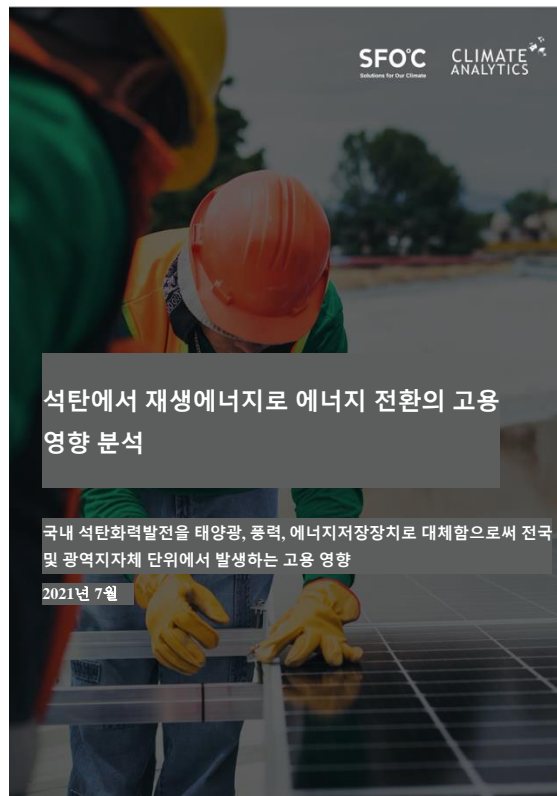


기술 부록

석탄에서 재생에너지로 에너지 전환의 고용 영향 분석

국내 석탄화력발전을 태양광, 풍력, 에너지저장장치로 대체함으로써 전국 및 광역지자체 단위에서 발생하는 고용 영향

2021년 7월



보고서 본문인 *Climate Analytics, Solutions for Our Climate (2021). 석탄에서 재생에너지로 에너지 전환의 고용 영향 분석*(*Employment opportunities from a coal-to-renewables transition in South Korea*)은 다음 URL 에서 다운로드 하실 수 있습니다:

<https://climateanalytics.org/publications/2021/employment-opportunities-from-a-coal-to-renewables-transition-in-south-korea/>

1. 방법론과 분석 단계 개요

기존 연구들은 재생에너지로의 전환이 **고용 창출 잠재력** 등을 포함한 여러 가지 경제적 혜택을 수반한다는 것을 보여준다. 본 연구는 기존 연구를 통해 얻은 통찰을 다음과 같이 발전시킨다. 첫째, 우리가 아는 바에 따르면 본 연구는 한국이 파리협정에 부합하도록 석탄발전을 폐지하고 석탄발전을 재생에너지 발전으로 직접 대체할 경우 얻어지는 고용 영향을 예측한 첫 연구이다. 이러한 연구 결과는 COP26 개최까지 각 국가들이 기후목표를 향상시켜야 한다는 점에서 시사점을 갖는다.

둘째, 본 연구는 전국뿐 아니라 광역지자체 단위의 고용 영향까지도 예측한 첫 연구이다. 이러한 각 지역 차원의 예측은 한국에서 정의로운 전환(Just Transition) 과정을 개시함에 따른 지역 고용의 잠재적인 대체 선택지지에 대한 논의의 중요한 출발점이 된다.

분석의 주안점

본 분석은 **한국에서 파리협정에 부합하는 빠른 탈석탄을** (석탄발전을 태양광과 풍력 및 저장장치로 대체)할 경우, **직접고용에 미치는 영향을** 예측하고, 제 9 차 전력수급기본계획(이하 “9 차 전기본”)에서 제시한 석탄발전 경로에 기반한 **현 정책 시나리오(Current Policy Scenario)**와 비교하는 데 초점을 맞춘다.

기존의 다른 에너지원들도 전체적인 에너지 믹스(mix)와 저장장치 용량을 파악하기 위해 에너지 시스템 모델링의 차원에서 고려되지만¹, **연구결과는 탈석탄과 태양광, 풍력, 관련 저장장치로의 대체 설비용량과 직접적으로 연관된 에너지원의 고용 영향만으로 제한한다.** 석탄발전에서 태양광/풍력 발전으로 전환되더라도 영향을 받지 않기 때문에 두 시나리오 동일한 발전설비와 관련 일자리는 결과에 달리 반영되지 않는다. 이에는 분석 대상인 탈석탄에 기인하지 않는 태양광과 풍력 발전 관련 기존 일자리들도 포함된다.

우리는 한국의 에너지 시스템 전체의 100% 재생에너지로 전환이 아니라, 석탄을 재생에너지로 전환함에 따른 고용 영향만을 평가한다.

2030 년 이전까지의 탈석탄과 연관된 기간을 보여주기 위해 연구 대상 기간을 2030 년까지로 한정한다.

파리협정에 부합하는 가속화된 탈석탄 정책이 전국과 광역지자체 단위에 미치는 고용 영향을 예측하기 위해, 우리는 아래의 단계를 거친다. 모든 분석과 가정은 3 장에 상세하게 나와있다.

1. 본 연구는 SIAMESE(Simplified Integrated Assessment Model with Energy System Emulator) 모델을 이용해 한국의 탄소배출 경로 도출에 대한 정책 제약을 설명하는 2°C 미만 시나리오(Beyond 2°C Scenario) 경로²를 상세화한 내용을 토대로 파리협정에 부합하는 한국의 전력발전 경로를 도출한 이전 연구³에 기반하고 있다. 방법론에 관한 보다 자세한 내용은 Sferra et al. (2019) [1] 참조.
2. 역시 기존 연구를 바탕으로 [2], 1 단계에서 도출된 파리협정에 부합하는 배출 경로를 이행하기 위해 한국의 석탄발전소들이 어떤 순서로 폐쇄되어야 하는지를 정하는 두 개의 발전기별 폐쇄 일정을 모델링한다. 본 분석을 위해 우리는 탄소 배출 집약도가 높은 발전기들이 우선 폐쇄된다는 순위 기준을 선택했다(이전 연구에서는 ‘환경성 관점’이라고 칭하였음). 방법론에 대한 자세한 내용은 Climate Analytics(2021)의 연구를 기반으로 한 본 보고서의 기술 부록(Technical Annex) 참조 [2]. 이 가속화된 탈석탄 일정은 제 9 차 전력수급기본계획에서 제시한 현행 정책과 비교된다 [3].

폐쇄된 발전소가 공급하던 전기를 보충하기 위해, 이 석탄발전소들을 재생에너지와 에너지 저장장치로 대체하는 것을 모델링한다. 이 부분의 분석은 아래의 두 단계로 진행된다.

3. 고해상도 격자자료(보다 상세한 내용은 3.2 장 참조) 모델링을 바탕으로 옥상 및 대지(유틸리티급) 태양광과 해상 및 육상 풍력에 대한 한국의 지역별 잠재량을 분석한다. 지역별 태양 및 풍력에너지 잠재량에 관한 공간적으로 명확한 정보를 활용하여 시나리오상 태양광과 풍력 발전설비가 한국 내 어떤 광역지자체에 위치할 것인지 파악한다.
4. 각 시나리오의 에너지 믹스를 평가하기 위해 “전력계통 분석 파이썬(Python for Power System Analysis; PyPSA)”을 바탕으로 한국형 전력시스템 모델을 개발했다. 이를 위해 3 단계에서 태양광과 풍력 잠재량 모델링 결과와 2 단계의 발전기 별 탈석탄 일정들을 활용한다. PyPSA 모델링의 결과는 각 에너지원(옥상 태양광, 대지 태양광, 해상 풍력, 육상 풍력 및 관련된 저장장치 용량)을 용량 측면에서 얼마나 설치해야 다른 에너지원과 관련, 폐쇄된 석탄발전을 대체할 수 있는지에 대한 정보를 제공한다. 나아가, 태양광과 풍력

² Climate Analytics 는 IAE 의 글로벌 에너지 기술 전망(Energy Technology Perspectives) “Beyond 2°C Scenario”에 적용된 하향식 모델을 기반으로, 그리고 2019 년까지의 역대 배출량을 고려하여 석탄 발전에 대한 파리협정에 부합하는 배출량 감축 경로를 모델링하였다. Climate Analytics 는 상기 모델이 파리협정의 장기기온목표(Long-Term Temperature Goal)와 부합하는 특성을 갖도록 별도의 평가를 실시하였다. 파리협정을 통해 지구 온난화를 “2 도보다 현저히 낮은 수준”으로 억제하면서 온난화 수준을 1.5 도 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하는 범지구적 합의이다.

³ Climate Analytics 의 2020 년 연구에서 파리협정에 부합하는 한국의 탈석탄 경로를 도출했다 [43]. 올해 초에 실시된 또 다른 연구에서는 대기오염과 건강에 미치는 영향을 평가하면서 발전기 별 폐쇄 일정을 분석하였다 [2].

잠재량에 관한 공간적으로 명확한 정보(3 단계에서 얻어진 자료), 그리고 각 석탄발전소가 폐쇄되는 연도에 관한 정보(2 단계에서 얻어진 자료)를 해당 석탄발전소의 지리 위치 정보와 결합하여 얻은 정보(Global Coal Plant Tracker 근거 [4])를 활용하여 다양한 에너지원에 대한 한국 내 광역지자체 단위의 설비 추정치와 변화 추이를 확인한다.

이러한 단계들을 통해, 현 정책 경로 대비 파리협정에 부합하는 가속화된 탈석탄을 위해 석탄발전소를 태양광과 풍력 발전 및 저장장치로 대체하는 경로에서의 광역지자체 단위 직접고용 영향을 분석한다. 우리는 직접고용 영향을 평가하기 위해 고용계수 방법론을 활용하는데, 고용계수 접근법은 매우 투명하고 유연하며, 기존문헌(가령 Rutovitz et al. (2015) [5], Ram et al. (2020) [6] 참조)에서 통상적으로 쓰인다. 전반적인 방법론과 가정은 섹션 3.3 에서 보다 상세히 다룬다. 고용 영향 분석을 위해서는 아래의 단계를 거친다:

5. 관련 데이터가 있는 경우에는 한국 고유의 고용계수를 실증적으로 도출하고, 그렇지 못할 경우 문헌에 나온 고용계수들을 사용한다.
6. 각 에너지원 및 광역지자체 별 설치, 추가, 폐쇄된 설비 관련 정보를 제공하는 PyPSA 모델링 결과(4 단계)와 고용계수(5 단계)를 사용하여, 직접 고용을 일자리유형별(국산 장비제조, 건설/설치, 운영/유지보수) 그리고 본 연구와 관련이 있는 에너지원별로 구분하여 추산한다.
7. 공간 모델링을 통해 얻은 태양광과 풍력 잠재량 정보와 석탄발전소의 지리 위치 정보를 활용하여 고용 추정치를 광역지자체 단위로 배분한다.

2. 시나리오에 대한 설명

산업통상자원부는 2020 년 12 월, 제 9 차 전력수급기본계획(“제 9 차 전기본”)을 발표했다 [3]. 이 계획은 계획 기간의 마지막 해인 2034 년까지의 에너지 수요변화를 예측하고 전원별 설비용량에 대한 정책을 세운다. 문 대통령이 2020 년 10 월 연설을 통해 한국은 2050 년까지 탄소중립을 목표로 석탄발전을 재생에너지로 대체하고자 함을 밝힌 바 있으나, 제 9 차 전기본에 따르면 계획 기간의 마지막 해인 2034 년 말에도 석탄발전 용량이 29GW 에 달할 것으로 예측된다.

파리협정에 부합하는 가속화된 탈석탄에 따른 고용 창출 잠재력을 설명하기 위해 본 연구는 석탄발전 퇴출의 역할과 시기와 관련하여 서로 다른 경로를 대표하는 두 가지 시나리오를 모델링한다. 석탄발전에 대한 현 정책은 현 정책(CPol) 시나리오를 바탕으로 모델링되었고, 이는 2029 년까지 빠른 탈석탄을 이루는 탈석탄(CtR) 시나리오와 비교 된다. 각 시나리오에 대한 가정은 이하에서 보다 자세히 설명한다.

석탄의 역할에 대해서는 두 시나리오가 몇 가지의 가정을 공유한다. 전력 수요⁴는 두 시나리오 모두에서 동일하게 제 9 차 전기본상의 수요예측을 따른다고 가정한다. 두 시나리오 모두 전력 공급을 동일하게 가정하며, 수요에 예비율(17%에서 22%로 증가)을 반영한 용량을 충족해야 한다. 송전 및 배전은 명시적으로 모델링하지 않는다. 전기 시스템의 기술-경제 최적화를 위한 입력값으로 사용되는 재생에너지 가격은 IRENA 가 제공하는 재생에너지 가격예측의 중간 값을 가정으로 사용한다. 나아가, 가속화된 석탄에서 재생에너지로의 전환에서 직접 비롯되지 않는 발전원의 설비용량은 두 시나리오 모두가 제 9 차 전기본에 명시된 추이를 따른다. 이러한 기타 발전원의 용량은 PyPSA 의 최적화에 고려되지만, 외부에서 주어지는 값이라고 가정하기 때문에 관련된 고용 영향을 달리 분석하지 않는다. 또한, 두 시나리오에서 기타 발전원의 용량이 정확히 동일하기 때문에 각 시나리오별 고용 효과 역시 동일하다.

현 정책(CPol) 시나리오

현 정책(CPol) 시나리오는 제 9 차 전기본의 전력 수요변화 예측 및 설비계획 추이에 근거하여 도출된 가정을 바탕으로 한다 [3]. 이하 현 정책 시나리오의 주요 특징을 기술한다.

현 정책 시나리오 하 전원별 용량의 발전 추이:

- **석탄발전 용량**은 발전기별 폐쇄(또는 전환) 예정날짜를 규정한 제 9 차 전기본상의 석탄발전 경로를 바탕으로 외부적으로 정해진다. 석탄발전 24 기는 2034 년까지 가스발전으로 대체될 예정인데, 제 9 차 전기본에 구체적으로 어떤 발전기들이 어느 해에 전환될지에 관한 자료가 제시되어 있다.
- **가스발전 용량** 역시 제 9 차 전기본상 설비용량 계획에 따라 외부적으로 주어진다. 석탄발전소의 가스발전소로의 전환에 따른 용량을 포함하여 2034 년에는 총 가스발전 설치용량이 59GW 에 달할 것으로 예상된다.
- **재생에너지 발전 용량 및 관련 저장장치 용량**은 풍력(해상 및 육상) 및 태양광(대지 및 옥상형) 용량 및 저장장치를 PyPSA 모델을 통하여 최적화함으로써 얻어지는데, 이는 (i) 제 9 차 전기본상 전력 수요 예측치와 예비력을 포함할 뿐만 아니라 (ii) 제 9 차 전기본에서 정의된 총 재생에너지 설치용량 경로(2034 년까지 78GW 로 증가)를 따른다.
- **기타 에너지원에 대한 발전 용량**도 제 9 차 전기본에 정의된 대로 모델링된다. 여기에는 원자력, 양수 발전 및 기타 관련성이 보다 떨어지는 여러 에너지원들이 포함된다.

⁴ 전력수요곡선은 제 9 차 전력수급기본계획 기준수요 전망의 총 전력소비량과 최대전력 예측에 맞게 조정되었다. 에너지 시스템이 보다 높은 수요 예측치까지 담보할 수 있도록, 보수적인 접근을 선택해서 제 9 차 전기본상 수요관리 목표를 반영하지 않은 전망을 활용한다.

파리협정에 부합하는 가속화된 탈석탄(CtR) 시나리오

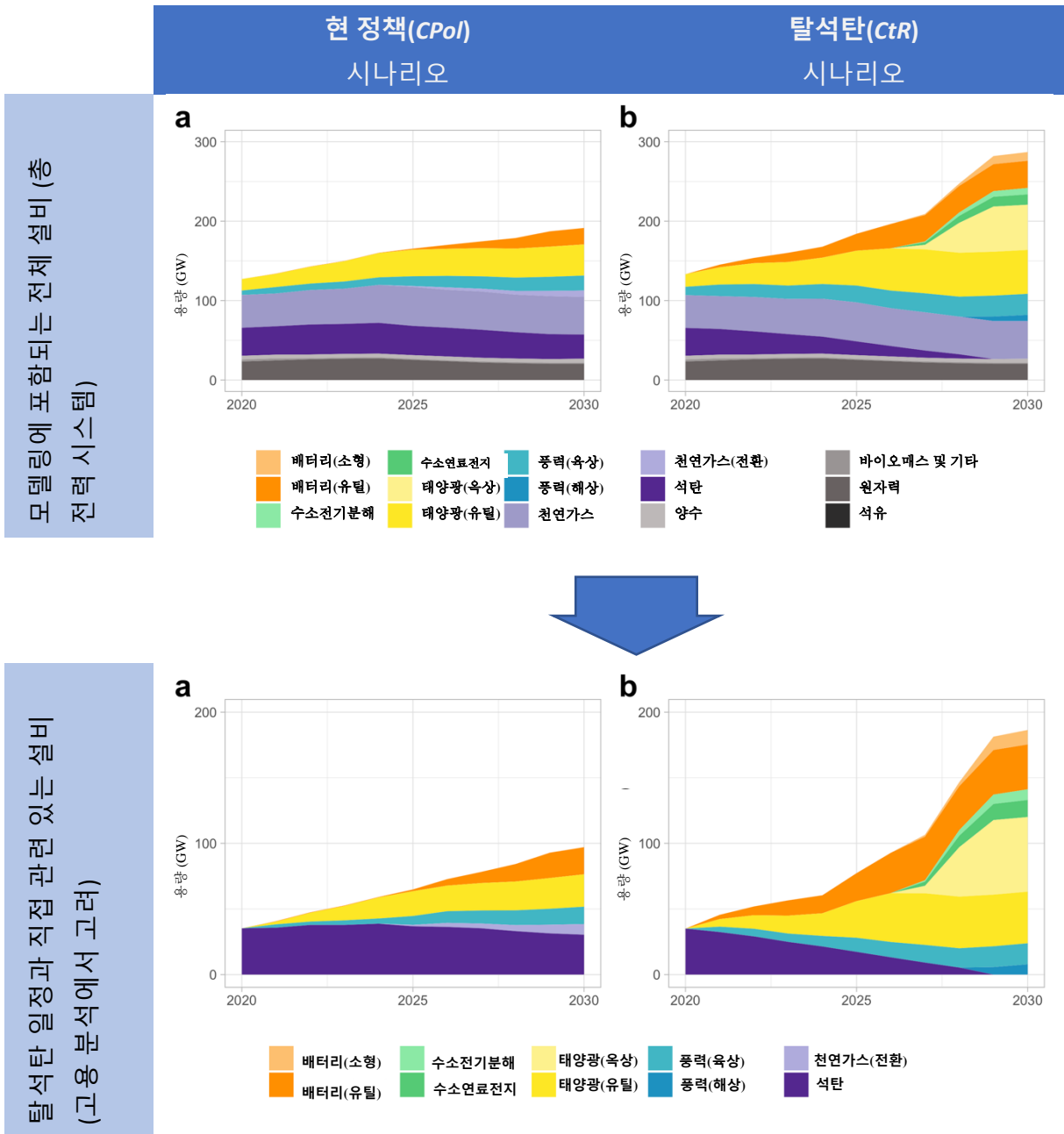
탈석탄 시나리오는 2029년까지(파리협정에 따라) 전력 시스템에서 석탄발전이 퇴출되고, 폐쇄된 석탄발전 설비를 재생에너지와 저장장치로 대체한다. 이 시나리오는 파리협정에 규정된 장기 온도제한 목표에 맞추어 한국 내 탈석탄 일정을 도출한 이전 작업⁵을 바탕으로 한다. 이는 또한 2030년 이전까지 석탄발전을 폐지할 필요가 있다는 점을 밝힌 Climate Analytics 등이 파리협정과 부합하는 경로와 관련하여 수행한 다른 연구와도 맥락을 같이 한다 [7]. 탈석탄 시나리오의 주요 특성은 다음과 같다:

탈석탄 시나리오 하에서의 발전설비 추이

- **석탄발전 용량**은 파리협정에 부합하는 발전기 별 폐쇄 일정에 의해 주어진 경로에 의해 정해진다. 이러한 발전기 별 폐쇄 일정은 환경성 관점에서 탄소배출 집약도가 높은 발전소의 폐쇄를 우선시하며 파리협정에 부합하기 위해서는 어떤 석탄발전소의 가동을 언제 멈춰야 하는지를 나타낸다.
- **가스 발전 용량**은 제 9 차 전기본에 따라 석탄에서 전환되는 가스발전소로 제외하고는 현 정책 시나리오상의 경로를 따른다. 그러나 현 정책 시나리오에서와 달리, 제 9 차 전기본에서 가스로 전환될 계획인 석탄발전소들은 가스발전소로 전환되지 않고 대신 풍력과 태양광으로 대체된다. 본 분석은 탈석탄으로 인한 고용 기회에 초점을 맞추고 있기 때문에, 전술한 전환과 관련 없는 가스 발전설비들의 추이는 현 정책 시나리오와 탈석탄 시나리오에서 모두 동일하다.
- **재생에너지 발전** 및 관련 **저장장치 용량**은 PyPSA 모델을 이용하여 풍력(해상 및 육상)과 태양광(대지 및 옥상형) 발전과 에너지 저장장치를 최적화함으로써 도출되는데, 이는 (i) 제 9 차 전기본의 전력 수요예측과 예비력을 포함하며 (ii) 파리협정에 부합하는 전력 부분의 탄소배출 경로 이하로 유지된다.
- **기타 에너지원**(원자력, 바이오매스, 양수) **발전용량** 또한 제 9 차 전기본에 정의된 바와 같이 모델링되므로 현 정책 시나리오에서와 동일한 가정을 따른다. 이러한 에너지원에 따른 고용 영향은 두 시나리오에서 모두 동일하기 때문에 본 분석에서는 달리 고려하지 않는다.

⁵ Climate Analytics의 2020년 연구로부터 파리협정에 부합하는 한국의 탈석탄 경로가 도출되었다 [43]. 올해 초에 실시된 또 다른 연구에서는 대기 오염과 건강에 미치는 영향을 평가하면서 발전기 별 폐쇄 일정을 분석하였다 [2].

표 1 CPoI 과 탈석탄 시나리오에 따른 발전설비의 변화 추이: 모델링에 포함되는 전체 용량(상단) 및 고용 분석에서 고려되는 탈석탄 일정과 직접 관련 있는 설비(하단)



참고: PyPSA 는 제9차 전기본의 전기간을 포괄하는 2034년까지의 발전 시스템을 모델로 한다. 2030년 이후의 용량 추가에 대한 PyPSA 의 정보는 제조 또는 건설/설치와 같은 상류부문 (upstream) 일자리를 고려하나, 기본적으로 본 분석을 위해 2030년까지의 기간에 초점을 두기로 한다. 수소 전기분해와 연료전지 등으로 구성되는 수소 저장장치 설비(MWh 단위)는 단위가 달라 해당 그래프에 달리 표기하지 않는다.

3. 방법론적 단계 및 가정 관련 상세 내용

한국 석탄발전소의 발전기 별 폐쇄 일정

발전기 별 폐쇄 일정이 도출된 방법에 대한 자세한 설명은 이전 보고서의 기술 부록에서 확인할 수 있다 [2]. 본 연구의 고용 분석은 ‘환경성 관점’에서 발전기 별 폐쇄 일정에 초점을 맞추었다. 표 2 는 탈석탄 시나리오에서 석탄 발전기들이 폐쇄되는 순서를 현 정책에 따른 폐쇄(현 정책 시나리오)와 비교하여 보여준다.

표 2: 석탄발전소의 발전기별 폐쇄 일정

| 발전기명 | 현 정책에 따른 폐쇄 | 탈석탄 시나리오에 따른 폐쇄 | 배출 집약도 (g CO ₂ / kWh) |
|------------|-------------|-----------------|-------------------------------------|
| 보령 #1 | 2020 | 2020 | 1045.552 |
| 보령 #2 | 2020 | 2020 | 1045.552 |
| 동해 #1 | 2028 | 2020 | 1256.639 |
| 동해 #2 | 2029 | 2021 | 1166.901 |
| 호남 #1 | 2021 | 2021 | 1175.02 |
| 호남 #2 | 2021 | 2021 | 1175.02 |
| 삼천포 #1 | 2021 | 2021 | 1012.987 |
| 삼천포 #2 | 2021 | 2021 | 1012.987 |
| 태안 #2 | 2025 | 2022 | 939.6995 |
| 삼천포 #4 | 2024 | 2021 | 972.3855 |
| 삼천포 #3 | 2024 | 2021 | 972.3855 |
| 당진 #3 | 2030 | 2023 | 861.3834 |
| 여수 #1 | 2046 | 2022 | 881.4979 |
| 태안 #4 | 2029 | 2022 | 939.6995 |
| 당진 #4 | 2030 | 2023 | 861.3834 |
| 강릉 안인 #1 | 2052 | 2026 | 795.0736 |
| 강릉 안인 #2 | 2052 | 2026 | 795.0736 |
| 태안 #3 | 2028 | 2022 | 939.6995 |
| 당진 #1 | 2029 | 2024 | 861.3834 |
| 고성 하이 #1 | 2051 | 2026 | 795.0736 |
| 고성 하이 #2 | 2051 | 2026 | 795.0736 |
| 삼척 그린파워 #2 | 2047 | 2027 | 795.0736 |
| 여수 #2 | 2041 | 2021 | 1094.004 |

| | | | |
|------------|------|------|----------|
| 태안 #1 | 2025 | 2022 | 939.6995 |
| 보령 #3 | 2043 | 2021 | 969.909 |
| 당진 #9 | 2045 | 2028 | 770.3096 |
| 영흥 #1 | 2034 | 2024 | 861.3834 |
| 당진 #2 | 2029 | 2024 | 861.3834 |
| 당진 #8 | 2037 | 2024 | 847.3219 |
| 당진 #7 | 2037 | 2025 | 847.3219 |
| 영흥 #2 | 2034 | 2024 | 861.3834 |
| 당진 #10 | 2046 | 2029 | 770.3096 |
| 태안 #10 | 2047 | 2029 | 770.3096 |
| 북평 #2 | 2047 | 2023 | 867.3625 |
| 북평 #1 | 2047 | 2023 | 867.3625 |
| 보령 #4 | 2043 | 2021 | 969.909 |
| 태안 #7 | 2037 | 2025 | 847.3219 |
| 보령 #5 | 2025 | 2021 | 969.909 |
| 보령 #6 | 2025 | 2022 | 969.909 |
| 당진 #6 | 2036 | 2023 | 874.5617 |
| 태안 #5 | 2032 | 2024 | 861.3834 |
| 하동 #1 | 2026 | 2022 | 939.6995 |
| 하동 #2 | 2027 | 2022 | 939.6995 |
| 당진 #5 | 2035 | 2023 | 874.5617 |
| 하동 #3 | 2028 | 2022 | 939.6995 |
| 영흥 #5 | 2044 | 2028 | 783.0674 |
| 영흥 #6 | 2044 | 2028 | 783.0674 |
| 하동 #4 | 2028 | 2024 | 861.3834 |
| 하동 #5 | 2031 | 2024 | 861.3834 |
| 하동 #6 | 2031 | 2024 | 861.3834 |
| 삼천포 #5 | 2027 | 2022 | 969.909 |
| 신서천 | 2051 | 2027 | 795.0736 |
| 보령 #8 | 2038 | 2023 | 874.5617 |
| 삼척 그린파워 #1 | 2046 | 2027 | 795.0736 |
| 신보령 #2 | 2047 | 2027 | 795.0736 |
| 삼천포 #6 | 2028 | 2022 | 969.909 |
| 삼척 블루파워 #1 | 2054 | 2025 | 808.2415 |

| | | | |
|------------|------|------|----------|
| 삼척 블루파워 #2 | 2054 | 2025 | 808.2415 |
| 영흥 #4 | 2038 | 2029 | 770.3096 |
| 신보령 #1 | 2047 | 2028 | 795.0736 |
| 태안 #8 | 2037 | 2025 | 847.3219 |
| 태안 #9 | 2046 | 2029 | 770.3096 |
| 태안 #6 | 2032 | 2024 | 861.3834 |
| 보령 #7 | 2038 | 2023 | 874.5617 |
| 영흥 #3 | 2038 | 2029 | 770.3096 |
| 하동 #7 | 2038 | 2025 | 847.3219 |
| 하동 #8 | 2039 | 2029 | 770.3096 |

석탄에서 재생에너지로의 전환 모델링

태양광과 풍력의 기술적 잠재량 모델링 및 평가

기술적 잠재량은 해상 풍력, 육상 풍력, 대지와 옥상형 태양광을 포함한 다양한 재생에너지원에 대해 오픈소스 파이썬 패키지인 GLAES(에너지 시스템에 대한 지리공간적 적격성)⁶ 및 RESKit(재생에너지 시뮬레이션 툴킷)⁷의 시간, 공간 시뮬레이션 모델을 적용함으로써 평가되었다 [8]. 이러한 모델은 유럽의 미래 해상 및 육상 풍력의 잠재력 분석[9]~[11]과 아르헨티나 파타고니아 지역의 풍력에너지 잠재력 분석[12]에 사용되었고 이에 반추하여 개선되었다. 재생에너지 모델링 프레임워크는 기술 선택, 재생에너지 최대 잠재량(해상 및 육상 풍력, 대지 및 옥상형 태양광), 각 재생에너지 그룹별 발전 시계열 및 가격 예측에 따른 비용평가(가령 균등화발전원가)에 따른 토지 적격성과 기상 데이터에 관한 전 세계 데이터 세트에 기초한 지역별 맥락을 보여준다.

첫 단계로 토지 적격성 분석에서는 문헌을 통해 파악한 포괄적인 배제 요인과 제약을 바탕으로 재생에너지원에 적합한 토지의 양과 분포를 평가한다. 여기에는 재생에너지 잠재량 연구에서 일반적으로 고려되는 풍력 터빈과 태양광 모듈의 설치 시 가장 공통된(사회정치적, 물리적, 보존, 준경제적⁸) 제약사항들이 반영된다. 가용 지역과 배제 지역이 나뉘면, 배치 알고리즘을 통해 매시간 별 발전 패턴 시뮬레이션에 따라 적격 지역 내에서 개별 터빈/태양광 모듈의 위치를 파악한다. 표 3은 각 재생에너지에 대해 본 분석에서 적용된 배제 요인들을 정리한 것이다.

표 3: 풍력과 태양광 잠재량 모델링을 위한 기본 가정 및 변수

| 에너지 원 | 분야 | 설명 | 가정 및 변수 선택 (배제 한도) | 출처 |
|-------|--------|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| 육상 풍력 | 지역 경계선 | 지역 경계선에서 500 m 완충거리는 배제 | ≤ 500 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 간선도로 | 간선도로에서 500 m 완충거리는 배제 | ≤ 500 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 철로 | 철로에서 500 m 완충거리는 배제 | ≤ 500 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 수로(하천) | 수로에서 150 m 완충거리는 배제 | ≤ 150 m | Heuser et al. (2019) [12] |

⁶ 더 많은 정보는 <https://github.com/FZI-IEK3-VSA/glaes> 를 참조

⁷ 더 많은 정보는 <https://github.com/FZI-IEK3-VSA/RESKit> 를 참조

⁸ 역자 설명: (자본비와 같은 경제적 요소들 외에도) 토지 가격, 접근성, 연결거리와 같이 재생에너지원 경쟁력에 간접적으로 경제적인 영향을 주는 요소들이 있음.

| | | | | |
|-------|---------|---|----------|--|
| | 공항 | 공항에서 5000 m 완충거리는 배제 | ≤ 5000 m | Ryberg (2019), Ryberg et al. (2020), Ryberg et al. (2019), Heuser et al. (2019) [8]–[10], [12] |
| | 도심 주거지 | 도심 주거지에서 1000 m 완충거리는 배제 | ≤ 1000 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 삼림지대 | 삼림지대(임관 면적, 활엽수, 침엽수, 혼효림)에서 300 m 완충거리는 배제 | ≤ 300 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 수역 | 수역에서 1000 m 완충거리는 배제 | ≤ 1000 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 보호구역 | 보호지정 공원, 기념물, 보호구역 및 원생지역에서 1000 m 완충거리는 배제 | ≤ 1000 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 조류 보호구역 | 보호 서식지 및 조류 지역에서 1500 m 완충거리는 배제 | ≤ 1500 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 고도 | 지상고도가 1500 m 를 넘는 지역은 배제 | ≥ 1500 m | Heuser et al. (2019) [12] |
| | 지형 경사 | 지형 경사가 17°를 넘는 지역은 배제 | ≥ 17° | Ryberg (2019), Ryberg et al. (2020), Ryberg et al. (2019) [8]–[10] |
| 해상 풍력 | 수심 | 최대치(200 m)보다 깊은 수심 배제 | ≥ 200 m | 재생에너지 백서 |
| | 해안과의 거리 | 해안에서 5000 m 완충거리는 배제 | ≤ 5000 m | [11], [13]의 문헌에서 주어진 지역적 측면과 범위에 기초한 자체 가정 |
| | 보호구역 | 보호구역에서 3000 m 완충거리는 배제 | ≤ 3000 m | Caglayan et al. (2019) [11] |
| | 조류 보호구역 | 조류 보호구역에서 5000 m 완충거리는 배제 | ≤ 5000 m | Caglayan et al. (2019) [11] |
| | 항로 | 가용 데이터 없음 | 배제 없음 | |

| | | | | |
|--------|--------|--|----------|------------------------------|
| 대지 태양광 | 간선도로 | 간선도로에서 50 m 완충거리는 포함 ⁹ | ≤ 50 m | 자체 가정 |
| | 철로 | 철로에서 50 m 완충거리는 포함 | ≤ 50 m | 자체 가정 |
| | 공항 | 공항에서 0 m 완충거리는 배제 | ≤ 0 m | Ryberg (2019)에 [8] 기반한 자체 가정 |
| | 도심 주거지 | 도심 지역에서 500 m 완충거리는 배제 | ≤ 500 m | 자체 가정 |
| | 삼림지대 | 삼림지대(임관면적, 활엽수, 침엽수, 혼효림)에서 0 m 완충거리는 배제 | ≤ 0 m | 자체 가정 |
| | 수역 | 수역에서 0 m 완충거리 배제 | ≤ 0 m | 자체 가정 |
| | 보호구역 | 보호공원, 기념물, 보호구역 및 원생지역에서 0 m 완충거리 배제 | ≤ 0 m | 자체 가정 |
| | 농업지역 | 농지(천수농경지, 천수농경_수목_또는_관목_면적, 관개농경지, 모자이크(mosaic)_농경지, 모자이크_자연식생)에서 0 m 완충거리는 배제 | ≤ 0 m | Ryberg (2019)에 [8] 기반한 자체 가정 |
| | 고도 | 지상고도가 1750 m 를 넘는 지역은 배제 | ≥ 1750 m | Ryberg (2019) [8] |
| | 경사: 전체 | 지형 경사가 10°를 넘는 지역은 배제 | ≥ 10° | Ryberg (2019) [8] |
| | 경사: 북쪽 | 북향 사면의 경사가 3°를 넘는 지역은 배제 | ≥ 3° | Ryberg (2019) [8] |
| 육상 태양광 | 인구밀도 | 인구밀도가 0 이 아닌 지역만 고려 대상 | | Ryberg (2019) [8] |

표 4 는 IRENA(2019) 연구에 근거하여 2020 년의 일반적인 터빈 구조를 반영하기 위한 기준치가 되는 터빈 설계와 관련하여 본 연구에서 전제로 삼은 가정에 대한 개요를 제공한다 [14]. 풍력 터빈 가격의 현 범위는 IRENA(2019, 2020)에서 주어진 전세계 평균 값에 기초한다 [14], [15]. 2030 년까지의 풍력 터빈 가격 하락 예상치는 IRENA(2019)를 통해 얻었다 [14]. RESKit 을 통해 구현된 함수는 관심 지역 및 기간에 대한 터빈 구조와 관련하여 서로 다른 가정을 할 때 주어지는 터빈 구조의 기준치에 근거하여 상응하는 스케일링 계수를 도출한다. 본 연구에서 터빈 설계 파라미터는 민감도 연구를 기반으로 최종 선택되었으며, 구체적인 내용은 다음 섹션에서 설명한다.

⁹ 역자 설명: 본 모델에서는 이격거리 규제를 고려하지 않음.

표 3: 기본 가정 및 변수 선택: 기준 터빈의 기술적 디자인과 경제적 변수

| 에너지원 | 요소 | 가정 및 변수 선택 | 출처 |
|-------------|-------------|--|---|
| 육상 풍력 | 허브 고도 | 101m | BWE (2021) [16] 및 https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1719-general-electric-ge-4.8-158-cypress |
| | 로터 지름 | 158m | IRENA (2019) [14] |
| | 용량 | 4.8MW | IRENA (2019) [14] |
| | 비출력 | 245 W m ² | IRENA (2019) [14] |
| | 자본비(2020 년) | 1108 (저) – 1473 (중) 2019 USD/kW | IRENA (2019,2020) [14], [15] |
| | 자본비(2030 년) | 800 (Low) – 1075 (me- dium) 2019 USD/kW | IRENA (2019) [14] |
| | 연간 운영비 | 2% 자본적 지출(CAPEX) | IRENA (2020) [15] |
| | 경제적 수명 | 20 년 | https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html |
| | 해상 풍력 | 허브 고도 | 120m |
| 로터 지름 | | 164m | IRENA (2019) [14] |
| 용량 | | 10MW | IRENA (2019) [14] |
| 비출력 | | 473 W m ² | IRENA (2019) [14] |
| 기초 유형 | | 모노파일 | |
| 자본비(2020 년) | | 2890 (저) – 3800 (중) 2019 USD/kW | IRENA (2019, 2020) [14], [15] |
| 자본비(2030 년) | | 1700 (저) – 3200 (중) 2019 USD/kW | IRENA (2019) [14] |
| 연간 운영비 | | 2% CAPEX | IRENA (2020) [15] |
| 경제적 수명 | | 20 년 | https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html |

표 5 는 대지 및 육상형 태양광 발전과 관련하여 본 연구에서 선택한 태양광 모듈의 특성과 경제적 가정에 관한 정보를 제공한다. 태양광 기술 관련 비용의 현 범위는 IRENA(2019, 2020)에서 주어진 전세계 평균값에 기초한다 [14], [15]. 또한, 2030 년대의 비용 절감 예상치 역시 IRENA(2019, 2020)로부터 얻어진 것이다 [14].

표 4: 기본 가정 및 변수 선택: 대지 및 육상 태양광 모듈의 특성

| 에너지원 | 요소 | 가정 및 변수 선택 | 출처 |
|-----------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| 대지 태양광 | 모듈명 | Winaico WSx-240P6 | Ryberg (2019) [8] |
| | 최대 전력점(P _{mp}) | 240.4 W | Ryberg (2019) [8] |
| | 면적 | 1.663 m ² | Ryberg (2019) [8] |
| | 효율 | 24% | Ryberg (2019) [8] |

| | | | |
|--------|----------------------------|--|---|
| | 기술 | 다결정 | Ryberg (2019) [8] |
| | 커버리지 (coverage) | 30 m ² _{land} kWp ⁻¹ | Ryberg (2019) [8]를 바탕으로 한 자체 가정 |
| | 종류(고정 경사형/단방향 추적식) | 고정 경사형 | |
| | 자본비(2020 년) | 714(저) - 995(중) 2019 USD/kWp | IRENA (2020) [15] |
| | 자본비(2030 년) | 340(저) - 587(중) 2019 USD/kWp | IRENA (2019) [19] |
| | 운영비 | 1.7% CAPEX | Ryberg (2019) [8] |
| | 경제적 수명 | 25 년 | https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html |
| 옥상 태양광 | 모델명 | LG 360Q1C-A5 | Ryberg (2019) [8] |
| | 최대 전력점 | 379.4 W | Ryberg (2019) [8] |
| | 면적 | 1.673 m ² | Ryberg (2019) [8] |
| | 효율 | 30% | Ryberg (2019) [8] |
| | 기술 | 단결정 | Ryberg (2019) [8] |
| | 커버리지 (coverage) | 9.1 m ² _{land} kWp ⁻¹ | Ryberg (2019) [8]를 바탕으로 한 자체 가정 |
| | 유형(고정 경사형/단방향 추적식) | 고정 경사형 | |
| | 자본비 ¹⁰ (2020 년) | 821(저) - 1144(중) 2019 USD/kWp | IRENA (2020) [15] |
| | 자본비(2030 년) | 391(저) - 675 (중) 2019 USD/kWp | IRENA (2019) [19] |
| | 운영비 | 1.7% CAPEX | IRENA (2020) [15] |
| | 경제적 수명 | 25 년 | https://www.nrel.gov/analysis/tech-footprint.html |

¹⁰ 옥상 태양광의 비용은 [15]에 따라 2019 년 한국에 대해 주어진 유틸리티 태양광과 옥상 태양광 비용 간의 비율을 바탕으로 계산한다.

재생에너지 모델링 민감도 분석 - 최적의 터빈 디자인 선택

균등화발전원가를 최소화하는 허브 높이와 로터 지름에 대한 최적 비용 수준을 도출하기 위해 정해진 범위에서 터빈의 기술적 디자인 변수를 다양하게 하여 민감도 분석을 실시한다. 표 6 은 터빈 디자인 변수의 추정 범위와 민감도 분석에서 얻은 최적 비용 수준을 나타낸다.

표 5: 기본 가정 및 변수: 가정의 범위 및 선택된 최적 수준(굵은 글씨)

| 에너지원 | 요소 | 가정 및 변수 선택 (최적 수준) | 출처 |
|-------|-------|---|---|
| 육상 풍력 | 허브 고도 | 80m, 88m, 99m , 101m, 121m, 149m | 일반적인 범위 및 민감도 분석에서 도출된 최적 값을 바탕으로 한 자체 가정 |
| | 로터 지름 | 117m, 125m, 136m, 141m, 158m | 상동 |
| | 용량 | 1MW, 2MW, 2.4MW , 3MW, 3.4MW, 4.2MW, 4.8MW | 상동 |
| 해상 풍력 | 허브 고도 | 105m, 110m, 120m, 130m, 140m, 150m | 상동 |
| | 로터 지름 | 180m, 200m | 상동 |
| | 용량 | 3MW, 5MW, 7MW, 9MW , 11MW, 13MW | 상동 |
| | 기초 유형 | 고정식 기초(깊이 100 m 미만), 부유식 기초(깊이 100 m 이상) | 자체 가정 |

육지/해양 가용성 및 균등화발전원가(LCOE)에 대한 시각화 자료

2020 년 육지 가용성 및 균등화된 발전 원가 분석에 대한 시각 자료를 다음의 네 가지 재생에너지원에 대해 제시한다.

육상 풍력 터빈

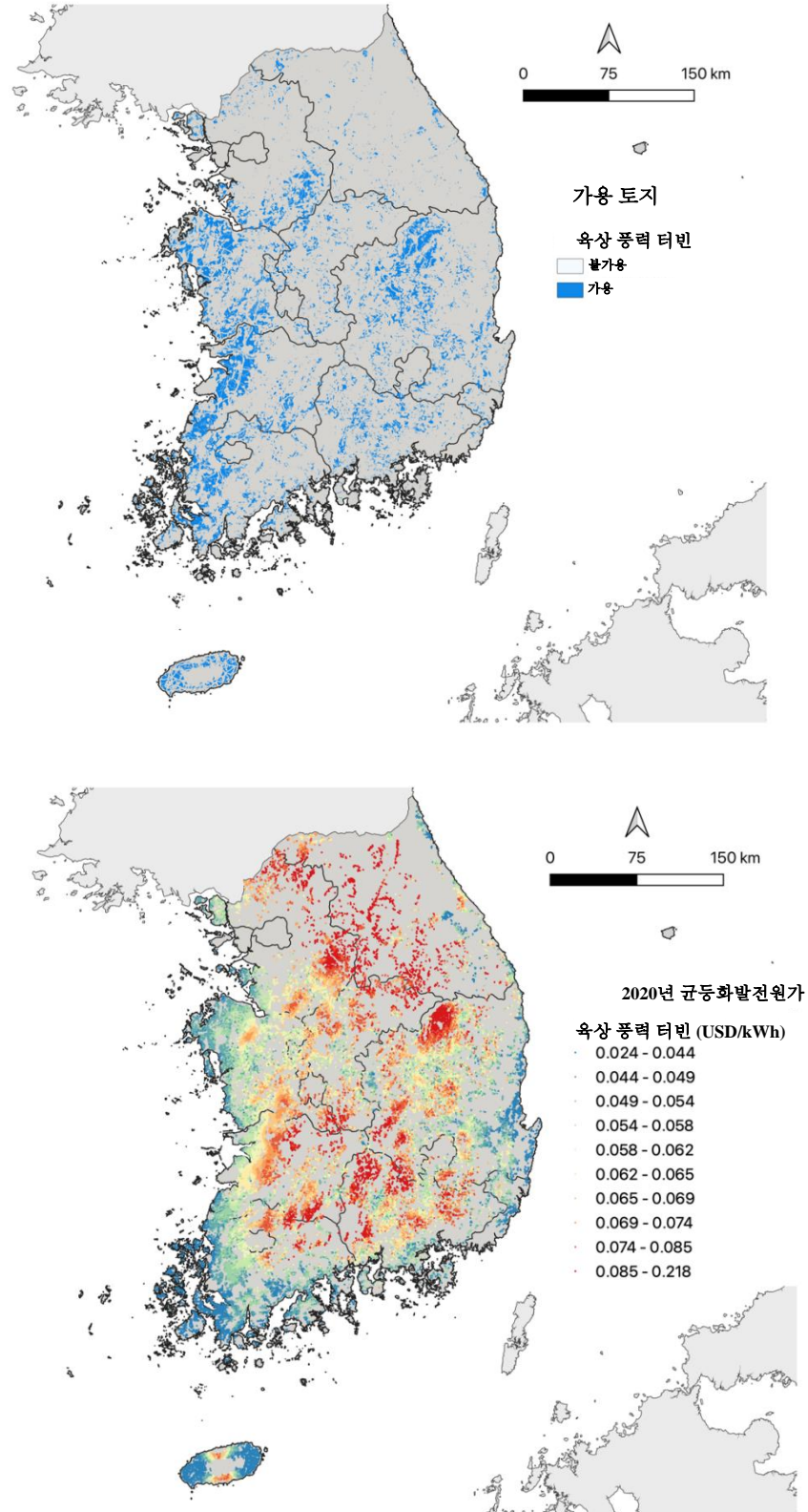


그림 1 육상 풍력 터빈을 위한 가용 토지 및 균등화발전비용(LCOE). 가시성을 높이기 위해 개별 터빈 위치의 크기가 확대됨.

해상 풍력 터빈

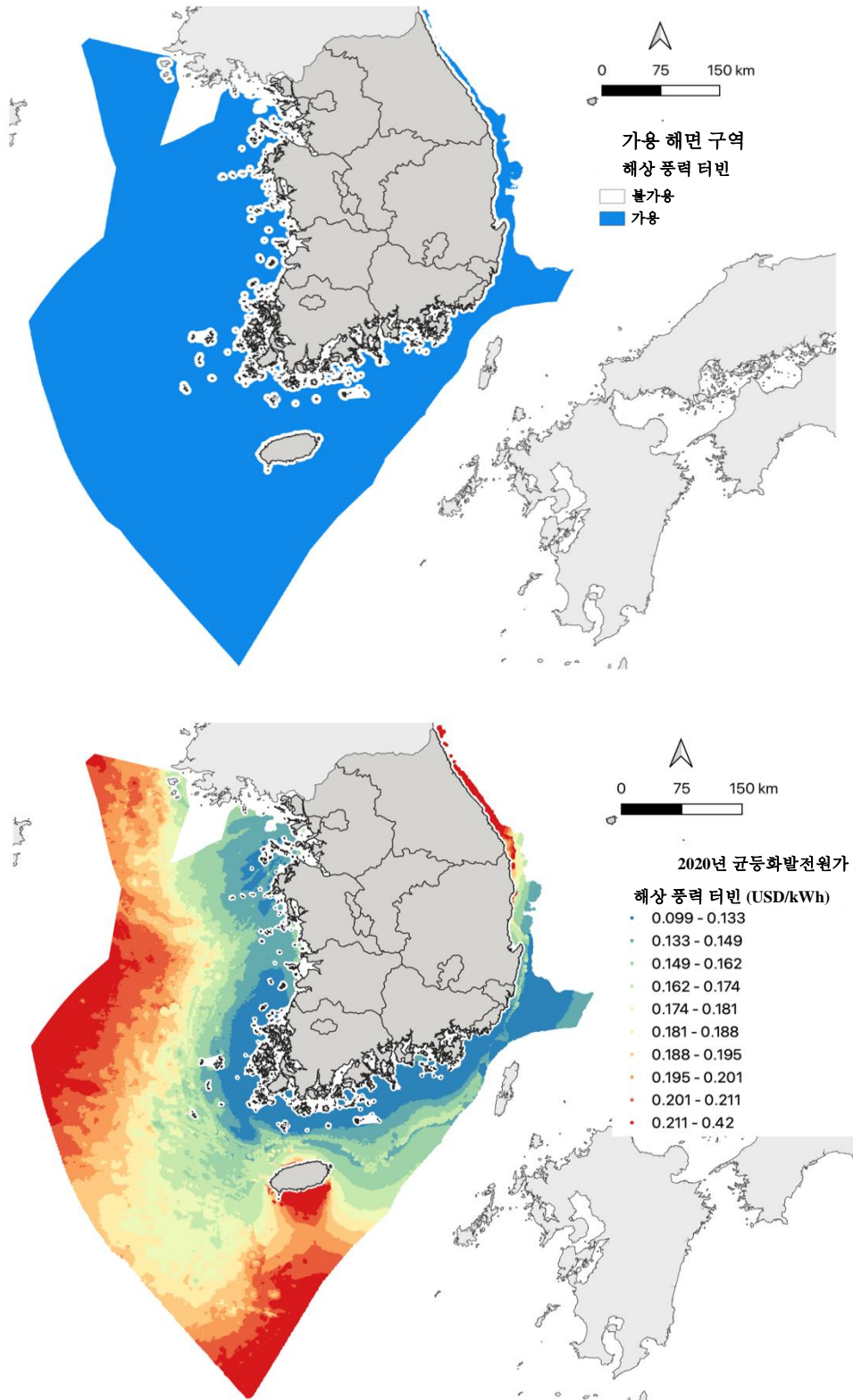


그림2 해상 풍력 터빈을 위한 가용 해면 구역 및 균등화발전비용(LCOE). 가시성을 높이기 위해 개별 터빈 위치의 크기가 확대됨.

대지 태양광 시스템

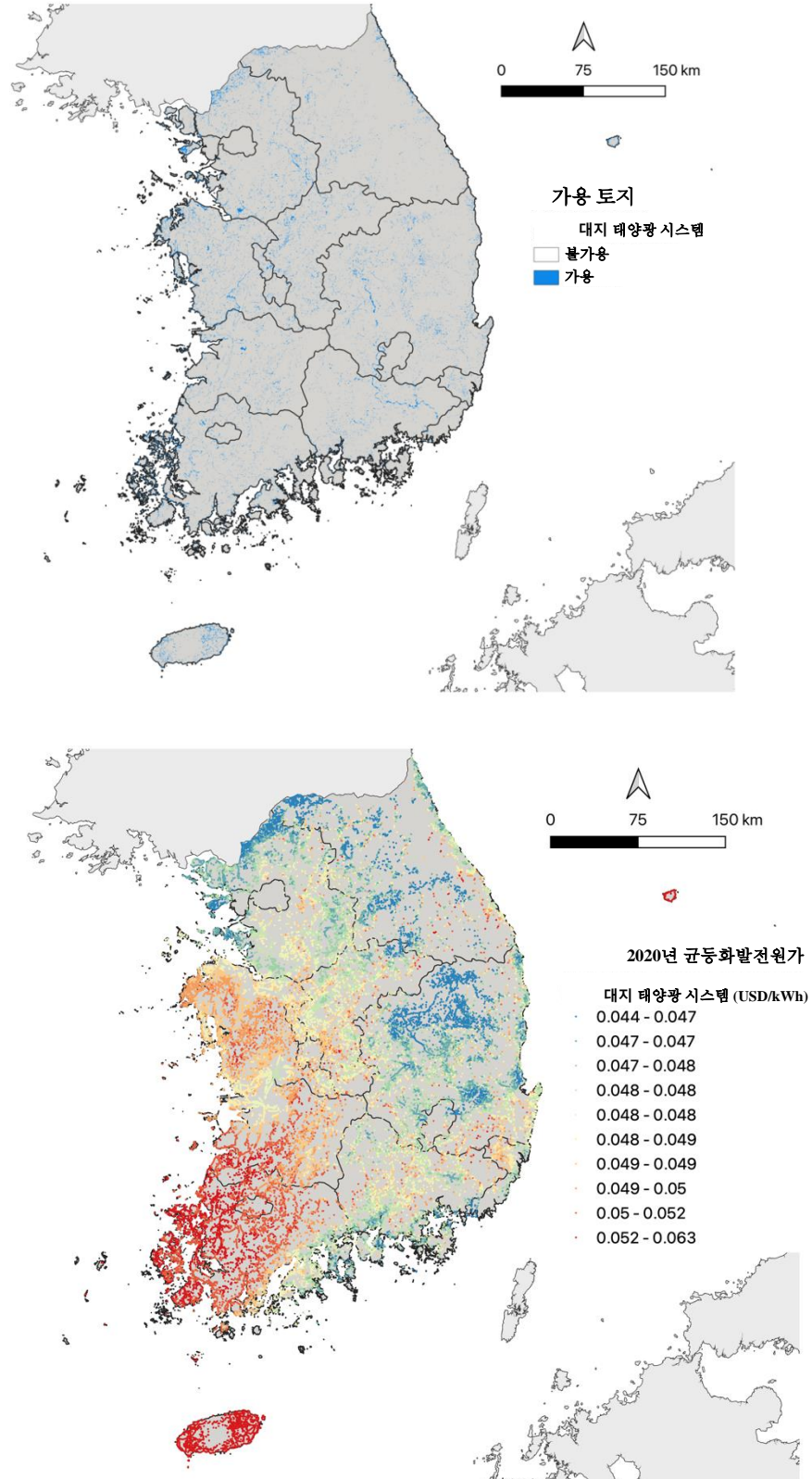


그림 3 대지 태양광 시스템을 위한 가용 토지 및 균등화발전비용(LCOE). 가시성을 높이기 위해 개별 공원의 크기가 확대됨.

기술 부록 - Climate Analytics 및 Solutions for Our Climate (2021). 석탄에서 재생에너지로 에너지 전환의 고용 영향 분석

육상 태양광 시스템

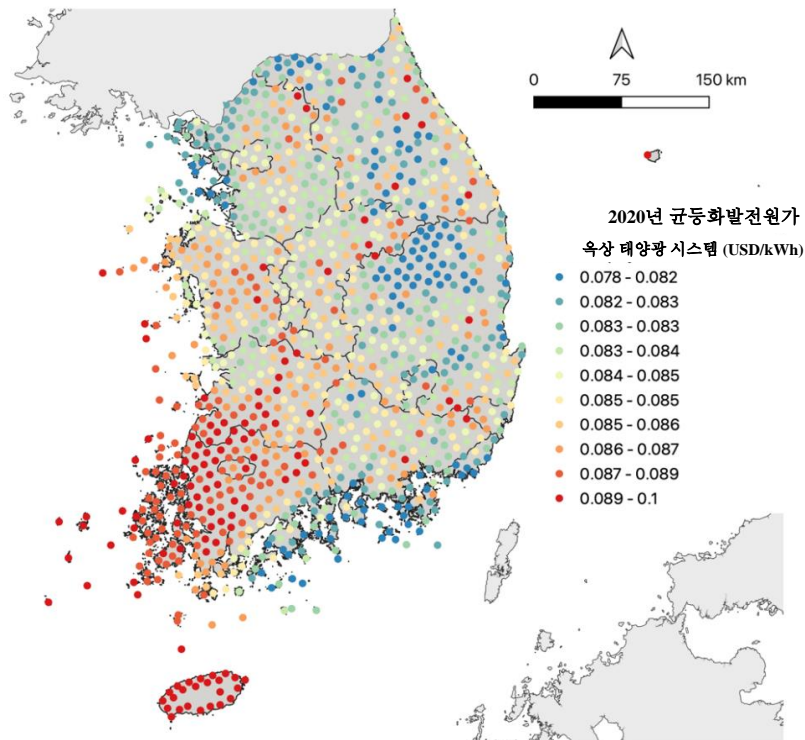
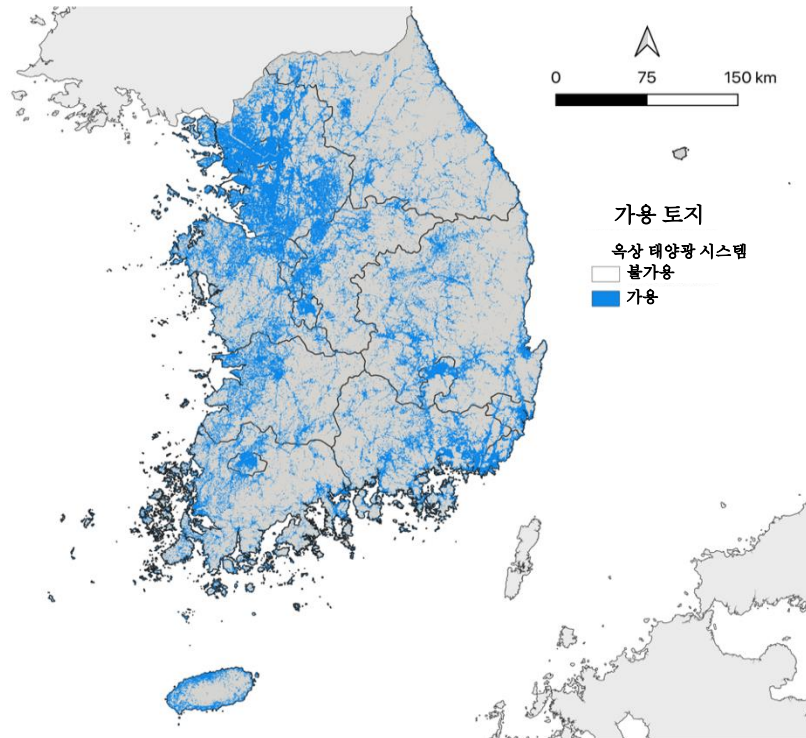


그림 4 육상 태양광 시스템을 위한 가용 토지 및 균등화발전비용(LCOE). 가시성을 높이기 위해 개별 공원의 크기가 확대됨. 아래 그림의 표시된 점은 비용의 지리적 분포만을 나타내며, 주거용 옥상에 걸쳐 있는 개별 패널의 분포는 나타내지 않음.

PYPSA 를 통한 에너지 시스템 모델링

개요

두 가지 시나리오(CPoi 및 CtR) 하에서 에너지 시스템 모델링 프레임워크에 기초한 기술-경제 전기 시스템 모델인 PyPSA([20] 참조)는 폐쇄된 석탄 발전기들을 대체하기 위한 최적 비용의 재생에너지 발전 및 저장 인프라를 결정한다. PyPSA 는 1 년의 기간과 시간대별 해상도(hourly resolution)를 가진 재귀-동적 부분 평형 모델로 실행된다. 주어진 연도마다 설비 추가와 발전 일정을 선택하는 최적화 문제로 자본, 운영 및 연료 비용으로 구성된 총 시스템 비용이 최소화된다.

1. 풍력과 태양광 잠재량에 따른 추가 설비뿐 아니라, 단기 및 장기 저장 기술의 추가 용량을 선택한다.
2. 재생에너지 발전은 전력 공급의 안정성을 위한 예비력을 포함하여 연중 각 시간마다 전력 수요를 정산하는 석탄, 원자력, 가스, 양수 발전 및 기타 에너지원의 발전 일정과 결합된다 [21].
3. 나아가, 탈석탄 시나리오에서 이산화탄소 배출량은 IEA B2DS 시나리오의 전기 시스템 배출 경로 중 한국이 차지하는 부분보다 낮아야 한다.
4. 현 정책 시나리오에서 재생에너지 설비 확대는 제 9 차 전기본에서 명시한 재생에너지 총 설비용량에 달해야 한다.

기존 태양광과 풍력 이외의 발전 설비들은 폐쇄 또는 수명연장이 불가하고, 대체적으로 제 9 차 전기본의 계획을 따른다(“시나리오 설명” 장 참조). *석탄발전의 경우*, PyPSA 는 각 시나리오별로 (i) 파리협정에 부합하는 발전기 별 폐쇄 시나리오(탈석탄 시나리오)를 통해 주어진 자료 및 (ii) 석탄발전이 가스발전으로 일부 전환될 뿐만 아니라 퇴출 속도도 더딘 제 9 차 전기본상의 탈석탄 계획에 근거(현 정책 시나리오)하여 시간에 따른 증설 및 폐쇄 용량을 정한다. 복합 가스터빈의 경우, 탈석탄 시나리오에서는 폐쇄된 석탄발전소들이 가스발전소로 전환되지 않는다는 점을 제외하고는, 제 9 차 전기본의 설치 계획을 따른다. 원자로, 양수 저장, 폐기물 소각 및 유류 발전(기타/로 분류)과 같은 기타 에너지원의 경우, 정부의 설비 계획이 채택된다.

날씨 의존적인 재생에너지 발전의 통합은 급전 가능한 화력발전원(가스 터빈)의 유연성과, 보다 중요하게는, 단기 불균형 완화를 위한 저장 시스템의 가용성(에너지 대 전력 비율이 1~6 시간인 배터리 및 양수 저장장치, 그리고 몇 주와 계절 간 에너지를 활용할 수 있게 하는 장기 저장장치)에 의해 좌우된다. 이러한 모델은 기존의 양수 저장 설비를 제어할 수 있으며, 나아가 대형 리튬 이온 기반 배터리와 가정용 배터리, 그리고 전해조(electrolyser), 파이프 저장소, 연료 전지로 구성된 수소 저장장치를 추가로 설치할 수 있다.

송배전 시스템은 현재 용량 및 배치 데이터의 가용성이 제한되어 있을 뿐만 아니라, 배전 시스템에 대한 구체적인 투자 수요가 본 연구의 범위를 벗어난 교통과 난방의 전기화에 따라 크게 좌우되기 때문에 본 모델에 나타나 있지 않다.

개별 구성 요소 및 각 요소가 모델에서 수학적으로 나타나는 방법은 다음 하위 장에서 자세히 설명한다.

PyPSA 의 최적화 공식

화력발전 용량와 수요 시계열이 매년 변하는 점을 고려하여, 석탄을 대체하기 위해 필요한 재생에너지 발전설비 및 저장 설비 구성을 결정하기 위한 최적화 모델은 2020 년부터 2034 년까지 각 연도별로 따로 모델링 된다.

표 7: PyPSA 의 명명법

| 변수 | 단위 | 정의 |
|---------------|--------------------|---|
| n | | 지역 표시 |
| f | | 화력발전기 연료 표시(예: 가스, 석탄 등) |
| s | | 에너지 저장기술 표시(예: 배터리, 수소 등) |
| a | | 재생에너지 발전 표시(대지 태양광, 옥상 태양광, 육상 풍력, 해상 풍력) |
| t | | 스냅샷/시점 표시 |
| y | | 연도 표시 |
| e_f | tCO_2eq/MWh_{th} | 연료 유형 f 의 CO_2 환산 배출량 |
| $g_{f,t,y}$ | MW | y 연도 t 시점의 열발전기 유형 f 의 급전 |
| $G_{f,y}$ | MW | y 연도에 발전기 f 의 발전용량 |
| $r_{n,a,t,y}$ | MW | y 연도 t 시점에 n 지역내 a 유형 재생에너지 발전기의 급전 |
| $R_{n,a,y}$ | MW | y 연도에 n 지역내 a 유형 재생에너지 발전기의 설치 용량 |
| $R^-_{n,a}$ | MW | n 지역내 a 유형 재생에너지 발전의 설치 잠재량 |
| $r^-_{n,a,t}$ | MW/MW | 발전기 용량 단위당 전력 가용성 |
| η_f | MW_{el}/MW_{th} | 연료 유형별 효율성 |
| $c^r_{n,a}$ | €/MW | 발전기 자본(고정)비 |
| $o^r_{n,a}$ | €/MW | 재생 발전기 운영(변동)비 |

| | | |
|---------------|-------|-------------------------------------|
| o_f^g | €/MWh | 화력발전기 운영(변동)비 |
| $h_{s,t,y}$ | MW | y 연도 t 시점에 매체가 있는 저장장치 s 의 급전 |
| $H_{s,y}$ | MW | y 연도에 저장장치 s 의 전력용량 |
| $e_{s,t,y}$ | MWh | 저장장치 잔존용량(에너지 수준) |
| $E_{s,y}$ | MWh | 저장장치 에너지용량 |
| c_s^h | €/MW | 저장장치 전력용량 비용 |
| \hat{c}_s^h | €/MWh | 저장장치 에너지용량 비용 |
| $d_{t,y}$ | MW | y 연도 t 시점의 전기부하 |
| v | | 전력예비율 |

PyPSA 의 목적함수

PyPSA 는 기술적, 물리적 제한사항들을 감안하여 발전, 저장 및 송전의 변동비와 고정비를 포함하는 총 전력 시스템 비용을 최소화한다.

목적 함수는 다음과 같다.

$$\min_{R_{n,a,y}, H_{s,y}, E_{s,y}, g_{f,t,y}, r_{n,a,t,y}, h_{s,t,y}} \left[\sum_{n,r} c_{n,a}^r \cdot R_{n,a,y} + \sum_s c_s^h \cdot H_{s,y} + \hat{c}_s^h \cdot E_{s,y} \right. \\ \left. + \sum_{n,a,t} o_{n,a}^r \cdot r_{n,a,t,y} + \sum_{f,t} o_f^g \cdot g_{f,t,y} \right]$$

이 함수는 기술 a 에 대해 각 지역 n 에서의 재생에너지 발전기 용량 $R_{n,a,y}$ 및 그 용량당 연간 증가화된 고정비 $c_{n,a}^r$, 저장장치의 전력용량 $H_{s,y}$, 저장기술 s 의 저장에너지용량 $E_{s,y}$ 및 그 관련 고정비인 c_s^h 와 \hat{c}_s^h , t 시점에 재생에너지 기술 a 의 급전 $r_{n,a,t,y}$ 및 관련 변동비 $o_{n,a}^r$, t 시점에 연료 f 의 화력발전 급전 $g_{f,t,y}$ 및 관련 변동비 o_f^g 로 구성된다. 최적화는 다양한 기상 및 수요 조건을 대표하는 다수의 기간 t 에 걸쳐 진행된다. 투자비는 전체 기간(만 1년, 8760시간)에 걸쳐 연간 증가화(annuitized)되었다.

표 6: 화력 발전기에 대한 비용 및 기술상의 가정

| 에너지원 | O&M 변수 Euro / MWh _{el} | 연료 Euro / MWh _{th} | 효율 | CO ₂ 집약도 kg CO ₂ / MWh _{th} |
|----------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| 석탄 | 3.5 ^a | 8.15 ^b | 0.33 ^a | 0.34 ^c |
| 원자력 | 3.5 ^a | 2.6 ^a | 0.33 ^a | |
| 가스 복합 | 4.4 ^a | 20.1 ^b | 0.47 ^c | 0.2 ^c |
| 기타 (유류/폐기물) | 2.1 (25.9) ^{d,e} | 7 (-) ^{d,e} | 0.3 (0.23) ^{d,e} | 0.4 ^c |

^a. [22]. ^b. [23]. ^c. [24]. ^d. [25]. ^e. 본 연구의 모델링에서는 *기타*를 *유류/폐기물* 대신 바이오매스에 해당하였다. 그러나 이는 전체 용량의 측면에서 매우 적은 부분만을 차지하므로 실제 결과에 미치는 영향은 미미하다. 그럼에도 대체 매개변수 선택지를 괄호안에 제시했다.

PyPSA 에서 구현된 제약사항

발전

화력 발전기의 급전 $g_{f,t,y}$ 은 발전기 용량인 $G_{f,y}$ 로 제한된다.

$$0 \leq g_{f,t,y} \leq G_{f,y} \quad \forall f, t \quad (1)$$

모든 연료별 용량은 최적화를 위해 외부적으로 고정된다. 이는, 개요 및 시나리오에 대한 설명장에서 설명한 탈석탄 시나리오 하의 석탄과 가스를 제외하고는, 제 9 차 전기본을 기반으로 한다.

재생에너지 발전의 급전 $r_{n,a,t,y}$ 역시 발전기 용량인 $R_{n,a,y}$ 로 제한될 뿐만 아니라, 용량 $R_{n,a,y}$ 단위당 주어진 시간 종속적 가용성 $r^-_{n,a,t}$ 에 의해서도 제한된다.

$$0 \leq r_{n,a,t,y} \leq r^-_{n,a,t} \cdot R_{n,a,y} \quad \forall n, a, t, y \quad (2)$$

풍력과 태양광과 같이 변동성이 있는 재생에너지 발전기의 경우, $g^-_{n,r,t}$ 가 기상 종속적 전력 가용성을 나타낸다.

재생에너지 발전 용량 $R_{n,a,y}$ 는 최대 설치가능 잠재량 $R^-_{n,a}$ 까지 최적화되며, 매년 확대된다.

$$R_{n,a,y-1} \leq R_{n,a,y} \leq R^-_{n,a} \quad \forall n, r, y \quad (3)$$

재생에너지 전력 가용성 및 잠재량은 이전 장에서 설명한 재생에너지 잠재량 및 발전에 대한 평가에 관한 입력이며, 각 지역 n 에 대해 별도로 결정된다.

현 정책 시나리오에서는 추가 제한사항인 R_y^{9th} 이 총 재생에너지 발전 용량이 제 9 차 전기본에 따른 경로를 따르도록 보장한다.

$$\sum_{n,a} R_{n,a,y} = R_y^{9th} \quad \forall y \quad (4)$$

저장장치

에너지매체를 s 로 표시한 저장장치의 급전 $h_{s,t,y}$ 은 발전기와 유사한 등식으로 제한된다.

$$-H_{s,y} \leq h_{s,t,y} \leq H_{s,y} \quad \forall s, t \quad (5)$$

단, 급전 $h_{s,t,y}$ 은 계통으로 급전될 때에는 양수, 계통에서 전력을 흡수할 때에는 음수가 될 수 있다. 전력 용량 $H_{s,y}$ 역시 설치 가능 잠재량 범위에서 최적화될 수 있다.

모든 저장장치의 에너지 수준(energy level)인 $e_{s,t,y}$ 는 매시간에 걸쳐 일관되어야 하며, 저장장치의 용량인 $E_{s,y}$ 로 제한된다.

$$e_{s,t,y} = e_{s,t-1,y} + \eta_{s,+}[h_{s,t,y}]^+ - \eta_{s,-}^{-1}[h_{s,t,y}]^-$$

$$0 \leq e_{s,t,y} \leq E_{s,y} \quad \forall s, t \quad (6)$$

값의 양수 및 음수 부분은 $[\cdot]^+ = \max(\cdot, 0)$, $[\cdot]^- = -\min(\cdot, 0)$ 로 표시된다. 저장장치는 충전효율 $\eta_{s,+}$ 과 방전효율 $\eta_{s,-}$ 이 있다. 에너지 수준은 순환적, 즉 $e_{s,t=0,y} = e_{s,t=T,y}$ 인 것으로 가정한다.

에너지 용량 $E_{s,y}$ 또한 설치가 가능 잠재량 내에서 최적화될 수 있으며, 그 잠재량은 본 연구에서 달리 제한되지 않았다.

저장기술에는 두 종류가 있다. 리튬이온 배터리는 일일 시간대별 단위에서 고효율의 유연성을 나타내며, 수소변환, 수소 파이프 저장, 연료전지의 재전화는 저효율의 계절적 유연성을 제공한다.

송배전 계통을 명시적으로 모델링하지 않고 지역별 저장장치 용량 확대를 평가하기 위한 재생에너지 발전의 전력 흐름 분류는 그림 5 와 같다. 배터리(소형)는 태양광(옥상형) 발전을 통해서만 충전이 가능한 가정용 리튬이온 배터리를 의미한다. 배터리(대형)는 가급적 같은 지역의 재생에너지 발전 설비를 통해 충전되는데, 원격 재생에너지 발전 설비에서 발전되는 전력은 송전 과정에서 2% 정도의 손실을 겪는다. 수소 저장 설비의 전해조를 위해 사용되는 전력은 풍력 터빈이나 태양광 발전을 통해서만 발전된다.

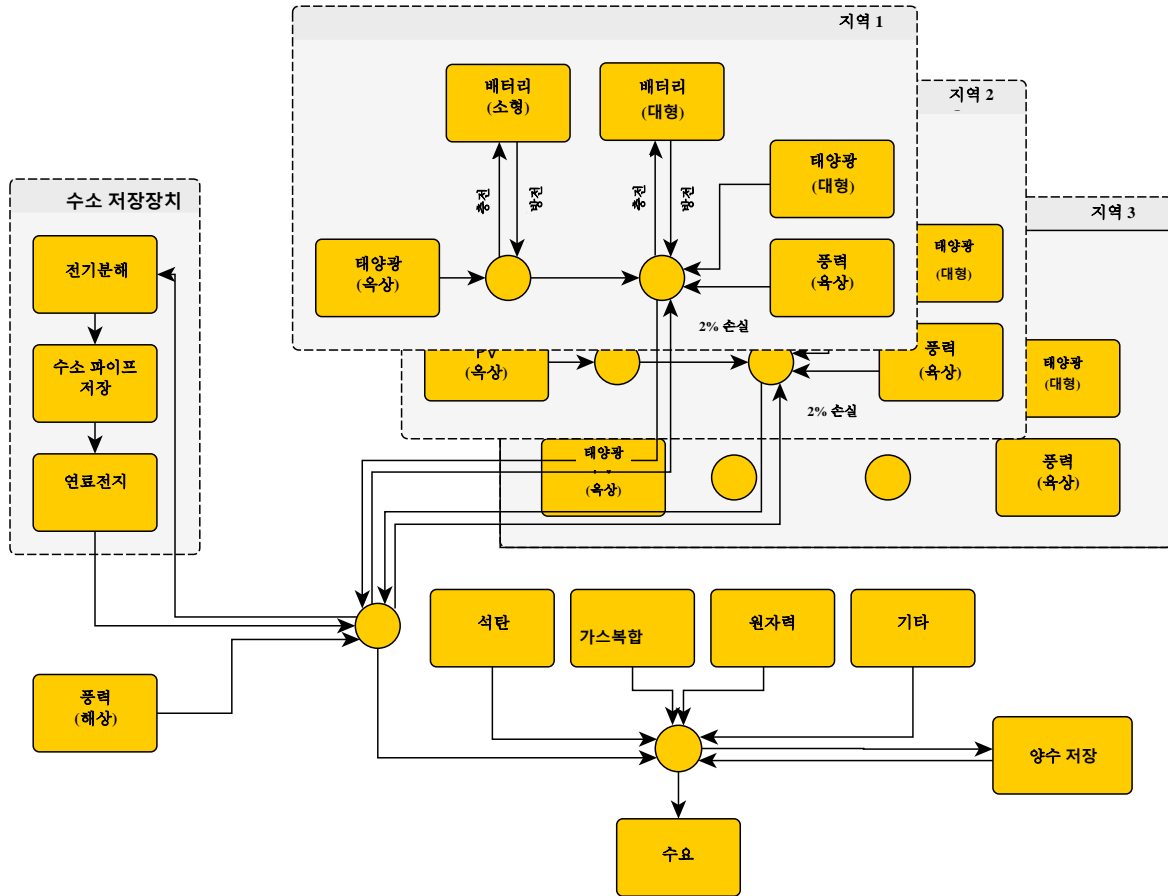


그림5: 모델의 전력 흐름 체계도. 상자들은 전력을 발전, 변환 또는 소비하는 기술을 나타내며, 화살표는 에너지 흐름과 방향을 보여줌.

표 7: 저장장치에 대한 비용 및 기술상의 가정

| 에너지 | CAPEX ^a | | | 고정 O&M CAPEX/년의 % | 수명 년 | 효율 |
|-----------------------------|--------------------|------|------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| | 2020 | 2025 | 2030 | | | |
| 수소 전기분해 ^b | 600 | 575 | 550 | 5 | 25 | 0.64 – 0.66 ^c |
| 수소 파이프 저장장치 ^d | 7 | 7 | 7 | 1 | 30 | |
| 수소 연료전지 ^b | 1300 | 1200 | 1100 | 5 | 10 | 0.5 |
| 배터리 저장장치 ^b | 232 | 187 | 142 | - | 20 – 25 ^c | |
| 배터리 인버터 ^b | 270 | 215 | 160 | 0.2 – 0.34 ^c | 10 | 0.95 – 0.96 ^c |

a. 전력 용량의 경우 CAPEX 를 Euro/kW_e 로 나타내고, 저장 용량의 경우 Euro/kWh 로 나타냄. b. [25]. c. 낮은 수치는 2020 년, 높은 수치는 2030 년의 수치를 나타냄. d. 자체 고려사항은 가스 파이프라인 [26], 수소 압축기 [27], 기존 파이프 저장 시스템의 정보 [28]과 [29]에 근거한 기술-경제 데이터.

CO₂ 배출량

CO₂ 배출량은 연료 f 의 tCO_2/MWh_{th} 단위 세부 배출량 e_f 와 발전기의 효율성 η_f 로 구현된 전력부문 배출 경로 P_y 의 배출량으로 제한된다.

$$\sum_{f,t} \frac{1}{\eta_f} g_{f,t,y} \cdot e_f \leq P_y \quad (7)$$

기준 배출량 경로 P_y 는 상세화된 B2DS 경로에서 발전을 위한 연료 연소로 인해 발생하는 배출량을 조정함으로써 도출된다. 이전 작업과의 일관성을 확보하기 위해 석탄 외 모든 연료에도 유사한 조정 방법(연료 연소(IEA)로 인한 최신(2019) CO₂ 배출량으로 조정하되 총 배출 허용량 유지)을 적용한다 [30].

전력 수요

(비탄력) 전력 수요 $d_{t,y}$ 는 각 시간 t 별로 화력 발전기, 재생에너지 발전 또는 저장을 통해 충족되어야 한다.

$$\sum_{n,a} r_{n,a,t,y} + \sum_f g_{f,t,y} + \sum_s h_{s,t,y} = d_{t,y} \quad \forall t \quad (8).$$

시간 별 전력 수요 커브는 전력거래소에서 발표되는 [일일 최대전력수급](#)에 따라 조정된 각 계절 하루 동안의 시간 별 부하 패턴을 연결하여 도출된다. 시간별 부하 패턴은 Kim et al.(2020)에서 모델링되었다 [21].

전력 수요 커브는 제 9 차 전기본기준수요 전망의 총 전력소비량과 최대전력 예측과 일치하도록 재조정된다.

전력예비율

전력 수요 $d_{t,y}$ 의 증가 비율 ν ¹¹의 전력예비율은 화력 발전, 재생에너지 발전 또는 저장을 통해 각 시간 t 별 안전 대책으로서 잠재적으로 충족 가능해야 한다.

$$\sum_{n,a} r_{n,a,t}^- \cdot R_{n,a,y} + \sum_f G_{f,y} + \sum_s H_{s,t,y}^{reserve} \geq (1 + \nu)d_{t,y} \quad \forall t, y \quad (9)$$

$$H_{s,t,y}^{reserve} \leq H_{s,y} \quad \text{and} \quad H_{s,t,y}^{reserve} \leq \eta_{s,+} e_{s,t,y} \quad \forall t, s, y \quad (10)$$

여기서 추가적 변수인 $H_{s,t,y}^{reserve}$ 는 빈 저장장치가 예비력을 만족하는 데 기여하지 않도록 막는다.

¹¹ 제 9 차 전기본에서와 같이 예비율은 2020-2024 까지 17%에서 2028 년까지 18%, 이후로는 22%로 증가한다.

가속화된 탈석탄이 고용에 미치는 영향 추정

기본 고용계수 접근법의 개요

우리는 Rutovitz 및 공동저자들이 [5] 제안한 일반적 접근법을 적용한다. 이 방법은 예컨대 전세계에서 에너지 전환으로 인해 생기는 고용 기회를 평가한 그린피스 인터내셔널, 세계풍력에너지위원회(Global Wind Energy Council) 및 유럽태양에너지협회(Solar Power Europe)의 에너지혁명(Energy [R]evolution) 보고서(Greenpeace et al., 2015)에서도 사용되었다 [31]. 기본 방법론은 고용계수를 사용해 에너지 전환이 고용에 미치는 영향을 평가할 것을 제안한다. 이 일반적 접근법은 최근에 확대 및 적용되었다. Ram et al.(2020)은 명시적으로 송전 및 발전소 해체 부문의 일자리를 포함시키고 있다 [6]. 파리협정의 기후목표 달성에 관한 저서에서 [32] Dominish et al.은 보다 상세한 직업적 측면들을 추가함으로써 이 접근법을 확장하였다 [33]. 전세계적인 분석들과 별개로 이 접근법은 국가 고유의 고용계수들과 더불어 특정 국가에 대해서도 적용되었다(가령 호주 [34] 또는 남아공 [35]). 이 접근법의 장점은 가정을 매우 투명하게 만들 수 있고 일련의 영향을 명료하게 나타낼 수 있다는 점이다. 나아가, 지역 데이터가 있을 경우 이를 바탕으로 고용계수를 조정할 수 있어 매우 유연하다.

이 접근법은 발전과 관련된 직접 고용을 추정하며 장비 제조, 건설/설치, 운영/유지보수 부문의 일자리를 포함한다. 또한 연료 공급, 송전, 해체 관련 일자리도 적절하다고 판단될 경우 추가할 수 있다.

근본적인 기본(단순화된) 논리는 표 6 에 나타나 있다. 특정 연도에 새로 설치되는 발전 용량은 기술 부품의 제조 영역에서 고용을 창출하며(국내 생산 비중에서 정의하는 바와 같이 이 부품들이 해당 국가에서 생산되는 경우에 한해, 이 고용은 국내 고용이다), 건설 기간 동안 이러한 추가 용량의 건설/설치 측면에서 고용을 창출한다. 특정 연도에 운영 중인 모든 용량은 각 설비의 수명기간 동안 운영/유지보수의 측면에서 고용에 기여한다. 기술의 효율성과 생산 기술의 발전이 효율성의 제고로 이어지는 “학습”을 반영하기 위해, 고용계수는 시간이 경과함에 따라 조정될 수 있다.

장비 제조 부문의 고용을 계산하기 위해, 관심 국가 또는 지역 내에서 제조되는 기술 부품의 비중이 정의되어야 한다. 만약 해당 국가의 고유한 맥락에 따라, 지역 비중에 대한 가정은 예컨대 건설/설치 또는 운영/유지보수 관련 전문지식을 해당 국가가 보유하지 않고 외국 전문가에 의존하는 경우 등, 다른 분야에도 적용할 수 있다.

계산은 에너지원 별로 특유의 고용 계수와 수명 및 공사기간에 대한 가정에 대해 실시한다.

$$\begin{aligned}
 &\text{제조 연간 고용} = \text{연간 설치 MW} \times \text{해당 연도 제조 고용계수} \times \text{국내 제조 \%v} \\
 &\text{건설 연간 고용} = \text{연간 설치 MW} \times \text{해당 연도 건설 고용계수} / \text{평균 건설기간} \\
 &\text{운영/유지보수 일자리} = \text{누적 용량} \times \text{해당 연도 O\&M 고용계수} \\
 &\text{해당 연도 고용계수} = \frac{\text{기준연도 고용계수}}{\text{기준연도 고용계수}} \times (1 - \text{평균 기술 하락 계수 decline factor})^{\text{기준연도 이후 경과 연수}}
 \end{aligned}$$

그림 6: 방법론에 대한 전반적 개요. 출처: [34]

Ram et al. (2020)과 Rutovitz et al.(2015)은 고용에 미치는 영향을 전세계 단위에서 추정하므로, 지역간 생산성 차이를 설명하기 위해 각 에너지원과 직무분야별 ‘기준’ 고용계수를 지역별 조정 계수들로 조정할 수 있도록 지역별 고용승수를 적용한다.

고용계수 접근법은 일반적으로 **직접 고용**에만 중점을 두며, 공급망 전체에 걸친 간접 고용이나 경제 전반에서 임금지출로 유도된 고용은 정량화하지 않는다는 점에 유의해야 한다. 그러나 다양한 에너지원의 일자리를 시간이 경과함에 따라 비교함으로써 분석된 시나리오들로 전반적인 변화 양상과 고용 효과를 유추할 수 있다. 하지만 추정치를 순 고용 효과의 예측으로 해석해서는 안 된다.

본 연구에서 고용계수 접근법의 적용

본 연구의 주안점

본 분석은 파리협정의 온도목표에 맞추어 한국의 석탄화력발전소를 완전 퇴출하고 태양광(육상형과 대지) 및 풍력(육상 및 해상)발전 설비로 대체하는 것이 고용에 미치는 영향을 추정하는 데 중점을 두고 있다. 파리협정에 부합하는 한국의 발전기 별 폐쇄 일정에 관한 기존 연구¹²를 바탕으로 하고 있다.

에너지 모델링에서 모든 에너지원의 기존 용량 측면에서 전체 에너지 믹스(mix)를 고려하지만, 한국의 전체 에너지 시스템을 100% 재생에너지로 전환할 경우 고용에 미치는 영향을 평가하지는 않는다는 점에 유의해야 한다. 보다 구체적으로, 본 분석은 한국에서 **석탄발전 설비**를 태양광과 풍력, 저장장치로 **대체**하는 것이 고용에 갖는 함의에 주목하고 있다. 본 연구는 양수, 해양 에너지,

¹² Climate Analytics 의 2020 년 연구로부터 파리협정에 부합하는 한국의 탈석탄 경로가 도출되었다 [43]. 올해 초에 실시된 또 다른 연구에서는 대기 오염과 건강에 미치는 영향을 평가하면서 발전기 별 폐쇄 일정을 분석하였다 [2].

바이오매스 또는 폐기물 발전과 같은 다른 재생에너지원과 관련된 고용은 평가하지 않는다¹³. 그리고 석탄발전 용량을 태양광과 풍력 재생에너지로 대체하는 것의 고용 효과를 제 9 차 전력수급기본계획상의 석탄발전 폐쇄 일정을 바탕으로 도출한 ‘현 정책’ 시나리오와 비교한다. ‘현 정책’ 시나리오에서는 일부 석탄발전소가 가스발전소로 전환되고 재생에너지 용량도 확대된다. 이에 상응하여 석탄발전을 가스발전으로 전환하는 것과 관련된 고용만을 평가하며, 여타 가스발전소에 의한 고용은 포함하지 않는다. 나아가, 2030 년까지의 결과만을 도출하도록 분석 범위를 제한하는데, 파리협정에 부합하는 2029 년 완전 폐지 년도에 적합한 일정이며, 먼 미래로 갈수록 분석의 불확실성이 증가하기 때문이다.

본 연구에서 개발된 기본 접근법의 확대

본 연구가 Rutovitz et al.(2015)에서 [5] 제안하고 Ram et al.(2020)에서 [6] 갱신 및 확장시킨 기본 고용계수 접근법에 기반하고 있지만, 이 접근방식을 세가지 측면에서 발전시킨다.

우선, 적합한 지역 데이터가 사용 가능한 경우, 한국 고유의 고용계수와 변수를 도출한다. 이는 아래에서 상세하게 설명한다.

둘째, 파리협정에 부합하는 발전기 별 폐쇄 일정들을 바탕으로 다양한 탈석탄 시나리오들의 고용영향을 평가하고 그 결과를 2054 년까지 석탄 발전을 퇴출하는 제 9 차 전기본을 반영한 ‘현 정책’ 시나리오와 비교한다. 한국의 탈석탄 분석을 위해, 과거 설비용량 및 미래 용량 시나리오에 관한 데이터는 예정된 발전기 단위 탈석탄 일정에 관한 정보를 사용한 전원 믹스(mix) 및 저장장치 용량에 관한 PyPSA 모델과 한국의 재생에너지 잠재량 모델링(섹션 3.2 참조)의 결과를 바탕으로 하였다. 이를 기반으로, 관련 에너지원의 (미래) 신규 설치용량와 총 기존 용량에 관한 데이터를 고용 분석 목적에서 도출한다.

셋째, 광역지자체 차원의 고용 추정치를 제공하기 위해 공간적으로 명확한 데이터와 모델링 결과를 활용한다. 지역별 세분화를 위한 기본 방법론은 아래에서 보다 상세히 다룬다.

일반적 접근법을 지역 단위로 확장

Ram et al.(2020)과 [6] Rutovitz et al.(2015)가 [4] 일반적으로 국가 수준 총 고용 추정치를 제공하는 반면, 본 연구는 광역지자체와 같은 지역 수준의 추정치를 얻기 위해 분석을 확장한다. 이를 위해 석탄발전소의 위치에 관한 공간적으로 명확한 정보와 상기 기술된 한국의 태양광 및 풍력 잠재량에 대한 공간적으로 명확한 모델링을 활용한다. 이는 아래에서 보다 상세히 다룬다.

¹³ 그러나 모든 에너지원의 기존 설비 측면에서 현재의 에너지 믹스를 상기에 기술된 바와 같이 주어진 에너지 시스템 구조에서 석탄을 대체할 태양광 및 풍력의 용량을 모델링하는 과정에서 고려하였다.

석탄과 가스 관련 일자리의 지역별 배분

건설/설치, 운영/유지보수 및 해체 부문 일자리와 같이 석탄발전소와 관련한 각각의 직접고용을 석탄발전소가 위치한 해당 지구에 배치하기 위해 글로벌 석탄발전소 트랙커(Global Coal Plant Tracker; GCPT) [4]가 제공하는 석탄발전소 위치의 경도와 위도 정보를 활용한다. 기술 부품의 제조와 같이 작업 수행 장소가 반드시 발전소의 위치와 연결되지 않는 석탄 관련 일자리에 대해서는, 해당 일자리를 특정 지역에 배분하지 않고(총 국가 수준 추정치에는 포함됨) 별도로 기록하였다.

가스의 경우, 제 9 차 전력수급기본계획(‘현 정책’ 시나리오)에 따라 석탄발전소에서 가스발전소로 전환될 예정인 가스발전소만을 고려하며, 그 외 기존에 존재하거나 계획된 가스발전소는 다루지 않는다. 이는 본 분석이 탈석탄이 고용에 미치는 영향에 초점을 맞추고 있기 때문이다. 따라서 분석에서 가스 부문 고용은 현 정책 시나리오상에서만 역할이 있다. 기존의 석탄발전소를 전환한 결과로 생긴 가스발전소의 위치에 관해서는, Global Coal Plant Tracker 에서 제공하는 각 석탄발전소의 위치가 이를 대체하는 가스발전소에 대해서도 적용된다고 가정한다 [4].

재생에너지 관련 일자리의 지역별 배분

한국 내 옥상 및 대지 태양광과 육상 및 해상 풍력의 잠재량을 파악하는 모델링(3.2 장에 기술된 바와 같음)은 그 잠재량이 한국 내 어디에 위치하는지에 대한 명확한 공간 정보도 제공한다. 이 정보를 바탕으로 해당 위치와 직접적으로 연결된 재생에너지 관련 일자리를 각 지역 수준에서 배분한다. 이는 태양광 및 풍력의 건설/설치, 운영/유지보수 부문 일자리를 포함하며 각각의 하위 에너지원(육상풍력과 옥상 및 대지 태양광)의 위치를 구분한다. 해상풍력의 경우, 설비들이 건설되는 위치가 바다이므로 그 위치는 특정 광역지자체와 직접적으로 연결되지 않는다. 마찬가지로, 풍력 및 태양광 관련 기술 부품의 제조 고용 또한 설치 지역과 직접 연결되어 있지 않기 때문에 광역지자체 수준에서 직접적으로 배정하지 않는다. 이에 대해 해당 일자리는 특정 지역에 배분하지 않고(총 국가 수준 추정치에는 포함됨) 별도로 기록한다.

배터리 저장장치 관련 일자리의 지역별 배분

배터리 저장장치 관련 고용의 경우, PyPSA 한국 (3.2 장 참조)으로 모델링한 저장 설비들이 특정 에너지원들 각각의 위치와 연결되어 있다고 가정한다. 프로슈머(prosumer)급 배터리 저장장치는 태양광 옥상 설치 시설 및 그 위치와 연관되며, 대규모 배터리 저장장치는 대지(유틸리티급) 태양광 설치 시설 및 그 각각의 위치와 연결된다고 가정한다. 마찬가지로 건설/설치, 운영/유지보수와 같이 해당 위치와 직접 연결된 관련 고용은 해당 위치에 배분된다. 배터리 기술 부품의 제조와 같이 어느 지역과 연결되지 않는 고용은 특정 지역에 배분하지 않고(총 국가 수준 추정치에는 포함됨) 별도로 기록한다. 수소 관련 저장장치의 경우에도 마찬가지이다.

송전 및 배전 부문 고용은 전력망과 송전선에 대한 상세한 모델링이 요구되어 본 연구의 범위를 벗어나는바, 고려 대상에 포함되지 않는다.

한국의 고용계수 도출

위에서 언급한 고용계수 접근법의 핵심은 실증적으로 도출되어 기준점 역할을 할 수 있는 기본 변수를 이용하여 유연하고 투명한 체계를 구축할 수 있다는 것이다. 만일 자체적인 고용계수를 도출할 수 있는 양질의 지역 데이터가 있을 경우에 문헌에서 제안하는 계수들을 대체할 수 있다.

한국 고유의 고용계수를 도출하기 위해 양질의 지역 데이터를 입수하지 못하는 경우에는 Ram et al.(2020)가 [6] 제안하는 고용계수를 사용하였다¹⁴.

Ram et al. (2020)은 전세계를 범위로 평가를 함에 있어 노동 강도의 격차를 설명하기 위해 지역 승수를 제시한다. 지역승수는 OECD 와 동북아시아 지역 모두에 대한 설명을 제공한다. 한국의 높은 노동 생산성이 타 OECD 회원국과 유사하다는 점을 감안하여, 한국을 OECD 국가 그룹에 배치하였다. 이로써 보다 보수적인 고용창출 추정치가 적용된다는 점에 유의해야 한다.

한국의 고용계수를 도출하기 위해 최근 고용데이터와 에너지원별 과거 및 현재의 용량 데이터에 관한 가용 정보를 활용한다. 이는 최근 추가 용량 당 일자리(장비 제조, 건설/설치 부문)와 총 용량 당 일자리(운영/유지보수 부문)가 얼마나 많이 관측되었는지 그 비율을 계산하는 데 사용된다. 기존 설비의 경우, 화석연료 및 재생에너지원 별 고용계수를 파악하기 위해 전력거래소에서 [24] 제공하는 용량 정보를 사용한다. 전력거래소의 “연료원별” 발전용량이 전력 및 난방용 발전용량을 모두 포함하고 있고 전력거래소에서 얻을 수 있는 유일한 재생에너지원 별 개별 정보이기 때문에, “에너지원별” 발전용량이 아닌 “연료원별” 발전용량을 사용한다.

태양광 및 풍력의 고용 통계는 한국에너지공단의 자료이나 [36], [37], 해당 자료는 일반적으로 하위 에너지원 별로 구분(즉, 태양광의 경우 옥상형 및 대지 관련 일자리 간의 구분, 풍력 관련 일자리의 경우 육상 및 해상 간의 구분)되어 있지 않다. 그러나 Ram et al.(2020)과 같은 문헌의 고용계수에 따르면, 하위 에너지원 별로 노동집약도가 다르게 나타난다. 가령 해상풍력의 경우 건설/설치 측면에서 육상보다 노동집약도가 높은 반면, 운영/유지보수에서는 비교적 노동집약도가 낮다. 태양광의 경우, Ram et al.(2020)의 고용 계수들을 보면, MW 당 고용인원수(jobs/MW) 또는 MW 당 연간 고용인원수(job-years/MW)로 측정했을 때 대지태양광에

¹⁴ Ram et al. (2020) 로 부터 2020 년의 고용계수를 얻기 위해, 시간이 경과함에 따른 학습을 반영하도록 Ram et al. (2020)에서 제공한 하락 계수를 적용하여 Ram et al.의 2015 년 기준 계수를 2020 년에 맞게 조정한다. 2020 년 이후의 태양광 및 풍력에 대해서는, 풍력 및 태양광 잠재량을 모델링하기 위해 수립된 가정과의 일관성을 유지하기 위해 1.2.2 장에 기술된 자본 지출(CAPEX)의 변화 양상을 바탕으로 한 하락 계수들을 적용한다(아래 하락 계수에 대한 설명 참조).

비해 옥상 태양광이 건설/설치와 운영/유지보수 모두에서 노동집약도가 두 배 더 높다. 한국의 하위 에너지원 별 기존 고용 비율을 계산하기 위해 국제재생에너지기구(International Renewable Energy Agency; IRENA)¹⁵에서 발췌한 태양광(옥상형 및 유틸리티급)과 풍력(해상 및 육상)의 총 설치 용량에 관한 과거 데이터를 전력거래소 용량정보에 적용하여, 태양광과 풍력의 과거 설치 및 추가 용량의 옥상형, 대지, 육상, 해상 구분을 가능한다. 하위 에너지원인 해상 및 육상 풍력, 옥상형 및 대지 태양광에 대한 한국 고유의 고용계수를 계산하기 위해, Ram et al.(2020)의 하위 에너지원 별 고용계수의 상대 비율이 한국에도 똑같이 적용된다고 가정하고, 이를 주어진 고용 관련 통계와 에너지원 별 설치 및 추가 용량에 맞는 각각의 고용계수를 도출하는 데 사용한다.

시간이 지나면서 발생하는 학습 효과에 따른 효율성 개선을 설명하기 위해 *하락 계수(decline factor)*를 적용한다. 건설/설치와 장비 제조 부문 고용과 관련한 하락 계수는 각 에너지원별 자본적 지출(CAPEX)의 변화 양상에 대한 가정을 바탕으로 도출되었다. 운영/유지보수에 관한 하락 계수는 각 에너지원별 운영비용(OPEX)을 바탕으로 한다. 에너지원 별 하락 계수는 표 10에 나타나 있다.

표 8: 학습 및 효율성 증대를 나타내는 하락 계수

| 에너지원 | CAPEX 유래 연간 | OPEX 유래 연간 | 출처 |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| | 하락 계수 (%) | 하락 계수 (%) | |
| 배터리 (소형) | 0.094 (2021-2025) | 0.128 (2021-2025) | Ram et al. (2020) [6] |
| | 0.065 (2026-2030) | 0.062 (2026-2030) | |
| 배터리 (대형) | 0.076 (2021-2025) | 0.111 (2021-2025) | Ram et al. (2020) [6] |
| | 0.059 (2026-2030) | 0.056 (2026-2030) | |
| 석탄 | 0 | 0 | Ram et al. (2020) [6] |
| 수소 전기분해 | 0 | 0 | Ram et al. (2020) [6] (PtG) |
| 수소 연료전지 | 0.017 | 0.017 | 표 7 |
| 수소 저장장치 | 0 | 0 | Ram et al. (2020) [6] (가스 저장) |
| 가스(석탄에서전환) | 0 | 0 | Ram et al. (2020) [6] |
| 태양광 (옥상) | 0.051 | 0.051 | 표 3 |
| 태양광 (대형) | 0.051 | 0.051 | 표 3 |
| 풍력 (해상) | 0.017 | 0.017 | 표 4 |
| 풍력 (육상) | 0.031 | 0.031 | 표 4 |

참고: 하락 계수 0 은 고용계수가 시간이 지나도 변하지 않음을 의미한다.

¹⁵ 국제재생에너지기구 2021. Statistics Time Series. <https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.

아래에서는 어떤 고용계수들이 사용되었고 해당 계수들이 어떻게 도출되었는지에 대해 상세히 설명하고 있다. 표 11 은 분석에 사용된 각 에너지원별 계수와 시간 경과에 따른 계수들의 변화양상(하락 계수를 감안함)을 나타낸다.

표 9: 분석에 사용된 고용계수의 개요

| 에너지원 | 일자리 유형 | 2020 | 2025 | 2030 | 비고 | Ram et al.(2020) 2020년 고용계수 |
|----------|---------------------------|-------|------|------|--|-----------------------------------|
| 배터리 (소형) | 건설/설치 (연간 고용인원수/MW) | 16.31 | 9.98 | 7.13 | Ram et al. [6]에 근거한 계수 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 배터리 (소형) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 12.76 | 7.81 | 5.58 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 배터리 (소형) | 운영/유지보수 (고용인원수/MW) | 0.34 | 0.17 | 0.12 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 배터리 (대형) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 7.29 | 4.91 | 3.62 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 배터리 (대형) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 11.41 | 7.69 | 5.66 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 배터리 (대형) | O&M (고용인원수/MW) | 0.15 | 0.08 | 0.06 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 석탄 | C&I (연간 고용인원수/MW) | 5.26 | 5.26 | 5.26 | Ram et al. [6]에 근거한 지역 EF 및 CAPEX | 11.2 |
| 석탄 | 해체 (연간 고용인원수/MW) | 1.65 | 1.65 | 1.65 | Ram et al. [6]에 근거한 EF; 고용 효과의 평가 일부는 아니지만 별도로 보고되는 일자리 | “2020” 열 참조 |

| | | | | | | |
|------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|----------------|
| 석탄 | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 5.4 | 5.4 | 5.4 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 석탄 | O&M (고용인원수/MW) | 0.17 | 0.17 | 0.17 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 전기분해 | C&I (연간 고용인원수/MW) | 2.6 | 2.6 | 2.6 | Ram et al. [6](PtG)에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 전기분해 | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 1.86 | 1.86 | 1.86 | Ram et al. [6](PtG)에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 전기분해 | O&M (고용인원수/MW) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | Ram et al. [6](PtG)에 근거한 EF 및 OPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 연료전지 | C&I (연간 고용인원수/MW) | 2.78 | 2.56 | 2.35 | 지역 EF; 표 9 에 근거한 CAPEX | NA |
| 수소 연료전지 | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 2.8 | 2.58 | 2.37 | 지역 EF; 표 9 에 근거한 CAPEX | NA |
| 수소 연료전지 | O&M (고용인원수/MW) | 0.6 | 0.55 | 0.51 | 지역 EF; 표 9 에 근거한 OPEX | NA |
| 수소 저장장치 | C&I (연간 고용인원수/MW) | 6×10^{-5} | 6×10^{-5} | 6×10^{-5} | Ram et al. [6](가스 저장(지하))에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 저장장치 | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 0 | 0 | 0 | Ram et al. [6](가스 저장(지하))에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 수소 저장장치 | O&M (고용인원수/MW) | 4×10^{-6} | 4×10^{-6} | 4×10^{-6} | Ram et al. [6](가스 저장(지하))에 근거한 EF 및 OPEX | “2020” 열 참조 |
| 가스(전환) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 1.3 | 1.3 | 1.3 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |

| | | | | | | |
|----------|-------------------------|-------|-------|-------|---|----------------|
| 가스(전환) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 0.93 | 0.93 | 0.93 | Ram et al. [6]에 근거한 EF 및 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 가스(전환) | O&M (고용인원수/MW) | 0.19 | 0.19 | 0.19 | Ram et al. [6]에 근거한 지역 EF 및 CAPEX | 0.14 |
| 태양광 (옥상) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 2.8 | 2.15 | 1.65 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 CAPEX | 17.37 |
| 태양광 (옥상) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 1.64 | 1.26 | 0.97 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 CAPEX | 4.48 |
| 태양광 (옥상) | O&M (고용인원수/MW) | 0.57 | 0.44 | 0.34 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 OPEX | 1.21 |
| 태양광 (대형) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 1.4 | 1.08 | 0.83 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 CAPEX | 7.21 |
| 태양광 (대형) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 1.64 | 1.26 | 0.97 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 CAPEX | 3.72 |
| 태양광 (대형) | O&M (고용인원수/MW) | 0.29 | 0.22 | 0.17 | 지역 EF; 표 4 에 근거한 OPEX | 0.46 |
| 풍력 (해상) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 7.16 | 6.57 | 6.03 | Ram et al. [6]에 근거한 EF; 표 5 에 근거한 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 풍력 (해상) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 13.95 | 12.80 | 11.75 | Ram et al. [6]에 근거한 EF; 표 5 에 근거한 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 풍력 (해상) | O&M (고용인원수/MW) | 0.08 | 0.08 | 0.07 | 지역 EF; 표 5 에 근거한 OPEX | 0.16 |
| 풍력 (육상) | C&I (연간 고용인원수/MW) | 2.94 | 2.52 | 2.15 | Ram et al.에 근거한 EF; 표 5 에 근거한 CAPEX | “2020” 열 참조 |
| 풍력 (육상) | 제조 (연간 고용인원수/MW) | 4.32 | 3.69 | 3.16 | Ram et al.에 근거한 EF; 표 5 에 근거한 CAPEX | “2020” 열 참조 |

| | | | | | | |
|---------|-------------------|------|-----|------|--------------------------|------|
| 풍력 (육상) | O&M (고용인원수/MW) | 0.12 | 0.1 | 0.09 | 지역 EF; 표 5 에 근거한 OPEX | 0.28 |
|---------|-------------------|------|-----|------|--------------------------|------|

참고: 마지막 열은 지역 데이터를 기반으로 고유 고용계수들이 도출된 경우, 비교를 위하여 Ram et al.(2020)의 고용계수를 표시하였다.

한국 내 석탄 관련 일자리의 고용계수

- 기술 부품의 국내 생산: 현재 건설 중인 석탄발전소와 관련한 장비 제조는 이 보고서의 분석 기간 이전에 이미 완료된 것이므로, 석탄발전소의 국내 제조는 고려하지 않는다.
- 건설/설치(C&I): 신서천화력발전소의 사업자가 제공한, 해당 발전소 건설과 관련된 고용에서 파생된 고용계수를 적용하여 한국 내 이미 건설 중인 석탄발전소 관련 일자리를 설명한다. 이를 바탕으로 본 분석에서 적용한 고용계수는 5.26 연간고용인원수/MW(비정규직 및 하청계약 포함)인 반면, Ram et al.(2020)은 고용계수로 2020 년 기준 11.2 연간고용인원수/MW 를 제시하였다.
- 운영/유지보수(O&M): 국내 기존 석탄발전소 운영/유지보수 관련 고용 데이터(발전사들이 국회의원실에 제출한 자료)를 바탕으로 고용계수를 도출하였다¹⁶. 해당 데이터에 기한 고용계수는 0.17 고용인원수/MW 인데, 이는 Ram et al.(2020)에서 제시한 수치인 0.14 고용인원수/MW 보다 조금 높은 수준이다.
- 해체: 주된 분석을 함에 있어 한국 내 석탄발전소의 해체로 인한 일자리는 고려하지 않는다. 이미 해체된 한국 내 석탄화력발전소 관련 일자리에 대한 데이터가 제한적이기 때문에, 일자리 창출 잠재력을 Ram et al.(2020)이 제시한 수치인 1.65 연간고용인원수/MW 로 상정한다.
- 석탄발전소의 가스발전소로의 전환: 기존의 석탄발전소를 가스발전소로 전환하는 것과 관련한 일자리를 추정할 수 있는 데이터를 얻지 못했기 때문에, 전환 관련 일자리에 Ram et al.(2020)에서 제시된 가스발전소 건설/설치의 고용 계수인 1.3 연간고용인원수/MW 이란 값을 대신 적용하였고, 본 분석을 위한 석탄 인프라 해체는 고려하지 않았다.
- 연료 공급: 석탄 공급 관련 일자리는 다루지 않는다.
- 광역지자체별 추정치: 상술한 바와 같이, 발전소 위치를 바탕으로 일자리 추정치를 각 광역지자체 단위에 배분한다.

¹⁶ 해당 자료는 산업통상자원부의 중소벤처기업위원회 소속 국회의원에게 제공된 바 있다.

한국 내 가스 관련 일자리의 고용계수

- 기술 부품의 국내 생산: 최근 한국은 독자적인 가스터빈 제조를 추진하는 데 성공하였으나, 아직 미국, 독일 및 일본 제조사들이 시장의 약 96%를 점하고 있다¹⁷. 본 분석에서는 석탄발전소에서 전환되는 가스발전소에 사용될 가스터빈 중 국내에서 생산되는 비율이 30%에서 2030년까지 50%로 선형 증가할 것으로 가정한다. Ram et al. (2020)에서 제시한 바와 같이 고용계수로 0.93 연간고용인원수/MW 를 적용한다.
- 석탄발전소 개조(refurbishment)/건설/설치(C&I): 분석 시 제 9 차 전기본(현 정책 시나리오)에 따라 기존의 석탄발전소에서 전환되는 것 이외의 가스발전소는 고려하지 않는다. 석탄발전소를 대체할 가스발전소 관련 일자리의 계산은 상기 “석탄발전소의 가스발전소로의 전환”에 기술되어 있다.
- 운영/유지보수(O&M): 국내 기존 가스발전소 운영/유지보수 관련 고용 데이터(발전사들이 국회의원실에 제출한 자료)를 바탕으로 고용계수를 도출하였다. 해당 데이터에 기한 고용계수는 0.19 고용인원수/MW 인데, 이는 Ram et al.(2020)에서 제시한 수치인 0.14 고용인원수/MW 보다 조금 높은 수준이다. 석탄발전소에서 전환된 가스발전소들이 전환 이전의 용량을 유지한다고 가정하고 해당 고용계수를 전환된 가스발전소들에 적용한다.
- 해체: 본 분석 범위가 2030년까지이고, 앞으로 10년간 석탄발전소에서 전환되는 가스발전소만을 고려한다는 점에서, 가스발전소의 해체는 이 분석에 적합하지 않다.
- 연료 공급: 가스 공급 관련 일자리는 다루지 않는다.
- 광역지자체별 추정치: 상술한 바와 같이, 활용 가능한 정보에 한해 발전소 위치를 바탕으로 일자리 추정치를 각 광역지자체 단위에 배분한다.

한국 내 태양광 관련 일자리의 고용계수

- 본 분석을 위해 옥상 태양광과 대지 태양광)을 구분한다. 이 구분에 따라 각각의 잠재량 및 그에 따른 위치의 모델링, 그리고 노동강도가 달라진다. 즉, 옥상 태양광과 대지 태양광에 서로 다른 고용계수가 적용된다.
- 태양광 기술 부품의 국내 제조
 - 국내 생산 비중: 한국 내 설치된 태양광 발전 시설의 기술 부품 생산과 관련된 지역 내 일자리를 추정하기 위해서는 2030년까지 태양광 모듈 제조에서 국내 생산 비중의 변화 양상에 대한 가정을 세워야 한다. 국산 태양광 모듈의 국내 시장 점유율은 2016년에는 72%, 2017년 73.5%, 2018년 72.5% 그리고 2019년에는 심지어 78.7%를 나타냈다¹⁸. 중소형 태양광 시스템의 경우 국산 태양광 모듈에

¹⁷ <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=55984>

¹⁸ <https://www.pv-magazine.com/2020/01/14/south-korean-government-reassures-domestic-pv-industry/>

대한 수요가 높은 가운데, 대형 태양광 시스템의 경우는 가격이 낮은 중국산 제품도 큰 역할을 한다¹⁹. 따라서 시나리오 분석을 위해 (소형) 옥상 태양광과 (대형) 대지 태양광의 국내 생산 비중을 구분하고, 2020년부터 2030년까지 옥상 태양광 시설의 국내 비중은 80%, 대지 태양광 시설의 비중은 50%로 고정되었다고 가정한다.

- 도출된 고용계수: 고용노동부(2017년)와 [38] 한국에너지공단(2018년)에서 [39], [40] 나온 한국 태양광 제조 부문의 과거 고용 관련 데이터를 분석에 사용하였다. 과거 태양광 설비에 대한 정보는 전력거래소 자료를 사용한다²⁰. 한국은 태양광 부품을 내수용 외에 수출용으로도 제조했기 때문에, 한국무역협회 데이터베이스²¹의 2017년과 2019년 간의 수입 대비 수출액 비율에 관한 데이터를 활용하여 한국에서 생산된 내수용과 수출용 태양광의 비율을 구하였으며, 수출된 설비 가격은 국내 설비 가격과 동일하다고 가정한다. 국내에 설치된 태양광 발전시설의 일부는 수입품(주로 중국산)이라는 사실을 반영하기 위해 상기와 같이 과거 국내 점유율에 관한 정보를 이용한다. 제조 공정은 추가 설비가 설치되어 전력거래소 통계에 반영되기 전에 발생한다. 추가 설비용량이 얼마나 발생하는지는 먼저 확인할 수 없으므로, 도출 과정을 단순화해야 한다. 태양광 제조 부문의 과거 고용은 시간의 경과에도 비교적 일정한 반면, 계산된 용량에는 급격한 수치상의 변화가 존재한다. 이 불확실성을 해결하기 위해 2017~2019년 간 신규 설치 용량, 제조부문 고용, 국내 생산 비중, 수입 대비 수출 비중에 관한 가용 정보의 평균을 내어 국가를 대표할 수 있는 고용계수를 결정한다. 그 결과 계산된 국내 태양광 제조 부문의 고용계수는 2020년의 경우 1.64 연간고용인원수/MW로, 옥상 태양광과 대지 태양광 시스템의 고용계수가 동일하다고 가정한다. 비교를 위해 부연하자면, Ram et al.(2020)에서 이에 상응하는 2020년의 고용계수는 3.72 연간고용인원수/MW이다.
- 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다(표 10 참조).
- 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 태양광 발전 시설의 국내 생산과 관련한 일자리를 추정하기 위해, PyPSA에서 얻은 각 태양광 에너지원(옥상형 및 대지)의 추가 설비용량(MW)에 국내 비중을 곱한 다음, 각 에너지원 및 연도별 태양광 국내 생산 고용계수를 곱한다.

¹⁹ <http://koreabizwire.com/imports-of-chinese-solar-modules-surge-as-s-korean-renewable-energy-market-grows/165029>

²⁰ 우리는 전력거래소의 '연료원별' 용량('에너지원별' 용량이 아님)를 사용하여 화석연료 및 재생에너지원 모두의 고용계수를 결정하였다. 재생에너지의 경우 이것이 전력거래소에서 얻을 수 있는 유일한 개별 정보이다.

²¹ http://www.kita.org/kStat/byCom_SpeCom.do

- 수출 또는 수입 관련 고용: 본 연구의 목적이 한국의 석탄발전소를 국내에서 재생에너지로 대체하는 것이 고용 측면에서 갖는 함의를 분석하는 데 있으므로, 태양광 기술 부품 수출을 위한 국내 생산은 감안하지 않았다는 점에 유의해야 한다. 수입 태양광 기술 부품에 기반하여 창출된 해외 일자리 역시 이번 분석에서는 고려하지 않는다.
- 건설/설치(C&I):
 - 도출된 고용 계수: 전술한 바와 같이 옥상 태양광과 대지 태양광을 구분한 C&I 부문 고용계수는 Ram et al. (2020)에 나온 상대 고용집약도(employment intensity)가 한국에도 적용된다고 가정하고, 재생에너지 3020 이행계획에 [41] 나온 비중과 한국의 고용 통계를 [39] 바탕으로 하위 에너지원별로 구분된 전력거래소의 추가 설비용량에 관한 과거 데이터를 토대로 도출된다. 한국을 대표할 수 있는 고용계수를 결정하기 위해 2017~2019 년의 추가 설비용량 및 일자리의 평균을 구한다. 그에 따라 도출된 한국의 C&I 고용 계수는 옥상 태양광 시설의 경우 2.8 연간고용인원수/MW, 대지 태양광 시설의 경우 1.4 연간고용인원수/MW 로 나타났다. 비교를 위해 부연하자면, Ram et al.(2020)에서 이에 상응하는 2020 년 고용 계수는 옥상 태양광의 경우 17.37 연간고용인원수/MW, 대지 태양광 시설의 경우 7.21 연간고용인원수/MW 이다.
 - 공사 기간: 태양광의 경우, 옥상 태양광과 대지 태양광 모두 공사기간은 1 년으로 가정한다.
 - 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 옥상형 및 대지 태양광 시설의 C&I 관련 일자리를 각각 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 태양광 에너지원(옥상형 및 대지)의 추가 설비용량(MW) 관련 시나리오 데이터에 각각의 도출된 에너지원 및 연도별 C&I 고용계수를 곱한다. 각 연도의 일자리 추정치를 계산하기 위해, 공사 기간에 걸쳐 연간고용인원수 추정치를 배분한다.
- 운영/유지보수(O&M):
 - 고용계수 도출: 전술한 바와 같이 옥상 태양광과 대지 태양광을 구분한 O&M 부문 고용계수는 재생에너지 3020 이행계획에 [41] 나온 비중과 한국의 고용 통계를 바탕으로 하위에너지원 별로 구분된 전력거래소의 총 설비용량에 대한 과거 데이터를 통해 도출되며, Ram et al. (2020) O&M 고용계수에 나온 상대 고용집약도가 한국에도 적용된다고 가정한다. 한국을 대표할 수 있는 고용계수를 결정하기 위해 2017~2018 년의 설비용량 및 일자리의 평균을 구한다. 그에 따라 도출된 한국의 현 O&M 고용계수는 옥상 태양광의 경우 0.57 jobs/MW, 대지

태양광의 경우 0.29 jobs/MW 로 나타났다. 비교를 위해 부연하자면, Ram et al. (2020)에서 이에 상응하는 2020 년 고용계수는 옥상 태양광의 경우 1.21 jobs/MW, 대지 태양광 시설의 경우 0.46 jobs/MW 이다.

- 하락 계수: OPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
- 고용에 미치는 영향 추정: 옥상형 및 대지 태양광 설비의 O&M 관련 일자리를 각각 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 태양광 기술(옥상형 및 대지)의 총 용량(MW)에 관한 시나리오 데이터에 각각의 도출된 에너지원 및 연도별 O&M 고용계수를 곱한다. 이러한 일자리는 설비의 수명 기간 동안 지속적으로 유지된다고 가정한다.
- 수명 및 대체: 태양광 발전 설비 및 관련 일자리의 대체는 태양광 발전 설비의 긴 수명(일반적으로 25 년)보다 본 분석의 시간적 범위가 짧기 때문에 무시될 수 있다고 가정한다.
- 광역지자체별 추정치: 전술한 바와 같이 정보가 있는 한 일자리 추정치를 각 광역지자체 단위에 배분한다.

한국 내 풍력 관련 일자리의 고용계수

- 기술 부품의 현지 생산
 - 국내 생산 비중: 우리는 풍력 터빈(해상 및 육상)의 국내 생산 비율을 20%로, 가장 관련성이 높은 기술 부품(블레이드, 타워)에 관한 자료인 한국남동발전의 국산화비율 반영제(LCR)와 비슷하게 가정했다.²² 해당 비율은 일정하게 유지될 것이라 가정한다.
 - 고용계수: 최근 몇 년 간의 국내 제조 설비의 불확실성으로 인해 해상 및 육상 풍력 모두에 대해 Ram et al.(2020)에서 제시한 고용계수를 사용한다. 이에 따르면 해상풍력에 대한 계수는 13.95 연간고용인원수/MW, 육상풍력에 대한 계수는 4.32 연간고용인원수/MW 이다.
 - 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 풍력 발전 설비의 국내 생산 관련 일자리를 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 풍력 기술(해상 및 육상)의 총 설비용량(MW)에 국산 비중을 곱한 뒤, 에너지원 및 연도별 풍력 국내 생산에 대한 고용계수를 곱한다.

²² <http://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=27311>

- 수출 또는 수입 관련 고용: 이 분석에서는 풍력 기술 수출을 위한 국내 생산은 고려하지 않는다.
- 건설/설치(C&I)
 - 고용계수 도출: 육상풍력 및 해상풍력 발전 설비 관련 2020 년 고용 계수를 각 2.94 연간고용인원수/MW 와 7.16 연간고용인원수/MW 로 본 Ram et al.(2020) 하 고용계수를 사용한다. 이는 국내 생산 및 용량 데이터로부터 파생된 자료보다 보수적인 수치이다.
 - 공사 기간: 육상(해상) 풍력의 경우, 공사기간은 1 년(4 년)으로 가정한다.
 - 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 육상 및 해상 풍력의 c&i 관련 일자리를 각각 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 풍력 기술(육상 및 해상)의 추가 설비용량(MW)에 관한 시나리오 데이터에 각각의 도출된 에너지원 및 연도별 c&i 고용계수를 곱한다. 각 연도의 일자리 추정치를 계산하기 위해, 공사 기간에 걸쳐 연간 고용인원수 추정치를 분배한다.
- 운영/유지보수(O&M):
 - 고용계수 도출: 전술한 바와 같이 육상풍력과 해상풍력을 구분한 O&M 부문 고용계수는 Ram et al.(2020) O&M 고용계수에 나온 육상 및 해상 풍력 간 상대 고용집약도가 한국에도 적용된다고 가정하고, 국제재생에너지기구²³에 나온 비중과 한국의 고용 통계를 [39] 바탕으로 하위에너지원 별로 구분된 전력거래소의 총 용량에 관한 과거 데이터를 통해 도출된다. 한국을 대표할 수 있는 고용계수를 정하기 위해 2017~2018 년의 설비용량 및 일자리의 평균을 구한다. 그에 따라 도출된 한국의 현 O&M 부문 고용계수는 육상풍력의 경우 0.12 jobs/MW, 해상풍력의 경우 0.08 jobs/MW 로 나타났다. 비교를 위해 부연하자면, Ram et al.(2020)에서 이에 상응하는 2020 년 고용계수는 육상풍력의 경우 0.28 jobs/MW, 해상풍력의 경우 0.16 jobs/MW 이다.
 - 하락 계수: OPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 육상 및 해상 풍력 터빈의 O&M 관련 일자리를 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 풍력 기술(육상 및 해상)의 총 설비용량(MW)에 관한

²³ 국제재생에너지기구 2021. Statistics Time Series. <https://irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>.

시나리오 데이터에 각각의 도출된 에너지원 및 연도별 O&M 고용계수를 곱한다. 이러한 일자리는 시설의 수명 기간 동안 지속적으로 유지된다고 가정한다.

- 수명 및 대체: 풍력 발전 시설 및 관련 일자리의 대체는 풍력 발전 설비의 긴 수명(일반적으로 20 년)보다 본 분석의 시간적 범위가 더 짧기 때문에 무시될 수 있다고 가정한다.

한국 내 배터리 저장장치 관련 일자리의 고용계수

배터리 저장장치 관련 한국 내 고용에 대한 가용 데이터는 매우 한정적이며, 이것으로는 본 연구에 필요한 고유의 고용계수를 도출할 수 없다. 따라서 소형 '프로슈머' 배터리 저장장치와 대형 배터리 저장장치를 구별한 Ram et al.(2020)의 고용계수를 적용한다.

- 기술 부품의 국내 제조:
 - 국내 생산 비중: 국내 배터리 제조사들의 강력한 시장 지위²⁴를 감안할 때, 소형 배터리와 대형 배터리 모두에 대해 80%의 점유율을 가정하고, 이러한 수치는 분석 기간 동안 지속적으로 유지된다고 가정한다.
 - 고용계수: 배터리 제조 부문 지역 일자리에 대한 가용 데이터가 한정적이어서 한국의 소형 및 대형 배터리 제조 관련 일자리는 Ram et al.(2020)에 나온 각 고용계수를 적용하여 설명한다. 2020 년 기준 소형 배터리의 경우 12.76 연간고용인원수/MW, 대형 배터리의 경우 11.41 연간고용인원수/MW 이다.
 - 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 배터리 저장장치 시스템의 국내 제조에 관한 일자리를 추정하기 위해 PyPSA 에서 얻은 각 저장 기술(소형 및 대형)의 추가 설비용량(MW)에 국산 비중을 곱한 다음, 각각의 에너지원 및 연도별 지역 배터리 제조 고용계수를 곱한다.
 - 수출 또는 수입 관련 고용: 이 분석에서는 배터리 저장장치 시스템 수출을 위한 국내 제조는 고려하지 않았다.
- 건설/설치(C&I):
 - 고용계수: 전력 배터리 시스템 건설/설치 부문 국내 일자리에 대한 가용 데이터가 한정적이기 때문에 한국의 프로슈머 및 대형 배터리 건설/설치에 관한 일자리는

²⁴ Hwang I, Jung Y. Korea's Energy Storage System Development: The Synergy of Public Pull and Private Push [Internet]. 2020 [2021 년 6 월 11 일 인용]. 다음에서 확인 가능:

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/152501583149273660/pdf/Koreas-Energy-Storage-System-Development-The-Synergy-of-Public-Pull-and-Private-Push.pdf>

Ram et al.(2020)에 나온 각 고용계수를 적용하여 설명한다. 2020 년 기준, 이는 소형 배터리의 경우 16.31 연간고용인원수/MW, 대형 배터리의 경우 7.29 연간고용인원수/MW 이다.

- 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수는 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따른 고용계수의 변화를 조정하기 위해 적용된다.
- 건설 기간: 소형 및 대형 배터리 저장장치의 건설 기간을 모두 1 년으로 가정한다.
- 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 배터리 저장장치 시스템의 건설/설치 관련 일자리를 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 저장 기술(소형 및 대형)의 추가 설비용량(MW)에 각각의 에너지원 및 연도별 고용계수를 곱한다.
- 운영/유지보수(O&M):
 - 배터리 운영/유지보수 부문 지역 일자리에 대한 가용 데이터가 한정적이어서 한국의 프로슈머 및 대형 배터리 운영/유지보수에 관한 일자리는 Ram et al.(2020)에 나온 각 고용계수를 적용하여 설명한다. 2020 년 기준, 소형 배터리의 경우 0.34 고용인원수/MW, 대형 배터리의 경우 0.15 고용인원수/MW 이다.
 - 하락 계수: OPEX 기반의 하락 계수가 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 고용계수를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 배터리 저장장치 시스템의 운영/유지보수 관련 일자리를 추정하기 위해, PyPSA 에서 얻은 각 저장 기술(소형 및 대형)의 총 연간 설비용량(MW)에 각각의 에너지원 및 연도별 고용 계수를 곱한다.
- 수명 및 대체: 이 분석에서 배터리 및 관련 일자리의 대체는 무시될 수 있다고 가정한다.

한국 내 수소 관련 일자리의 고용계수

수소 전기분해, 수소 저장장치, 수소 연료 전지는 각각 구분되는 개념들이다. 수소 기술과 연관된 고용 관련 데이터로 현재 활용 가능한 것은 전세계적으로 매우 한정적이므로 수소 전기분해 및 수소 저장 설비의 고용계수 근사치를 계산하기 위해 유사 기술들에 대한 Ram et al.(2020)의 고용계수를 적용한다. 수소 연료전지의 경우, 가용 데이터를 바탕으로 한국 고유의 고용계수를 산출한다.

- 기술 부품의 국내 제조
 - 국내 생산 비중: 수소 전기분해에 대해서는 국내 제조 비율을 50%로 가정하고, 해당 수치가 분석 기간 동안 동일하게 유지된다고 전제한다. 수소 연료전지에 대해서는 국내 제조 비율을 2020 년에 50%로 가정하고, 2030 년까지 70%로

증가한다고 가정한다²⁵. 이는 국내 발전용 연료전지 제조 경험과 여전한 외국 기술에 대한 의존을 반영한 것이다²⁶. 수소 저장 설비는 지하에 설치되므로 전술한 바와 같이 제조 부문 고용과는 관련이 없다²⁷.

- 고용계수: 전해조(electrolyser) 제조에 관한 일자리는 Ram et al.(2020)에서 제공한 P2G(Power-to-Gas; PtG) 고용계수(1.86 연간고용인원수/MW)를 적용하여 설명한다. 수소 연료전지의 경우에는 국내 연료전지 제조사의 데이터를 토대로 제조와 관련된 일자리를 설명한다. 고용계수 근사치는 고용이 계속 이루어진다는 가정 하에 제조되는 설비용량 정보²⁸ 및 고용 정보²⁹를 바탕으로 산출한다. 이에 따른 고용계수는 2.8 연간고용인원수/MW 이다. 수소 저장설비는 지하에 설치되므로 전술한 바와 같이 제조 부문 고용과는 관련이 없다.
- 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수가 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 고용계수를 조정하기 위해 적용된다.
- 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 수소 관련 국내 제조에 관한 일자리를 추정하기 위해 PyPSA 에서 얻은 각 수소 에너지원(전기분해, 수소 저장장치, 수소 연료전지)의 추가 설비용량(전기분해와 연료전지의 경우 MW, 수소 저장장치의 경우 MWh 단위)에 국산 비중을 곱한 다음, 상기 기술된 제조에 관한 각각의 에너지원 및 연도별 고용계수를 곱한다.
- 수출 또는 수입 관련 고용: 이 분석에서는 수소 관련 기술을 수출하기 위한 국내 생산은 고려하지 않는다.
- 건설/설치(C&I):
 - 고용계수: 전해조의 건설/설치 관련 일자리는 Ram et al.(2020)에서 제공한 P2G 고용계수(2020 년 기준 2.6 연간고용인원수/MW)를 적용하여 설명한다. 수소 저장장치 역시 Ram et al.(2020)에서 제공하는 가스 저장 설비의 건설/설치에 관한 고용 계수(0.00006 연간고용인원수/MWh)를 적용한다. 수소 연료전지의 경우, C&I 에 대한 고용계수는 전력거래소의 추가 용량에 대한 과거의 데이터 및 한국의 고용 통계에 근거하여 산출되었다 [39]. 한국을 대표할 수 있는 고용계수를 결정하기 위해 2017~2019 년(각 2017~2018 년)의 추가 설비용량 및 일자리의

²⁵ 수소경제로드맵에서 발표한 바와 같이 한국은 연료전지의 국내 제조 확대를 목표로 한다 [42]. 본 연구의 가정된 국내 제조 비중은 이러한 목표를 반영한다.

²⁶ <https://www.ifri.org/en/publications/editoriaux-de-lifri/edito-energie/south-koreas-hydrogen-strategy-and-industrial>

²⁷ 적절한 지형을 확보할 수 없다면 국내에서 지하 저장 시설은 현실적인 대안이 아닐 수 있다. 다른 형태의 저장 설비(가령 파이프, 탱크)를 구축해야 하는 경우, 이러한 설비를 제조하는 과정에서 추가적인 일자리가 창출될 수 있다. 이러한 점에서 본 연구의 예측치는 보수적이라고 볼 여지가 있다.

²⁸ https://www.doosan.com/en/media-center/press-release_view/?id=20172197&page=3&

²⁹ <https://www.marketscreener.com/quote/stock/DOOSAN-FUEL-CELL-CO-LTD-103508980/company/>

평균을 구한다. 그에 따라 도출된 한국의 C&I 고용계수는 2.78 연간고용인원수/MW 이다.

- 하락 계수: CAPEX 기반의 하락 계수가 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 고용계수를 조정하기 위해 적용된다.
- 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 수소 관련 에너지원의 건설/설치에 관한 일자리를 추정하기 위해 PyPSA 에서 얻은 각 수소 기술(전기분해, 수소 저장장치, 수소 연료전지)의 추가 용량(전기분해와 연료전지는 MW, 수소 저장장치는 MWh 단위)에 상기 기술된 건설/설치에 관한 각각의 에너지원 및 연도별 고용계수를 곱한다.
- 운영/유지보수(O&M):
 - 고용계수: 전해조의 O&M 관련 일자리는 Ram et al.(2020)에서 제공한 P2G 의 O&M 관련 고용계수(2020 년 기준, 0.28 jobs/MW)를 적용하여 설명한다. 수소 저장장치 역시 Ram et al. (2020)에서 제공하는 가스 저장장치의 O&M 에 관한 고용계수(2020 년 기준, 0.000004 jobs/MWh)를 적용한다. 수소 연료전지의 경우, 현재 건설 중인 한국 내 수소연료전지발전소의 예상 일자리 정보를 바탕으로 한국 고유의 O&M 관련 고용계수를 도출한다³⁰. 이에 따른 고용계수는 0.6 jobs/MW 이다.
 - 하락 계수: OPEX 기반의 하락 계수가 전술한 바와 같이 시간이 경과함에 따라 고용계수를 조정하기 위해 적용된다.
 - 고용에 미치는 영향 추정: 한국 내 수소 관련 에너지원의 운영/유지보수에 관한 일자리를 추정하기 위해 PyPSA 에서 얻은 각 수소 기술(전기분해, 수소 저장장치, 수소 연료전지)의 총 연간 설비용량(전기분해와 연료전지는 MW, 수소 저장장치는 MWh 단위)에 상기 기술된 운영/유지보수에 관한 각각의 에너지원 및 연도별 고용계수를 곱한다.
- 수명 및 대체: 우리는 전해조, 수소 저장장치, 수소 연료전지의 대체와 일자리는 이번 분석 시 고려한 기간에서는 무시될 수 있다고 가정한다.

30

https://www.gb.go.kr/Main/open_contents/section/invest_eng/page.do?mnu_uid=4419&BD_CODE=bbs_gongji&cmd=2&B_NUM=73421401&B_STEP=73421400&V_NUM=

표 10: 건설/설치 시간의 수명에 관한 기본 가정

| 에너지원 | 건설 기간 (단위: 연) | 출처 |
|-------------|------------------|-------------------|
| 배터리 (소형) | 1 | Ram et al. (2020) |
| 배터리 (대형) | 1 | Ram et al. (2020) |
| 석탄 | 5 | Ram et al. (2020) |
| 수소 전기분해 | 2 | Ram et al. (2020) |
| 수소 연료전지 | 2 | Own assumption |
| 수소 저장장치 | 2 | Ram et al. (2020) |
| 가스(석탄에서 전환) | 1 | Own assumption |
| 태양광 (옥상) | 1 | Ram et al. (2020) |
| 태양광 (대지) | 1 | Ram et al. (2020) |
| 풍력 (해상) | 4 | Ram et al. (2020) |
| 풍력 (육상) | 1 | Own assumption |

표 11 국내 제조 비중에 대한 기본 가정

| 에너지원 | 2020 | 2025 | 2030 |
|-------------|------|------|------|
| 배터리 (소형) | 80% | 80% | 80% |
| 배터리 (대형) | 80% | 80% | 80% |
| 석탄 | 0% | 0% | 0% |
| 수소 전기분해 | 50% | 50% | 50% |
| 수소 연료전지 | 50% | 60% | 70% |
| 가스(석탄에서 전환) | 30% | 40% | 50% |
| 태양광 (옥상) | 80% | 80% | 80% |
| 태양광 (대지) | 50% | 50% | 50% |
| 풍력 (해상) | 20% | 20% | 20% |
| 풍력 (육상) | 20% | 20% | 20% |

고용 영향에 대한 민감도 분석

녹색 수소(그린수소)의 역할을 제한적으로 가정할 때의 추정치

현 정책 시나리오에서는 수소 개발이 예상되지 않지만, 탈석탄 시나리오는 전력 시스템의 유연성을 향상시키기 위해 비용 효율적인 에너지원로서 녹색 수소의 생산, 저장, 활용의 확대를

예상한다. IRENA 에서 제공하는 재생에너지 가격 예측의 중간값과 결합하여 [14], [19], 녹색 수소는 2025 년부터 전력 시스템에 비용 효율적인 장기 저장장치를 제공하는 데 이미 중요한 역할을 한다. 그러나 단기적으로 수소 에너지원에 대한 정치적 지원, 투자 및 비용 개선 측면에서의 불확실성을 감안하여, 이 장에서 2019 년 한국 정부가 발표한 수소경제 로드맵과 부합하도록 수소의 양을 제한하는 분석을 제공한다 [42]. 구체적으로, 연료전지는 2040 년 연료전지 발전소 1.5GW 목표치에 맞추어 일정한 성장 경로를 따르도록 정해져 있으며, 이에 따라 전해조와 저장 설비용량이 개발되었다³¹. 탈석탄 시나리오와 비교하였을 때, 2025 년부터 시작되는 수소 설비 확대가 더 낮은 부분을 소형 및 대형 배터리 저장 설비용량을 늘리고, 나아가 해상풍력 설비용량을 그보다 더 큰 규모로 늘림으로써 상쇄시켜야 한다. 총 고용 효과는 이러한 발전 추이를 반영하여, 수소 관련 일자리의 경우 3 분의 1 이하만이 유지되는 반면, 배터리와 해상풍력과 관련된 일자리는 연평균 20,000 개 이상이 새로 창출된다(그림 7 참조). 수소 확대를 제한하는 것이 일자리에 미치는 전반적인 영향은 유익한 것이라 볼 수 있으나, 이는 PyPSA 의 가정 하 비용적인 측면에서 최적의 에너지 시스템이 아니라는 단점이 있다. 광역지자체 수준의 고용 분석에서도 주요 분석과 유사한 결과가 나타났다(그림 8 참조). 고용이 광역지자체 수준에서 일부 재할당되나, 석탄발전소가 위치한 광역지자체를 포함하여 모든 광역지자체들이 석탄발전 설비를 재생에너지와 저장장치로 대체함으로써 얻게 되는 혜택을 누린다.

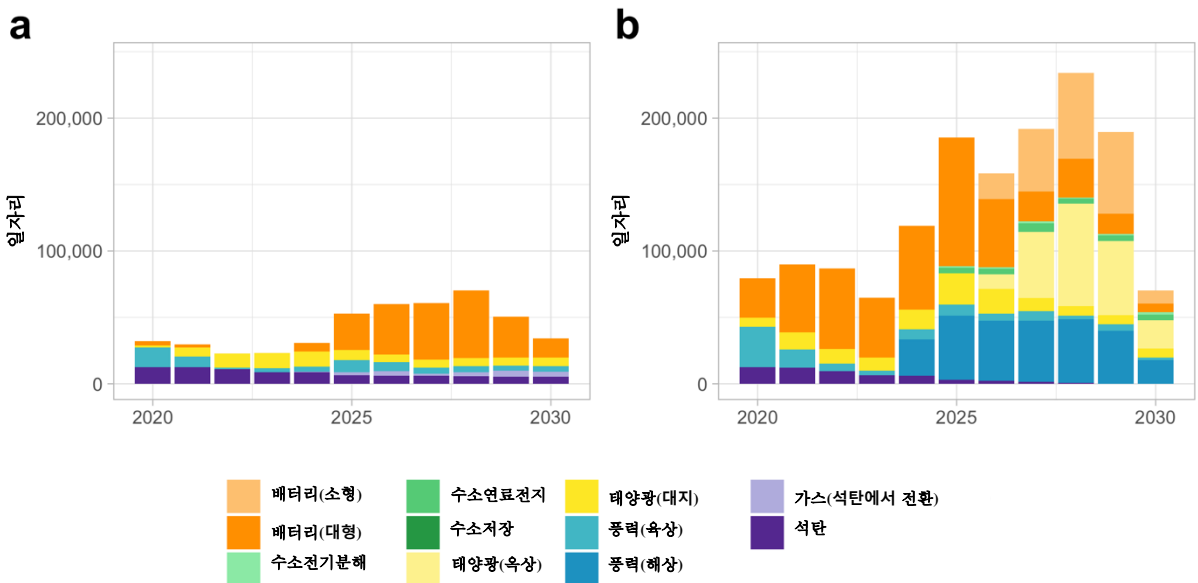


그림 6 민감도 분석: 일자리 유형별로 집계된 에너지원별 총 고용영향- 현 정책 시나리오(패널 a)의 일자리 예측치와 변형 탈석탄 시나리오(패널 b)의 제한된 수소 확대과 비교

³¹ 제한된 수소 경로의 탈석탄 시나리오에서는 2030 년에 1.4GW 에 상응하는 전해조 설비가 요구되는 반면, 주된 분석 하에서는 탈석탄 시나리오에서 8.1GW 에 상응하는 설비가 요구된다.

탈석탄 시나리오와 현 정책 시나리오(수소 제한) 비교 하
2020-2030년 일자리 증가(C&I, O&M; 연간 고용인원수 기준)

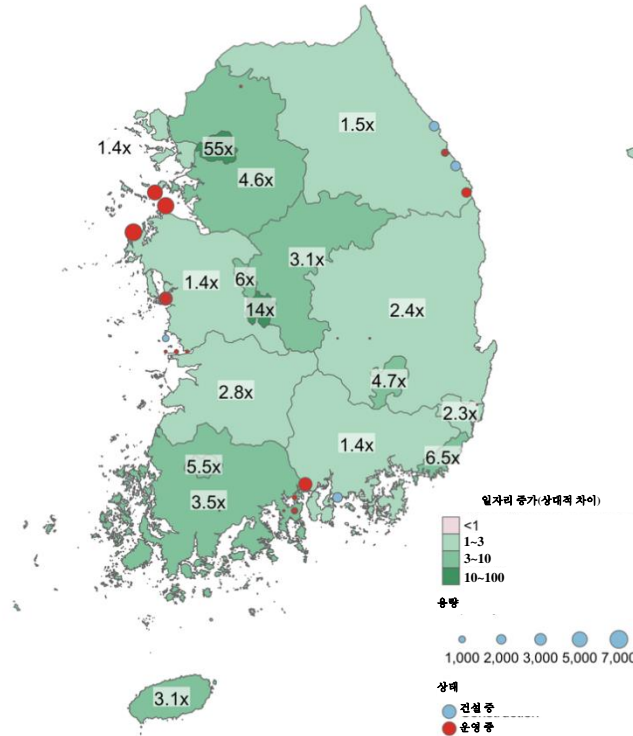


그림7 민감도 분석: 수소를 제한하는 탈석탄 시나리오의 변형과 현 정책 시나리오 간의 연간 고용인원수의 차이- 석탄, 가스(전환), 태양광, 육상풍력 및 배터리 저장장치의 c&i 와 O&M 관련 업무 포함. 표시된 계수는 두 시나리오 간에 광역지자체 수준 일자리 창출 잠재력이 어떻게 다른지 보여준다(가령 2x 라고 표시되어 있는 경우, 이는 탈석탄 시나리오의 변형이 현 정책 시나리오와 비교하였을 때 두 배 이상의 연간 고용인원수를 창출함을 의미함). 각 광역지자체에 배정되지 않은 일자리 창출(국내 장비제조, 해상풍력, 수소)는 해당 숫자에 포함되지 않는다. 석탄발전소의 용량과 위치는 원으로 표시되어 있다.

4. References

- [1] F. Sferra *et al.*, “Towards optimal 1.5° and 2 °C emission pathways for individual countries: A Finland case study,” *Energy Policy*, vol. 133, 2019.
- [2] Climate Analytics, “Assessing the health benefits of a Paris-aligned coal phase out for South Korea,” 2021.
- [3] MOTIE, *The 9th Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand 2020-2034*. 2020.
- [4] Global Energy Monitor, “Global Coal Plant Tracker,” 2020.
- [5] J. Rutovitz, E. Dominish, and J. Downes, “Calculating global energy sector jobs: 2015 Methodology Update,” 2015.
- [6] M. Ram, A. Aghahosseini, and C. Breyer, “Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 151, no. May, p. 119682, 2020.
- [7] Climate Analytics, “1.5°C national pathway explorer — South Korea,” 2021.
- [8] D. S. Ryberg, *Generation Lulls from the Future Potential of Wind and Solar Energy in Europe*, vol. 521. 2019.
- [9] D. S. Ryberg, Z. Tulemat, D. Stolten, and M. Robinius, “Uniformly constrained land eligibility for onshore European wind power,” *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 921–931, Feb. 2020.
- [10] D. S. Ryberg, D. G. Caglayan, S. Schmitt, J. Linßen, D. Stolten, and M. Robinius, “The future of European onshore wind energy potential: Detailed distribution and simulation of advanced turbine designs,” *Energy*, vol. 182, pp. 1222–1238, Sep. 2019.
- [11] D. G. Caglayan, D. S. Ryberg, H. Heinrichs, J. Linßen, D. Stolten, and M. Robinius, “The techno-economic potential of offshore wind energy with optimized future turbine designs in Europe,” *Appl. Energy*, vol. 255, p. 113794, Dec. 2019.
- [12] P. M. Heuser, D. S. Ryberg, T. Grube, M. Robinius, and D. Stolten, “Techno-economic analysis of a potential energy trading link between Patagonia and Japan based on CO2 free hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 25, pp. 12733–12747, May 2019.
- [13] D. S. Ryberg, M. Robinius, and D. Stolten, “Evaluating land eligibility constraints of renewable energy sources in Europe,” *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–19, 2018.
- [14] IRENA, *FUTURE OF WIND Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*. 2019.
- [15] IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2019*. 2020.
- [16] BWE, “Wind Industry In Germany,” 2021.
- [17] S. Wang, A. R. Nejad, and T. Moan, “On design, modelling, and analysis of a 10-MW medium-speed drivetrain for offshore wind turbines,” *Wind Energy*, vol. 23, no. 4, pp. 1099–1117, 2020.
- [18] F. Onea and L. Rusu, “Evaluation of some state-of-the-art wind technologies in the nearshore of the black sea,” *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018.
- [19] IRENA, *Future of solar photovoltaic*, vol. November. 2019.
- [20] T. Brown, J. Hörsch, and D. Schlachtberger, “PyPSA: Python for Power System Analysis,” *J. Open Res. Softw.*, vol. 6, no. 1, p. 4, Jan. 2018.
- [21] C.-Y. Kim, C.-R. Kim, D.-K. Kim, and S.-H. Cho, “Analysis of Challenges Due to Changes in Net Load Curve in South Korea by Integrating DERs,” *Electronics*, vol. 9, no. 8, p. 1310, Aug. 2020.
- [22] Lazard, “Lazard’s levelized cost of energy analysis — version 13.0,” 2019.
- [23] BP, “BP Statistical Review of World Energy 2019,” 2019.
- [24] EPSIS, “Generation Capacity by Fuel,” 2021. [Online]. Available: <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkpoBftChart.do?menuId=020100&locale=eng>.
- [25] Danish Energy Agency, “Technology Data, Update November 2019,” 2019.
- [26] J. Mischner, H.-G. Fasold, and J. Heymer, *Systemplanerische Grundlagen der Gasversorgung*. DIV Deutscher Industrieverlag, 2015.
- [27] M. E. Reuß, “Techno-economic analysis of hydrogen infrastructure alternatives,” RWTH Aachen

- University, 2019.
- [28] O. Kruck, F. Crotonino, R. Prelicz, and T. Rudolph, "Assessment of the potential, the actors and relevant business cases for large scale and seasonal storage of renewable electricity by hydrogen underground storage in Europe" Overview on all Known Underground Storage Technologies for Hydrogen," 2013.
- [29] F. Fuoli, "Für 21 Millionen entsteht ein riesiger Erdgasspeicher," *Limmattaler Zeitung*, 2012.
- [30] Climate Analytics, "South Korea must exit coal by 2029 to be in line with the Paris Agreement," *Climate Analytics*, 20-Feb-2020. [Online]. Available: <https://climateanalytics.org/latest/south-korea-must-exit-coal-by-2029-to-be-in-line-with-the-paris-agreement/>. [Accessed: 04-Aug-2020].
- [31] Greenpeace International, Global Wind Energy Council, and SolarPowerEurope, "Energy [R]evolution | A Sustainable World Energy Outlook 2015," 2015.
- [32] S. Teske (Editor), *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*. 2019.
- [33] E. Dominish, C. Briggs, S. Teske, and F. Mey, "Just Transition: Employment Projections for the 2.0 °C and 1.5 °C Scenarios," in *Achieving the Paris Climate Agreement Goals*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 413–435.
- [34] J. Rutovitz, C. Briggs, E. Dominish, and K. Nagrath, "Renewable Energy Employment in Australia : Methodology. Prepared for the Clean Energy Council by the Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney.," 2020.
- [35] A. S. Oyewo, A. Aghahosseini, M. Ram, A. Lohrmann, and C. Breyer, "Pathway towards achieving 100% renewable electricity by 2050 for South Africa," *Sol. Energy*, vol. 191, no. September, pp. 549–565, 2019.
- [36] Korea Energy Agency, "2018 New and Renewable Energy Industry Statistics," 2019.
- [37] Korea Energy Agency, "2019 New and Renewable Energy Industry Statistics," 2020.
- [38] Human Resources Development Service of Korea, "Power/Energy Industry Employment Status Report," 2019.
- [39] Korea Energy Agency, "2018 New and Renewable Energy Industry Statistics," 2019.
- [40] Korea Energy Agency, "2019 New and Renewable Energy Industry Statistics," 2020.
- [41] MOTIE, *Renewable Energy 3020 Implementation Plan*. 2017.
- [42] Government of Korea, *Hydrogen Economy Roadmap of Korea*. 2019.
- [43] Climate Analytics, "Transitioning towards a coal-free society : science based coal-phase out pathway for South Korea under the Paris Agreement," Berlin, 2020.