사용되고 있다. 수년에 걸쳐 태양광 패널은 점점 더 효율화 되었으며, 태양 에너지 비용은 크게 감소하며 가장 경쟁력 있는 재생 가능 옵션 중 하나가 되었다. 그러나 특정 위치의 일사량과 유틸리티 규모 시스템에 적합한 지형을 고려하는 것이 중요하다. 태양 에너지는 출력에서 큰 변동성을 보이는 경향이 있으며, 일반적으로 잠재량을 최대한 활용하려면 특정 형태의 에너지 저장 장치가 필요하지만, 해당 비용까지 고려하더라도 비용 경쟁력이 있는 경우가 많다. (Kost et al. 2021)

풍력 터빈은 육상 및 해상 모두에 설치할 수 있으며 후자는 더 높은 풍속, 더 큰 에너지 생성 잠재량 및 더 지속적인 에너지 출력을 제공하는 경우가 많다. 해상 풍력 터빈은 바닥에 고정되거나 부유식으로 설치될 수 있다. 전자는 상대적으로 얕은 수심에 더 일반적이고 적합한 반면, 부유식 터빈은 더 깊은 수심에 활용할 수 있다. 해상에서의 높은 다양성과 풍속으로 부유식 솔루션이 최근 몇 년간 추진력을 얻고 있다. 또한 해안선이 가파른 국가에 더 적합하다. 더 큰 로터(rotor) 직경 및 더 높은 타워와 같은 기술 발전으로 인해 풍력 에너지 비용이 급격히 감소했으며, 이는 특히 해상 풍력 발전의 더욱 안정적인 출력과 더불어 풍력 에너지 보급을 가속화하는 데 기여했다. (Ritchie et al. 2022; Sieler 2022). 그러나 육상 및 해상 풍력 에너지에 대한 지역의 적합성을 평가할 때는 평균 풍속, 입지, 자연 보호 및 기타 요소에 관한 규제 등 다양한 요소를 고려해야 한다.

풍력과 태양 에너지는 최근 몇 년간 상당한 성장을 거듭하여 전 세계 총 생산량이 각각 1,800TWh 와 1,000TWh 에 이르렀음에도 불구하고 (Ritchie et al. 2022), 여전히 세계 최대 재생 에너지원인 수력에는 근접하지 못하고 있다. 수력 발전만으로 다른 모든 재생 가능 에너지원을 합친 것보다 더 많은 전력인 4,200TWh 의 전력을 공급하였다. 전 세계적으로 이처럼 중요한 역할을 함에도 불구하고 수력발전은 다른 발전원과 구별되는 몇 가지 특성을 갖고 있기에 본 연구에서는 간략하게만 다룰 것이다.

해당 특징 중 하나는 수력 발전 프로젝트, 특히 대규모 프로젝트에는 다소 독특한 지리적 조건이 필요하다는 것이다. 동시에 높은 자본 비용, 환경 영향 및 지정학적 문제로 인해 수력 발전 확대가 둔화되었으며, 연간 성장률은 태양광 또는 풍력 에너지보다 낮은 실정이다 (Ritchie et al. 2022; U.S.

Energy Information Administration 2022). 또한, 독일과 한국 모두 경제성이 확보된 잠재량의 상당 부분이 이미 과거에 실현되었다.

수력, 태양, 풍력 에너지가 2021 년 전 세계 재생 가능 에너지 생산량의 90% 이상을 차지하지만 고려해야 할 다른 에너지원도 다양하게 존재한다. (Ritchie et al. 2022). 첫 번째는 에너지를 생산하기 위해 지하 깊은 곳의 높은 온도를 활용하는 지열 에너지이다. 운영 비용은 상대적으로 낮지만 시추 및 탐사에 필요한 초기 투자 비용은 높을 수 있으며, 지열 프로젝트 실행 오류와 관련된 잠재적 위험으로 인해 대중의 수용도가 낮은 경우도 있다. 지열 자원은 입지에 따라 차이가 크며, 가장 적합한 장소는 지구의 열에 가장 쉽게 접근할 수 있는 지각판 경계 또는 화산 지역 근처에서 발견된다. 또 다른 관련 재생 에너지원은 바이오매스와 바이오가스이며, 둘 다 유기 폐기물 연소와 관련되어 있다. 이 기술은 대부분의 육상 풍력 및 태양광보다 비용이 많이 들지만, 비교적 저렴하며 소규모로도 사용할 수 있지만 대기 오염 등 환경에 영향을 미칠 수 있거나, 또는 비폐기물에 의존하는 경우 삼림 전용이 일어난다. (Southern Environmental Law Center 2022; Kost et al. 2021). 마지막으로 해양 에너지는 보급률은 적지만 유망한 재생 에너지원이다. 예를 들면, 조류를 사용하여 에너지를 생성한다. 해양 에너지는 예측 가능하고 신뢰할 수 있으며, 한국이 세계 최대 조력 발전소 중 하나를 보유하고 있음에도 불구하고 현재 효율성의 차이가 크고 아직 널리 보급되지 않았다. (Edmond 2020). 현 도전과제는 대부분 기술의 새로운 발전, 높은 자본 비용 및 입지 의존성과 관련되어 있다.

결론적으로, 오늘날 이용 가능한 다양한 재생 에너지 옵션이 있으며 각각 고유한 장점과 도전과제가 존재한다. 가장 적합한 재생 가능 에너지원의 구성은 기본적으로 각 국가의 지리와 일반적인 선호도에 따라 다르다. 그럼에도 불구하고, 현재 재생 에너지 용량 확장을 위해 구현이 가장 용이한 옵션은 태양광과 풍력 에너지라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주로 이 두 가지에 초점을 맞추며, 나머지에 대해서는 더 간략하게 논의하기로 한다.

본 연구는 기존 연구 및 보고서를 통해 한국과 독일의 다양한 재생 에너지원에 대한 잠재량에 대한 연구 결과를 요약하고 있다. 그러나 잠재량을 결정하는데 기초가 되는 가정은 출처에 따라 크게 다를 수 있으며, 이로 인해 제한된 범위에서만 결과 비교가 가능할 수 있다. 대략적으로, 잠재량은 세 가지 수준으로 나눌 수 있다. 이론적 또는 자연적 잠재량이라고 불리는 첫 번째 수준은 특정 기술의 잠재량을 계산하기 위해 국가 표면(또는 해상 풍력의 경우 배타적 경제 수역(EEZ))과 일사량, 풍속, 또는 수심과 같은 자연적 조건의 전반을 사용하는 간단한 접근 방식을 취한다.

두 번째 수준인 기술적 잠재량은 변환 효율성, 시스템 구성, 기술적으로 필요한 간격 등의 요소를 고려하여 이용 가능한 기술을 통해 이론적 잠재량 중 실제 얻을 수 있는 산출량이 어떻게 되는지 살펴본다. 예를 들면, 모듈/풍차 및 대부분의 경우 협준한 지형, 삼림, 도시화/산업 지역과 같은 각 재생 기술 설치와 관련된 물리적인 장애물로 인한 제약 조건도 존재한다.

세 번째 수준인 실질 잠재량은 다음의 제약 조건을 고려하며, 연구에 따라 큰 차이가 존재한다.

- 기술적 잠재량에 포함되지 않은 경우 해당 재생 기술 설치에 대한 물리적 장애물
- 토지 이용 규정, 예: 자연 보호 구역 또는 농경지
- 정부 지원 및 규제 정책과 해당 기술의 경제적 타당성

정책 규제 및 경제적 타당성은 해당 사회에서 특정 기술의 기술적, 입지적 잠재량의 어느 정도가 실현 가능한 것으로 분류될 것인지에 영향을 준다.

마지막으로, 본 연구에 인용된 모든 출처가 상기 언급된 개념을 엄격하게 적용하는 것은 아니라는 점을 밝히고자 한다. 때로는 잠재량의 정의가 서로 혼합되거나 명확하게 구분되지 않는 경우도 있으며, 이 경우 관련 맥락에 대한 설명이 제공될 것이다.

5 태양 에너지

한국과 독일 모두 전반적으로 온화한 기후를 갖고 있음에도 불구하고, 태양광 발전은 전력 발전 및 주거용 또는 산업용 건물의 옥상 태양광 발전으로서 상당한 잠재량을 갖고 있다. 또한 태양광은 소규모로도 실행 가능한 비교적 저렴한 옵션이라는 매력을 갖고 있어 시민들이 에너지 프로슈머가 될 수 있도록 해준다. 가정용 배터리나 전기 자동차뿐만 아니라 제로 에너지 주택과 같은 새로운 건축 접근 방식과 결합하여 태양열은 가정의 에너지 자율성을 확보하는 열쇠가 될 수도 있다.

5.1 목표, 정책, 및 현황

다음에서는 태양 에너지 발전 확대 현황과 기술에 대한 정책 목표를 간략하게 소개하고, 보다 폭넓은 탈탄소화 노력 간의 연관성을 살펴보고자 한다.

5.1.1 독일

앞서 언급한 바와 같이, 독일 기후 정책은 2045년까지 탄소 중립을 달성한다는 목표를 갖고 있으며, 에너지 부문의 전환은 해당 목표를 이루는 데 필수적이다. 이러한 맥락에서 독일 정부는 2030년까지 재생 에너지원을 통해 전력 공급의 80%를 생산할 것 목표로 하고 있다. (Bundesregierung 2023). 이는 재생 에너지의 비중이 10년 내에 거의 두 배로 증가해야 함을 의미한다. 해당 목표를 달성하기 위해 2022년 4월에 소위 부활절 패키지(Easter Package)가 마련되었으며, 이는 옥상 태양광에 대한 추가 지원을 포함하는 재생 에너지원 개정법(EEG)이 포함되어 있다. 해당 법은 또한 2030년까지 215GW¹를 생산하는 신규 태양광 확장 목표를 설정했는데, 이는 2022년 기준 67GW에서 독일의 최대 설치 용량을 3배 이상 늘려야 함을 시사한다. (Umweltbundesamt 2023c; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023). 2030년까지 남은 기간을 고려하면 연간 약 18.5GW의 추가 피크 용량을 설치해야 한다. 과거 2009년부터 2013년까지 독일의 단기간 태양광 붐이 한창 일었을 때 달성된 연간 최대 용량 추가분이 약 8GW였던 것을 감안하면, 해당 목표는 의욕적인 것이다. 비록 용량 추가가 2022년에 7GW를 약간 넘었고, 이것은 지난 몇 년간 상당한 개선이 이루어졌음을 보여주고 있지만, 독일이 목표를 달성하려면 태양 에너지 확장 속도를 더욱 높여야 한다.

5.1.2 한국

한국은 2050년까지 기후 중립 달성을 목표로 하고 있으며, 이를 위해서는 에너지 공급에 근본적인 변화가 필요하다. 이러한 상황에서 한국은 유틸리티 규모에서 재생 에너지 비중을 확대하겠다는 목표를 발표했다. 한국의 2021년 탄소중립 로드맵에 제시된 목표는 재생 에너지 비중 30.2%였으나, 제 10차 전력수급기본계획에 따르면 해당

목표는 2030년 21.6%, 2036년 30.6%로 낮아졌다.

(Enerdata 2023c) 원자력 확장 선호를 반영한 해당 계획은 또한 태양 에너지에 비해 중요성이 더 커질 풍력에 더 중점을 두려는 정부의 목표를 강조하고 있다. 재생 에너지 공급계획에 따르면 재생 에너지 생산에서 풍력에너지가 차지하는 비중은 2022년 1.8GW, 즉 전체 재생 에너지 생산량의 7%에서 2036년 34GW, 즉 약 33%로 증가할 예정이다. 유틸리티 규모 PV 또한 2022년 22GW에서 2036년 65GW 이상으로 늘어, 중요한 진전이 될 것이다. 현재 용량을 고려할 때 한국은 연간 약 2억 5천만 달러의 용량 추가가 필요할 것으로 보인다. 3GW로 정부 PV 목표 달성 2021년에 유틸리티 및 가정용 PV 모두 4.4GW가 추가된 점을 고려하면 한국은 자체 태양광 용량 목표에 필요한 비율을 달성할 수 있는 가능성이 높은 것으로 보이며, (Bellini 2022), 이는 더 높은 수준의 목표 또한 실현 가능함을 보여주고 있다. 그러나 한국은 태양광 입찰에서 용량 할당량을 줄였다. (Bellini 2023).

2030년까지 태양광 발전 용량 목표 달성과는 별개로, 태양 에너지의 2050년 역할이 무엇인가에 대한 문제는 여전히 정해지지 않았다는 점에 유의해야 한다. 여러 싱크탱크의 최근 연구에서는 태양광이 2050년까지 한국의 주요 전력 공급원이 될 수 있다고 추정했다. 해당 연구에서는 2050년 이후 중립을 달성하기 위해서는 38%의 태양광 발전 생산이 필요할 것이라고 밝혔다. (Green Energy Strategy Institute et al. 2022). 2021년 기준 태양 에너지는 총 발전량의 4%에 불과하기 때문에 이 비율을 달성하기에는 상당한 노력이 필요하다. (BloombergNEF 2021; Lee 2022)

5.2 세계태양지도(Global Solar Atlas)따른 잠재량

이 부분에서는 세계은행이 발행한 GSA를 사용하여 양국의 태양광 잠재량을 평가하기 위한 몇 가지 기본 맥락을 제공할 것이다.

5.2.1 독일

태양 에너지의 총 잠재량을 고려하는 출발점은 자연적 또는 이론적 잠재량이며, 이는 한 국가가 받는 지구 수평 복사량의 총량만을 나타낸다. 세계은행 Global Solar Atlas(GSA)의 추산에 의한 독일의 이론적 잠재량은 하루 평균 2.98kWh/m²이다. (World Bank Group et al. 2023) Fehler에 나온 것처럼 가장 강력한 잠재량은 남쪽에서 찾을 수 있다. (요류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.)

¹ 태양광 분야에서 GW는 기가와트 피크(Giga Watt Peak)를 의미하며, 이는 태양광 설비의 피크 용량을 의미한다.

독일의 총 표면적 약 357,000km²와 평균 자연 잠재량을 사용해 간단한 계산을 해 보면, 독일의 이론적 태양 잠재량은 연간 388,000TWh 에 달한다. 알기 쉽게 비교해보면, 2022 년 독일의 전력 소비량은 550TWh 였으며, 해당 소비량은 이론적 잠재량의 0.14% 수준이다. (Enerdata 2023a)

그러나 태양광 발전소는 모든 에너지량을 수확할 수 없다. 따라서 기술 잠재량(예: 시스템 구성, PV 모듈의 변환 효율 및 대기 온도, 오염 및 음영과 같은 기타 요소 고려)과 모듈 간 간격을 수정할 경우, GSA 는 독일의 2014 년 전력 소비량과 비슷한 전력을 제공하기 위해서는 독일 전체 면적의 2.95%가 유틸리티 규모의 태양광 발전으로 전환되어야 한다고 밝혔다. **오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.**에서는 앞서 언급된 기술적 한계를 고려한 독일의 태양광 발전 잠재량을 보여주고 있다.

기술적인 제한과는 별도로, 토지 사용의 제한으로 인해 이 최대 잠재량을 수확할 수 있다고 가정하는 것은 현실적이지 않다. 이것이 바로 GSA 가 실질 잠재량을 현실적으로 반영하기 위한 추가 노력의 일환으로 해당 산출 과정에 두 가지 수준의 제약 조건을 더한 이유이다. 레벨 1에서는 식별 가능한 물리적 장애물(예: 험지, 삼림, 도시화/공업 지역)이 있는 토지가 제외되고, 레벨 2에서는 토지 이용 규제(예: 자연 보호 구역, 농경지)가 적용될 수 있는 토지가 제외된다. 이에 따라 이용 가능한 면적은 독일 총 토지의 각각 73.2%와 21.4%로 줄어들게 된다.

이러한 가용 공간의 감소는 독일 태양광 패널의 이론적 평균 효율에도 영향을 미친다. 기술적 한계와 사용 가능한 토지의 분포를 고려하여 GSA 는 레벨 1에서 사용 가능한 토지 기준 하루 2.96kWh/kWp 의 실제 효율을 산출하였다. 이는 연간 kWp 당 약 1,080kWh 에 해당하며, 이는 독일이 태양광만으로 2022 년 전력 수요 550TWh 를 충족하려면 약 510GW 의 태양광 발전 용량이 필요함을 시사한다.

토지 이용 제한(레벨 2)에 관한 GSA 의 가정을 바탕으로, 단순화된 접근법 및 이론적으로 이용 가능한 21.4%에 대한 전국 평균 일사량 사용 시, 태양광 PV 의 기술적 잠재량은 7,438TWh 로 추산된다. (Rechner Online 2023)

5.2.2 한국

독일의 경우와 마찬가지로 해당 분석의 이상적인 출발점은 해당 국가의 총 이론적 태양 잠재량이다. 한국의 경우 더 높은 일사량으로 인해 단위 면적당 평균 이론적 잠재량이 독일보다 약간 높으며, GSA 에 따르면 하루 3.99kWh/m²에 달한다. 그러나 한국의 국토 면적이 약 100,339km²로 더 작다는 점을 고려하면 총 이론적 잠재량은 이보다 낮아 약 146,000TWh 이 산출된다.

이것을 한국의 2021 년 전력 소비량 554TWh 과 비교하여, 한국의 현재 전력 수요를 충족하려면 이론상 총 태양 에너지 잠재량의 약 0.38%가 필요할 것이다. (Enerdata 2023b). 기술적인 한계를 고려하면, GSA 는 태양광이 모든 에너지 수요를 충족하려면 한국 국토의 4.51%가 태양광 에너지 생산에 필요하다고 보고 있다.

이전에 논의한 바와 같이, GSA 에는 태양 잠재량을 보다 정확하게 표현하기 위해 두 가지 수준의 실제 토지 가용성

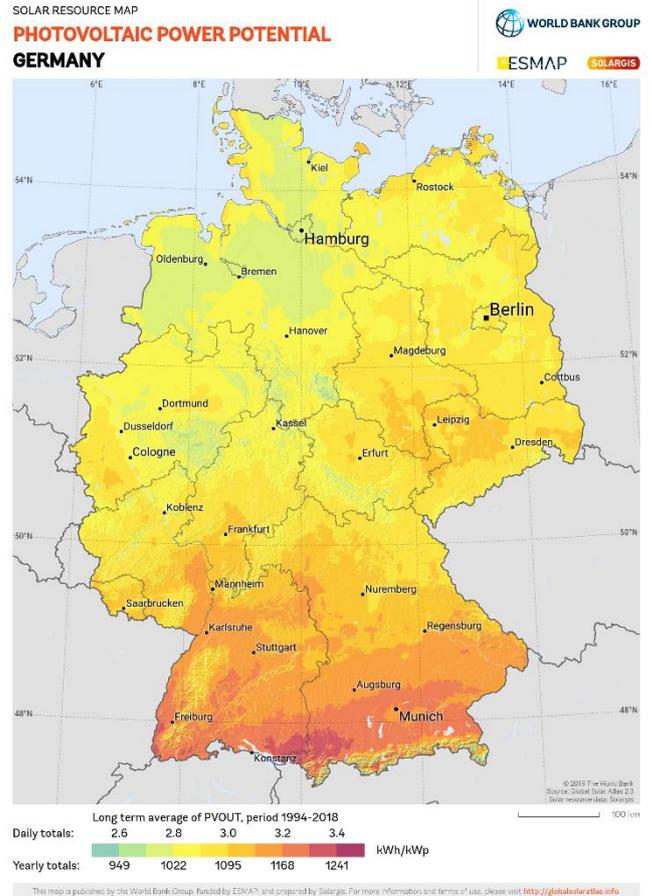


그림 2: 기술적 한계를 고려한 독일의 태양광 발전 잠재량

관련 제약이 포함되었다. 한국의 경우 산악 지형이 많아 레벨 1 제한(식별 가능한 물리적 장애물) 하에서 사용 가능한 토지는 54.2%로 감소하고, 레벨 2 (토지 사용 규제에 따른 가용 면적)에서는 19%로 감소한다

무료 웹 기반 애플리케이션인 "Global Solar Atlas 2.0"에서 가져온 지도는 Solargis s.r.o 라는 회사에서 세계 은행 그룹을 대리하여 개발 및 운영한다. 에너지 부문 관리 지원 프로그램(ESMAP)에서 제공하는 자금으로 Solargis 데이터를 활용한다. 추가 정보: <https://globalsolaratlas.info/>

표시된 광전지 발전 잠재량은 변환 효율, 시스템 구성, 기술적으로 필요한 모듈 간격 등의 요소를 고려하여 사용 가능한 기술로 이론적 잠재량(태양 복사)을 얼마나 많이 포집할 수 있는지를 나타낸다.

그러나 GSA 에 따르면 태양 복사량이 높기 때문에 태양광 PV 장치의 출력은 하루 3.816kWh/kWp 로 비교적 높다. 이는 연간 1,390kWh/kWp 을 의미하며, 한국 전체에 태양광으로 전력을 공급하려면 약 400GW 가 필요하다는 것을 시사한다. GSA 의 데이터를 기반으로 독일과 동일한 단순화된 접근 방식을 사용하면 한국의 태양광 PV 에 대한 기술적 잠재량이 2,377TWh 로 산출될 수 있다.

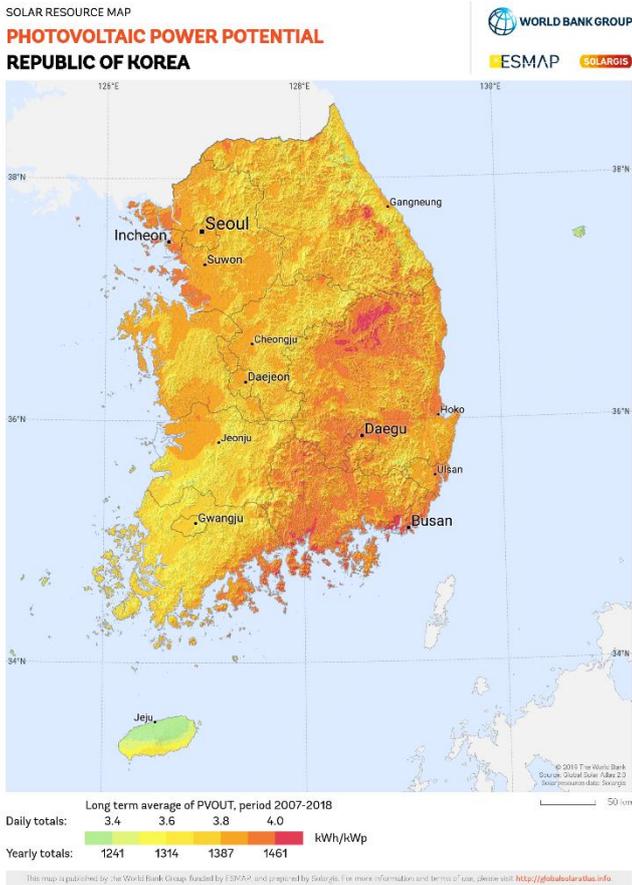


그림 3: 기술적 한계를 고려한 한국의 태양광 발전 잠재량

무료 웹 기반 애플리케이션인 "Global Solar Atlas 2.0"에서 가져온 지도로 Solargis s.r.o 라는 회사에서 세계 은행 그룹을 대리하여 개발 및 운영한다. 에너지 부문 관리 지원 프로그램(ESMAP)에서 제공하는 자금으로 Solargis 데이터를 활용한다. 추가 정보: <https://globalsolaratlas.info/>

표시된 광전지 발전 잠재량은 변환 효율, 시스템 구성, 기술적으로 필요한 모듈 간 간격 등의 요소를 고려하여 사용 가능한 기술로 이론적 잠재량(태양 복사)을 얼마나 많이 포집할 수 있는지를 나타낸다.

5.3 국가 차원 연구에 따른 구체적 잠재량

앞서 언급한 바와 같이, GSA 계산은 이상적인 조건에서의 유틸리티 규모의 태양광을 가정하며, 명확하게 감지할 수 있는 제약이 있는 토지만 제외한다는 다소 이론적인 시나리오를 사용한다는 점을 유념해야 한다. 이처럼 포괄적인 잠재량 분석은 물론 현장의 실제 조건을 반영하지 않는다. 기술적이고 실용적인 잠재량을 더 잘 이해하려면, 해당 주제에 대한 다양한 문헌을 살펴보는 것이 중요하다. 이번 장에서는 양국의 특정 태양 에너지 잠재량에 대한 보다 구체적인 이해를 제공하기 위해 국가 차원의 연구 결과를 요약하였다.

5.3.1 독일

GSA의 추정에서 다루지 않은 가장 중요한 세부 사항은 태양 에너지의 다양한 잠재적 사용 사례에 관한 것이다. 에너지의

다용도성을 지니는 태양광은 건물 일체형 태양광, 호수와 저수지의 수영 태양광, 농경지와 혼합 사용되는 태양광 등 다양한 상황에서 사용될 수 있다. 프라운호퍼(Fraunhofer ISE)는 독일의 다양한 응용 분야에 대한 기술적 잠재량(해당 기술에 사용할 수 없는 표면은 제외, 기타 규제 및 경제적 제한 미고려)을 계산하고 특히 건물 일체형 및 농업용 태양광의 높은 잠재량을 강조하고 있다. 해당 계산에 따르면 전자의 잠재량은 1000GW에 달하고, 후자의 잠재량은 1700GW에 이른다. 또한 수영 태양광, 교통 인프라와 함께 태양광, 도시 지역의 태양광과 같은 다양한 다른 발전원의 경우 추가로 450GW를 제공한다. (Conexio GmbH 2021) 독일의 태양광 확장 목표 중 3,150GW 또는 약 3,400TWh의 전체 예측을 적용하면, 전통적인 유틸리티 규모의 태양광을 고려하지 않을 경우, 2030년 확장 목표인 215GW를 달성하기 위해서 기술 잠재량의 약 7%만이 필요할 것으로 보인다.

대부분 기존 에너지를 사용한 Stiftung Klimaneutralität의 문헌 검토에 따르면, 농업용 태양광 및 부유식 태양광을 포함한 독립형 태양광의 경우 경제적으로 실질적으로 사용 가능한 태양광 잠재량이 300~350GW, 옥상 태양광의 경우 400GW, 건물 표면(façade) 태양광의 경우 320GW에 해당한다. 이로 인한 총 잠재량은 1,070GW 또는 약 1,155TWh에 이른다. (Stiftung Klimaneutralität 2021). 약간 낮기는 하지만 해당 값은 프라운호퍼의 예측치와 다소 비슷하며, 건물 일체형 태양광에 대한 예상치는 각각 720GW와 1,000GW이다.

1가구 주택 및 2가구 주택용 옥상 태양광에만 초점을 맞춘 또 다른 연구에서는, 연간 최대 38.6TWh의 기술적 잠재량을 추정하고 있다. 다만 잠재량의 일부가 경제적으로 타당하지 않을 것으로 보인다. 해당 연구는 또한 농업 및 식품 리테일 부분의 옥상 태양광 발전에 대한 기회를 조사하고 있으며, 해당 부분의 잠재량은 연간 3.8TWh로 추산된다. (Prognos 2016). 이는 각각 약 36GW와 3.6GW의 잠재 용량에 해당한다.

태양광, 특히 건물 일체형 태양광의 관련성은 아리아드네 프로젝트(the Ariadne project)의 일환으로 작성된 2045년 독일의 기후 중립에 대한 다양한 시나리오를 분석한 연구 결과에서 더욱 분명해졌다. (Ariadne 2022). 2045년까지 독일이 기후 중립을 달성할 수 있는 잠재적 시나리오에서 옥상 태양광은 핵심적인 역할을 수행하며, 재생 에너지원의 조합과 관련된 시나리오에서는 거의 모든 옥상에 태양광을 설치할 것을 요구하고 있다.

태양열과 관련하여 프라운호퍼 ISE는 2050년까지 연간 약 30TWh의 잠재량을 가정하는 다른 연구를 인용하고 있다. (Wirth et al. 2021)

프라운호퍼 ISE 연구에서 kWh 당 2~7ct로 추정하는 태양광 PV 비용도 참고할 수 있다. (Wirth et al. 2021). 비용 측면에서 프라운호퍼의 최근 연구에 따르면, 유틸리티 규모 태양광의 경우 kWh 당 3.1~5.7EuroCt, 소규모 옥상 태양광의 경우 11~13EuroCt/kWh가 될 것으로 추정된다 (Wirth 2023) GSA의 예측치는 평균 11 USDct/kWh(2016)로 유사하며, 이는 대략 10 EuroCt 정도이다.

5.3.2 한국

오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.에서 전 GSA 를 기반으로 한 산출과는 별도로, 한국 정부도 태양에너지를 포함한 재생 에너지원의 전체 잠재량에 대한 자체 연구를 수행해 2021 년에 백서 형식으로 발표했다. GSA 의 산출은 이론적, 기술적, 시장 잠재량으로 나누어진다. 이 경우 이론적 잠재량은 태양 복사의 완전한 활용을 의미하는 반면, 기술적 잠재량은 기술적 한계뿐만 아니라 지리 물리학적 한계도 고려한다. 시장 잠재량은 경제적으로 비효율적인 사용을 제외한 정부 지원 및 규제 정책을 반영하므로, 잠재적인 변화가 있을 수 있다. 시장 잠재량에는 자연 공원 등 위의 레벨 2 와 유사한 토지 사용 제한도 포함된다. 산출 결과 총 이론적 잠재량은 137,347TWh/년에 이르렀으며, 이는 GSA 의 데이터를 기반으로 앞서 언급한 계산 결과와 매우 유사하다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021).

기술적 잠재량에 대해서는 한국백서에서 태양광발전과 태양열을 별도로 살펴보았을 때, 온수 냉난방이 가능한 일반 건물만 고려하면, 태양광은 2,409GW 또는 3,349TWh, 태양열은 4,778GW 또는 6,181TWh 의 잠재량을 제시한다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021).

해당 백서의 시장 잠재량 계산에 따르면 연간 잠재량은 369GW 또는 513TWh 로 한국의 2021 년 전력 수요의 약 90%에 해당하며, 냉/난방용수가 제공되는 건물만 고려했을 경우에 태양열은 141GW 또는 187TWh 로 나타난다. 이는 대략 총 510GW 또는 700TWh 에 해당한다.

2018 년 에너지경제연구원의 연구에 따르면 경제적으로 실현 가능한 총 태양광 잠재량은 318GW, 토지 비용을 포함하면 293GW 로 산출된다. (Lee and Jo 2018). 이는 업데이트된 2036 년 목표의 대략 3 배에 해당한다. 해당 연구는 또한 건물 일체형 태양광의 잠재량을 별도로 고려하여 추가 44.2GW 의 전체 잠재량을 제안하고 있다. 2021 년 한국 전력수요 554TWh 와 GSA 가 계산한 평균 효율을 고려하면 전력수요의 약 85%를 담당할 수 있다.

비슷한 규모로 한국의 탄소중립 목표에 대한 옵션을 조사한 또 다른 연구도 있다. GESI 및 기타 싱크탱크가 작성한 보고서에서는 2050 년까지 실용적이고 달성 가능한 잠재량을 375GW 로 추정한다. (Green Energy Strategy Institute et al. 2022) Climate Analytics 의 추가 연구에 따르면 총 기술 경제적 잠재량은 노지 584GW, 옥상 PV 57GW 로 추산되며 총 용량은 641GW 로 추정된다. 이를 GSA 에서 제공된 산출법에 따라 변환하며, 약 893TWh 에 해당하지만, 당 연구 자체에서 수행한 보다 정확한 추정에 따르면 그 값은 1115TWh 로 추정되며, 이는 한국의 2021 년 전력 수요의 거의 두 배에 해당한다. (Welder et al. 2023).

태양광발전단가와 관련해 에너지경제연구원은 균등화발전비용(LCOE)이 2023 년 100 원/kWh, 2030 년 84 원으로 하락할 것으로 전망했다. (Korea Energy Economics Institute (KEEI) 2018). GSA 의 경우, 평균 10USDct/kWh(2016 년)로 추정하는데, 이는 약 100 원 정도이다. 이 값은 독일의 11USCct/kWh 예측치보다 다소 낮다.

5.4 비교

이론적으로, 독일 전체 면적의 약 3%, 한국 전체 면적의 4.5%에 해당하는 면적만 사용하면 현재 전력 수요를 모두 충족할 수 있는 충분한 태양광 발전을 공급할 수 있다. 독일은 표면적이 3 배 이상 넓어 이론적 총 태양에너지 잠재량이 더 높은 반면, 한국은 일사량이 더 높아 이론적 평균 일일 태양광 발전량이 독일보다 훨씬 높다는 장점이 있다. (독일은 2.68kWh/m²인것에 반해 한국의 3.99kWh/m²) 두 국가의 기술적, 실제적 잠재량은 서로 다른 기본 가정을 한 여러 연구에서 산출된 바와 같이 제한된 수준에만 비교가 가능하다. 태양광 PV 의 예측치는 독일의 경우 1,155~7,438TWh, 한국의 경우 513TWh~3,350TWh 이다. 그럼에도 불구하고, 각 국가의 태양 에너지 잠재량에 대한 해당 예측치의 중간값은 해당 국가의 탄소중립연도에 예상되는 최종 에너지 소비량(독일의 경우 1,468TWh, 한국의 경우 1,620TWh, 3 장 참조)을 초과한다. 한국의 예측치인 513TWh 와 같이 실제/시장 잠재량에 대한 낮은 값은 일반적으로 덜 우호적인 규제 및 시장 프레임워크를 가정한 값이다.

6 육상 풍력

이론적으로 보았을 때, 풍력 발전은 독일과 한국 모두에서 가장 중요한 에너지원 중 하나가 될 가능성이 존재한다. 두 국가 모두 전반적으로 일사량이 낮은 지역에서는 풍속이 더 높기 때문에 적어도 태양광 발전에 보완적인 역할을 할 수 있다. 독일에서는 풍력 잠재량 지도가 태양 잠재량 지도의 반대의 경향을 보인다. 특히 독일 북부의 평지에서는 풍력 발전으로 깨끗한 전력을 안정적으로 공급할 수 있다. 반면, 한국은 산악지형으로 인해 풍력 발전에 사용할 수 있는 면적이 작다. 하지만, 국내 특정 지역의 풍속은 육상 풍력 터빈은 한국의 미래 에너지 믹스에 유망하게 작용한다.

6.1 목표, 정책, 및 현황

다음에서는 국가별 육상풍력 확장 목표와 시행 계획, 그리고 각 국가가 이미 어느 정도 진전을 이루었는지 소개하고자 한다.

6.1.1 독일

타 재생 에너지 확장 목표와 마찬가지로, 독일의 육상 풍력 에너지 목표는 독일의 2021 년 기후변화개정법과 2045 년으로 설정된 온실가스 중립 목표의 맥락 하에 존재한다. 독일 정부의 연합 합의와 조정된 재생 에너지원법(EEG 2023)은 육상 풍력 에너지 확장에 대한 새로운 목표도 설정했다. 2035 년까지 "거의 완전하게" 탈탄소화된 전력 믹스를 달성하기 위해 육상 풍력의 전체 용량은 2030 년까지 115GW, 2035 년까지 157GW, 2040 년까지 160GW 로 확장된다. 2025 년까지 연간 육상 풍력 용량은 10GW 에 도달해야 한다.

2022 년 말까지 독일에는 58GW 의 육상 풍력 에너지가 설치되었다. 2022 년 신규 풍력 에너지 용량의 순 추가분은 2.1GW 로, 이는 전년도에 비해 상당히 높았지만 여전히 필요한 설치 수에는 훨씬 못 미쳤다. 그러나 계획 및 승인 과정에서 풍력 에너지 프로젝트의 우선순위를 지정하는 등 정부가 규제 조정을 시행하면 상승 추세가 더욱 강화될 수 있다. (Umweltbundesamt 2023d)

2022 년 전체 전력수요(550TWh) 중 18%(99TWh)를 육상풍력으로 공급했다. (Umweltbundesamt 2023b).

6.1.2 한국

현재 육상풍력에너지는 한국 전력 믹스에서 매우 제한된 비중만을 공급하고 있다. 2022 년 발전량이 6% 증가했음에도 불구하고 육상 풍력은 여전히 총 발전량의 1% 미만을 차지했다. (Ember 2023: 142)

정부는 제 10 차 전력수급기본계획에 따라 다양한 신재생 에너지 기술의 용량 목표를 설정했으며, 2030 년까지 19.3GW 의 복합(육상 및 해상) 풍력 에너지 용량이 설치될 예정이다. (Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE)

2023) 이는 한국의 NDC 공약 이행을 위해 총 풍력 발전 용량이 22GW 에 도달해야 한다고 제안한 한국 싱크탱크 넥스트그룹(Next Group)의 모델링에 미치지 못한다. (Park et al. 2023) 2036 년까지 전체 풍력 에너지 용량은 34GW 로 증가할 예정이며, 이는 풍력과 태양광을 통해 전력의 25%를 공급하겠다는 정부 목표에 대한 Next Group 의 모델링과 일치한다. (Park et al. 2023) 2021 년 풍력 에너지의 총 용량은 1.7GW 에 불과하므로, (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b), 목표를 달성하려면 풍력 에너지 구현을 빠르게 가속화해야 한다.

6.2 독일과 한국의 전반적인 잠재량

태양 에너지에 비해 국가의 전반적인 풍력 에너지 잠재량을 산출하는 데에는 더 많은 변수가 사용된다. 바람 패턴의 변동성, 터빈 높이 및 로터 직경 크기로 인해 이론적인 풍력 에너지 잠재량을 계산하기가 더 까다롭다. 육상 및 해상 모두에서 풍력에 대한 과학적으로 타당한 전체 잠재량을 계산하려면, 태양광보다 훨씬 다수의 변수를 활용해야 필요하며, 그 중 일부는 공개적으로 사용이 불가능하다. 따라서 본 연구의 범위에서는 이론적인 잠재량 계산이 불가능하였다. 이렇게 미묘한 뉘앙스를 설명하기 위해 본 연구는 아래에 소개된 기본 연구의 가정에 의존할 것이다. 이들 중 다수는 전반적인 이론적 잠재량을 제공하지 않으며, 다양한 수준의 제약 사항을 반영한 기술 및 실질 잠재량만을 제공한다.

그럼에도 불구하고, 세계 풍력 지도(GWA)에 제시된 데이터는 독일과 한국의 풍력 에너지 잠재량을 비교할 수 있는 일부 맥락을 제공할 수 있다. 지상 100m 높이(평균 터빈 높이)에서 해당 국가의 바람이 가장 많이 부는 10% 지역의 중간 전력 밀도는 독일의 경우 595W/m², 한국의 경우 552W/m² 이다. 해당 지역의 평균 풍속은 독일의 경우 8.45m/s, 한국의 경우 7.35m/s 이다. 이렇게 약간 높은 풍속 외에도, 독일은 이론적으로 풍력 에너지를 배치할 수 있는 한국보다 3 배 더 넓은 표면적을 보유하고 있다. 그림 3 에서 볼 수 있듯이 독일의 풍속은 일반적으로 북부 지역에서 더 높다. 한국에서는 산간지방과 해안선을 따라 가장 높은 풍속을 관찰된다. (그림 4 참조)

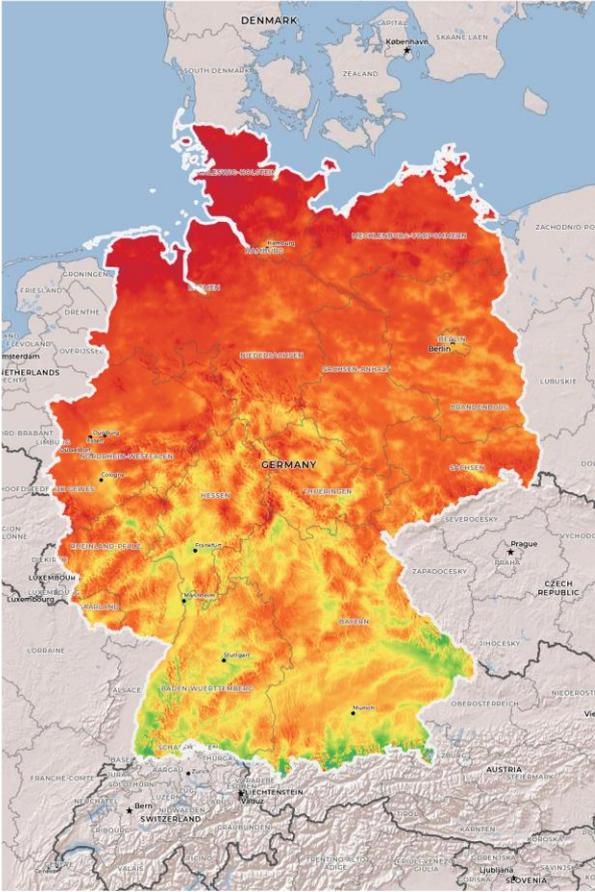


그림 4: 독일의 육상 풍력 발전 잠재량
(진한 색이 풍속이 높음을 의미)

덴마크 기술 대학(DTU)에서 개발, 소유 및 운영하는 무료 웹 기반 애플리케이션인 "Global Wind Atlas 3.0"에서 가져온 지도. Global Wind Atlas 3.0 은 에너지 부문 관리 지원 프로그램(ESMAP)에서 제공한 자금과 Vortex 에서 제공한 데이터를 활용하여 세계 은행 그룹과 협력하여 출시되었다. 추가 정보: <https://globalwindatlas.info>

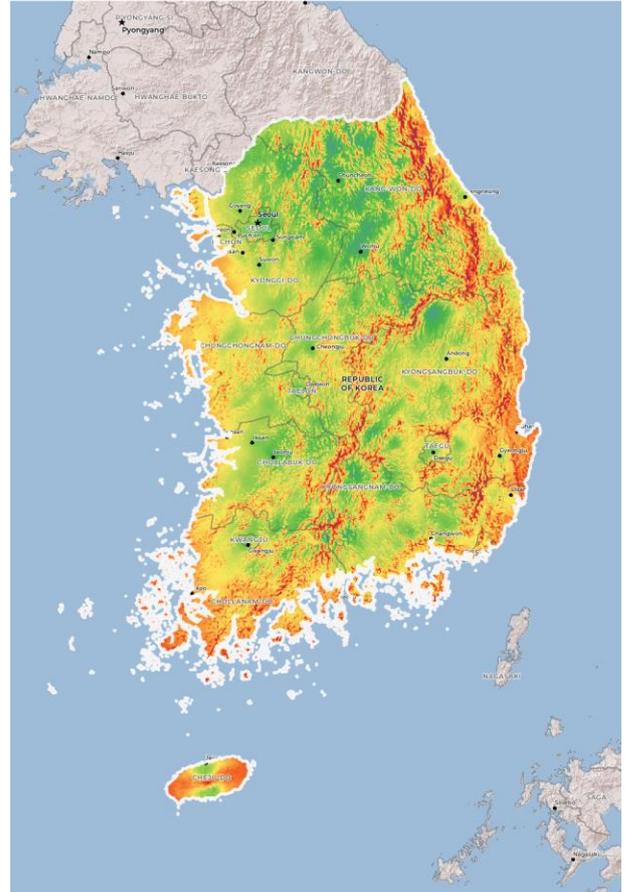


그림 1: 한국의 육상 풍력 발전 잠재량
(진한 색이 풍속이 높음을 의미)

덴마크 기술 대학(DTU)에서 개발, 소유 및 운영하는 무료 웹 기반 애플리케이션인 "Global Wind Atlas 3.0"에서 가져온 지도. Global Wind Atlas 3.0 은 에너지 부문 관리 지원 프로그램(ESMAP)에서 제공한 자금과 Vortex 에서 제공한 데이터를 활용하여 세계 은행 그룹과 협력하여 출시되었다. 추가 정보: <https://globalwindatlas.info>

6.3 국가 차원 연구에 따른 구체적인 잠재량

이 부분에서는 양국의 다양한 육상 풍력 잠재량 수준을 나타내는 연구를 소개하고 각 연구의 가정과 관련된 맥락을 다루었다.

6.3.1 독일

태양 에너지와 마찬가지로 육상 풍력 에너지 용량 및 발전에 대한 국가 전체 표면적의 이론적 잠재량은 실제로 다양한 요인에 의해 제약을 받는다.

2012 년에 실시된 프라운호퍼(Fraunhofer) 연구에서는 기술적으로나 지리적으로(물리적 장애물 제외) 풍력 에너지 터빈의 실행 가능한 영역을 조사하고, 해당 영역 중, (1) 규제 제한이 없는 영역, (2) 자연 보호 요건이 없는 산림 영역, (3) 자연 보호 대상인 산림 영역의 세 가지 수준으로 분류하였다. 기술적으로나 지리적으로 실행 가능한 모든 지역을 포함하면 독일 육지 표면의 22%가 풍력 에너지에 사용될 수 있기에, 독일은 1,500GW 용량의 풍력 터빈을 설치할 수 있다. 지리적 또는 자연 보존 제약이 없는 지역만 고려할 때 잠재적으로 사용 가능한 면적은 전체의 8%로, 가용 용량은 722GW 이다.

(Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (Fraunhofer IWES) 2012)

지리 정보 시스템 데이터를 사용하여 기술적으로 적합한 모든 지역을 식별한 독일 환경부(Umweltbundesamt)의 또 다른 연구는 풍력 에너지 현장과 건물 사이에 유지되어야 하는 다양한 최소 거리와 관련하여 독일의 육상 풍력 에너지 잠재량을 보여준다. 연구에 따르면 최소 거리 요구 사항이 600 미터일 경우 독일 전체 표면적의 13.8%가 풍력 터빈에 사용될 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통해 풍력 에너지 용량 1,190GW 를 설치하고 연간 약 2,900TWh 의 전력을 공급할 수 있다. 최소 거리를 200 미터 또는 400 미터 늘리면, 사용 가능한 표면적이 각각 9.1% 또는 5.6%로 줄어든다.

(Lütkehus et al. 2013). 전반적으로, 연구에서 가장 중요한 경제 및 규제 요소 중 일부가 누락되어 실제 정책, 사회적 맥락에 대한 연구 결과의 활용도가 크게 감소했다.

프라운호퍼(Fraunhofer IEE)가 수행한 고급 지리정보 데이터 세트를 사용한 최신 연구에서는 풍력 에너지 활용을 방해하는 요인을 살펴봄으로써 "갈등 위험"과 관련된 영역을 차별화하였다. 갈등 위험 요소에는 풍력 발전소가 자연이나 경관 보호 문제에 관여될 수 있는 가능성이 포함된다. 갈등 위험에 대한 상기 요인을 무시하고, 기술적으로나 지리적으로 풍력 에너지 사용이 가능한 모든 지역을 합하면 독일 표면적의 26%가 2.086GW 의 풍력 에너지 용량을 설치하는 데 사용될 수 있다. 그러나 더 중요한 것은 실제 실행 가능성 측면에서 갈등 위험이 "매우 낮음"에서 "중간"인 지역만 고려하면, 전체 면적의 5.6%가 풍력 터빈에 사용 가능하다는 점이다. 이렇게 되면 풍력 발전 용량이 366GW 이며, 연간 발전량은 971TWh 정도가 된다. 또한 오래된 터빈을 기술적으로 더욱 발전된 새 터빈으로 교체하는 경우(Repowering), 추가 영역을 지정하지 않고도 109TWh/a 의 전력을 제공하는 39GW 를 더 추가할 수 있다. (Pape et al. 2022)

풍력 에너지를 둘러싼 독일의 정책 논쟁의 초점은 토지 면적 지정에 있다. 현재 최소 거리 요구 사항은 독일 연방 주마다 420m 에서 특정 터빈 높이의 10 배까지 다양하지만 현 독일 정부는 규제 조화에 착수했다. 독일의 정책 담론에서 가장 많이 활용되며 정부가 공식화한 목표인 국토 면적의 2%를 사용할 수 있다고 가정할 때, 약 200GW 용량의 육상 풍력 터빈을 건설하는 것이 가능하며, 390TWh/를 생성되어 독일 현재 전력 수요의 71%를 공급하게 된다. (Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (Fraunhofer IWES) 2012). 해당 연구에 대한 최근 업데이트를 보면, 오늘날의 기술 표준에 따라 200GW 용량이 연간 770TWh 를 생성할 수 있다고 명시되어 있다. (Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE) 2022). 그러나 경제의 모든 부문에서 전력 공급이 증가함에 따라, 시나리오에서는 독일의 전체 전력 수요가 2045 년까지 1,000~1,350TWh/a 로 증가할 것으로 예상하고 있다는 점을 감안해야 한다. (Ariadne 2021)

앞서 언급한 일부 연구에서 입증된 바와 같이, 풍력 발전에 2% 목표에 반영된 것보다 더 많은 면적을 사용하는 것은 기술적으로, 생태학적으로, 경제적으로 실행 가능하다. 해당 면적을 활용하면 독일의 에너지 전환에서 육상 풍력 에너지의 역할이 더욱 강화될 수 있다.

6.3.2 한국

독일과 마찬가지로 한국에서도 터빈과 타 지역 간의 최소 거리 요구 사항에 대한 논의가 있었다. 현재 지자체에서는 풍력 터빈과 건물, 도로 및 기타 보호 구역 사이의 거리에 대한 개별 규정을 두고 있다. 중앙 정부는 주거지역에서는 1,000m, 도로에서는 500m 를 표준거리로 하는 등의 지침을 발표하면서 해당 규정을 조화시키려고 노력해 왔다. 그러나 아직까지 한국 전체에 통일된 규정은 없다. 결과적으로, 다양한 거리 요건은 국내 육상 풍력 발전 배치를 제한하는 주요 규제 요인 중 하나이다.

2021 년 한국 정부가 발간한 백서는 풍력 에너지의 잠재량을 세 가지 수준으로 구분하고 있다. 이론적 잠재량이란 km² 당 발전용량(5MW/km²) 밀도만을 고려하여 총 면적에 설치 가능한 전체 용량과 발전 가능한 전력을 의미한다. 기술적 잠재량은 지리적으로 실현 불가능한 지역과 기술적으로 비효율적인 사용을 제외한다. 다음의 시장 잠재량은 규제 및 지원 정책을 반영하며, 경제적으로 비효율적인 사용을 제외하는 경제적 잠재량을 강조한다. 따라서 이에는 국립공원과 같은 토지 사용 규정도 포함된다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021).

백서에서 평가된 육상 풍력 에너지의 이론적 잠재량은 발전 용량이 499GW, 전력 생산량이 연 968TWh 정도이다. 지리적, 기술적 한계를 고려한 기술적 잠재량은 용량 352GW, 연 발전량 781TWh 수준이다.

해당 연구에서는 발전 용량이 24GW 이며, 연간 전력 생산량이 52TWh 에 달하는 육상 풍력 에너지의 시장 잠재량을 추가로 평가하고 있다. 이 숫자들이 자연 보존 지역 등 토지 이용 제한을 고려했다는 것을 감안해도, 이처럼 훨씬 낮은 수치는 현재 한국의 규제 체계가 한국의 탈탄소화 목표와 에너지 자립에 더 크게 기여할 수 있는 육상 풍력 에너지의 대규모 확장에 도움이 되지 않는다는 것을 보여준다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021)

지리적인 이유와 한국 내 특정 지역의 높은 인구 밀도로 인해 정부 백서에서 확인한 현재 시장 잠재량의 거의 4분의 3 이 4 개 도(경상북도, 전라남도, 충청남도, 제주)에 존재한다. 이 때문에 특히 이들 지역에서 풍력 에너지 프로젝트와 전력망 확장에 대한 사회적 수용성이라는 과제를 제기된다. 언급된 지방 중에서 제주도는 표면적에 비해 시장 잠재량이 가장 높기 때문에 해당 이슈가 부각되고 있다.

다양한 국가의 비산립, 비도시 지역을 분석하고 터빈당 용량을 2.5MW 로 가정한 2009 년 연구에서는 한국의 육상 풍력 발전의 전체 잠재량이 130TWh/a 인 것으로 나타났다. 해당 연구는 조사를 위해 지리 정보 데이터를 사용하며, 터빈 간격의 효율성에 대한 영향을 고려하였다. (Lu et al. 2009) 또한 해당 연구는 지금은 증대되었으나 2009 년에 유효했던 풍력 터빈 용량에 대한 기술적 가정이 기반했다는 점을 유의해야 한다.

Climate Analytics 가 최근 발표한 연구에서는 태양광 및 풍력 에너지의 실질적인 잠재량을 확인했다. 이 연구에서는 인프라 주변의 완충 구역, 일반적인 구축 환경, 자연 보호를 위해

지정된 구역 등 토지 이용 가능성과 관련하여 많은 실제적인 제의 요건을 고려하고 있다. 이는 식별된 잠재량을 실제 정책, 사회적 맥락에 매우 많이 적용할 수 있게 만들어 주기 때문이다. 물론 육상 풍력의 잠재량은 42GW(121TWh/년)로 그리 높지 않은 것으로 나왔다. (Welder et al. 2023). 그러나 정부 백서에서 밝힌 시장 잠재량보다는 높았다.

6.4 비교

위에서 볼 수 있듯이 독일의 지리적 위치를 고려하면 육상 풍력 에너지에 대한 잠재량이 상당히 높다. 독일의 육상 면적은 한국의 약 3 배에 달하며, 가장 바람이 많이 부는 지역의 중간 전력밀도와 평균 풍속도 독일이 더 높다. 결과적으로, 다양한 연구에서 계산된 육상풍력의 기술적, 실무적 잠재량은 한국보다 독일이 더 높다. 독일의 예측치는 토지 면적의 2%를 지정하는 현재의 정책 프레임워크를 기반으로 하는 경우, 200GW 에서 2,086GW 사이이다. 만약 구현이 되는 경우, 해당 용량은 연간 770TWh 에서 7,822TWh² 사이의 발전량으로 변환될 수 있다. 따라서 현재의 정책 프레임워크에서의 실질 육상 풍력 잠재량은 2045 년 독일 최종 에너지 소비량의 절반 이상을 공급할 수 있다. 기술적 잠재량은 예상 에너지 소비량을 몇 배 이상 초과한다. 한국의 경우 기술 잠재량 최고 예측치는 352GW 로 발전량 781TWh 로 독일의 최저 예측치와 유사하지만, 이는 자연 보호 구역을 포함한 규제 체계를 고려하지 않은 것이다. 한국의 실제 시장 잠재량에 대한 최저 예측치는 24GW 에 불과하여 연간 52TWh 의 발전량을 창출한다. 상기 언급한 바와 같이 규제 체계가 보다 유리하게 변화되면, 이 수치는 더 높아질 수 있다.

² 독일 육상 풍력 터빈의 평균 효율에 대한 가정을 기반으로 한 단순 산출: <https://stromrechner.com/wie-viel-strom-produziert-ein-windrad/>

7 해상 풍력

바다의 고품속으로 인해 매우 유망한 전력원인 해상 풍력 에너지는 독일과 한국 모두의 에너지 전환에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 해양에 접근성을 지닌 양국은 해상 풍력 프로젝트를 활용하여 경쟁이 치열한 육상 풍력 프로젝트를 보완할 수 있다.

7.1 목표, 정책, 및 현황

다음은 독일과 한국의 해상 풍력 에너지 확장에 관한 현재의 구현 수준, 더 넓은 정책 프레임워크 및 향후 목표에 대한 개요이다.

7.1.1 독일

독일 정부는 2030년까지 해상 풍력 발전 용량을 30GW, 2035년까지 40GW, 2045년까지 70GW에 달성하려는 목표를 갖고 있다. (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022). 이는 대략 2045년 220TWh 규모에 해당한다. 이 목표를 달성하기 위해 입찰량이 증가하였고, 계획은 단순화가 법제화되었다. 2030년 용량 목표를 달성하려면 매년 3~4GW를 설치해야 한다. (Agora Energiewende et al. 2020)

2022년 말 기준으로 8GW의 해상 풍력 에너지 용량이 설치되어 독일 전체 전력 수요에 거의 5%(25TWh)를 생산하고 있다. 원자재 가격 상승과 불리한 규제 체제로 인해 2021년 해외 확장이 거의 없을 정도로 둔화되었지만, 현 정부가 도입한 규제의 조정은 프로젝트 개발의 즉각적인 증가로 이어질 것이다.

독일 정부는 최근 유럽 파트너들과 함께 북해를 해상 풍력 에너지의 허브로 개발하고, 최대 300GW의 총 용량을 갖춘 풍력 단지를 건설하며, 유럽 전력 시장(European Electricity Market) 하에서 해당 단지를 참여 국가의 전력망과 연결하는 계통 네트워크를 구축하겠다는 계획을 발표했다. (Tagesschau 2023)

7.1.2 한국

제 5장에서 언급한 바와 같이 한국 정부는 제 10차 전력수급기본계획에서 해상풍력과 육상풍력을 구분하지 않고 있다. (Park et al. 2023). 그러나 2030년까지 총 19.3GW, 2036년까지 34GW의 풍력 에너지가 필요하다고 명시되어 있다. 2030년까지 해상풍력 용량을 12GW로 확대하겠다는 전 정부 계획을 고려해 볼 때, (International Energy Agency (IEA) 2019), 해상 풍력은 여전히 전체 풍력 에너지 확장에 더 큰 기여를 할 가능성이 높다.

국제에너지기구(International Energy Agency)가 발행한 해상 풍력 전망 2019(Offshore Wind Outlook 2019)는 당시 관련 정책에 따라 2040년에 25GW로 추가 성장할 것으로 예측하였다. 이러한 목표가 달성되면 해상 풍력은 국가의 현재 전력 수요의 10%를 공급할 수 있다. 보고서 시나리오에서 예상되는 해상 풍력 발전의 확대를 통해 한국은 가스 화력 발전량과 동일한 전력을 공급하는 데 필요한 추가

가스 수입 비용 가운데 약 20억 달러를 절약할 수 있다. (International Energy Agency (IEA) 2019). 이 예측치는 전 세계적으로 휘발유 가격이 급격하게 상승하도록 만든 러시아의 우크라이나 침공 전의 가스 가격을 반영하고 있다는 점을 추가로 이해해야 한다.

한국의 해상풍력 연간 용량은 유럽 중 바람이 가장 많이 부는 지역(60% 내외)과 비교할 수는 없지만, 2019년 신규 프로젝트의 경우 40% 내외에 도달해 중국의 수준에(45%)에 근접했다. (International Energy Agency (IEA) 2019). 또한 부유식 발전소를 포함한 해상 풍력 터빈의 기술 발전으로 인해 용량이 증가할 가능성이 높다.

해상풍력 구현의 세계적, 지역적 성장은 한국의 산업계에 흥미로운 기회를 제공한다. 2021년 한국은 전 세계 해상풍력 제조능력의 2.6%를 차지해 중국, 유럽연합, 대만에 이어 4번째로 큰 제조업 허브가 됐다. 이는 중국 제조업체의 지배력 증가에서 벗어나 글로벌 공급망을 다양화하는 데 있어서 한국의 잠재적인 역할을 보여준다.

글로벌풍력에너지협회(Global Wind Energy Council)는 중국을 제외한 아시아 지역의 해상 풍력 발전 설비가 2031년까지 연간 7,100MW로 증가할 것으로 예상하고 있다. 최근 투자 및 발표에 따르면 한국은 상대적으로 성숙한 공급망을 갖춘 매력적인 시장이다. ("역내 허브 중 하나") 그러나 업계에서는 국내 해상 풍력 에너지 잠재량을 실제로 활용하기 위해 프로젝트 개발 패스트 트랙킹 법안을 도입할 것을 요구했다. 이것이 구현된다면 해상풍력은 한국의 초기 수소경제 구축을 위한 흥미로운 기회도 제공할 것이다. (Global Wind Energy Council 2022)

7.2 독일과 한국의 전반적인 잠재량

5.1에서 언급한 바와 같이, 독일과 한국의 태양에너지 등 이론적 잠재량 산출은 본 연구 범위 내에서 불가능하였다. 그러나 해상 풍력 에너지 사용에 대한 독일과 한국의 지리적 특징에 관해 몇 가지 일반적인 설명은 가능하다.

GWA에서 볼 수 있듯이 해상 풍속은 일반적으로 한국보다 독일 해역에서 더 높다. 독일 해상의 평균 풍속은 9~10m/s인 반면, 한국의 평균 풍속은 7~8m/s이다. (World Bank et al. 2023) 제주 앞바다에서는 약 8.5m/s의 더 높은 풍속이 발생한다. 독일 해안은 풍속이 더 높은 반면, 한국은 해안을 따라 활용할 수 있는 해양 면적이 443,000km² 이상으로 훨씬 더 넓다. (MOLIT 2023). 국제 공법에 대해 깊이 들어가지 않고, 본 연구에서 "해양 지역"은 해당 국가가 이론적으로 당 정부의 공식 입장에 따라 에너지 생산을 위해 이용할 수 있는 지역을 의미하며, 따라서 영해와 배타적 경제 수역(EEZ) 포함한다. 한국의 EEZ 일부(총 EEZ 크기: 288,000km²)는 일본의 영토 갈등 대상이므로 가까운 미래에 재생 에너지 확장에 사용되지 않을 가능성이 높다는 점을 언급할 필요가 있다. 한국에 비해 독일의 해양 면적은 약 57,000km²에 불과하며, 그 중 거의 33,000km²가 EEZ에 속한다. 또한, 독일 해양 지역의 거의 절반이 해양 생물 다양성을 위해 보호되는 반면, 한국 해양 지역의 1.8%만이 완전한 환경 보호 대상이다. (Marine Conservation Institute 2023)

독일 해양 지역은 수심이 얇기 때문에 바다 고정식 해상 풍력 설비만 요구된다. 한국은 또한 서해안과 남해안을 따라 얇은 수역을 갖는 바다 고정식 솔루션의 잠재량을 가지고 있지만 동해안과 및 해안에서 더 멀리 떨어진 지역에 대한 부유식 기술이 필요하다.

그림 6 과 7 은 각각 독일과 한국의 해상 풍력 잠재량을 풍속, 잠재적으로 이용 가능한 면적, 수심(고정식 또는 부유식이 실행 가능한 옵션인지 나타냄)으로 구분하여 보여준다.

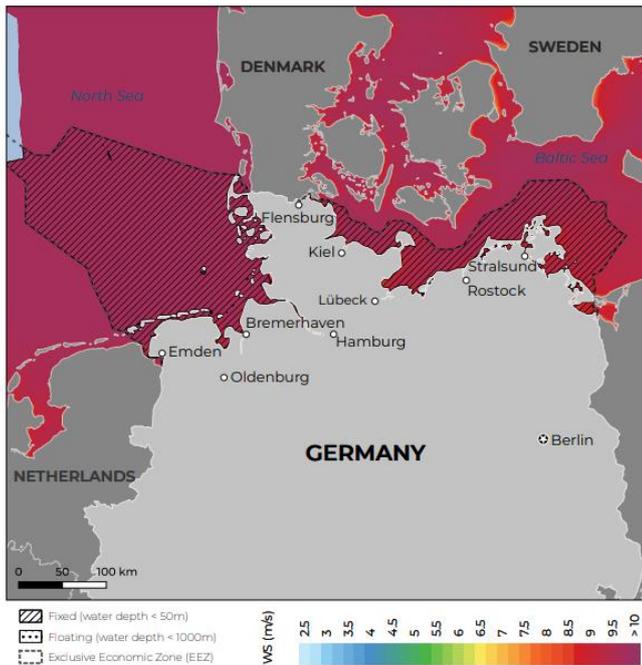


그림 2: 독일의 해상풍력 잠재량

세계풍력에너지협의회 지도(2021) under: https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/Germany_Offshore-Wind-Technical-Potential_GWEC-OREAC.pdf

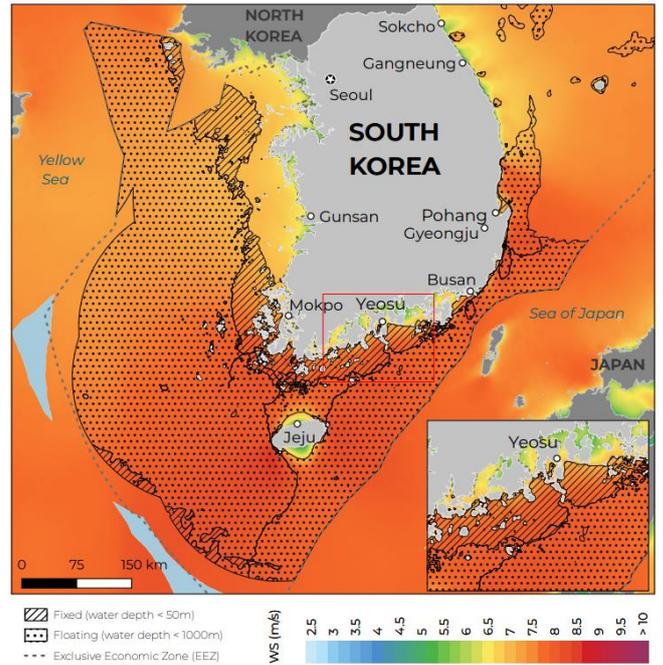


그림 3: 한국의 해상풍력 잠재량

세계풍력에너지협의회 지도 (2021) under: https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/South-Korea_Offshore-Wind-Technical-Potential_GWEC-OREAC.pdf

7.3 국가 환경 및 전망을 고려한 구체적인 잠재량

다음에서는 서로 다른 연구를 통해 평가된 양국의 해상 풍력 에너지 확장의 이론적, 기술적, 실질적 잠재량을 다루고 있다.

7.3.1 독일

2009 년 한 연구에서는 독일의 각 해안선에서 100km 이내에서 사용할 수 있는 해상 풍력 잠재량을 조사했다. 2009 년의 풍력 터빈 기술 표준을 가정했음에도 불구하고, 이 연구에서는 독일의 총 해상 풍력 잠재량이 연간 940TWh 에 달한다는 사실을 발견했다. (Lu et al. 2009). 그러나 독일의 해양 면적이 제한되어 있고 자연 보호 지역이 광대하다는 점을 고려할 때, 해당 잠재량은 실현 가능성이 거의 없어 보인다.

2021 년 세계풍력에너지협의회(Global Wind Energy Council)의 분석에 따르면 독일 해안선에서 200km 이내에 203GW 의 바다 고정식 풍력 에너지 용량을 설치할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 7~8m/s 사이의 풍속에 대해 km² 당 3MW 의 터빈 설치 밀도와 8m/s 이상의 풍속에 대해 km² 당 4MW 의 터빈 설치 밀도에 초점을 맞춘 기술적 잠재량을 의미한다. (Global Wind Energy Council 2021a)

다음에서는 실용적인 잠재량을 확인한 몇 가지 연구를 소개하고자 한다. 이러한 잠재량은 일반적으로 자연 보호

구역, 운송 경로, 케이블 및 파이프라인 인근 구역, 군사 또는 연구 목적으로 지정된 구역을 제외한다.

독일 경제 연구소(German Institute for Economic Research)의 기사는 독일의 해양 지역이 84GW의 해상 풍력 에너지 용량의 실질적인 잠재량을 제공한다는 2017년 연구를 참조하고 있다. (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) 2018). 프라운호퍼(Fraunhofer IWES)의 2022년 연구에서는 82GW의 유사한 잠재용량이 확인되었다. 이 시나리오에 따르면 독일은 연간 292TWh의 전력 생산량을 얻을 수 있다. (Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (Fraunhofer IWES) 2022)

아고라 에너지전환(Agora Energiewende)은 독일의 대부분의 순제로 시나리오에서 2050년까지 해상 풍력 에너지 설치 용량이 50~70GW로 가정하여 연간 약 200~280TWh를 생산한다고 밝히고 있다. 여기에 전달된 범위는 실질 잠재량이지만, 기술적으로 가능한 추가 확장과 관련하여 논문에서 매우 중요한 점이 하나 있다. 바로, 독일은 해양 지역이 제한되어 있어, 용량을 더 늘리면 풍력 단지 사이의 더 작은 공간으로 인해 바람이 다시 생성될 수 없기 때문에 생산량이 감소하게 된다는 것이다. (Agora Energiewende et al. 2020)

2045년까지 70GW를 설치하겠다는 현 정부의 해상풍력 확장 목표가 달성되면, 독일은 해상풍력 분야에서 탈탄소화 목표를 달성할 수 있게 된다. 다양한 시나리오에서 언급했듯 독일의 탄소중립 목표를 위해서는 해당 에너지 형식을 통해 연간 190~280TWh를 생산해야 한다. (Stiftung Klimaneutralität 2022). 위에서 분석한 일부 연구에 따르면 기존의 실질 잠재량으로 인해 약간 더 큰 확장이 가능할 수도 있다.

7.3.2 한국

해상풍력 전망 2019는 이 분야에서 한국의 잠재량을 분석하고 있다. 잠재량을 평가하기 위해 위성사진을 활용한 지리정보시스템 분석이 실시되었다. 풍속이 낮은 지역(5m/s 미만), 해상 보호 지역, 케이블 완충 지역, 중요한 해상 항로, 지진 단층선 및 이용 갈등 지역은 고려 대상에서 제외되었다. 또한 다양한 풍속, 해안으로부터의 거리 및 수심에 따른 다양한 풍력 터빈 설계가 고려되었다. (International Energy Agency (IEA) 2019)

보고서에는 한국 해역의 해상풍력의 기술적 잠재량이 연간 발전량 3,000TWh 이상에 달하는 것으로 나타났다. (International Energy Agency (IEA) 2019). 이론적으로 이는 2018년 한국 최종 에너지 소비량의 1.5배, 한국 현재 전력 수요의 5배를 공급하기에 충분하다. (Ember 2023) 이 잠재량 중 613TWh는 얕은 바다에서, 2,434TWh는 심해에서 생산할 수 있다. (국제에너지기구(IEA) 2019 (Ember 2023) (International Energy Agency (IEA) 2019)

2021년부터 세계풍력에너지협회(Global Wind Energy Council)가 실시한 연구에 따르면 한국 해안선에서 200km 이내에 78GW의 바닥 고정식 및 546GW의 부유식 풍력 에너지 용량을 설치할 수 있는 것으로 나타났다. 7~8m/s 사이의 풍속에서는 km²당 3MW의 터빈 설치 밀도와 8m/s 이상의 풍속에서는 km²당 4MW의 터빈 설치 밀도가

나오므로, 이는 기술적 잠재량이다. (ESMAP 10.05.2023; Global Wind Energy Council 2021b)

상기 언급된 2009년부터의 Lu 등의 연구에 따르면 한국의 총 해상풍력 잠재량은 연간 990TWh인 것으로 나타났다. (Lu et al. 2009) 앞서 언급한 Climate Analytics의 연구에서는 이미 바닥 고정식 터빈의 수심과 같은 기술적 요소와 보호 지역과 운송 경로에 대한 실질적인 요소 고려하여, 용량 870GW, 연간 발전량 3,710TWh의 기술적 잠재량을 식별했다. 잠재량에는 바닥 고정식과 및 부유식 터빈이 모두 포함되며, 이것이 부분적으로 높은 숫자가 나오는 이유를 설명한다. 부유식 터빈은 아직 시장에 출시될 준비가 되어 있지 않지만, 저자들은 결국 모든 형태의 해양 설비에 대한 장기적 한계 비용이 한국의 가스 플랜트 발전소보다 훨씬 저렴해질 것이라고 주장한다. (Welder et al. 2023).

한국 정부 백서는 해상 풍력 에너지의 이론적 잠재량을 482GW 및 1,298TWh/a로 계산하고, 기술적 잠재량은 387GW 및 1,176TWh/a로 약간 낮게 추산하고 있다. 그러나 현재 해양 시장 잠재량은 기술 잠재량보다 훨씬 낮게 계산되고 있음에도 여전히 육상 잠재량의 거의 두 배로 평가되며, 41GW의 용량은 연간 약 119TWh의 발전량에 해당한다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021)

따라서 백서에 명시된 육상 및 해상 풍력 에너지의 통합 시장 잠재량이 실현되면, 연간 171TWh의 발전량을 얻게 될 것이다. 이 시나리오에 따르면, 현재 규제 체계 하에서 풍력 에너지 확대 보급을 통해 한국의 현재 전력 수요의 31%를 충족할 수 있다. 전기화가 증가하면 전력 수요가 높아짐에 따라(예측치는 현재 554TWh/a에서 약 1,200TWh/a로 증가할 것으로 예상된다. (Park et al. 2023), 이전에 요약한 다른 연구의 예측치에 따르면 잠재적으로 이용 가능한 풍력 에너지의 더 높은 점유율을 달성하려면 규제 전환이 필요할 수 있다.

7.4 비교

육상풍력과 달리 해상풍력의 경우 한국은 높은 잠재량에 관한 전반적으로 더 유리한 요소들을 갖고 있다. 한국 해양 지역의 평균 풍속(7~8.5m/s)은 독일 해역(9~10m/s)보다 낮지만, 한국의 해양 지역은 약 8배 더 크며, 그 중 상대적으로 작은 비중의 2%만 완전한 환경 보호를 받고 있어 훨씬 더 많은 해상 풍력 발전 용량을 설치할 수 있다. 부유식 해상 풍력 터빈이 경제성을 갖게 되고, 수심이 높아 한국 해역의 넓은 구역에 설치하기 어려운 바닥고정식 터빈을 보완할 수 있게 되면 더욱 그러하다. 바닥고정식 및 부유식 해상 풍력 시스템을 모두 고려하면, 기술적 잠재량에 대한 예측치는 연간 발전량이 990~3,710TWh(870GW)에 이른다. 독일에서는 해양 지역의 크기가 제한적이라서 최대 203GW(용량 최고치) 및 940TWh/a(발전 최고치)의 기술적 잠재량 달성이 가능하다. 그러나 대부분의 연구에서는 독일의 실질 잠재량을 살펴보고 있는데, 특히 넓은 지역이 자연 보호 대상으로 지정되어 제약이 있기 때문이다. 실질 잠재량에 대한 예측치는 50~84GW로, 이는 2045년까지 정부 목표인 70GW에 근접하는 수준이다.

8 기타 재생 에너지원

독일과 한국 양국에서 태양에너지와 풍력에너지가 재생 에너지 믹스의 선두주자이지만, 다른 형태의 재생 에너지도 에너지 전환에 중요한 역할을 할 수 있다. 이번 장에서는 그 잠재량을 간략하게 살펴보고 비교하였다.

8.1. 지열

지열 에너지를 분석에서 심부 지열과 천부 지열 사이의 기본적인 구별이 중요하다. 심부 지열은 난방 또는 전기 생산을 위해 400~5,000m 깊이의 열을 활용하는 것과 관련이 있다. (Agentur für Erneuerbare Energien 2023). 천부 지열은 더 얇은 깊이에서 생성된 에너지를 고려하며, 현재 개인 주택의 난방 분야(예: 열 펌프를 통해)에 주로 사용된다.

독일

독일에서는 지열 에너지가 주로 기존 지역 난방 그리드에 열을 공급하거나 개별 건물의 열 펌프에 전력을 공급하여 주거용 난방 부문에 기여할 수 있는 것으로 여겨진다.

독일 지열 협회(German Geothermal Association)에 따르면, 독일의 기존 유틸리티 규모 심부 지열 발전소의 전체 용량은 2021 년에 452MW 였고, 9 개 발전소가 46MW 설치 용량의 전기를 생산했다. 현재 상대적으로 낮은 수치이지만, 업계에 따르면 연간 1.1TWh 의 성장도 가능하다. 2030 년 이후 탐사 및 설치가 가속화될 것으로 예상되므로 2040 년까지 연간 56TWh 의 에너지 생산이 가능할 수 있다. 해당 업계의 협회에 따르면 이는 이론적인 것이 아니라 현실적으로 구현 가능한 잠재량이다. (Richter 2023)

2022 년 11 월, 연방 경제기후행동부는 2030 년까지 10TWh 의 심부 지열 에너지를 생산한다는 목표를 세웠다. 이는 산업 협회의 전망과 대략적으로 일치한다. (Richter 2023)

독일 연방환경청(Umweltbundesamt)의 2010 년 연구에 따르면 주민 정착지, 숲, 수역 및 기타 부적합 지역을 제외하고 독일 표면의 거의 38%가 심층 지열 에너지 생성에 사용 가능한 것으로 확인되었다. 이 예측치는 6.4GW 의 설치 용량으로, 50TWh 의 지열 발전 잠재량으로 해석되며, 2040 년 독일 지열 협회의 예측치에 근사하다. (Thomas et al. 2010)

또 다른 연구에서는 연간 118TWh 의 심층 지열 에너지 생성에 대한 실질적인 잠재량을 언급하고 있다. 해당 연구에 따르면, 해당 잠재량을 달성하기 위해서는 지역난방 네트워크 확장이 필요하고 지열 프로젝트를 위한 탐사 기간이 필요하기 때문에 2045 년(독일의 탄소중립 목표 연도)까지는 달성하기 어려울 것으로 보인다. (Richter 2023) 그러나 이를 통해 독일에서 지열 에너지의 잠재량이 훨씬 크다는 것을 엿볼 수 있다. 2017 년 Ifeu 연구에서는 독일 심부 지열 자원의 기술적 잠재량을 1,400TWh/a 로 설정했다. (Jochum et al. 2017) 천부 지열 에너지는 이미 독일의 신재생 난방에 상당한

비중을 차지하고 있다. 2022 년 천부 지열 발전량은 13% 증가해 22TWh 에 이르렀다. 열펌프의 기록적인 성장 덕분에 재생 가능한 열원 중 그 비중은 11%까지 증가했다. (Umweltbundesamt 2023b) 위에 언급된 Ifeu 연구에서는 탄소중립 시나리오 의 적용 가능한 규제 체계 하에서 145~186TWh 사이의 천부 지열 난방의 실제 잠재량을 평가하고 있다. (Jochum et al. 2017) 2022 년 Fraunhofer IEG 보고서에서는 지열 열펌프 기술적 잠재량만 약 600TWh/a 로 평가되었다. (Born et al. 2022)

한국

현재 한국의 지열에너지는 주로 직접 이용이나 지열 열펌프(GHP) 설치를 통해 활용되어 왔다. GHP 용량은 2021 년에 0.9TWh 의 에너지를 공급하는 수준에서 1.6GW 로 증가했다. (Song and Lee 2022). 심부 지열 에너지 현장에 대한 탐사는 2017 년 탐사 현장에서 지진이 발생한 이후 중단되었다.

한국 정부가 발표한 백서에서 천부 지열과 심부 지열의 구분을 포함하여 지열 에너지의 잠재량이 평가되었다. 백서의 정의에 따르면 천부 지열에너지는 지표면 아래 최대 300m 에서 발견되는 열을 의미하며, 주로 지역난방 건물에 열을 공급하거나 열펌프에 전력을 공급하는 데 직접 사용된다. 반면에 심부 지열 에너지는 지표면 아래 더 깊은 곳에서 발견되며, 열로 사용되거나 전기를 생성하는 데 사용될 수 있다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021)

지열 에너지의 각 형태는 이론적, 기술적, 시장 잠재량으로 구분된다. 이론적 잠재량이란 응용 기기의 발전용량만을 고려한 총 잠재량을 말한다. 기술적 잠재량은 지리적으로 지열 에너지 사용이 불가능한 지역을 고려한다. 다음으로 연구에서 제시된 시장 잠재량은 기존 규제 체계와 경제적 고려 사항을 설명하고 있다. 시장 잠재량에 대한 정의에서 눈에 띄는 부분으로는, 기존 지역 난방망에 속하는 건물만 포함되며 심부 지열의 경우 계통 연결 관련 경제적 타당성이 있는 지역만 포함된다는 것이다.

천부 지열 에너지의 이론적 잠재량은 22,236GW 의 용량과 55,796TWh/a 의 에너지 산출량을 가진 것으로 예측된다. 지리적 한계를 고려한 기술적 잠재량은 1,256GW(용량), 932TWh/a(발전)로 계산되었다. 연구에서 시장 잠재량은 334GW 의 발전 용량과 29TWh 의 연간 발전으로 추산되었다. 해당 연구에서는 기술 잠재량과 비교하여 지열 현장의 시장 잠재량 용량이 크게 차이가 발견된 이유를 다루지 않았다. 심부 지열의 경우 이론적 잠재량은 350GW(3,066TWh/a)이나, 기술적 잠재량은 3GW(19TWh/a)로 상당히 낮은 것으로 설명되고 있으며, 현재 상황에서는 시장 잠재량이 없다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021)

8.2 수력

현재 독일 전력의 3~4%는 4.2GW 용량의 수력 발전소에서 생산된다. 지리적인 이유로 대부분의 공장은 바이에른에 위치해 있다. 일반적으로 독일의 수력발전 잠재량은

제한적이다. 또한 생태학적, 경제적인 이유로 인해 독일 에너지 전환 논의에서 수력 발전의 중요성이 감소하게 되었다. (Wissenschaftlicher Dienst Deutscher Bundestag 2022)

문헌에 언급되었듯 2010년부터 연방환경청에서 의뢰한 독일 수력 발전에 대한 연구에서는 연간 14.7TWh의 추가 발전에 대한 기술적 잠재량이 확인되었다. 이 중 10.75TWh는 생태학적 규제로 인해 허용되지 않는 것으로 분류된다. 기존 발전소를 현대화하면 연간 2.7TWh의 발전량을 추가할 수 있다. 연방 교통 및 디지털 인프라부에서 실시한 또 다른 연구에서는 현실적으로 실행 가능한 3.4TWh의 추가 발전 잠재량을 발견했다. (Wissenschaftlicher Dienst Deutscher Bundestag 2022)

현재 한국의 수력 발전 용량은 6.5GW로 2021년에 1.9TWh의 전력을 공급한다. 정부 백서는 연간 8.9TWh의 추가 수력 발전 잠재량을 확인하고 있다. 해당 잠재량은 규제 및 경제적 타당성을 반영한 시장 잠재량으로 제공된다. 이 잠재량의 75%가 4개 지방(경기도, 경상남도, 강원도, 경상북도)에 존재한다. (Power Technology 2023).

8.3 해양 에너지

해안선의 범위가 제한적이고 심해에 대한 접근이 제한되어 있기 때문에 Forschungsverbund Erneuerbare Energien에서는 다양한 유형의 해양 에너지에 대한 독일의 잠재량이 다소 낮다고 평가한다. 그러나 해양 에너지는 유럽 전력 시장에 대한 기여할 수 있으며, 해당 분야의 독일 기업에게는 잠재적인 비즈니스 기회로 간주된다. 유럽의 파력 에너지의 기술적 잠재량은 약 1,200TWh/a로 추정된다. 조력 에너지의 전 세계 잠재량은 1,500TWh/a로 추산되며, 그 중 10%는 유럽에서 발견된다. (Forschungsverbund Erneuerbare Energien 2023). 독일 환경 및 원자력 안전부가 2010년에 실시한 연구에서는 독일의 모든 형태의 해양 에너지에 대한 이론적 잠재량이 미미한 것으로 평가되었다. 예를 들어, 연간 발전량이 2TWh인 조력 댐을 모델링하였는데, 독일 해안의 얕은 수심으로 인해 물과 파도의 압력으로 인해 기존 발전소에 필요한 1차 에너지를 공급할 수 없는 것으로 나왔다. (GKSS Forschungszentrum et al. 2010)

북쪽을 제외한 모든 지역이 바다로 둘러싸인 한국은 세계 최대 규모의 조력 발전소 중 하나를 보유하고 있다. 한국수자원공사(K-water)가 운영하는 시화호 갯벌발전소는 매년 552GWh의 청정 녹색에너지를 생산해 연간 86만 2000배럴의 석유를 대체하고 있다. (Edmond 2020)

한국 정부가 발표한 백서에서는 다양한 형태의 해양/해양 에너지의 잠재량이 확인되었다. 조류를 사용하는 다양한 응용 분야의 기술적 잠재량은 679TWh/a의 에너지 변환 용량 83GW로 추정된다. 한국 해역의 파력 발전 기술 잠재량은 연간 46TWh로 평가된다. 이러한 인상적인 기술적 잠재량에도 불구하고 모든 해양 기술의 시장 잠재량은 현재로서는 존재하지 않는 것으로 평가된다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021) 이는 한국이 연안에서 해양 에너지 발전 잠재량을 발휘하게 위해

연구개발을 늘려야 하며, 우호적인 규제 체제를 구축해야 할 필요성을 강조한다.

8.4 바이오매스

IRENA는 에너지 프로필에서 국가의 평균 순 1차 생산성, 즉 “발전소에 의해 고정적으로 매년 바이오매스로 축적되는 탄소의 양”을 통해 국가의 이론적 바이오매스 잠재량을 추정한다. 한국의 경우 6.5tC/ha/yr로 독일의 5.5tC/ha/yr보다 약간 높으며, 두 나라의 가치는 세계 평균인 3-4tC/ha/y보다 높다. (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b, 2022a)

독일의 에너지 시스템에서 바이오매스는 경제의 여러 부문에 유연하게 적용할 수 있기 때문에 중요한 역할을 한다. 현재 국가 최종 에너지 소비에서 재생 에너지 기여도의 52%를 담당하고 있다. (Umweltbundesamt 2023b). 2022년에는 바이오매스를 이용해 전기 50.2TWh, 난방 169KWh를 생산했다. 2021년 연구에 따르면 바이오매스 활용은 2050년 독일의 감소하는 1차 에너지 소비량의 거의 4분의 1을 차지하며, 750TWh의 에너지 생산량에 도달할 수 있다. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2023) 그러나 발전 kWh 당 높은 토지 사용량과 생태학적 문제로 인해 독일에서 바이오매스를 둘러싼 담론은 점점 더 중요해지고 있다. 이로 인해 시장 점유율이 정체되고, 일부 탄소중립 제로 시나리오는 바이오매스 에너지 생성을 예측에서 완전히 제외하게 되었다. (Umweltbundesamt 2023a). 그럼에도 불구하고, 바이오매스는 유연성으로 덕분에, 변동성이 높은 태양광 및 풍력 에너지 수율에 대한 예비원으로서 독일의 미래 에너지 시스템에서 여전히 역할을 수행하고 있다. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2023)

바이오매스 한국의 미래 에너지 시스템에도 기여할 수 있으며 잠재적으로 풍속이 낮고 일사량이 적은 날에도 대처할 수 있다. 한국 정부의 백서에 따르면, 바이오매스 기반 에너지 발전의 기술적 잠재량은 연간 71.5TWh로 설정되어 있다. 그러나 경제성과 규제 상황을 반영한 현재 시장 잠재량은 연간 3.1TWh에 불과하다. (Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021)

8.2 기타 재생 에너지 잠재량 비교

예상할 수 있듯이, 한국과 독일의 다른 재생 에너지원의 잠재량은 자연적 요인에 따라 달라진다. 수력 발전의 경우 환경 규제를 고려하면 추가 실제 잠재량에 대한 예측치는 독일의 경우 3TWh, 한국의 경우 9TWh이다. 지열, 바이오매스, 해양 에너지의 경우, 본 연구 고려된 그 어떤 연구에서도 한국과 독일의 잠재량을 동시에 살펴보지 않았으며, 연구의 기본 가정이 크게 다르기 때문에 다양한 연구의 예측치를 비교하기 어렵다.

연구에 의해 확인된 천부 지열에너지의 기술적 잠재량은 독일의 높은 수준인 600TWh에 비해서도 한국이 932TWh로 더 높았다. 즉, 열펌프용 천부 지열 에너지는 양국의 난방 부문을 변화시키는 데 결정적인 역할을 할 수 있다. 현재 규제 체계(실질적 잠재량)를 고려할 때 독일의 예측치는 145~186TWh입니다. 한국의 경우, 기술의 경제적 타당성을

추가로 고려하여 정부 백서에서 계산한 수치는 약 30TWh 를 기록하여, 기술적 잠재량에 비해 매우 낮다.

심부 지열의 경우 기술적 잠재량이 독일에서는 최대 1,400TWh 로 조사되었으나, 한국에서는 19TWh 에 불과하다. 독일의 실질적인 잠재량은 연간 50TWh 에서 118TWh 사이로 추정되는 반면, 한국의 경우 한국 정부 백서는 현재 상황에서 시장 잠재량이 전혀 없다고 명시하고 있다. 한국에 대한 낮은 예측치는 2017 년 강화된 지열 탐사 현장에서 발생한 지진 이후 취해진 매우 신중한 접근 방식 때문일 수 있다.

모든 형태의 해양 에너지는 시장 잠재량 측면에서 여전히 블랙박스라 같지만, 해양 면적이 넓기 때문에 한국이 이 점에서 훨씬 더 큰 기술적 잠재량을 갖고 있다는 것은 분명하다. 해양 면적과 얕은 바다의 제한된 범위로 인해 다양한 유형의 해양 에너지에 대한 독일의 잠재량은 미미한 것으로 평가된다. 반면, 한국에서는 다양한 형태의 해양에너지에 대한 종합적인 기술적 잠재량이 725TWh/a 로 추산된다. 연구 개발의 증가와 유리한 규제 체계를 통해 한국 연안에서 해양 에너지 발전의 잠재량을 발휘할 수 있다.

평균 순 일차 생산성을 기반으로 한 국가의 이론적 바이오매스 잠재량에 대한 Irena 의 예측치는 한국이 독일보다 약간 높지만, 문헌에서 발견된 바이오매스에 대한 총 추정 기술 잠재량은 한국보다 독일이 훨씬 높다. 이는 주로 독일의 총 토지 면적이 더 넓기 때문에 설명될 수 있다.

9 결론

한국과 독일 모두 다양한 재생 에너지 솔루션을 보유하고 있다. 연구에 제시된 수치를 살펴보면, 두 국가 모두 자국내 재생 에너지가 현재의 전력 수요를 충족할 수 있고 미래 에너지 수요의 상당 부분을 충족할 수 있는 잠재량을 가지고 있다는 것이 분명하다. 각국의 탄소중립 목표를 달성하려면 재생 에너지 솔루션 및 관련 인프라의 출시를 가속화하기 위한 정부 지원이 필요하다.

풍력, 태양, 기타 다양한 재생 에너지를 살펴보면, 한국과 독일 모두 상당한 재생 에너지 잠재량을 지닌 다양한 옵션 중에 선택할 수 있다는 것이 분명하다. 이번 결과는 특히 양국의 의욕적이지만 중요한 탄소중립 목표를 고려할 때 좋은 소식이다. 해당 목표는 한국과 독일의 유사한 경제 구조와 더불어 두 국가 모두 비슷한 과제에 직면해 있음을 의미한다. 그러나 국가 간의 지리적 차이를 고려하면, 재생 에너지 잠재량과 및 이에 따른 이상적인 정책 및 탈탄소화 옵션과 관련하여 일부 차이점이 존재한다.

태양 에너지와 관련하여 한국은 일조량 노출이 높기 때문에 전반적인 효율성 이점이 있는 반면, 독일은 더 넓은 토지 면적으로 인해 총 잠재량이 더 크다. 이러한 규모 차이만으로도 독일은 이론적 태양에너지 잠재량이 한국보다 두 배 이상 높다. 보다 세부적인 사항에 초점을 맞추고 기술적, 실무적 타당성을 고려하면 독일의 잠재량은 1,155~7,438TWh, 한국의 경우 513~3,350TWh 로 추산된다. 그러나 연구 간의 방법론적 차이로 인해 비교가 불완전하다. 예를 들어 앞서 언급한 Fraunhofer 의 연구(5.3.1 참조)에서 계산한 독일의 3000GW 이상의 총 잠재량은 다른 일부 연구에는 포함되지 않은 태양 에너지에 대한 다양한 새로운 구현을 옵션을 살펴보았기에 총 잠재량에 대해 매우 높은 예측치를 얻을 수 있었을 것이다. 그러나 중요한 것은 시장에 초점을 맞춘 보다 신중한 추정을 고려하더라도, 이론적으로 보았을 때 한국과 독일 모두 태양광 발전만으로 현재 전력 수요의 전부는 아니더라도 대부분을 감당할 수 있다는 것이다. 또한, 각 국가의 태양 에너지 잠재량 예측치의 중간값은 해당 국가의 탄소중립년도에 예상되는 최종 에너지 소비량(독일의 경우 1,468TWh, 한국의 경우 1,620TWh)을 초과한다.

육상 풍력 발전의 경우 잠재량 추정 시 태양 에너지의 경우보다 더 많은 변수에 의존해야 한다. 따라서 서로 다른 규제 및 기술적 가정으로 인해 전체 잠재량 범위가 훨씬 더 넓어지고 기술적 잠재량과 실제 잠재량 사이의 경계가 때로는 덜 명확해진다. 기술적 잠재량과 실질 잠재량을 함께 고려한다면 독일의 잠재 용량은 200~2,086GW 에 달하며, 연간 발전량은 770TWh~7,822TWh 에 해당한다 (6.4 참조)

따라서 현재의 정책 프레임워크에서 실질 육상 풍력 잠재량은 2045 년 독일의 예상 최종 에너지 소비량의 절반 이상을 공급할 수 있다. 기술적 잠재량은 예상 에너지 소비량을 몇 배 이상 초과한다. 한국의 경우 기술적 잠재량에 대한 최고 예측치는 352GW 로 연간 전력 생산량을 781TWh 로 환산되는 반면, 실제 시장 잠재량에 대한 최저 예측치는

24GW 에 불과해 연간 52TWh 의 전력 생산량을 창출한다(6.3.2 참조) 독일과 한국의 이러한 수치는 다양한 접근법을 사용한 서로 다른 연구에서 비롯된 것이지만, 독일이 육상 풍력 에너지에 대해 더 큰 기술적 잠재량을 가지고 있다는 것은 분명하다. 이러한 차이는 양국 간의 매우 다른 지리적 상황으로 인해 설명될 수 있다. 한국의 국토는 대부분 숲이 우거진 산으로 이루어져 있으며, 평탄한 부분은 대도시가 차지하고 있다. 독일에는 인구 밀도가 낮고 평균 풍속이 높은 비교적 평평한 지역이 많다. 기술적 육상 풍력 잠재량의 현실적인 수준은 보존 지역과 육상 풍력 에너지 확장을 위한 최소 거리, 더 넓은 경제적 조건 등 해당 국가의 규제 체계에 대한 정책 결정에 따라 달라진다.

해상풍력에 관해서도 독일과 한국은 서로 다른 지리적 위치로 인해 상황이 다르다. 독일은 평균 풍속이 9~10m/s 로 한국의 7~8.5m/s 보다 높지만 해안선이 비교적 짧고 해양 영토가 제한적인 반면, 한국은 거의 완전히 둘러싸여 있는 반대의 상황이다. (독일 해양 면적: 약 57,000 km², 한국 해양 면적: 443,000 km²) 독일은 얕은 수심으로 인해 검증되고 상대적으로 저렴한 고정 바닥 풍력 터빈을 설치하기에 유리한 조건을 갖추고 있다. 한국 해역은 서해안과 남해안 근처의 바닥 고정 솔루션에 적합한 반면, 동해안과 해안에서 심해 지역에서는 풍력 에너지 확장의 경우 새로운 부유식 풍력 터빈에 의존하게 된다. (7.2 참조) 한국의 경우 기술적 잠재량에 대한 예측치는 연간 발전량이 990~3,710TWh(870GW)에 이른다. 한편, 독일의 경우 기술 잠재량은 최대 203GW 용량 및 940TWh 발전량으로 평가된다(7.4 참조) 대부분의 연구는 독일의 실질 잠재량을 살펴보고 있으나, 이는 특히 자연 보호 대상인 넓은 지역으로 인해 제약이 많다. 실제 잠재량에 대한 예측치는 50~84GW 로, 이는 2045 년까지 정부의 목표인 70GW 에 가깝다. 이는 독일 해상 풍속이 더 높음에도 불구하고, 한국의 해상 풍력 잠재량이 훨씬 더 크다는 것을 보여주며, 특히 부유식 터빈의 비용이 감소하는 경우 더욱 그러하다.

독일은 상대적으로 확립된 천부 지열 열펌프 시장에서 전체 기술 잠재량이 600TWh 에 달하고 심부 지열에 대한 예측치는 최대 1,400TWh 에 달하는 등 더 큰 지열 잠재량을 갖고 있는 것으로 보인다. 현재 규제 체계를 고려할 때, 얕은 지열 에너지의 경우 실제 잠재량은 145~186TWh, 심부 지열 에너지의 경우 50TWh~118TWh 로 추정된다. 한국의 경우 백서는 얕은 지열의 기술적 잠재량을 932TWh 로 추정했지만 시장 잠재량은 30TWh 에 불과하다. 심부 지열 에너지의 경우 기술 잠재량은 19TWh 에 불과하고 시장 잠재량은 존재하지 않을 것으로 추정된다(8.1 참조)

미래 에너지 시스템을 위한 와일드카드는 해양 에너지 기술의 개발이 될 수 있다. 독일은 제한된 해양 지역과 얕은 바다로 인해 잠재량이 미미한 반면, 한국에서 추산되는 725TWh 의 기술적 잠재량은 해양 에너지의 시장 잠재량이 커질 수 있는 연구 개발과 도움이 되는 규제 체계가 구현된다면 한국의 미래 에너지 자립과 탈탄소 경제의 자산이 될 수 있다. (8.3 참조)

수력 발전 잠재량은 양국 모두에서 대부분 충족되어 있지만, 연구에 따르면 독일의 경우 3.4TWh/a, 한국의 경우 8.9TWh/a 의 추가 실질 발전 잠재량이 확인되었다. (8.2 참조)

평균 순 1 차 생산성을 기준으로 한 국가의 이론적 바이오매스 잠재량 예측치는 독일보다 한국이 약간 높지만, 문헌에서 발견된 바이오매스에 대한 총 추정 기술 잠재량은 한국보다 독일이 훨씬 높다. (71.5TWh/년과 비교하여 750TWh/년) 이는 주로 독일의 총 토지 면적이 더 크고 계산에 대한 기본 가정이 다르기 때문일 가능성이 높다.

요약하면, 독일은 특히 태양 및 육상 풍력과 같은 재생 에너지 배치에 있어서 더 넓은 육지 면적으로 인한 이점을 갖고 있는 반면, 한국은 더 넓은 해양 면적으로 인해 해상 풍력 및 해양 에너지 솔루션의 향후 확장 가능성에 대해 이점을 가지고 있다.

독일의 더 큰 규모, 경제, 인구에도 불구하고 두 국가 모두 비슷한 수준의 전체 에너지 소비를 보이고 있는데, 이는 독일의 더 나은 에너지 효율성에 크게 기인할 수 있다. 독일의 GDP 단위당(PPP) 에너지 소비량은 한국의 거의 절반 정도이며, 독일의 1 인당 전력 소비량은 한국의 약 70% 수준이다. (3 참조) 따라서 독일의 에너지 집약도 감소의 과정에서 한국이 탄소중립 목표 달성에 있어 추가적인 재생 가능 확장의 필요성을 줄이는 방법이 될 수 있다. 이는 특히 타 부문의 전력 공급 증가로 인해 양국에서 전반적인 전력 수요가 높아지는 것과 관련이 있다. 그러나 이는 독일의 1,468TWh 에 비해 평균 1,620TWh 의 최종 에너지 소비를 예상하는 한국의 경우 훨씬 중요하다. (3 참조) 에너지 소비 및 재생 에너지 잠재량에 관한 일부 주요 요인은 아래 표 1 에 시각화되어 있다.

한국과 독일의 재생 에너지 잠재량이 상당함에도 불구하고, 두 국가 모두 기술의 실행 가능성과 경제적 효율성을 이유로 여전히 일부 에너지를 수입할 가능성이 높다. 이는 특히 탈탄소화 산업 및 운송 부문을 위한 청정 수소와 관련 솔루션에 대한 수요 증가와 관련이 있다. 여기에서 논의된 다양한 시나리오 연구와 정부 계획은 수소 사용에 관한 가정이 크게 다르지만 양국 모두 수요가 크게 증가할 것으로 예상된다. 결과적으로, 독일과 한국 모두 탄소중립 달성연도에도 여전히 에너지를 수입하게 될 것이다. 그럼에도 불구하고, 2021 년의 독일(갈탄 제외)과 한국이 거의 모든 화석 연료를 수입하는 것에 비해, 재생 에너지 잠재량의 실현을 통해 전체 수입 의존도가 현재보다 훨씬 작아질 것이다. (Clean Energy Wire 2023; EIA 2023).

이번 연구에서 보여주는 것은 독일이나 한국 모두 탄소중립(net zero)와 그 너머를 향한 여정에서 전력을 공급할 재생 에너지 잠재량의 부족에 대해 걱정할 필요가 없다는 점이다. 재생 가능 에너지원의 신속한 확장 및 통합, 전기화 및 에너지 효율성 향상을 목표로 하는 정책 조합을 통해 탄소중립은 가까워질 수 있다. 양국 정부의 모든 수준에서의 요한 임무는 기후 변화를 늦추고, 미래 피해를 줄이며 미래의 친환경 경제를 구현하기 위해 이러한 정책 믹스를 만들고, 탄소중립을 달성할 수 있도록 보장하는 것이다.

표 1: 한국과 독일의 재생 에너지 잠재량에 대한 에너지 소비 및 요인

	독일	한국
전력소비량 20	550 TWh	554 TWh

22/2021		
탄소중립연도 예상 최종 에너지 소비량 ¹	1,468 TWh	1,620 TWh
탄소중립연도 예상 전력 소비량 ²	1,041 TWh	1,212 TWh
현재 설치된 태양 및 풍력 발전 통합 용량	133 GW	27 GW
2030 년 태양 및 풍력 발전 통합 용량 목표	330 GW	73 GW
일일 이론적 태양광 PV 잠재량(Global Solar Atlas)	2.68 kWh/m ²	3.99 kWh/m ²
평균 풍속(육상) ³	8.45 m/s	7.35 m/s
전력 밀도 풍력 중간값(육상)	595 W/m ²	552 W/m ²
해양 면적 규모	57,000 km ²	443,000 km ²
평균 풍속 범위(해상)	9 - 10 m/s	7 - 8.5 m/s
¹² 다양한 연구의 예측 평균값.		
³ 해당 국가 표면에서 바람이 가장 많이 부는 상위 10% 지역의 평균 풍속.		
정보 출처: (Ariadne 2021), (Prognos et al. 2021), (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021), (Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) 2021), (Green Energy Strategy Institute et al. 2022), (International Energy Agency (IEA) and Korean Energy Economics Institute (KEEI) 2021), (World Bank Group et al. 2023), (MOLIT 2023), (Marine Conservation Institute 2023), (Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2023), (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022)		

참고문헌

- Agentur für Erneuerbare Energien 2023: Tiefengeothermie. Retrieved 15 May 2023, from <https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energie/erdwaerme/tiefengeothermie#:~:text=Als%20Tiefengeothermie%20bezeichnet%20man%20die,auch%20f%C3%BCr%20die%20Stromerzeugung%20nutzbar.>
- Agora Energiewende; Agora Verkehrswende; Technical University of Denmark (DTU) and Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Biospheric Theory and Modeling 2020: Making the Most of Offshore Wind. Re-Evaluating the Potential of Offshore Wind in the German North Sea.
- Ariadne 2021: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich 2021.
- Ariadne 2022: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich 2022.
- Bellini, Emiliano 2022: South Korea installed 4.4 GW of PV capacity in 2021. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.pv-magazine.com/2022/01/10/south-korea-installed-4-4-gw-of-pv-capacity-in-2021/>.
- Bellini, Emiliano 2023: South Korea cuts capacity allocations from 4 GW to 2 GW in solar tenders. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.pv-magazine.com/2023/03/28/south-korea-cuts-capacity-allocations-from-4-gw-to-2-gw-in-solar-tenders/>.
- BloombergNEF 2021: Solar Power to Retain Lead in South Korea's Green Plans. Retrieved 10 May 2023, from <https://about.bnef.com/blog/solar-power-to-retain-lead-in-south-koreas-green-plans/>.
- Born, Holger; Rolf Bracke; Timm Eicker and Michael Rath 2022: Roadmap Oberflächennahe Geothermie. Erdwärmepumpen für die Energiewende - Potenziale, Hemmnisse und Handlungsempfehlungen: Fraunhofer-Gesellschaft IEG.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2022: Überblickspapier Osterpaket. Berlin:
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2023: Installierte Leistung (kumuliert) der Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2022 (in Megawattpeak). Retrieved 10 May 2023, from <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13547/umfrage/leistung-durch-solarstrom-in-deutschland-seit-1990/>.
- Bundesregierung 2023: Mehr Energie aus erneuerbaren Quellen. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/energiewende-beschleunigen-2040310#:~:text=Bis%202030%20Wind-%20und%20Solarstrom%20verdoppeln&text=Bis%202030%20soll%20der%20Bruttostromverbrauch,als%20zehn%20Jahren%20fast%20verdoppeln.>
- Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) 2021: Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft.
- Clean Energy Wire 2023: Germany, EU remain heavily dependent on imported fossil fuels. Retrieved 04 Aug 2023, from <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-dependence-imported-fossil-fuels#:~:text=In%20the%20midst,a%20key%20solution.>
- Conexio GmbH 2021: 36. PV-Symposium BIPV-Forum 18.-26. Mai 2021. Tagungsunterlagen.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) 2018: GENeSYS-MOD v2.0 – Enhancing the Global Energy System Model. Model Improvements, Framework Changes, and European Data Set.
- Edmond, Charlotte 2020: A new tidal energy project just hit a major milestone in Scotland. World Economic Forum. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.weforum.org/agenda/2020/01/tidal-renewable-energy-turbine-electricity-generation-scotland/>.
- EIA 2023: Country Analysis Brief: South Korea.
- Ember 2023: Global Electricity Review 2023.
- Enerdata 2023a: Germany Energy Information. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.enerdata.net/estore/energy-market/germany/>.
- Enerdata 2023b: South Korea Energy Information. Retrieved 10 May 2023, from [https://www.enerdata.net/estore/energy-market/south-korea/#:~:text=Electricity%20consumption%20increased%20by%205,2018%20\(2.2%25%2Fyear\).](https://www.enerdata.net/estore/energy-market/south-korea/#:~:text=Electricity%20consumption%20increased%20by%205,2018%20(2.2%25%2Fyear).)
- Enerdata 2023c: South Korea targets 34.6% nuclear and 30.6% renewable power generation in 2036. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/south-korea-targets-346-nuclear-and-306-renewable-power-generation-2036.html#:~:text=South%20Korea%20targets%2034.6%205%20nuclear,power%20generation%20in%202036%20|%20Enerdata&text=The%20most%20comprehensive%20and%20up-to-date%20annual%20energy%20database.>
- Enerdata 2023d: Total energy consumption. Retrieved 04 Sep 2023, from <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>.
- Environmental Performance Index 2023: Air Quality. Retrieved 10 May 2023, from <https://epi.yale.edu/epi-results/2022/component/air.>

ESMAP 10.05.2023: Offshore Wind Technical Potential. Analysis and Maps. Retrieved 10 May 2023, from https://www.esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2023: Bioenergie: Biomasse-Potenziale. Retrieved 15 May 2023, from <https://bioenergie.fnr.de/bioenergie/biomasse/biomassepotenziale/>.

Forschungsverbund Erneuerbare Energien 2023: Meeresenergie – Wie funktioniert das? Retrieved 26 Jun 2023, from <https://www.fvee.de/forschung/energiebereitstellung/meeresenergie>.

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE) 2022: Flächenpotenziale für die Windenergie an Land. Retrieved 15 May 2023, from https://www.iee.fraunhofer.de/de/presseinfothek/PresseMedien/2022/flaechenpotenziale_windenergie_an_land.html.

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (Fraunhofer IWES) 2012: Windenergie Report Deutschland 2011.

Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (Fraunhofer IWES) 2022: Offshore Flächenpotenziale: Analyse der Energieerzeugungseffizienz in der deutschen AWZ. Studie im Auftrag des BWO und BDEW.

GKSS Forschungszentrum; ECOFYS and Greater Good Science Center (GGSC) 2010: Nutzung der Meeresenergie in Deutschland. Endbericht.

Global Wind Energy Council 2021a: Offshore Wind: Technical Potential in Germany. Retrieved 26 Jun 2023, from https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/Germany_Offshore-Wind-Technical-Potential_GWEC-OREAC.pdf.

Global Wind Energy Council 2021b: Offshore Wind: Technical Potential in Korea. Retrieved 26 Jun 2023, from https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/South-Korea_Offshore-Wind-Technical-Potential_GWEC-OREAC.pdf.

Global Wind Energy Council 2022: Global Offshore Wind Report 2022.

Green Energy Strategy Institute; Institute for Green Transformation; NEXT Group and Agora Energiewende 2022: 2050 Climate Neutrality Roadmap for Korea. K-Map Scenario. Agora.

International Energy Agency (IEA) 2019: Offshore Wind Outlook 2019. Special Report.

International Energy Agency (IEA) and Korean Energy Economics Institute (KEEI) 2021: Reforming Korea's Electricity Market for Net Zero.

International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022a: Energy Profile Germany.

International Renewable Energy Agency (IRENA) 2022b: Energy Profile Republic of Korea.

Jochum, Patrick; Julia Lempik; Saskia Böttcher; Dennis Stelter; Tobias Krenz; Peter Mellwig; Martin Pehnt; Amany von Oehsen; Sebastian Blömer and Hans Hertle 2017: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Enbericht: Beuth Hochschule für Technik Berlin, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu).

Jung, Woosuk 2017: South Korea's Air Pollution. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.isdp.eu/publication/south-koreas-air-pollution-gasping-solutions/>.

Korea Energy Economics Institute (KEEI) 2018: Energy News. Retrieved 10 May 2023, from http://www.keei.re.kr/main.nsf/index_en.html?open&p=%2Fweb_keei%2Fen_news.nsf%2FXML_Portal%2F268d0d3a7500bcfc4925836d00257938&s=%3FOpenDocument%26menucode%3D%26category%3D%25EC%2597%2590%25EB%2584%2588%25EC%25A7%2580%25EB%2589%25B4%25EC%258A%25A4%26Click%3D.

Korean New and Renewable Energy Center (KNREC) and Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2021: New and Renewable Energy White Paper 2020. (Korean).

Kost, Christoph; Shivenes Shammugam; Verena Fluri; Dominik Peper; Aschkan Davoodi Memar and Thomas Schlegl 2021: Levelized cost of electricity renewable energy technologies: Fraunhofer ISE.

Lee, Keun-Yeong 2022: South Korea's solar power generation exceeds 7%. Retrieved 26 Jun 2023, from <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1055687.html>.

Lee, Seok-Ho and Sangmin Jo 2018: Estimating solar market potential and analyzing implementation costs considering regional economics: Korea Energy Economics Institute.

Lu, Xi; Michael B. McElroy and Juha Kiviluoma 2009: Global potential for wind-generated electricity. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106:27, pp 10933–10938.

Lütkehus, Insa; Hanno Salecker and Kirsten Adlunger 2013: Potenzial der Windenergie an Land. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Lutz, Christian; Markus Flaute; Ulrike Lehr; Andreas Kemmler; Almut Kirchner; Alex auf der Maur; Inka Ziegenhagen; Marco Wünsch; Sylvie Koziel; Alexander Piégsa and Samuel Straßburg 2018: Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende: Fraunhofer ISI; Prognos; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung; Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung.

Marine Conservation Institute 2023: Marine Protection Atlas. Retrieved 26 Jun 2023, from <https://mpatlas.org/countries/DEU/>.

Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2023: Announcement of the 10th Basic Plan for Electricity Supply and Demand (2022~2036). Retrieved 22 May 2023, from https://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce3/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=68162&bbs_cd_n=6¤tPage=1&search_key_n=&cate_n=&dept_v=&search_val_v=&biz_a_nc_yn_c=.

MOLIT 2023: Offshore Practice Q&A. Retrieved 02 Aug 2023, from <https://www.molit.go.kr/USR/policyTarget/dtl.jsp?idx=203>.

Pape, Carsten; David Geiger; Christoph Zink; Miron Thylmann; Wolfgang Peters and Silvio Hildebrandt 2022: Flächenpotenziale der Windenergie an Land 2022: Frauenhofer IEE; bosch & partner.

Park, Won Young; Nikit Abhyankar; Paliwal Umed; James Hyungkwan Kim; Nina Khanna; Kenji Shiraishi; Jiang Lin; Amol Phadke; Yong Hyun Song; Hee Seung Moon; Eunsung Kim; Sanghyun Hong and Seung Wan Kim 2023: A Clean Energy Korea by 2035. Transitioning to 80% Carbon-Free Electricity Generation: NEXT Group; Lawrence Berkeley National Laboratory; University of California.

Power Technology 2023: Hydropower capacity in South Korea and major projects. Retrieved 15 May 2023, from <https://www.power-technology.com/data-insights/hydropower-in-south-korea/>.

Prognos 2016: Eigenversorgung aus Solaranlagen. Das Potenzial für Photovoltaik-Speicher-Systeme in Ein- und Zweifamilienhäusern, Landwirtschaft sowie im Lebensmittelhandel.

Prognos; Öko-Institut and Wuppertal-Institut 2021: Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann.

Rechner Online 2023: Photovoltaik - Größe einer Freiflächenanlage MWp/ha. Retrieved 15 Sep 2023, from <https://rechneronline.de/photovoltaik/freiflaeche.php>.

Richter, Manuela 2023: 2022 Country Report Germany: IEA Geothermal.

Ritchie, Hannah; Max Roser and Pablo Rosado 2020a: CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Retrieved 10 May 2023, from <https://ourworldindata.org/co2/country/germany>.

Ritchie, Hannah; Max Roser and Pablo Rosado 2020b: CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Retrieved 10 May 2023, from <https://ourworldindata.org/co2/country/south-korea>.

Ritchie, Hannah; Max Roser and Pablo Rosado 2022: Energy. Retrieved 26 Jun 2023, from <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.

Sieler, Roman Eric 2022: Offshore Wind. Achieved Cost Reductions in Germany. Berlin: adelphi.

Song, Yoonho and Tae Jong Lee 2022: 2021 Republic of Korea Country Report: IEA Geothermal.

Southern Environmental Law Center 2022: Satellite images show link between wood pellet demand and increased hardwood forest harvesting.

Stiftung Klimaneutralität 2021: Photovoltaik Potentiale. Literaturrecherche. Berlin: Stiftung Klimaneutralität.

Stiftung Klimaneutralität 2022: Szenarienvergleich. Retrieved 26 Jun 2023, from <https://www.stiftung-klima.de/de/themen/klimaneutralitaet/szenarienvergleich/>.

Tagesschau 2023: Nordsee-Anrainer setzen auf Ausbau der Windkraft. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/windkraft-gipfel-105.html>.

Thomas, Klaus; Carla Vollmer; Kathrin Werner; Harry Lehmann and Klaus Müschen 2010: Energieziel 2050. 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Rosslau: Umweltbundesamt.

U.S. Energy Information Administration 2022: Levelized Costs of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2022.

Umweltbundesamt 2023a: Bioenergie. Retrieved 22 May 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#bioenergie-ein-weites-und-komplexes-feld->.

Umweltbundesamt 2023b: Erneuerbare Energien in Zahlen. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>.

Umweltbundesamt 2023c: Photovoltaik. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#photovoltaik>.

Umweltbundesamt 2023d: Windenergie an Land. Retrieved 10 May 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#flaeche>.

Welder, Lara; Neil Grant; Tina Aboumhaboub; Jonas Hörsch; Victor Maxwell and Claire Fyson 2023: Clean power in South Korea. A roadmap to zero fossil gas in South Korea's power sector.

Wirth, Harry 2023: Aktuelle Fakten zu Photovoltaik in Deutschland: Frauenhofer ISE.

Wirth, Harry; Christoph Kost; Korbinian Kramer; Holger Neuhaus; Dominik Peper; Jochen Rentsch and Charlotte

Senkspiel 2021: Solaroffensive für Deutschland. Wie wir mit Sonnenenergie einen Wirtschaftsboom entfesseln und das Klima schützen: Fraunhofer ISE; Greenpeace.

Wissenschaftlicher Dienst Deutscher Bundestag 2022: Zu Ausbaupotentialen der Wasserkraft in Deutschland.

World Bank; ESMAP; VORTEX and Technical University of Denmark (DTU) 2023: Global Wind Atlas. Retrieved 26 Jun 2023, from <https://globalwindatlas.info/en/area/South%20Korea>.

World Bank Group; Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) and SOLARGIS 2023: Global Solar Atlas 2.0.

World Bank Open Data 2023: GDP per unit of energy use (PPP \$ per kg of oil equivalent). Retrieved 22 May 2023, from <https://data.worldbank.org/indicator/EG.GDP.PUSE.KO.PP?locations=DE-KR>.

표 목 록

그림 1: 현재 및 탄소중립연도의 독일과 한국의 에너지 동향.....	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
그림 2: 기술적 한계를 고려한 독일의 태양광 발전 잠재량.....	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
그림 3: 기술적 한계를 고려한 한국의 태양광 발전 잠재량.....	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
그림 4: 독일의 육상 풍력 발전 잠재량.....	오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.
그림 5: 한국의 육상 풍력 발전 잠재량.....	14
그림 6: 독일의 해상 풍력 발전 잠재량.....	18
그림 7: 한국의 해상 풍력 발전 잠재량.....	18

