

# KIER

## 기술분석 Report

---

2021. 12.

VOL.2, No.1

---

본 내용은 한국에너지기술연구원이 2020년 발간한  
'에너지기술 R&D 기획 연구(KIER-C0-2431-01)' 보고서의  
관련 연구내용을 기반으로 추가적인 보완 연구를 수행한 결과로서,  
기관의 공식적인 의견이 아닌 필자 개인(연구진)의 견해를 알려드립니다.  
편집자주

# 목차

C/O/N/T/E/N/T/S

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Executive Summary .....           | 5  |
| 1. 서론 .....                       | 7  |
| 2. 분석 방법론 및 주요 전제조건 .....         | 9  |
| 3. 2050 탄소중립을 위한 수소에너지의 역할 .....  | 12 |
| 4. 불확실성에 따른 수소에너지 역할의 변화 .....    | 25 |
| 5. 시사점 및 분석의 한계 .....             | 32 |
| 참고문헌 .....                        | 38 |
| 부록 1. KIER-TIMES ver2.1. 개요 ..... | 40 |
| 부록 2. 주요 기술 특성치에 대한 가정 .....      | 43 |
| 부록 3. 모형 구현 화면 .....              | 52 |

# 그림목차

|  |    |
|--|----|
| [그림 1] 국가 탄소중립 시나리오의 최종에너지 수요 전망 .....         | 10 |
| [그림 2] 2050년 탄소중립을 위한 일차에너지 공급 전망 .....        | 13 |
| [그림 3] 2050년 탄소중립을 위한 최종에너지 소비 전망 .....        | 14 |
| [그림 4] 2050년 탄소중립을 위한 발전용량 믹스 전망 .....         | 15 |
| [그림 5] 2050년 탄소중립을 위한 발전량 믹스 전망 .....          | 16 |
| [그림 6] 2050년 탄소중립을 위한 수소생산 기술 포트폴리오 전망 .....   | 19 |
| [그림 7] 2050년 탄소중립을 위한 수소 수요 전망 .....           | 21 |
| [그림 8] 2050년 탄소중립을 위한 열에너지 공급기술 포트폴리오 전망 ..... | 22 |
| [그림 9] KIER-TIMES 모형의 2050 탄소중립 시나리오 전망 .....  | 23 |
| [그림 10] 불확실성 고려를 위한 민감도 분석 수행 방안 .....         | 25 |
| [그림 11] 수입수소 비중 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화 .....     | 26 |
| [그림 12] 수입수소 비중 변화에 따른 발전 믹스 변화 .....          | 27 |
| [그림 13] 수전해 효율 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화 .....      | 28 |
| [그림 14] 수전해 효율 변화에 따른 발전 믹스 변화 .....           | 29 |
| [그림 15] CCUS 처리량 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화 .....    | 30 |
| [그림 16] CCUS 처리량 변화에 따른 발전 믹스 변화 .....         | 31 |
| [그림 17] 발전분야 무탄소 기술 옵션 및 제약조건 .....            | 33 |
| [그림 18] 전력과 수소 사이의 인과 다이어그램 .....              | 34 |

# 표 목차

|   |    |
|---|----|
| 〈표 1〉 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표 .....          | 8  |
| 〈표 2〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 발전기술 포트폴리오 비교 ..... | 17 |
| 〈표 3〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 분야별 전력 수요 비교 .....  | 18 |
| 〈표 4〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 수소생산 포트폴리오 비교 ..... | 20 |
| 〈표 5〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 온실가스 배출 비교 .....    | 24 |



## Executive Summary

- 지난 10월 국가 2050 탄소중립 시나리오가 의결되어 신재생에너지 중심의 A안과 화석에너지가 보다 많이 잔존하는 B안이 제시되었으나, 장기적인 관점에서의 시나리오로서 자원잠재량, 기술수준, 보급목표 등에서 많은 불확실성이 존재
- 따라서 본 고에서는 수소에너지에 초점을 맞추어 수요량, 공급방식, 기술수준 등 다양한 요인의 변화가 탄소중립에 미치는 영향을 에너지시스템 모형을 이용하여 살펴보고 이를 통하여 탄소중립을 위한 수소의 역할을 고찰
- 본 고에서는 열에너지 생산을 위한 전력소비량을 추가로 고려하여 2050년 총발전량이 국가 탄소중립 시나리오 대비 71~120 TWh 높은 1,328 TWh인 경우에 대한 분석 수행
- 전력, 수소 등 이차에너지 비중이 증가함에 따라 전환분야의 에너지소비가 증가하여, 최종에너지 소비는 2017년 대비 2050년 16% 감소하나, 일차에너지 공급은 2050년 12% 증가할 전망
- 특히 수소에너지는 2050년 일차에너지 공급의 27%, 최종에너지 수요의 25%를 차지할 것으로 분석
- 본 고에서는 국가 탄소중립 시나리오 대비 전력 수요 증가 및 재생에너지 발전량 감소를 가정함에 따라, 2050년 연료전지와 수소터빈 발전량은 470 TWh(전체 발전량의 35%)로 국가 탄소중립 시나리오 대비 약 183 TWh 가량 증가할 것으로 전망
- 수소 터빈 발전량 증가에 따라 전환분야의 수소 수요가 1,949 만톤으로 증가할 전망(국가 탄소중립 시나리오 대비 616만톤~666만톤 증가)
- 수입수소 비중이 감소하게 되면 국내 생산을 위한 전력수요가 증가하여, 수입수소 비중 74% 이하에서는 국내 무탄소 발전옵션 만으로는 전환분야 탄소중립 달성에 어려움이 발생할 전망
- 수전해 효율이 65%에서 94%로 향상되면, 총발전량은 1,410 TWh에서 1,320 TWh로 감소되고 수소 소비량은 37,573 천톤에서 33,710 천톤으로 감소될 전망
- CCUS 처리 가능량이 65백만톤 이하인 경우는 발전분야에서 화석연료 사용이 제한될 것으로 전망 되었으며, 에너지시스템 측면에서는 이산화탄소 포집 기술을 발전 분야 보다는 수소생산 분야에 도입하는 것이 효율적일 것으로 분석

- 수소는 산업분야와 수송분야의 탄소중립 뿐만 아니라 발전분야의 탄소중립을 달성하기 위한 핵심 수단이나, 그린수소의 생산 그리고 블루수소 생산과정에서 포집된 이산화탄소의 저장이나 활용을 위해서는 많은 양의 전력이 필요
- 이와 같이 전력을 이용하여 수소를 생산하고, 이를 이용하여 다시 전력을 생산하는 구조는 에너지시스템 측면에서 심각한 에너지 효율 저하를 유발하고 해외 에너지 의존도 증가를 유발할 가능성 존재
- 따라서 발전분야의 수소 이용은 탄소중립 달성 및 재생에너지 출력 변동성 대응을 위하여 필수적이나, 국가 에너지시스템의 효율향상을 위해서는 발전 분야에서의 수소 이용은 최소화하고 최종에너지 소비 분야에서의 수소 이용을 적극적으로 확대해 나가는 것이 필요
- 또한 전체적인 에너지시스템의 효율향상 및 안정성 향상을 위하여 수입수소 비중 증대, 수전해 효율 향상, CCUS 연계 개질 기술 보급 확대가 필요
- 현재 탄소중립 시나리오의 달성 가능성에 대한 논쟁이 매우 뜨거우나 탄소중립 시나리오는 구체적인 이행 계획 보다는 국가가 지향해 나가는 미래 방향성을 의미
- 따라서 시나리오의 달성 가능성에 대한 논쟁 보다는 달성하기 위한 노력에 집중할 필요가 있으며, 달성을 위한 시행착오를 최소화하기 위해서는 다양한 지표들의 불확실성들을 고려한 탄소중립 시나리오 개발과 이를 통한 대응방안 마련이 필요

# 1 서론

## ■ COP(기후변화협약)26와 글로벌 탄소중립 동향

- 11월 영국 글래스고에서 개최된 COP26에서 세계 각국이 석탄 사용의 단계적 감축 등을 포함해 기후 위기를 막기 위한 대책에 합의 (석탄의 감축을 명시한 최초의 기후협약)
- 미국 조 바이든 대통령은 지난 트럼프 행정부 시절 파리협약에서 탈퇴한 것에 대하여 사과하면서 2050까지 넷제로를 달성하고, 2030년까지 온실가스를 50~52% 감축하겠다고 선언
- 한국 문재인 대통령은 2050 탄소중립 달성을 위하여 2030 국가 온실가스 감축 목표를 2018년 대비 40%로 상향하겠다고 선언
- COP26에 불참한 중국에 대한 국제사회의 비판여론이 높으나, 중국 역시 이미 2060년 탄소중립을 선언
- COP26에서 G20 국가들의 구체적인 탄소중립 시점에 대한 합의에는 실패하였으나, 21세기 중반을 목표로 한 탄소중립 노력에는 합의
- 국제에너지기구(IEA)에서 2021년 발간한 보고서<sup>1)2)</sup>에서는 기후변화를 1.5°C 이내로 억제하기 위해서 2050년까지 탄소중립 달성 필요성을 강조
- 탄소중립은 기후변화에 대응하여 인류의 지속가능한 성장을 이루기 위한 핵심 아젠다로 자리매김

## ■ 2050 국가 탄소중립 시나리오 최종안<sup>3)</sup>

- 한국은 지난 10월 탄소중립위원회 2차 전체회의에서 국가 2050 탄소중립 시나리오 의결
- 지난 8월 탄중위가 발표한 시나리오 초안 3개 중 1안과 2안은 각각 25.4백만톤, 18.7백만톤의 국내 배출량을 남겨두고 있었으나, 최종안은 국내 배출량을 0으로 하는 두 개 안 만이 제시
- 정부의 2050 탄소중립 시나리오 A안은 화력발전이 전면 중단되는 시나리오이며, 이에 따라 전환분야에서 재생에너지의 역할이 강조되는 시나리오
  - 전체 발전량에서 재생에너지 발전량이 차지하는 비중은 70.8%(889.8 TWh)
- 최종 시나리오 B안은 A안에 비하여 화석에너지의 역할이 조금 더 큰 시나리오
  - 전환분야에서 LNG 발전이 일부 남아있으며, 수송 및 수소에너지 생산 분야에서도 A안 보다 온실가스 배출량이 높음
  - 증가한 배출량을 이산화탄소 포집 및 활용·저장(CCUS) 기술과 직접공기포집(DAC) 기술을 이용하여 상쇄 (이산화탄소 포집량: 92백만톤)
  - 전체 발전량에서 재생에너지 발전량이 차지하는 비중은 60.9%(736.0 TWh)

1) Net Zero by 2050, IEA, 2021.

2) World Energy Outlook 2021, IEA, 2021.

3) 2050 탄소중립 시나리오안, 관계부처 합동, 21.10.18.

〈표 1〉 2050 탄소중립 시나리오 최종(안) 총괄표<sup>4)</sup>(단위 : 백만톤CO<sub>2</sub>eq)

| 구분      | 부문                         | '18년  | 초안             |                |       | 최종본   |       |
|---------|----------------------------|-------|----------------|----------------|-------|-------|-------|
|         |                            |       | 1안             | 2안             | 3안    | A안    | B안    |
|         | 배출량                        | 686.3 | 25.4           | 18.7           | 0     | 0     | 0     |
| 배출      | 전환                         | 269.6 | 46.2           | 31.2           | 0     | 0     | 20.7  |
|         | 산업                         | 260.5 | 53.1           | 53.1           | 53.1  | 51.1  | 51.1  |
|         | 건물                         | 52.1  | 7.1            | 7.1            | 6.2   | 6.2   | 6.2   |
|         | 수송                         | 98.1  | 11.2<br>(-9.4) | 11.2<br>(-9.4) | 2.8   | 2.8   | 9.2   |
|         | 농축수산                       | 24.7  | 17.1           | 15.4           | 15.4  | 15.4  | 15.4  |
|         | 폐기물                        | 17.1  | 4.4            | 4.4            | 4.4   | 4.4   | 4.4   |
|         | 수소                         | -     | 13.6           | 13.6           | 0     | 0     | 9     |
|         | 탈루                         | 5.6   | 1.2            | 1.2            | 0.7   | 0.5   | 1.3   |
| 흡수 및 제거 | 흡수원                        | -41.3 | -24.1          | -24.1          | -24.7 | -25.3 | -25.3 |
|         | 이산화탄소 포집 및 활용·저장<br>(CCUS) | -     | -95            | -85            | -57.9 | -55.1 | -84.6 |
|         | 직접공기포집(DAC)                | -     | -              | -              | -     | -     | -7.4  |

#### ■ 탄소중립을 위한 시나리오 활용방안

- 시나리오는 여러 가지 전제를 바탕으로 한 미래 사회상에 대한 예측(projection)으로서 먼 미래를 정확하게 예측하기에는 한계가 존재<sup>1)</sup>)
- 또한 탄소중립 시나리오는 재생에너지, 수소에너지, CCUS 등 새로운 에너지원과 혁신 기술을 포함하고 있기 때문에 기술 수준, 보급량, 자원잠재량 등 핵심 지표들에 대한 불확실성 존재
- 따라서 탄소중립위원회를 통하여 도출된 탄소중립 시나리오만이 정답으로 인식되기 보다는 다양한 탄소중립 시나리오가 제시되어 검토·논의되는 과정이 지속적으로 필요
- 특히 핵심 지표들에 대한 민감도 분석을 통하여 다양한 위험요인이 탄소중립 달성에 미치는 영향을 분석하는 연구가 필요
- 따라서 본 고에서는 수소에너지에 초점을 맞추어 수요량, 공급방식, 기술수준 등 다양한 요인의 변화가 탄소중립에 미치는 영향을 살펴보고 이를 통하여 탄소중립을 위한 수소의 역할을 고찰하고자 함

4) 2050 탄소중립 시나리오안, 관계부처 합동, 21.10.18.

## 2 분석 방법론 및 주요 전제조건

### ■ 분석범위

- 분석대상 온실가스: 에너지 연소에 의한 이산화탄소 배출
  - 산업공정 배출, 메탄, 불화가스 등 기타 온실가스 미고려
- 2017년 기준 모형의 이산화탄소 배출량은 676백만톤으로 국가 총배출량의 95%에 해당
- 분석대상 분야: 발전, 수소, 열, CCUS 등 에너지 공급 및 전환 분야
  - 농축수산, 폐기물, 탈루, 흡수원 미고려
- 2017년 기준 에너지 공급 및 전환분야의 배출량은 277백만톤으로 모형 배출량의 41%에 해당

### ■ 분석방법론

- 본 고에서는 KIER-TIMES ver2.1. 모형을 이용하여 에너지 공급 및 전환분야에 대한 탄소중립 시나리오를 개발 (부록 1 참고)<sup>5)</sup>
- KIER-TIMES 모형은 국가의 확정된 정책 및 계획을 베이스라인 시나리오에 반영하며, 이에 따라 가능한 범위 내에서 탄소중립 시나리오 B안과 주요 전제조건을 통일
- 그러나 KIER-TIMES 모형은 상향식 에너지시스템 모형으로서 개별 기술 단위의 특성치(효율, 가동율, 비용, 수명 등)를 요구하며, 최적화 방법론에 기반하여 기술 및 에너지원의 조합을 도출하기 때문에 국가 탄소중립 시나리오와는 차이가 존재
- 따라서 KIER-TIMES 모형은 국가 탄소중립 시나리오를 재현하기 위한 모형이 아니며, 국가 탄소중립 시나리오와의 비교 또는 추가적인 분석결과 도출을 통하여 새로운 시사점을 도출하기 위한 방법론임

5) 분석방법론에 대해서 보다 상세한 내용은 30페이지에 제시된 국내 참고문헌 [19], [20]을 참고

■ 주요 전제조건

[최종에너지 수요]

- 최종에너지 수요전망은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 최종에너지원별 에너지 수요에 따라 정의(그림 1)
  - 석유제품에서 원료용 제품(납사) 비중은 2017년 비중인 51.6%가 유지된다고 가정
  - 열에너지에서 산업용 비중은 2017년 비중인 75.6%가 유지된다고 가정

[그림 3-3] 2018년 대비 2050년 최종에너지원별 에너지 수요



[그림 1] 국가 탄소중립 시나리오의 최종에너지 수요 전망

[발전설비 용량]

- 2034년까지의 발전설비 증설 및 폐기 계획은 제9차 전력수급기본계획<sup>6)</sup>을 반영
- 2035년 이후 원자력, 석탄, 석유 발전은 신규 건설 없이 수명에 따른 폐지만을 고려

[재생에너지]

- 재생에너지는 신재생에너지 백서<sup>7)</sup>의 시장 잠재량을 보급 상한으로 정의
  - 태양광 369 GW, 육상풍력 24 GW, 해상풍력 41 GW
- 2050년 재생에너지 이용율은 신재생에너지 백서를 기반으로 추정
  - 태양광 15.6%, 육상풍력 25.9%, 해상풍력 33.1%

6) 제9차 전력수급기본계획, 산업통상자원부, 2020.

7) 2020 신재생에너지백서, 한국에너지공단, 2021.

**[원자력발전]**

- 원자력 발전 이용율은 자체적인 전문가 및 문헌 조사 결과를 반영하여 78.5%로 가정
  - 국가 탄소중립 시나리오 A안에서는 77%, B안에서는 87%를 가정

**[수소에너지]**

- 수입수소의 최대 비중은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 수입수소 비중인 82%로 제약
- 그린수소의 최소 비중은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 그린수소 비중인 11%로 제약
- 부생수소 공급량은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 백만톤으로 정의
- 수전해를 이용한 수소생산 효율은 국가 탄소중립 시나리오에 따라 43 kWh/kg-H<sub>2</sub>로 정의
- 수소저장방식은 고압기체 저장만을 고려(저장효율 96.49%)<sup>8)</sup>
- 수소이송방식은 파이프라인 이송만을 고려(이송효율 99.39%)<sup>9)</sup>
- 수입수소의 기체 전환 에너지는 미고려

**[CCUS]**

- CCUS 최대 처리량은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 8,500만톤으로 제약
- 국가 탄소중립 시나리오의 산업분야 이산화탄소 배출량을 고려하여 8,500만톤 중 5,110만톤은 산업분야에서 포집되는 것으로 정의
- 저장과 활용의 비율은 국가 탄소중립 시나리오에 따라 2:1로 정의
- CCUS에 필요한 전력, 수소 수요는 국가 탄소중립 시나리오에 따라 정의
  - CCS 전력소모량: 1.1 MWh/tCO<sub>2</sub>, CCU 전력소모량: 3.6 MWh/tCO<sub>2</sub>
- DAC는 미고려

**[열에너지]**

- 히트펌프 기술이 주거용 저온열 뿐만 아니라 산업단지 중고온열 생산 기술에 활용가능하다고 가정

**[에너지 수출입]**

- 전력 수입량은 국가 탄소중립 시나리오 B안에 따라 33.1 TWh로 정의
- 열에너지의 수출입은 없다고 가정

**[이산화탄소 배출]**

- 2050년 전력, 수소, 열 생산을 위한 이산화탄소 배출량은 0으로 제약

8) 수소생산 전과정 평가, 수소융합얼라이언스추진단, 2019.

9) 수소생산 전과정 평가, 수소융합얼라이언스추진단, 2019.

### 3 2050 탄소중립을 위한 수소에너지의 역할

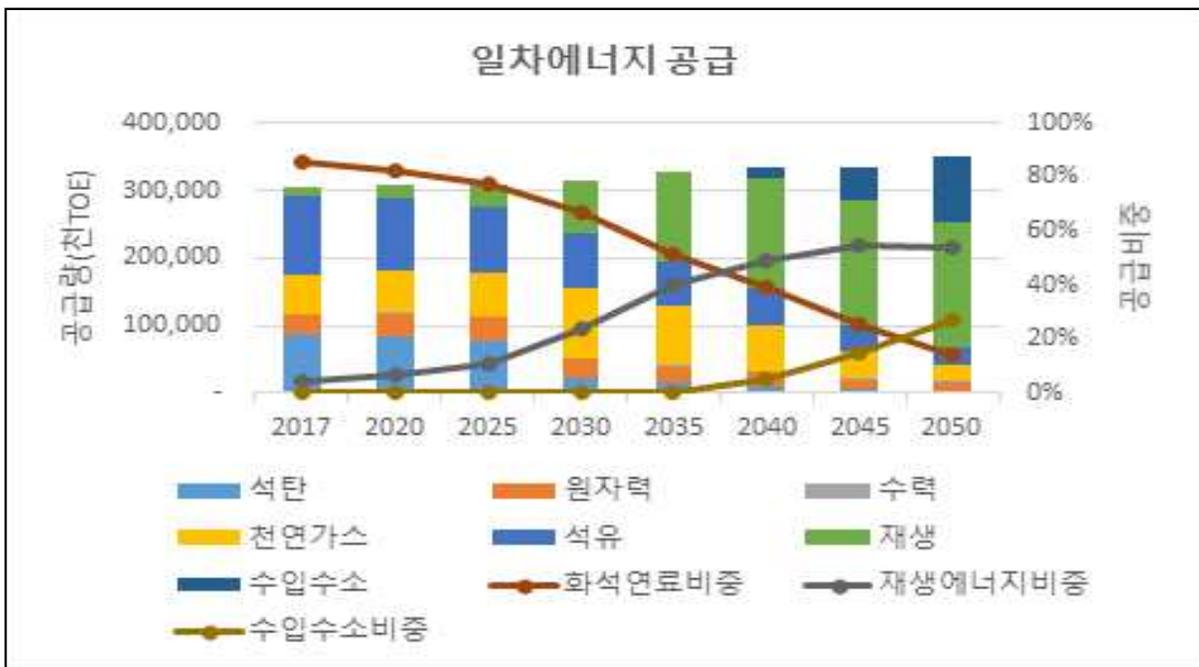
#### ■ 수소에너지의 역할 분석 개요

- 앞서 분석의 주요 전제조건에서 언급한 바와 같이 국가 탄소중립 시나리오 B안에서 정의된 최종에너지 원별 에너지 수요와 동일한 수요를 기준으로 수소에너지의 역할을 분석
- 그러나 전력에너지의 경우 국가 탄소중립 시나리오에서는 산업/건물/수송/농축수산 외에도 수소생산과 CCUS를 위한 전력소비량이 최종에너지 수요에 포함되어 있으나, 본 연구에서는 이는 최종에너지 분야가 아닌 전환분야에서 고려(표 3)
- 또한 국가 탄소중립 시나리오에서는 최종에너지원 중 열에너지의 공급기술에 대한 명확한 언급이 없어, 본 연구에서는 2050년 전환분야 탄소중립 달성을 위하여 전력을 이용하여 열을 생산하는 기술인 히트 펌프가 기존의 열 생산기술을 완전 대체하는 것으로 가정
- 이에 따라 국가 탄소중립 시나리오 보다 전력 수요가 증가하는 경우의 수소에너지 역할에 대한 분석 수행
- 다만 수소에너지 역할의 변화는 전력 수요 변화 뿐만 아니라, 재생에너지 잠재량, 태양광/풍력 출력 변동성, 시간대별 전력 수요 패턴, 발전기술별 부하 추종성, 수소생산기술 포트폴리오 등 국가 탄소중립 시나리오에서 명시적으로 제시되지 않은 다양한 기술 특성치들에 대한 가정의 차이 그리고 기술과 에너지원의 조합을 도출하는 방법론의 차이로 인하여 발생

■ 일차에너지 공급과 최종에너지 수요

[일차에너지 공급]

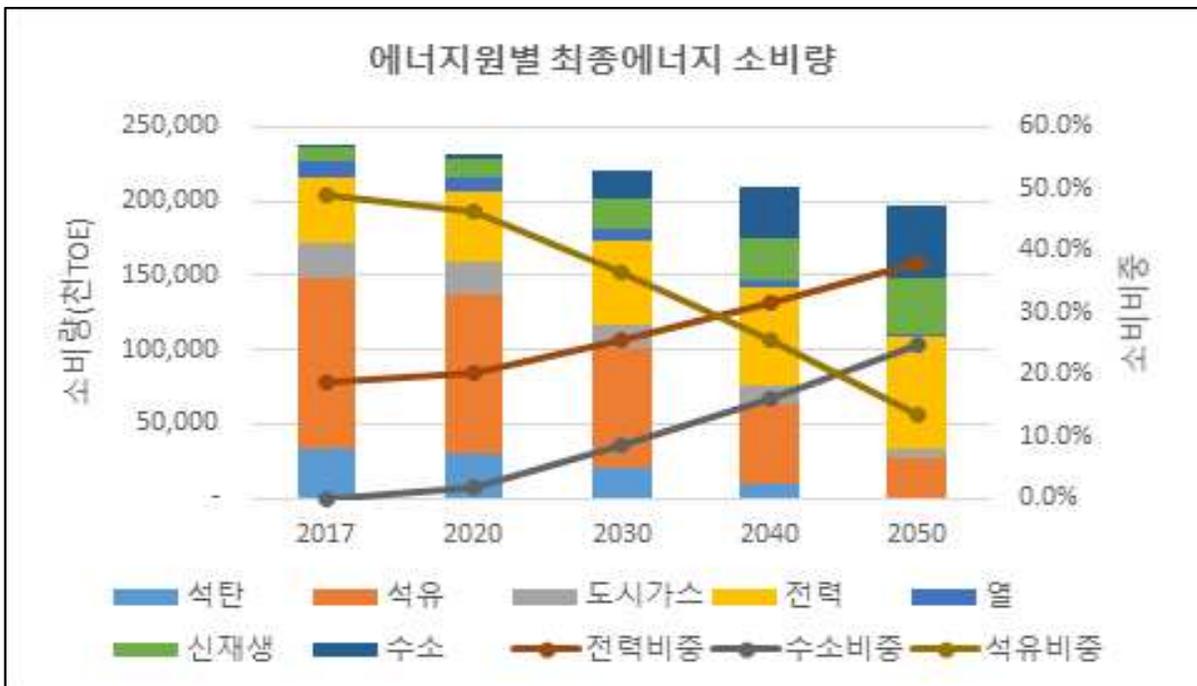
- 2017년 86%를 차지하는 석탄, 석유, 천연가스의 일차에너지 비중은 2050년 14%로 감소하고, 재생에너지와 수입수소의 비중이 5%에서 81%로 증가할 전망
- 특히 수입 수소는 2040년 이후부터 급격하게 증가하여 2050년 일차에너지 공급의 27%를 차지할 전망



[그림 2] 2050년 탄소중립을 위한 일차에너지 공급 전망

[최종에너지 수요]

- 최종에너지 수요는 국가 탄소중립 시나리오 B안에 따라 정의하였기 때문에 동일한 결과 도출
  - 전력의 경우 국가 탄소중립 시나리오는 전력소비량에 수소생산 및 CCUS를 위한 전력소비량이 포함되어 있으나 이를 제외하고, 산업, 건물, 수송, 농축수산 분야의 전력소비량인 75.3 백만TOE를 최종 에너지 수요로 반영
- 2017년 73%를 차지하는 석탄, 석유, 도시가스의 최종에너지 비중은 2050년 17%로 감소하고, 전력, 재생에너지와 수소의 비중이 23%에서 82%로 증가할 전망
- 수소는 2050년 최종에너지 수요의 25%를 차지하여 전력 다음으로 가장 많이 사용되는 에너지원이 될 전망<sup>10)</sup>



[그림 3] 2050년 탄소중립을 위한 최종에너지 소비 전망

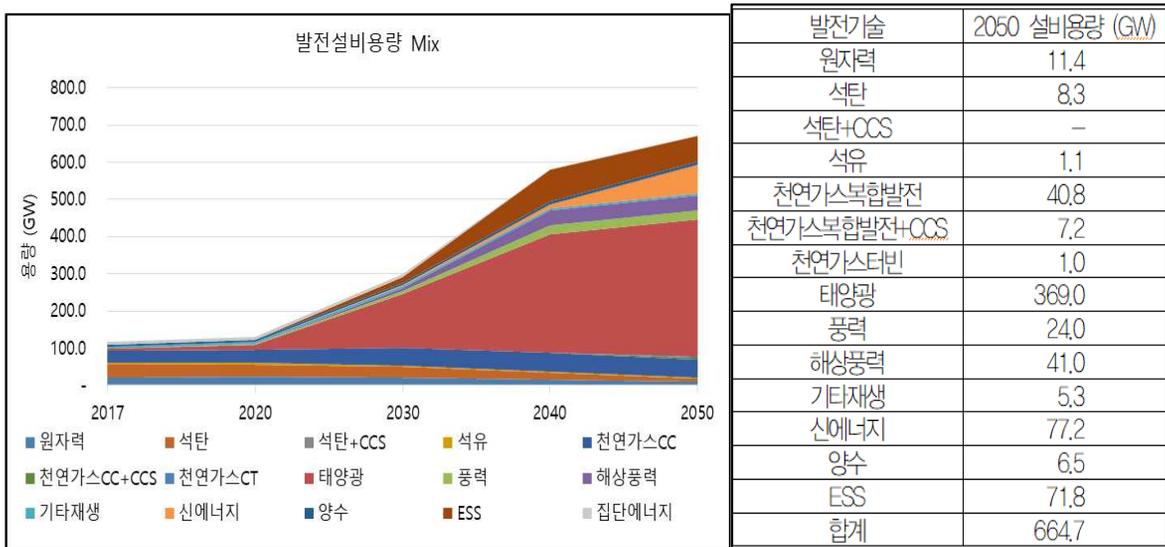
- 전력, 수소 등 이차에너지 비중이 증가함에 따라 전환분야의 에너지소비가 증가하여, 최종에너지 소비는 2017년 대비 2050년 16% 감소하나, 일차에너지 공급은 2050년 12% 증가할 전망
- ☞ 발전, 수소 생산 등 전환 분야에서의 효율향상 기술 개발 중요

10) 최종에너지 수요 부분의 수소 소비량은 산업, 건물, 수송, 농축수산 외에 CCUS를 위한 소비량까지 포함

■ 전력 분야

[발전설비 용량]

- 발전설비용량은 2017년 118.3 GW 규모에서 2050년 664.7 GW 규모로 약 5.6배 증가 전망
- 발전설비용량의 증가는 전력 수요 증가 외에도 가동율이 낮은 재생에너지 발전설비 비중의 증가가 주요 원인
- 2050년 발전분야 탄소중립 달성을 위하여 태양광, 육상풍력, 해상풍력 발전은 신재생에너지백서의 시장잠재량을 기반으로 설정한 최대 보급 가능량에 대한 전제조건에 따라 보급 (태양광 369 GW, 육상 풍력 24 GW, 해상풍력 41 GW)
  - 2050년 재생에너지 발전설비 용량은 2017년 대비 42.6배 증가
- 수소터빈과 연료전지로 구성되는 신에너지 발전설비는 2050년 77.2 GW까지 증가
  - 2050년 신에너지 발전설비 용량은 2017년 천연가스 발전설비 용량(31.8 GW)의 2.4배
- 석탄 발전은 2050년 8.3 GW의 잔존 설비가 존재하나 발전분야 탄소중립을 위해서 가동이 제한될 전망
- 천연가스 복합발전 설비는 2050년 48 GW의 잔존 설비가 존재하며, 이중 7.2 GW는 CCS 설비 도입을 통하여 지속적으로 가동될 전망<sup>11)</sup>
- 재생에너지를 이용한 수전해 기술과 부하추종성이 높은 수소터빈의 보급 확대가 재생에너지 출력 변동성 대응에 기여함에 따라 2050년 ESS 설비 용량은 71.8 GW에 그칠 것으로 전망



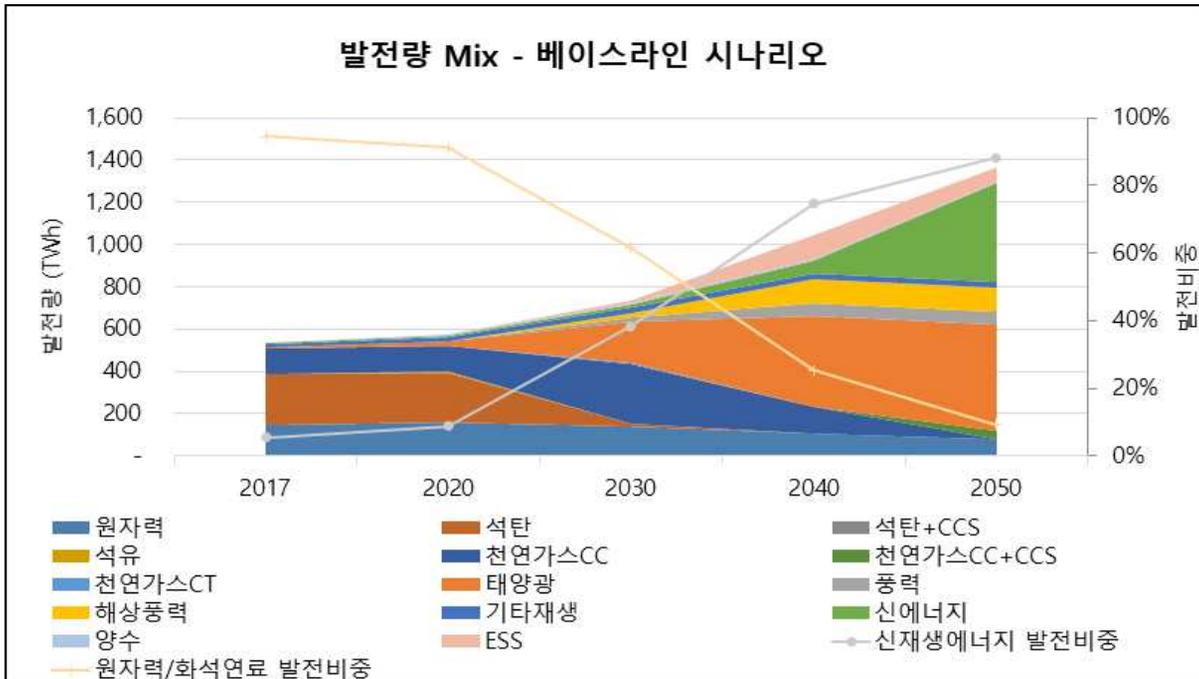
[그림 4] 2050년 탄소중립을 위한 발전용량 믹스 전망

☞ 수소 이용 발전기술은 2050년 발전량에서 큰 비중을 차지할 뿐만 아니라 ESS와 함께 부하변동 대응에서도 큰 역할을 수행할 전망

11) 신규 건설 LNG 발전소는 CCS ready 상태로 건설되어 CCS를 위한 별도의 LNG 발전소가 건설되지는 않는다고 가정

[발전량]

- 발전량<sup>12)</sup>은 2017년 534 TWh 규모에서 2050년 1,328 TWh 규모로 약 2.5배 증가 전망
- 2017년 전체 발전량의 94%를 차지하는 원자력, 석탄, 천연가스 발전량은 2050년 9%로 감소
- 2017년 전체 발전량의 5%를 차지하는 신재생에너지 발전량은 2050년 88%로 증가



[그림 5] 2050년 탄소중립을 위한 발전량 믹스 전망

- KIER 탄소중립 시나리오는 국가 탄소중립 시나리오 대비 총 발전량이 6~10% 높음<sup>13)</sup>
- 원자력 발전량의 차이는 전제조건에서 기술된 바와 같이 이용율에 대한 가정 차이에서 발생
- B안에 비하여 LNG 발전량이 감소한 이유는 이산화탄소 저장 및 활용 가능성이 제약된 상황에서 수소 생산 분야의 이산화탄소 포집량 증가로 발전분야에서 포집 가능한 이산화탄소가 감소하였기 때문
- 재생에너지 발전량은 설비용량과 가동율에 대한 전제조건 내에서 최대한으로 전력을 생산하였으나 국가 탄소중립 시나리오 보다 낮음<sup>14)</sup>
- 동북아 그리드는 국가 탄소중립 시나리오 B안에서 정의한 33.1 TWh와 동일하며, 부생가스 발전기술은 KIER-TIMES 모형에서 반영하지 못하였음

12) 양수발전 및 ESS 발전량 제외, 동북아 그리드를 통한 수입 전력량 포함

13) 총발전량 증가 이유는 열에너지 생산을 위한 히트펌프 보급을 고려하였기 때문

14) 국가 탄소중립 시나리오는 신재생에너지백서 보다 더 높은 보급 잠재량 또는 가동율을 전제하였다고 판단

- 2050년 연료전지와 무탄소 가스터빈 발전량은 470 TWh(전체 발전량의 35%)로 국가 탄소중립 시나리오 대비 약 183 TWh 가량 증가
  - 수소 가스 터빈이 연료전지에 비하여 부하변동에 대응이 용이하다고 전제<sup>15)</sup>하였기 때문에 가스터빈이 큰 폭으로 증가
- 원자력, 재생에너지, CCS가 설치된 천연가스 발전 기술 모두가 용량 상한에 대한 제약조건 때문에 더 이상 보급될 수 없어 증가한 전력 수요를 수소 이용 발전 기술이 공급하는 결과 도출

〈표 2〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 발전기술 포트폴리오 비교

(단위: TWh)

| 발전기술               | 탄소중립 시나리오 A 안 | 탄소중립 시나리오 B 안 | KIER-TIMES 결과 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| 원자력                | 76.9          | 86.9          | 78.4          |
| 석탄                 | -             | -             | -             |
| LNG <sup>16)</sup> | -             | 61.0          | 43.7          |
| 재생에너지              | 889.8         | 736.0         | 702.7         |
| 연료전지               | 17.1          | 121.4         | 39.3          |
| 무탄소 가스터빈           | 270.0         | 166.5         | 431.1         |
| 동북아그리드             | -             | 33.1          | 33.1          |
| 부생가스               | 3.9           | 3.9           | -             |
| 합계                 | 1,257.7       | 1,208.8       | 1,328.3       |

- ☞ 수소 이용 발전기술은 국가 탄소중립 시나리오 전망 이상으로 전력 수요가 증가하였을 때 이에 대응하기 위한 핵심 기술
- ☞ 그러나 전력을 이용하여 수소를 생산하고, 이를 이용하여 다시 전력을 생산하는 기술의 보급 확대는 국가 에너지 시스템의 효율성 저하와 에너지 해외 의존도 증가를 유발할 가능성 존재

15) 국가 탄소중립 시나리오에서도 재생에너지 발전량이 높고 부하 추종 운전이 가능한 천연가스 발전량이 0인 A안이 B안 대비 연료전지는 감소하고 수소 가스 터빈은 증가하는 결과 제시

16) 이산화탄소 포집설비가 설치된 LNG 발전임

[전력 소비]

- 최종에너지 수요는 국가 탄소중립 시나리오 B안에 따라 정의하였기 때문에 최종에너지 소비 분야에서의 전력 소비량은 동일
- 수소생산, CCUS, 열생산으로 구성되는 전환 분야에서의 전력소비량은 KIER-TIMES 모형 결과와 국가 탄소중립 시나리오 사이에 차이가 존재
- 수전해를 통한 수소 생산량이 시나리오별로 상이하기 때문에, 수소생산을 위한 전력소비량은 국가 탄소중립 시나리오 A안과 B안 사이로 도출
- CCUS를 위한 전력소비량은 국가 탄소중립 시나리오 A안이 가장 낮는데, 그 이유는 A안은 발전 및 수소생산 분야에서 탄소포집 기술이 적용되지 않는 것을 전제하여, 산업분야 이산화탄소 배출량인 5,110만톤 가량만 저장하거나 활용하기 때문
- KIER-TIMES 모형은 열에너지 생산 분야의 탄소중립을 위하여 히트펌프 기술이 보일러 기술을 100% 대체한다고 가정하였기 때문에, 열에너지 생산을 위한 전력 소비가 발생
- 2017년은 최종에너지 소비분야에서의 전력소비가 대부분을 차지하나, 2005년에는 69%로 감소하고 전환 분야에서의 전력소비가 전체의 31%를 차지할 전망
- ☞ 수소생산과 CCUS를 위한 전력소비량이 건물과 수송 분야의 전력수요를 합산한 수준으로 증가할 전망
- ☞ 수소생산, CCUS 등 전환분야의 효율향상 기술개발이 매우 중요

〈표 3〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 분야별 전력 수요 비교

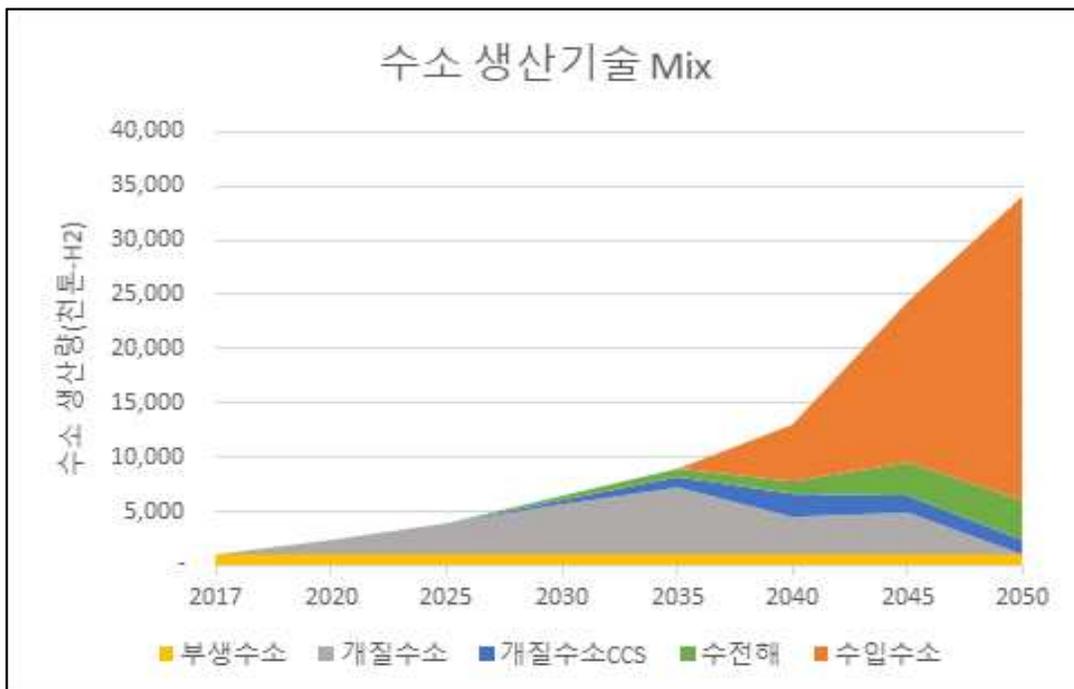
(단위: TWh, %)

| 분야              |      | 탄소중립 시나리오 A 안 | 탄소중립 시나리오 B 안 | KIER-TIMES 결과 |       |       |     |       |
|-----------------|------|---------------|---------------|---------------|-------|-------|-----|-------|
| 최종<br>에너지<br>소비 | 산업   | 877.1         | 503.6         | 876.0         | 503.6 | 876.0 | 69% |       |
|                 | 수송   |               | 71.3          |               |       |       |     | 70.2  |
|                 | 건물   |               | 277.1         |               |       |       |     | 277.1 |
|                 | 농축수산 |               | 25.1          |               |       |       |     | 25.1  |
| 수소생산            |      | 235.3         | 129.0         | 178.9         | 14%   |       |     |       |
| CCUS            |      | 101.3         | 161.5         | 164.3         | 13%   |       |     |       |
| 열생산             |      |               |               | 58.6          | 5%    |       |     |       |
| 합계              |      | 1,213.7       | 1,166.5       | 1,277.8       | 100%  |       |     |       |

■ 수소 및 열에너지 분야

[수소 생산]

- KIER-TIMES 모형의 수소생산기술 포트폴리오는 앞서 2장에서 기술된 전제조건에 의하여 결정
  - 수입수소의 최대 비중은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 수입수소 비중인 82%로 제약
  - 그린수소의 최소 비중은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 그린수소 비중인 11%로 제약
  - 부생수소 공급량은 국가 탄소중립 시나리오 B안의 1백만톤으로 정의
- ☞ 열에너지 생산을 위한 전력 수요 증가가 수소 터빈 발전량 증가로 이어짐에 따라 수소 공급량이 국가 탄소중립 시나리오보다 616~666 만톤 증가
- 수입수소에 의한 공급량은 27.9백만톤으로 전망
  - 2011년부터 2020년까지 10년간 천연가스 수입량은 매년 33백만톤에서 44백만톤 사이<sup>17)</sup>
- ☞ 그린수소 공급량은 최소 비중 제약 이상 증가하지 않는 것으로 보아, 그린수소에 비하여 블루수소의 비용 경쟁력이 높은 것으로 판단<sup>18)</sup>



[그림 6] 2050년 탄소중립을 위한 수소생산 기술 포트폴리오 전망

17) 자료출처: 천연가스 수입량 증가세로 바뀌나, 에너지신문, 2021.03.11.

(<https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=75639>)

18) 국제에너지기구(IEA)에서도 이산화탄소 포집비용을 고려하는 경우에도 천연가스 개질을 이용한 수소생산 기술이 수전해를 이용한 수소생산 기술에 비하여 비용경쟁력이 높을 것이라는 전망 제시 (자료출처: The Future of Hydrogen, IEA, 2019.)

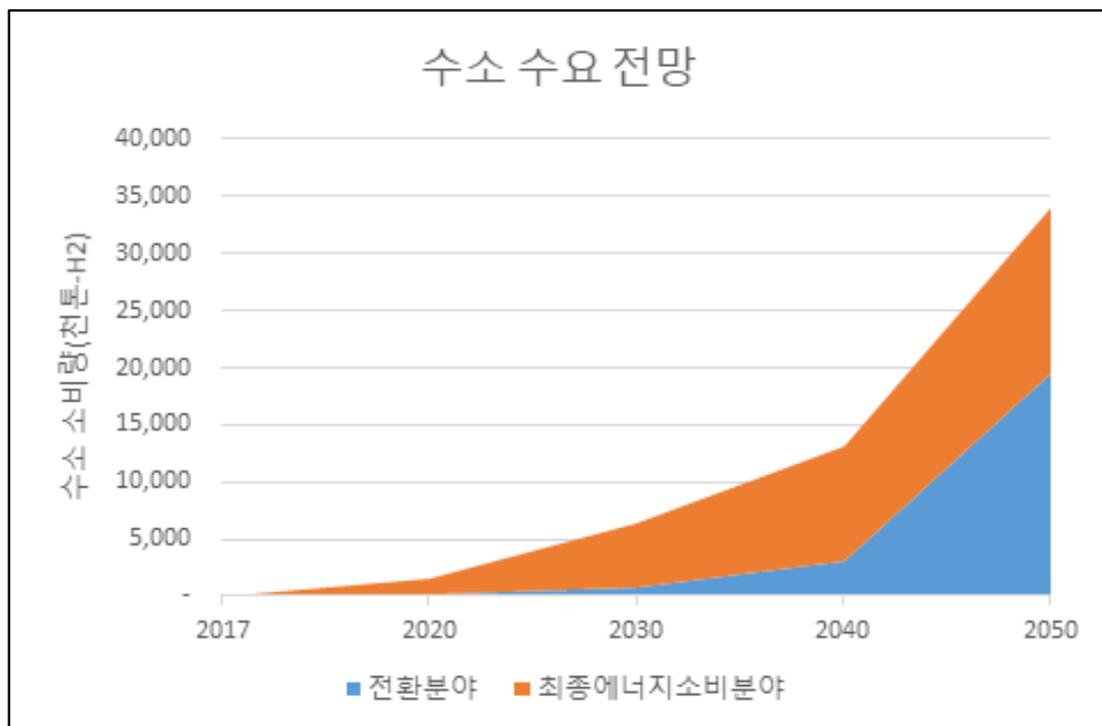
〈표 4〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 수소생산 포트폴리오 비교

(단위: 백만톤, %)

| 생산방식 | 탄소중립 시나리오 A 안 |       | 탄소중립 시나리오 B 안 |       | KIER-TIMES 결과 |       |
|------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
|      | 량             | 비율    | 량             | 비율    | 량             | 비율    |
| 수입수소 | 21.9          | 79.9% | 22.9          | 82.1% | 27.9          | 82.0% |
| 그린수소 | 5.5           | 20.1% | 3.0           | 10.8% | 3.7           | 11.0% |
| 블루수소 | -             | -     | 1.0           | 3.6%  | 1.4           | 4.1%  |
| 부생수소 | -             | -     | 1.0           | 3.6%  | 1.0           | 2.9%  |
| 합계   | 27.4          |       | 27.9          |       | 34.1          |       |

## [수소 소비]

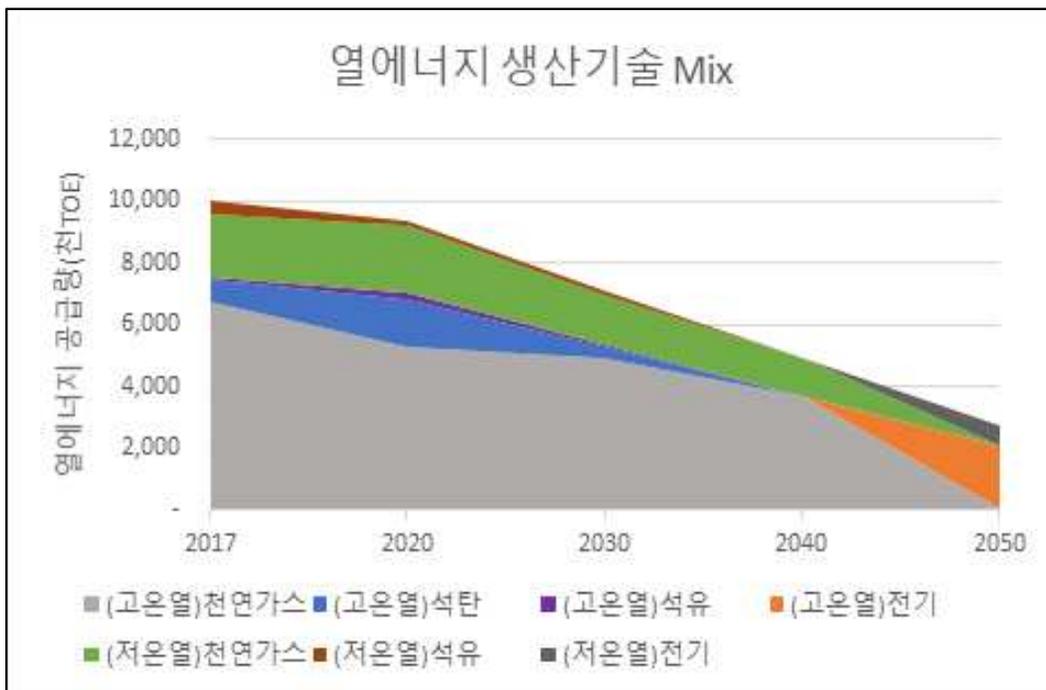
- 국가 탄소중립 시나리오 B안에서는 전환분야에서 1,350만톤, 산업/수송/농축수산/CCUS 분야에서 1,440만톤에 수요가 있을 것으로 전망
  - 산업/수송/농축수산/CCUS 분야의 수소 수요는 국가 탄소중립 시나리오와 동일하다고 가정
- ☞ KIER-TIMES 모형은 수소터빈 발전량이 증가함에 따라 전환분야의 수소수요가 1,949만톤까지 증가할 것으로 분석



[그림 7] 2050년 탄소중립을 위한 수소 수요 전망

[열에너지 생산]

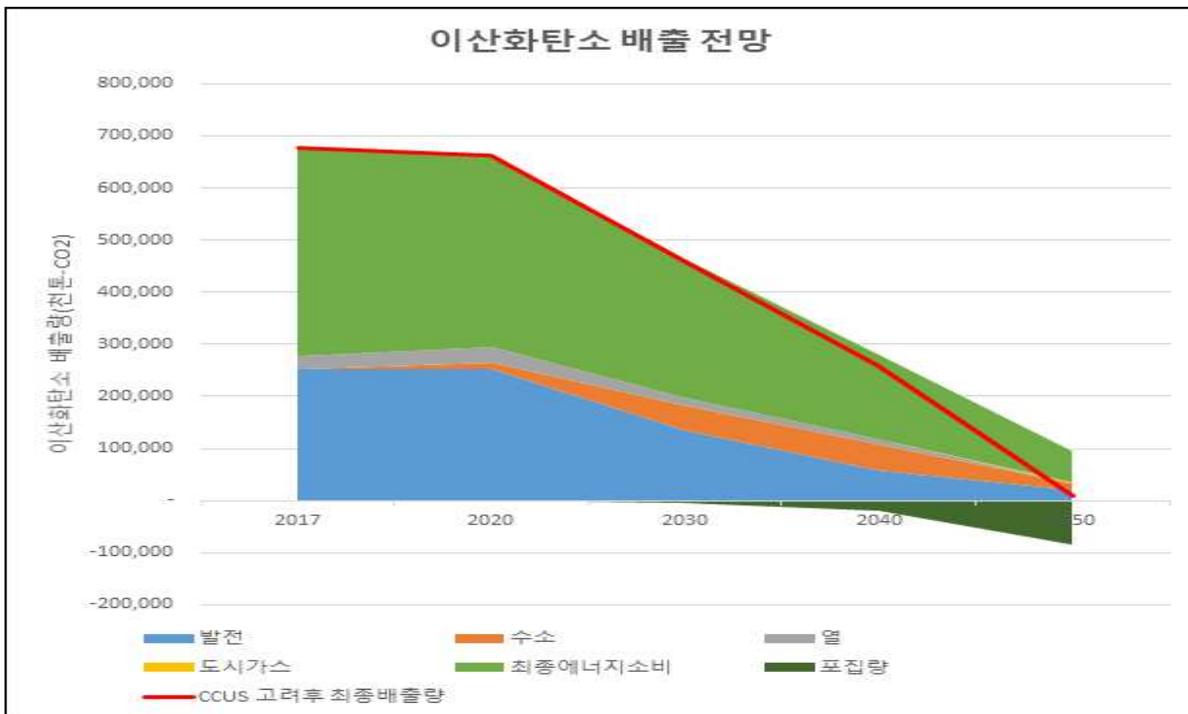
- 본 고에서는 히트펌프 기술이 기존의 열 생산 기술을 대체하여 2050년에는 열에너지 생산 분야에서 전력에너지가 유일한 에너지원이 되는 것으로 가정
  - 열에너지 생산 분야의 탄소중립을 위한 기술 대안으로는 히트펌프 외에 전기히터, 수소히터 등 다양한 옵션이 존재하기 때문에 추후 이들을 고려한 상세한 연구 필요



[그림 8] 2050년 탄소중립을 위한 열에너지 공급기술 포트폴리오 전망

■ 이산화탄소 배출

- 본 고에서는 전력수요가 국가 탄소중립 시나리오보다 71~120 TWh 높은 경우를 가정하여 전환분야의 탄소중립 시나리오를 도출
- 2050년 최종에너지 소비분야와 전환분야에서 8,500만톤의 이산화탄소가 배출될 전망이나 CCUS 기술을 통하여 에너지 시스템 전 분야의 탄소중립을 달성할 수 있을 것으로 전망<sup>19)</sup>
- 재생에너지, 원자력, CCUS, 동북아그리드와 같은 무탄소 발전 옵션의 추가적인 용량 확대가 제한된 상황인 경우, 발전분야 탄소중립 달성을 위해서는 수소 이용 발전기술의 발전량이 전체 발전량의 35% 수준까지 증가되어야 한다고 분석
- 수소 이용 발전기술의 증가는 수소 생산을 위한 에너지 소비를 동반하지만, 전체 수소 공급량의 82%를 수입수소로 공급하는 경우, 수소 생산 분야의 탄소중립이 가능할 것으로 전망



[그림 9] KIER-TIMES 모형의 2050 탄소중립 시나리오 전망

19) 최종에너지소비 분야에서의 이산화탄소 배출량은 국가 탄소중립 시나리오 B안에서 제시된 원별 최종에너지소비량에 원별 배출계수를 곱하여 산출된 추정치

- KIER-TIMES 모형은 에너지 연소에 의한 이산화탄소 배출을 분석대상으로 하는 모형으로 산업 공정배출, 농축수산, 폐기물, 탈루 분야에서 발생하는 이산화탄소 외의 온실가스는 분석대상에 미포함<sup>20)</sup>
- 분석대상에 미포함된 온실가스 배출량은 흡수원을 통하여 상쇄될 수 있을 때 국가 차원의 탄소중립 달성이 가능

〈표 5〉 국가 탄소중립 시나리오와 2050년 온실가스 배출 비교

(단위: 백만톤-CO<sub>2</sub>eq)

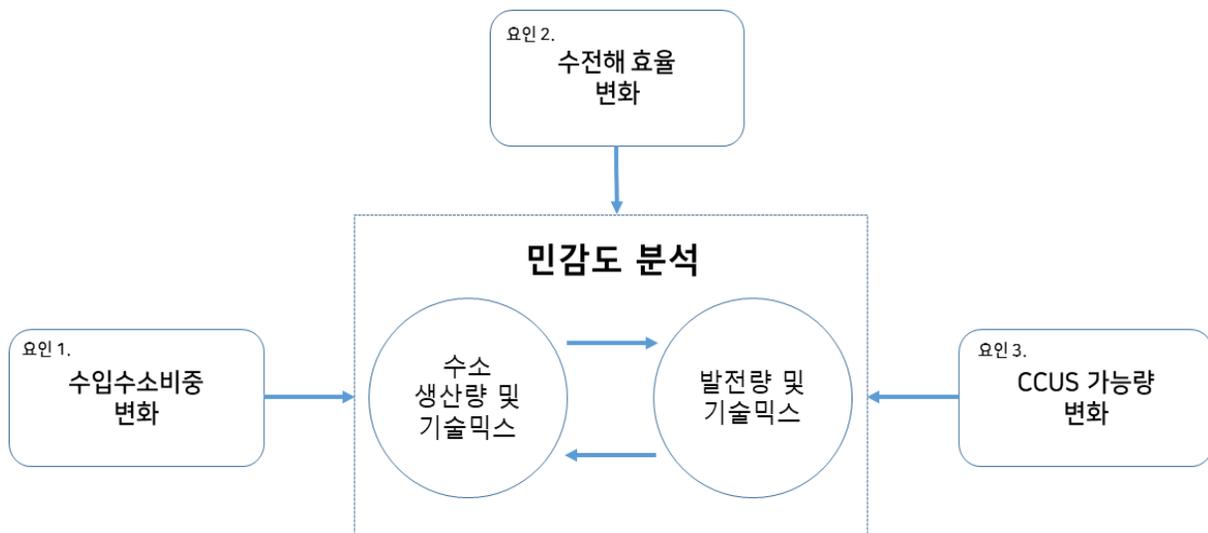
| 분야   | 탄소중립 시나리오 A 안 | 탄소중립 시나리오 B 안 | KIER-TIMES 결과 |
|------|---------------|---------------|---------------|
| 전환   | 0             | 20.7          | 20.9          |
| 산업   | 51.1          | 51.1          | 59.9          |
| 건물   | 6.2           | 6.2           |               |
| 수송   | 2.8           | 9.2           |               |
| 농축수산 | 15.4          | 15.4          | 미고려           |
| 폐기물  | 4.4           | 4.4           | 미고려           |
| 수소   | 0             | 9             | 13            |
| 탈루   | 0.5           | 1.3           | 미고려           |
| 흡수원  | -25.3         | -25.3         | 미고려           |
| CCUS | -55.1         | -84.6         | -85           |
| DAC  | 0             | -7.4          | 미고려           |

20) 전력, 수소 및 열에너지의 생산과 공급 분야는 에너지시스템 분석 모형을 이용하여 세부 기술들의 구성, 가동율, 효율 등을 고려하여 분석하였으며, 산업, 건물 및 수송으로 구성되는 최종에너지 소비 분야는 국가 탄소중립 시나리오 B안에서 제시된 원별 최종에너지소비량을 기준으로 이산화탄소 배출량만을 추정

## 4 불확실성에 따른 수소에너지 역할의 변화

### ■ 불확실성 고려 방안

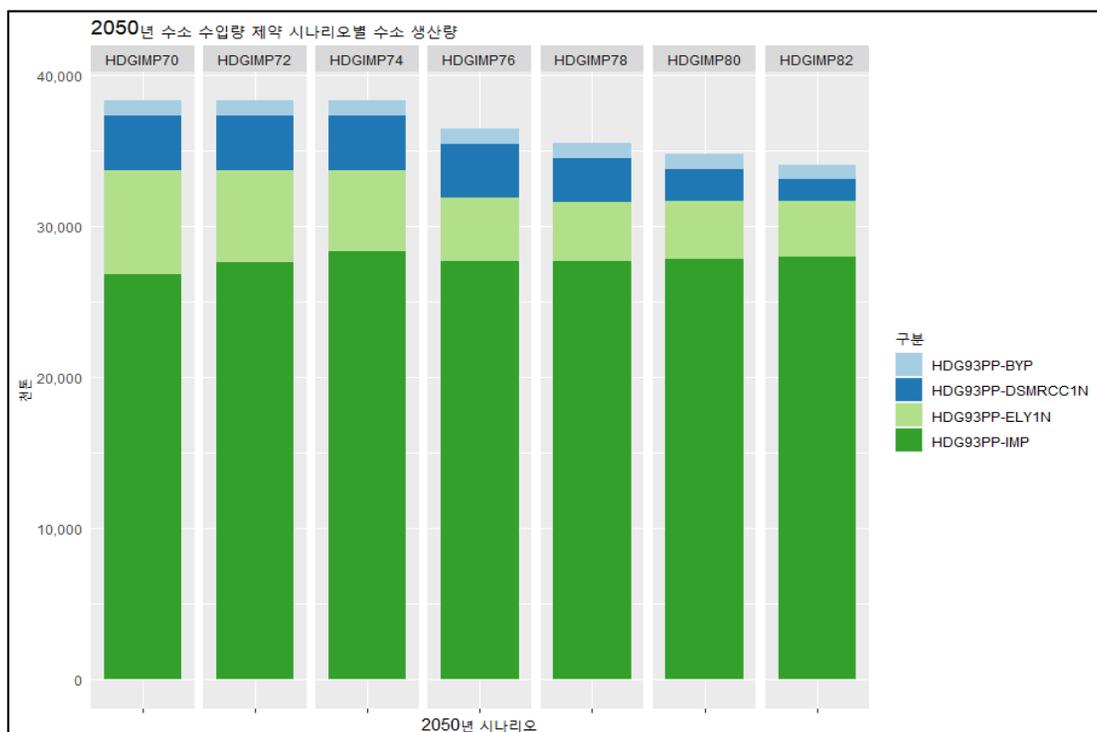
- 3 장에서는 전력 수요가 국가 탄소중립 시나리오보다 높은 경우를 가정하여 전환분야의 탄소중립 시나리오를 도출
- 그러나 전력 수요 외에도 재생에너지 자원 잠재량, 이산화탄소 저장 및 활용 가능량, DAC 기술 상용화 가능성, 수입 수소 비중, 동북아 그리드 현실화 가능성 등 탄소중립 달성을 위하여 고려해야 할 불확실성 요인들은 다양하게 존재
- 따라서 4 장에서는 다양한 불확실성 요인 중 수소에너지와 연관성이 높은 수입 수소 비중, 수전해 효율, 이산화탄소 저장 및 활용 가능량에 대한 민감도 분석을 통하여 탄소중립 달성을 위한 시사점 도출



[그림 10] 불확실성 고려를 위한 민감도 분석 수행 방안

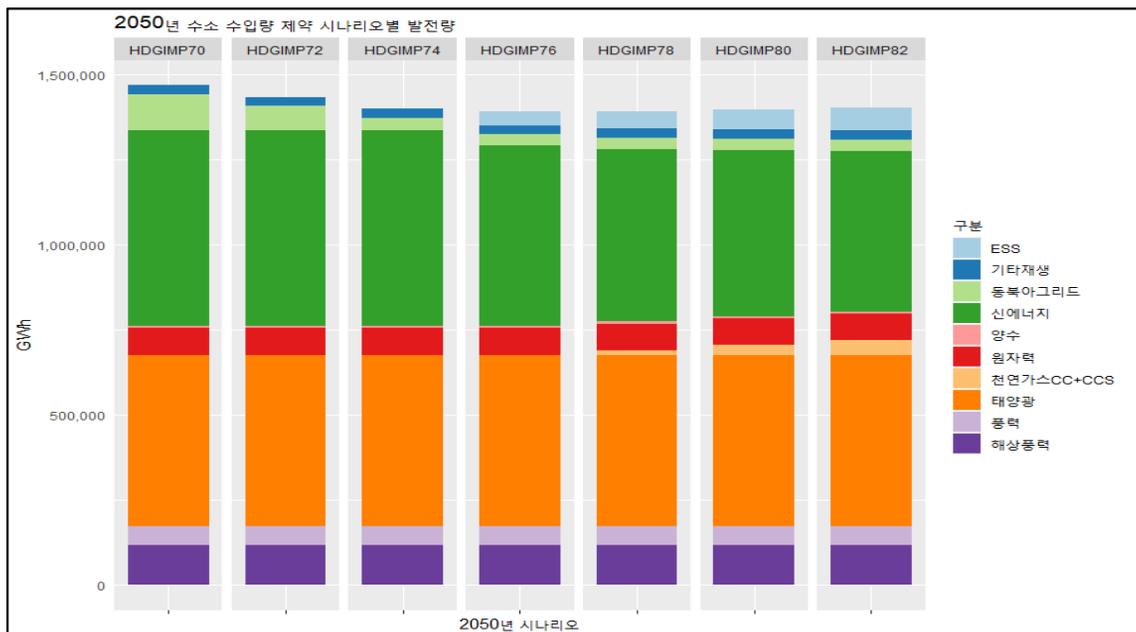
■ 수입수소 비중에 대한 민감도 분석

- 3장에서는 국가 탄소중립 시나리오를 고려하여 전체 수소 공급량에서 수입수소의 최대 비중을 82%로 제약
  - 그러나 지나치게 높은 수입수소 비중은 에너지 해외 의존도를 높이고, 이에 따른 수급 불안정성 증가와 같은 부작용 발생 가능
  - 따라서 최대 수입수소 비중에 대한 제약을 점차 낮추어가며, 이에 따른 국가 에너지시스템 측면의 영향을 분석
  - 최대 수입수소 비중을 82%에서 70%까지 2%씩 낮추어 가며 민감도 분석 수행한 결과, 82%에서 76%까지는 블루수소 공급량이 증가하고, 76%에서 70%까지는 그린수소 공급량이 증가
    - 이는 블루수소의 가격경쟁력이 그린수소보다 높기 때문
  - 최대 수입수소 비중 82%에서 34,085천톤 규모인 수소 공급량은 74%에서 38,311천톤까지 지속적으로 증가
    - 블루수소가 증가하는 영역에서 수소 공급량이 증가하는 이유는, 수소생산 분야에서 이산화탄소 포집량이 증가함에 따라 발전 분야에서 이산화탄소 포집량이 감소하게 되고, 이에 따라 수소터빈과 같은 수소 이용 발전량이 증가하기 때문
- ☞ 수입수소 비중 감소에 따라 수소 생산 분야에서 이산화탄소 포집량이 확대되며, 이는 발전 분야의 이산화탄소 포집량을 제약하여 발전분야의 탄소중립 달성에 제약조건으로 작용



[그림 11] 수입수소 비중 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화

- 최대 수입수소 비중이 76%까지 감소하게 되면 발전분야에서 천연가스 사용이 제한되며, 감소된 천연가스 발전량은 수소를 기반으로 한 신에너지 발전으로 충당
    - 최대 수입수소 비중이 82%에서 74%로 감소함에 따라 신에너지 발전량은 471 TWh에서 576 TWh로 증가
    - 부하추종성이 높은 신에너지 발전량 증가에 따라 ESS 발전량은 감소
  - 최대 수입수소 비중이 76%이하로 감소되면 수전해를 이용한 수소생산 증가에 따른 발전량 증가로 최대 수입수소 비중 76%에서 1,345 TWh 수준이던 발전량<sup>21)</sup>은 최대 수입수소 비중 70%에서 1,462 TWh까지 증가
  - 수입수소 비중이 74%이하로 감소되면, 국내에서 가용한 무탄소 발전옵션이 존재하지 않아 동북아 수퍼그리드를 통한 수입 전력 의존도가 상승
    - 최대 수입수소 비중이 76%에서 70%로 감소함에 따라 수입 전력량은 33.1 TWh에서 105.3 TWh로 증가
- ☞ 수입수소 감소에 따라 국내에서 수소를 생산하기 위한 전력 수요가 증가하게 되며, 증가한 전력 수요에 대응하기 위하여 다시 수소 이용 발전량이 증가하는 비효율성 발생
- ☞ 최대 수입수소 비중 74% 이하에서는 국내 무탄소 발전옵션 만으로는 전환분야 탄소중립 달성에 어려움 발생

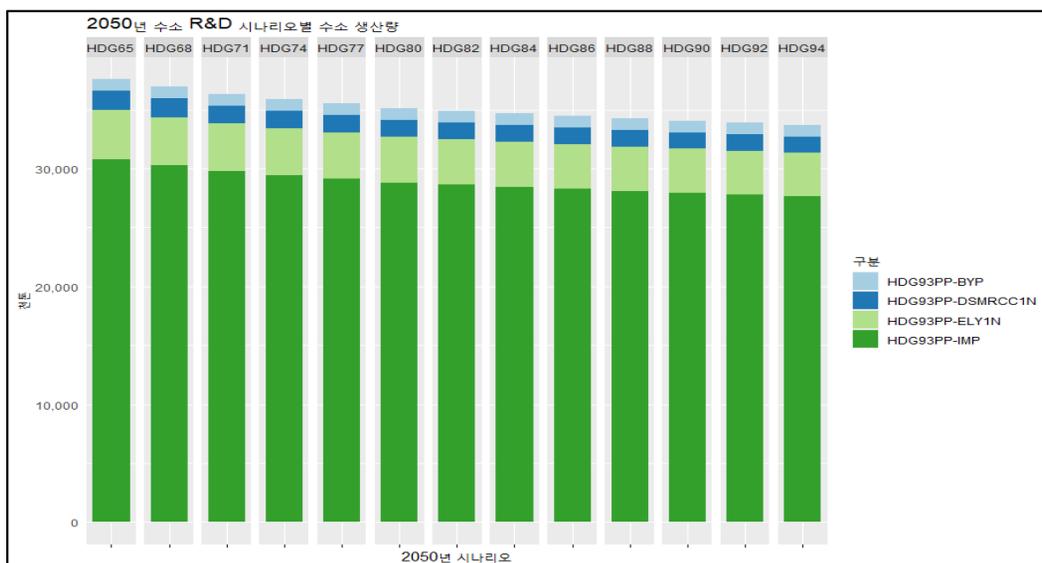


[그림 12] 수입수소 비중 변화에 따른 발전 믹스 변화

21) 양수발전 및 ESS 발전량 제외, 동북아 그리드를 통한 수입 전력량 포함

■ 수전해 효율에 대한 민감도 분석

- 국가 탄소중립 시나리오에서 수입수소 다음으로 비중이 높은 생산방식은 수전해
  - 수전해 기술의 비중확대는 큰 폭의 전력 수요 증가를 유발하기 때문에 수전해 기술의 효율을 높이기 위한 연구는 탄소중립 달성을 위하여 가장 집중해야할 분야 중 하나
    - 국가 탄소중립 시나리오 A안의 경우 수소생산을 위한 전력수요는 235.3 TWh<sup>22)</sup>로 건물 분야(277.1 TWh)와 유사한 양
  - 국가 탄소중립 시나리오에서는 2050년 수전해에 필요한 전력 소비량을 43 kWh/kg-H<sub>2</sub>(시스템 효율 기준)로 전망
    - 정부 수전해 연구개발 목표<sup>23)</sup>: 60 kWh/kg-H<sub>2</sub>(현재) → 43 kWh/kg-H<sub>2</sub>(2040)
  - 43 kWh/kg-H<sub>2</sub>는 현재 65.8%인 수전해 효율을 90%까지 높여야 한다는 도전적인 목표로서 이러한 목표 달성이 국가 에너지시스템에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수전해 효율을 65%에서 94%까지 점차적으로 향상시키는 민감도 분석을 수행
  - 수전해 효율 향상에도 불구하고 그린수소 공급 비중은 11%로 변화가 없음
    - 이는 수전해 효율 향상에도 불구하고 여전히 블루수소의 경쟁력이 높기 때문
  - 그러나 수전해 효율 향상에 따라 수소 공급량은 큰 폭으로 감소하여 수전해 효율 65%에서는 수소 공급량이 37,573 천톤이나, 94%에서는 33,710 천톤으로 10% 이상 감소
    - 이는 수전해를 위한 전력 소비량 감소에 따라 수소 이용 발전량이 감소하였기 때문
- ☞ 수전해 효율 향상으로 전체적인 수소 수요 감소로 연결되어 수입 수소량 감소 등 안정적인 수소 공급 가능성 향상

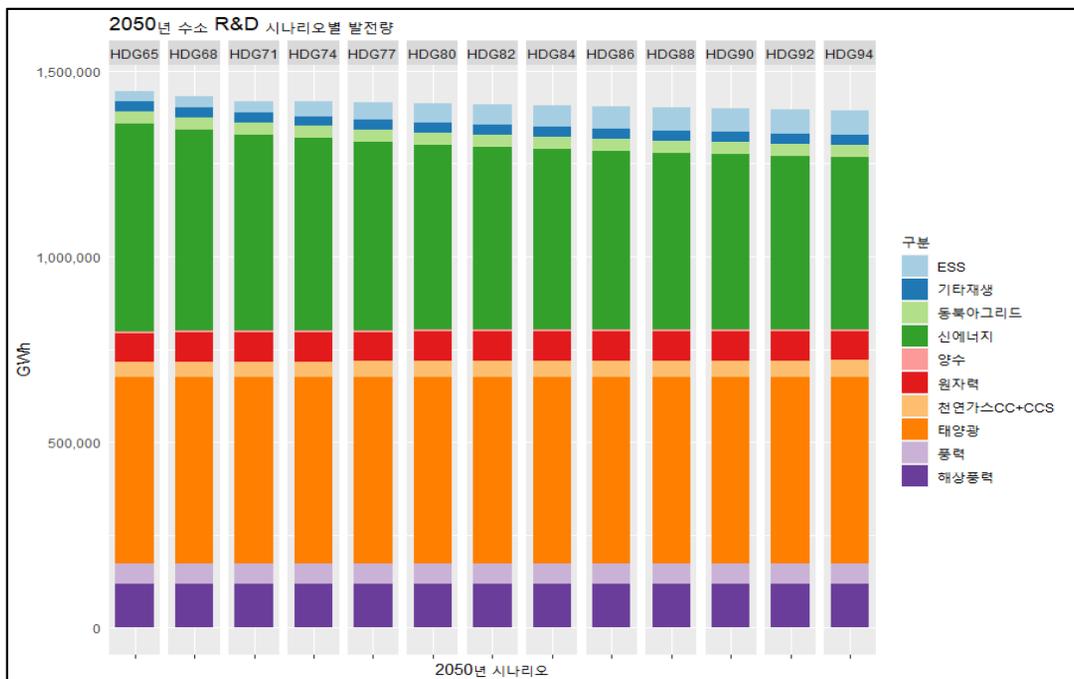


[그림 13] 수전해 효율 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화

22) 2050년 국가 전체 전력 수요의 19.4%

23) 수소 기술개발 로드맵(안), 과학기술관계장관회의, 2019.10.

- 수전해 효율이 65% 수준에서 94%로 향상됨에 따라 신에너지 발전량은 557.3 TWh에서 461.8 TWh로 감소하고, 전체 발전량<sup>24)</sup> 역시 1,410 TWh에서 1,320 TWh로 감소
  - 전체 발전량에서 신에너지 발전량이 차지하는 비중은 39.5%에서 35.0%로 감소
  - 다만 부하추종을 담당하는 수소터빈의 감소로 ESS 발전량은 27.8 TWh에서 66.8 TWh로 증가
  - 수전해 효율이 65% 수준에서 94%로 향상됨에 따라 수소터빈 용량은 78GW에서 68GW로 감소하며, ESS 용량은 62GW에서 77GW로 증가
- ☞ 수전해 효율 향상으로 전력 수요 뿐만 아니라, 수소 수요 및 수소터빈 용량 감소 등 가능

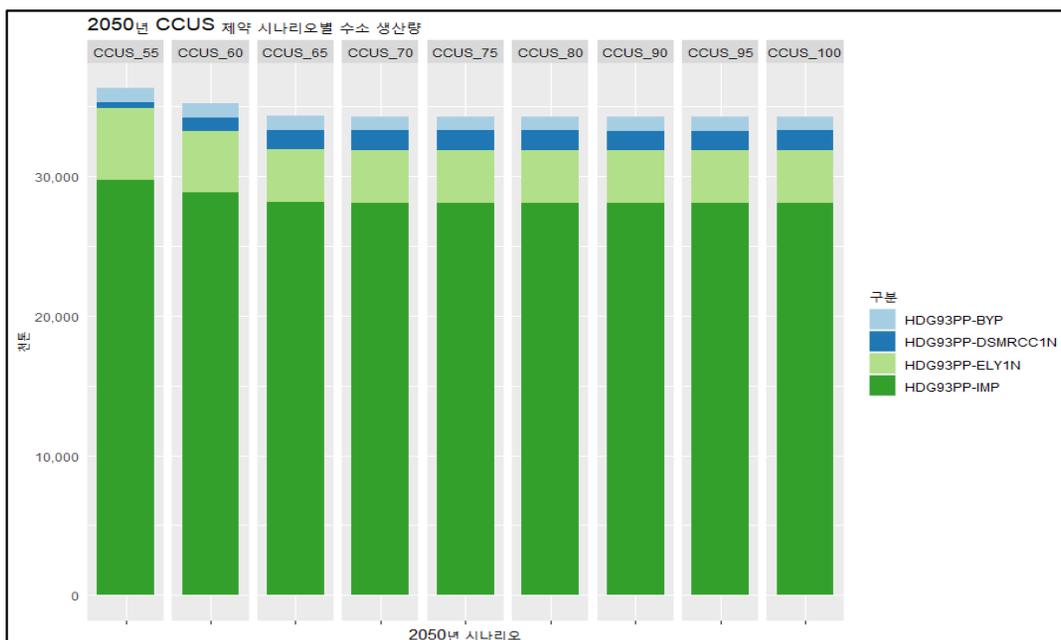


[그림 14] 수전해 효율 변화에 따른 발전 믹스 변화

24) 양수발전 및 ESS 발전량 제외, 동북아 그리드를 통한 수입 전력량 포함

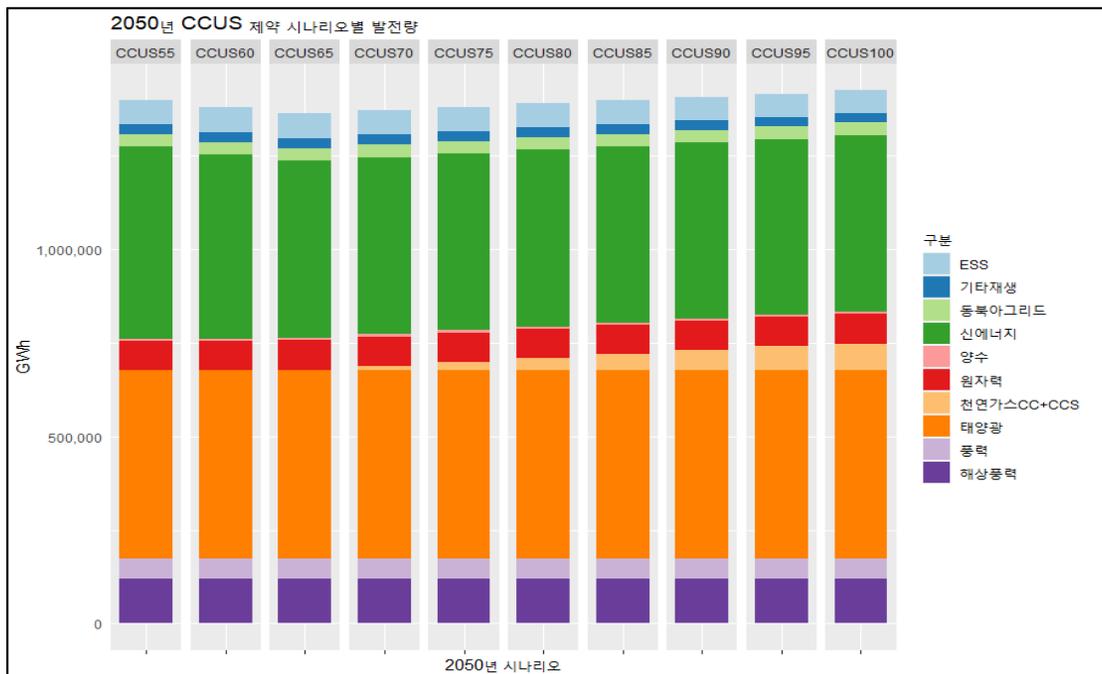
■ CCUS 처리량에 대한 민감도 분석

- CCUS 최대 처리 가능량은 수소 생산 분야에서 개질 기술과 이산화탄소 포집 기술을 통하여 생산되는 블루수소 공급량에 영향
- 국가 탄소중립 시나리오 A안에서는 CCUS 처리량을 55.1백만톤으로 B안에서는 84.6백만톤으로 가정
  - 국가 탄소중립 시나리오 A안에서 블루수소 공급량은 제외되어 있으며, B안에서 백만톤을 고려
  - B안에서 블루수소 백만톤 공급을 위하여 필요한 이산화탄소 포집량은 9백만톤으로 추정
- 본 분석에서는 CCUS 처리 가능량을 100백만톤부터 55백만톤까지 5백만톤 단위로 감소시켜가며 민감도 분석 수행
- CCUS 처리 가능량이 100백만톤부터 65백만톤까지 감소하는 경우에는 수소 공급 포트폴리오에 큰 변화가 없으며, 65백만톤부터 55백만톤까지 감소하는 경우에는 전체 수소 공급량에서 블루수소가 차지하는 비중이 4.1%에서 1.1%까지 감소
  - CCUS 처리 가능량 중 5,110만톤은 산업분야에서 포집되는 이산화탄소를 우선 처리하는 것으로 가정하였기 때문에, CCUS 처리 가능량이 5,110만톤은 이하인 경우 전환분야에서 CCS 기술 활용 불가능
- 그린수소 비중 증가에 따라 전력수요가 증가하며, 이에 따라 발전분야에서의 수소수요가 증가하여, CCUS 처리 가능량이 65백만톤부터 55백만톤까지 감소하는 경우 전체 수소 공급량은 34.3 백만톤에서 36.3 백만톤으로 6%가량 증가



[그림 15] CCUS 처리량 변화에 따른 수소생산 포트폴리오 변화

- CCUS 처리가능량이 100백만톤부터 65백만톤까지 감소하는 경우에는 천연가스 발전량이 71.4 TWh부터 1.6 TWh까지 지속적으로 감소하며, 60백만톤 이하에서는 발전분야에서 천연가스 사용이 제한
    - 이산화탄소 포집기술의 적용 우선순위가 발전분야보다 수소 생산분야에서 높음
  - 신에너지 발전량은 CCUS 처리가능량이 95백만톤인 경우 468.4 TWh로 가장 낮으며, CCUS 처리가능량이 55백만톤까지 감소함에 따라 512.4 TWh까지 증가
    - 특히 CCUS 처리가능량이 65백만톤 이하로 제약되어 수소생산 분야에서 수전해 기반 그린수소 공급이 증가하는 경우에 큰 폭으로 증가(CCUS 처리가능량이 65백만톤인 경우 신에너지 발전량은 474.2 TWh 수준)
  - ESS 발전량은 CCUS 처리가능량이 65백만톤인 경우 68.3 TWh로 가장 높음
    - CCUS 처리량이 이보다 증가하는 경우는 천연가스 터빈 증가로, CCUS 처리량이 이보다 감소하는 경우는 수소 터빈 증가로 부하추종 운전이 가능한 발전설비가 증가하기 때문
  - CCUS 처리가능량이 100백만톤부터 65백만톤까지 감소하는 경우에는 CCUS를 위한 전력 소비 감소로 전체 발전량이 1,358 TWh부터 1,290 TWh까지 지속적으로 감소하며, 65백만톤부터 55백만톤까지 감소하는 경우에는 수전해를 위한 전력 소비 증가로 전체 발전량이 1,290 TWh부터 1,448 TWh까지 지속적으로 증가
- ☞ 이산화탄소 포집 기술을 수소생산 분야에 적극적으로 도입하는 것이 발전량 증가를 억제하면서 전체 에너지시스템 효율을 향상시키는 결과 유도



[그림 16] CCUS 처리량 변화에 따른 발전 믹스 변화

## 5 시사점 및 분석의 한계

### ■ 주요 분석 내용

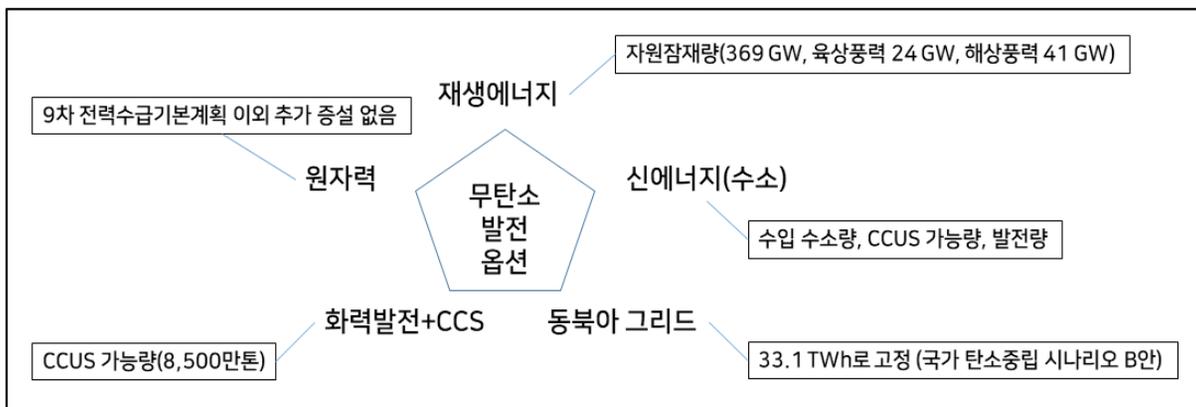
- 본 고에서는 에너지 공급 및 전환 분야에 대한 상세한 분석이 가능한 KIER-TIMES 모형을 활용하여 새로운 탄소중립 시나리오를 제안
- 새로운 탄소중립 시나리오는 국가 탄소중립 시나리오와 부분적으로 전제조건을 통일 하였으나, 일관성 보다는 차별화와 상세화를 통하여 탄소중립 달성을 위한 보다 다양한 시사점을 도출하는데 활용
- 본 고에서는 탄소중립 달성을 위한 수소 에너지의 역할에 초점을 맞추어 분석 시나리오를 설정하고 결과를 제시
- 국가 탄소중립 시나리오 대비 전력 수요가 증가하는 경우 탄소중립을 위한 수소 역할의 변화에 대하여 분석
- 또한 수입수소 비중, 수전해 효율, CCUS 가능량 등의 변화가 발전 분야와 수소 생산 분야의 탄소중립에 미치는 영향을 분석

### ■ 전력 수요가 높은 경우의 탄소중립 전망

- 본 고에서는 열에너지 생산을 위한 전력소비량을 추가로 고려하여 2050년 총발전량이 국가 탄소중립 시나리오 대비 71~120 TWh 높은 1,328 TWh인 경우에 대한 분석 수행
- 전력, 수소 등 일차에너지 비중이 증가함에 따라 전환분야의 에너지소비가 증가하여, 최종에너지 소비는 2017년 대비 2050년 16% 감소하나, 일차에너지 공급은 2050년 12% 증가할 전망
- 수소생산과 CCUS를 위한 전력소비량 증가로 전환 분야가 전체 전력 소비량의 31%를 차지할 것으로 분석
- 수소에너지는 일차에너지 공급의 27%, 최종에너지 수요의 25%를 차지할 것으로 분석
- 높은 수입 수소 비중과 발전 분야에서의 수소 사용량 증가로 수소는 2050년 최종에너지 수요보다 일차 에너지 공급에서 비중이 높을 것으로 전망

■ 탄소중립을 위한 수소의 역할

- 본 고에서는 발전분야에서 그림 17의 5가지 무탄소 기술을 고려하고 있으나, 수소를 제외한 기술들은 이미 제약조건 내에서 최대로 발전하고 있기 때문에 추가적인 발전에 한계가 존재
- 2050년 연료전지와 무탄소 가스터빈 발전량은 470 TWh(전체 발전량의 35%)로 국가 탄소중립 시나리오 대비 약 183 TWh 가량 증가 전망 (신에너지 발전 설비용량은 2050년 77.2 GW)
- 전력 수요 증가가 수소 터빈 발전량 증가로 이어져 수소 수요가 1,949만톤으로 증가하고, 이에 따라 수소 공급량은 국가 탄소중립 시나리오 보다 616~666만톤 증가
- 본 연구에서는 수소에너지 기반 발전기술을 증가하는 전력 수요에 대응할 수 있는 유일한 수단으로 고려되고 있으나, 전력수요, 재생에너지 자원잠재량, CCUS 가능량 등의 변화에 따라 새로운 탄소중립 시나리오 제시 가능



[그림 17] 발전분야 무탄소 기술 옵션 및 제약조건

■ 수입수소 비중 변화에 따른 수소 역할의 변화

- 수입 수소 비중 감소에 따라 수소 생산을 위한 개질기술의 보급이 확대되며, 한정된 이산화탄소 저장 및 활용 가능량으로 인하여 발전 분야의 이산화탄소 포집량이 축소되고 수소생산 분야의 이산화탄소 포집량이 확대
- 수입수소 감소에 따라 국내 수소 생산량 증가가 필요하며, 이에 따라 수전해를 위한 전력과 개질과정에서 포집된 이산화탄소를 저장 및 활용하기 위한 전력 소비가 급격하게 증가
- 국내 무탄소 발전옵션 만으로는 증가하는 전력소비 대응에 한계가 존재하기 때문에, 최대 수입수소 비중 74% 이하에서는 전환분야 탄소중립 달성에 어려움 발생

■ 수전해 효율 변화에 따른 수소 역할의 변화

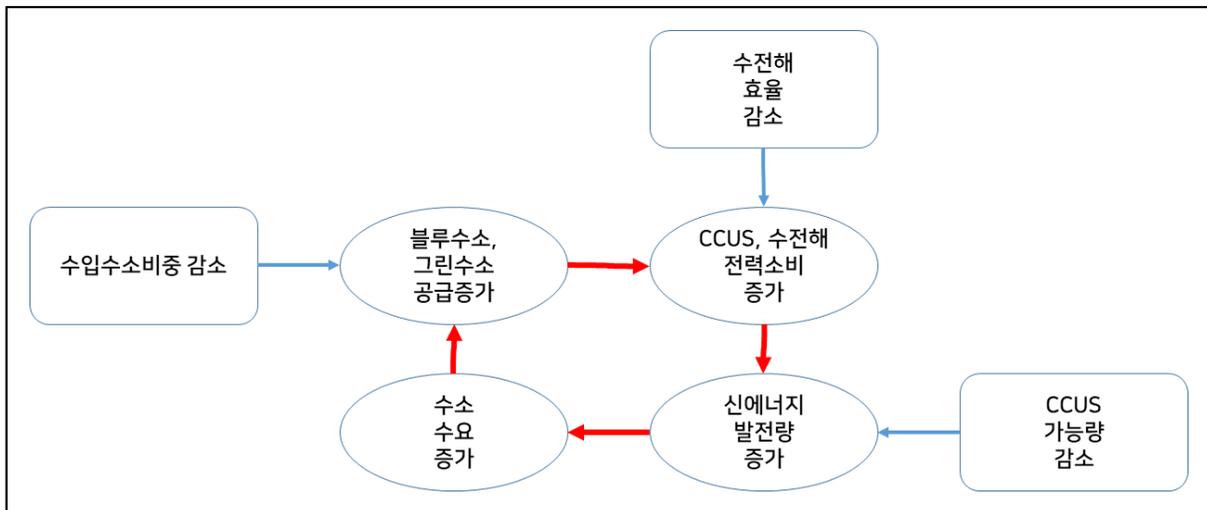
- 수전해 효율이 65% 수준에서 94%로 향상됨에 따라 전력 수요는 90 TWh 감소하고, 이는 발전 분야 수소 수요 감소로 이어져 수소 공급량 역시 37.5 백만톤에서 33.7 백만톤으로 10% 이상 감소할 전망
- 수전해 효율 향상에 따른 전력 및 수소 수요 감소로 수입 수소량 감소 등 안정적인 에너지 시스템 운영 가능성 향상

■ CCUS 가능량 변화에 따른 수소 역할의 변화

- CCUS 처리 가능량이 감소하는 경우 발전분야에서부터 천연가스 사용이 제한되며, 60백만톤 이하부터는 수소 생산 분야에서의 천연가스 사용이 제한
- 발전 분야의 이산화탄소 포집기술 보급 확대는 저장 및 활용을 위한 전력 수요 증가로 그 효과가 제한적이며, 수소 생산 분야의 이산화탄소 포집기술은 수전해 기술을 대체하여 전력 수요 감축 가능
- 따라서 이산화탄소 포집 기술을 발전 분야 보다는 수소생산 분야에 적극적으로 도입하는 것이 필요

■ 효율적인 수소 활용 방안

- 수소는 산업/수송 분야 뿐만 아니라 발전 분야의 탄소중립 달성을 위한 핵심 수단
- 그러나 블루수소, 그린수소 생산을 위해서는 전력이 필요하며, 전력 생산을 위해서 다시 수소를 사용하는 구조는 에너지시스템 측면에서 심각한 에너지 효율 저하를 유발
- 따라서 수소는 발전 분야 보다는 최종에너지 소비 분야에서 적극적으로 활용되는 것이 필요
- 무탄소 전력 공급 및 재생에너지 출력 변동성 대응을 위하여 사용되는 수소를 효율적으로 활용하기 위해서는 수입수소 비중 증대, 수전해 효율 향상, CCUS 연계 개질 기술 보급 확대가 필요



[그림 18] 전력과 수소 사이의 인과 다이어그램

## ■ 수소 연구개발 방향

### [수입수소 비중 증대]

- 본 분석에서는 수입 수소가 2050년 2,800만톤으로 일차에너지 공급의 27%를 차지할 것으로 분석
- 수입 수소 확대를 위해서는 안정적인 공급망 확보가 중요하겠지만, 연구개발을 통하여 대량의 수소를 저장하고 운송하기 위한 최적의 기술을 개발하는 것이 선결과제
- 현재 고압 기체 저장, 극저온 상태의 액화 수소 저장, 액상 유기 화합물(LOHC, Liquid Organic Hydrogen Carrier)을 이용한 액체 저장, 고체저장, 암모니아 등 다양한 기술들에 대한 연구개발이 진행 중
- 수소 생산 지역, 생산 방식, 저장 및 운송 용량, 운송 거리, 활용 분야에 따라 최적의 저장 및 운송 기술이 달라질 것이기 때문에 이를 고려한 연구개발이 필요

### [수전해 효율 향상]

- 수전해 기술은 온실가스 배출 없이 수소를 생산할 수 있는 기술로 탄소중립 달성을 위하여 중요성이 강조되고 있으나, 수전해 기술은 전력 수요를 증가시켜 발전분야 탄소중립에는 더 큰 도전으로 작용할 가능성 존재
- 본 분석에서는 수전해 효율을 국가 로드맵 목표 수준으로 향상시킬 수 있다면, 현재 효율 대비 전력 소비량을 약 90 TWh 절감할 수 있을 뿐만 아니라 수소 소비량 역시 약 380 만톤 절감할 수 있을 것으로 분석
- 따라서 수전해 기술의 효율을 높이기 위한 연구는 전체 에너지시스템 효율 향상을 위하여 반드시 필요한 연구

### [CCUS 연계 개질 기술 보급 확대]

- 천연가스 개질을 통한 수소 생산 기술은 국가 탄소중립 시나리오 A안에서는 제외되어 있으며, B안에서만 백만톤 고려
- 개질 기술은 이미 상용화되어 검증된 기술이며, 대량 생산 뿐만 아니라 수소충전소와 연계한 분산형 소량 생산에도 활용될 수 있기 때문에 수소경제 전환을 위한 핵심 연계 기술
- 특히 본 분석에서는 수전해 효율이 국가 로드맵 목표 수준으로 향상되는 경우에도 탄소중립 달성을 위하여 CCS 기술과 연계된 개질기술이 여전히 중요한 역할을 할 것으로 분석
- 따라서 천연가스 개질 기술과 이산화탄소 포집 기술의 효율향상과 투자비용 저감을 위한 연구개발 필요

### [발전분야 수소 이용기술]

- 본 분석에서는 발전량에서 수소 이용 발전 기술이 차지하는 비중이 2050년 35% 가량 차지할 것으로 전망
- 수입수소의 안정적이고 충분한 공급이 가능하다면, 수소 터빈과 연료전지는 발전분야 탄소중립 달성을 위하여 매우 중요한 역할 감당 가능
- 특히 수소터빈 기술은 무탄소 전원이면서 동시에 재생에너지 비중 증가에 따라 확대되는 부하변동성 대응을 위한 핵심 수단
- 따라서 수소터빈의 상용화를 위한 연구와 발전용 연료전지의 부하추종 운전이 가능하도록 내구성을 개선하기 위한 연구개발 필요

### ■ 분석의 한계

- 본 연구는 국가 에너지시스템에 영향을 미치는 기술, 정책, 사회, 경제 등 다양한 요인들에 대한 가정, 단순화 및 시나리오 기반의 분석을 통하여 수행되었으므로 현실과의 괴리가 존재하며 주요 한계를 살펴 보면 아래와 같음
- 모형 내에서 전력/수소/열 에너지 가격은 설비 투자비용, 유지보수비용, 에너지비용 등에 의하여 결정되는 가격으로, 에너지 세제를 포함한 국내 전력시장의 가격 결정체계와 RPS(Renewable Portfolio Standard), HPS(Hydrogen Energy Portfolio Standard) 제도와 같은 정부 인센티브 제도 등이 반영되지 않았기 때문에 실제 시장가격과는 차이 존재
- KIER-TIMES 모형은 단일지역모형(Single-Region) 모형으로 전력/수소/열 에너지의 이송에 소요되는 비용과 에너지를 정밀하게 고려하는데 한계 존재
- 기술 특성치는 국가 전체 차원의 평균적인 특성을 반영한 것으로 기술 단위의 세밀한 분석과 차이가 존재하며, 2050년까지 장기적인 기술 특성치의 변화는 일부 기술의 경우 연구개발 목표를 기반으로 추정되었으나, 대부분의 기술은 현재 기술 수준이 유지되는 것으로 가정
- 수소분야의 경우 수소 생산, 저장, 이송 단계 별로 본 연구에서 고려하지 못한 새로운 기술이 도입될 가능성이 높으며, 수입수소의 국내 도입 후 수소 저장 매체로부터 수소를 분리하기 위한 에너지 소비는 미고려

**■ 향후 연구추진 계획**

- 본 연구는 앞서 살펴본 한계점에도 불구하고 국가 탄소중립 시나리오에서 제시하고 있는 핵심 지표들의 불확실성을 고려한 다양한 탄소중립 시나리오를 도출하고 이를 통하여 탄소중립을 위한 기술들의 역할에 대한 세밀한 분석을 수행하였다는데 의미 존재
- 향후 현재 전환분야를 중심으로 개발된 모형을 산업/건물/수송 분야와 같은 최종에너지 소비 분야까지 확장하는 연구 필요
- 본 연구에서 고려하지 못한 수소 및 열 에너지의 생산/저장/이송 관련 신기술 등을 고려한 연구 필요
- 모형에 포함된 정부 정책, 기술 특성치 등에 대한 지속적인 업데이트를 통하여 모형의 신뢰성 및 활용성을 제고하기 위한 연구 필요

## 참 고 문 헌

## 〈국내문헌〉

- [1] 2050 저탄소 사회 비전 포럼, 2050 저탄소 사회 비전 포럼 검토안, 2020
- [2] 관계부처 합동, 2050 탄소중립 시나리오안, 2021.10.
- [3] 관계부처합동, 수소경제활성화로드맵, 2019
- [4] 관계부처합동, 수소기술개발로드맵, 2019
- [5] 기획재정부, 예비타당성조사 수행 총괄지침 제52조, 2017.
- [6] 민대기 외 2인, 탈원전·탈석탄·신재생 에너지 확대 정책에 따른 신규 전원구성의 수급 안정성 평가, 에너지경제연구, 제17권, 제1호, pp. 1-35, 2017.
- [7] 산업통상자원부, 제9차 전력수급기본계획, 2020
- [8] 수소융합얼라이언스추진단, 수소생산 전과정 평가, 2019.
- [9] 에너지경제연구원, 수소 경제가 온다, 2020
- [10] 에너지경제연구원, 에너지통계연보, 2018
- [11] 에너지경제연구원, 태양광 원가분석을 통한 균등화 비용: 국제 비교 분석, 2017
- [12] 에너지경제연구원. 원자력발전의 경제적·사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스 연구: 적정 전원믹스 연구, 2015
- [13] 온실가스종합정보센터, 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 2019
- [14] 한국에너지경제연구원, 세계에너지시장인사이트(제 18-31호), 2018
- [15] 한국에너지공단, 2017년 신재생에너지 보급통계, 2018
- [16] 한국에너지공단, 2017년도 에너지총조사 보고서, 2018
- [17] 한국에너지공단, 2018 집단에너지사업자 편람('17년 실적자료), 2018
- [18] 한국에너지공단, 2020 신재생에너지백서, 2021
- [19] 한국에너지기술연구원, 에너지기술 R&D 기획 연구, KIER 주요사업보고서, 2020.
- [20] 한국에너지기술연구원, 재생에너지 보급 확대에 따른 ESS 역할 분석, KIER 기술분석리포트, Vol.1., No. 1., 2020
- [21] 한국전력거래소, 2017년도 발전설비현황, 2018

## 〈국외문헌〉

- [1] EIA ETSAP, Documentation for the TIMES Model – PART I, 2005

- [2] EIA ETSAP, Optimization Modeling Documentation: Dispatching and unit commitment features in TIMES, 2016
- [3] EIA, Annual Energy Outlook, 2018
- [4] EU, The JRC-EU-TIMES model – Assessing the long-term role of the SET Plan Energy technologies, 2013.
- [5] IEA, Net Zero by 2050, 2021.
- [6] IEA, The Future of Hydrogen, 2019.
- [7] IEA, World Energy Outlook 2021, 2021.
- [8] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2018, 2018
- [9] Lazard, Levelized Cost of Storage Analysis, 2018
- [10] Pilorge et al., “Cost Analysis of Carbon Capture and Sequestration of Process Emissions from U.S. Industrial Sector”, Environmental Science and Technology, 54(12), 7524–7532 (2020)

#### 〈온라인 자료〉

- [1] e-나라지표, 주요 원자재 가격동향(석유화학분야) (<http://www.index.go.kr>)
- [2] NREL, 2018 Annual Technology Baseline, 2018 (<https://atb.nrel.gov>)
- [3] 공공데이터포털, 한국남동발전 풍력 발전 현황, 2018.10.30.  
(<https://www.data.go.kr/data/15043275/fileData.do>)
- [4] 공공데이터포털, 한국서부발전 태양광 발전 현황, 2018.10.30.  
(<https://www.data.go.kr/dataset/15025486/fileData.do>)
- [5] 공공데이터포털, 한국전력거래소 발전 실적 정보, 2018.03.28.  
(<https://www.data.go.kr/dataset/15013399/fileData.do>)
- [6] 산림청, 목재펠릿 가격 ([www.forest.go.kr/](http://www.forest.go.kr/))
- [7] 삼표시멘트, 사업보고서 (<http://www.sampyocement.co.kr/kor/default.htm>)
- [8] 전력통계정보시스템, 연료비용(열량단가) (<http://epsis.kpx.or.kr/>)
- [9] 천연가스 수입량 증가세로 바뀌나, 에너지신문, 2021.03.11.  
(<https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=75639>)
- [10] 한국도시가스협회, 도시가스 요금표 (<http://www.citygas.or.kr/index.jsp>)
- [11] 한국석유공사 페트로넷, 제품수입(제품별) (<https://www.petronet.co.kr>)

## 부록 1 KIER-TIMES ver2.1. 개요

### 가. TIMES 모형 간략 개요<sup>25)</sup>

- TIMES(The Integrated MARKAL-EFOM System)모형은 국제에너지기구(IEA)의 에너지기술 시스템분석프로그램(ETSAP, Energy Technology System Analysis Program)을 통하여 개발되어 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 가장 대표적인 상향식 에너지시스템 모형
- TIMES 모형은 최적화(Optimization) 기반의 상향식 에너지시스템 모형으로서 주어진 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 최적해(Optimal Solution)를 도출하는 다주기선형계획(Multi Period Linear Programming)에 기반
  - 목적함수: 전체 분석기간 동안의 할인된(discounted) 에너지시스템의 총비용
  - 제약조건: 유효에너지 수요의 만족, 신규 및 폐기 설비를 고려한 기간별 설비용량 정의, 기술별 최대 에너지 산출량 정의 등 에너지시스템을 묘사하기 위하여 필수적으로 만족시켜야 하는 물리적 혹은 논리적인 관계
  - 최적해: 신규 설비 투자 계획, 설비별 운영 계획

### 나. KIER-TIMES 모형의 범위 및 기본전제

- KIER-TIMES 모형<sup>26)</sup>은 대한민국을 하나의 지역으로 묘사하는 단일지역 모형이며, 기준년도는 2017년도이고, 2020년부터 2050년까지 5년 단위의 분석이 가능
- 단일년도를 시간적으로 세분화하는 기준인 타임 슬라이스(Time Slice)는 4계절, 주중/주말, 24시간을 조합하여 192개로 나누어 정의
- KIER-TIMES 모형은 에너지통계연보의 2017년 국가 에너지 밸런스를 기준으로, 에너지총조사보고서, 한전통계, 집단에너지통계, 신재생에너지통계 등을 활용하여 구현
- 할인율은 국가 예비타당성 조사에 활용하는 사회적 할인율인 4.5%<sup>27)</sup>를 적용하였으며, 대미환율은 한국은행이 발표한 2017년 연평균환율인 1,130.5원/USD을 기준으로 분석
- 발열량은 에너지 시행규칙 제5조 제1항에 따라 2017년 개정된 7차 에너지열량 환산기준을 적용하였으며, 온실가스 배출계수는 국가 온실가스 인벤토리 산정 방식에 따라 정의

25) 국제에너지기구의 「Documentation for the TIMES Model - PART I」을 요약 정리

26) TIMES모형에 기반하여 개발된 KIER-TIMES 모형은 2014년도 첫 번째 버전이 개발되어 다양한 정부 정책 과제 수행 및 학술 활동에 활용되어 왔으며, 포항공과대학교와 공동연구를 통하여 발전소 운영에 대한 보다 정밀한 모사가 가능한 두 번째 버전을 2019년에 개발

27) 예비타당성조사 수행 총괄지침 제52조, 기획재정부지침, 2017.

〈모형 적용 온실가스 배출계수〉

| 구분        | 에너지원   | 총발열량      | 순발열량   | 전환계수    | 탄소물입율 | 평균산화율 | 국가 배출계수 | 모형적용<br>배출계수                |     |
|-----------|--------|-----------|--------|---------|-------|-------|---------|-----------------------------|-----|
|           |        | kcal      | kcal   | LHV/HHV | %     | %     | kg-C/GJ | ton-CO <sub>2</sub><br>/TOE |     |
| 석탄        | 국내무연탄  | 4,730     | 4,630  | 0.979   |       | 0.980 | 30.5    | 4.5                         |     |
|           | 수입무연탄  | 5,060     | 4,900  | 0.968   |       | 0.980 | 28.6    | 4.2                         |     |
|           | 원료탄    | 6,970     | 6,690  | 0.960   | 0.750 | 0.980 | 26.2    | 0.9                         |     |
|           | 연료탄    | 5,920     | 5,660  | 0.956   |       | 0.980 | 26.0    | 3.7                         |     |
| 석유        | 원유     | 10,750    | 10,080 | 0.938   |       | 0.990 | 20.0    | 2.9                         |     |
|           | 휘발유    | 7,810     | 7,260  | 0.930   |       | 0.990 | 20.0    | 2.8                         |     |
|           | 등유     | 8,770     | 8,170  | 0.932   |       | 0.990 | 19.6    | 2.8                         |     |
|           | 경유     | 9,030     | 8,410  | 0.931   |       | 0.990 | 20.2    | 2.9                         |     |
|           | 경질중유   | 9,310     | 8,690  | 0.933   |       | 0.990 | 20.4    | 2.9                         |     |
|           | 중유     | 9,670     | 9,080  | 0.939   |       | 0.990 | 20.5    | 2.9                         |     |
|           | 중질중유   | 9,960     | 9,360  | 0.940   |       | 0.990 | 20.6    | 2.9                         |     |
|           | 항공유    | 8,720     | 8,100  | 0.929   |       | 0.990 | 19.8    | 2.8                         |     |
|           | 프로판    | 12,040    | 11,060 | 0.919   | 0.800 | 0.990 | 17.6    | 2.5                         |     |
|           | 부탄     | 11,820    | 10,920 | 0.924   | 0.800 | 0.990 | 18.1    | 2.5                         |     |
|           | 납사     | 7,710     | 7,140  | 0.926   | 0.750 | 0.990 | 19.2    | 0.7                         |     |
|           | 용제     | 7,830     | 7,240  | 0.925   | 1.000 | 0.990 |         | -                           |     |
|           | 아스팔트   | 9,890     | 9,360  | 0.946   | 1.000 | 0.990 | 21.6    | -                           |     |
|           | 윤활유    | 9,550     | 8,910  | 0.933   | 0.500 | 0.990 | 19.9    | 1.4                         |     |
|           | 석유코크스  | 8,360     | 8,170  | 0.977   |       | 0.990 | 27.2    | 4.0                         |     |
|           | 기타석유제품 | 8,860     | 8,260  | 0.932   |       | 0.990 | 19.7    | 2.8                         |     |
|           | 가스     | 천연가스      | 13,060 | 11,800  | 0.904 |       | 0.995   | 15.3                        | 2.1 |
|           |        | 도시가스(LNG) | 10,290 | 9,290   | 0.903 |       | 0.995   | 15.3                        | 2.1 |
| 도시가스(LPG) |        | 15,190    | 13,950 | 0.918   |       | 0.995 | 17.6    | 2.5                         |     |

- 에너지가격은 에너지통계연보, 세계 에너지시장 인사이트, 한국석유공사(Petronet), e-나라지표, 한국 도시가스협회 등의 자료를 이용하여 2017년도 기준가격을 설정하고 EIA의 Annual Energy Outlook 2019의 가격 변화율 전망을 적용하여 2050년까지의 가격전망치를 설정

〈주요 에너지원에 대한 가격 시나리오〉

(단위: 백만원/천toe)

| 구분  | 에너지원                     |                         | 2017    | 2020    | 2030    | 2040    | 2050          | 자료출처 (2017년)           |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------|------------------------|
| 석탄  | 무연탄                      | 국내탄                     | 372.9   | 380.1   | 358.2   | 361.0   | 361.4         | 에너지통계연보 2018           |
|     |                          | 수입탄                     | 307.4   | 313.3   | 333.8   | 336.4   | 336.8         | 에너지통계연보 2018           |
|     | 유연탄                      | 수입 - 연료탄 <sup>28)</sup> | 191.8   | 195.5   | 191.8   | 193.3   | 193.6         | 세계에너지시장인사이트 (제 18-31호) |
|     |                          | 수입 - 원료탄                | 438.3   | 446.7   | 472.3   | 476.0   | 476.5         | 세계에너지시장인사이트 (제 18-31호) |
| 석유  | 원유                       | 수입                      | 440.0   | 448.4   | 474.1   | 477.8   | 478.4         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 휘발유                      | 국내                      | 2,054.1 | 2,093.5 | 2,213.5 | 2,230.9 | 2,233.5       | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수입                      | 699.5   | 712.9   | 753.8   | 759.7   | 760.6         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 708.7   | 722.2   | 763.6   | 769.7   | 770.5         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 등유                       | 국내                      | 1,044.2 | 1,064.2 | 1,125.2 | 1,134.0 | 1,135.3       | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수입                      | 586.6   | 597.8   | 632.1   | 637.1   | 637.8         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 663.4   | 676.1   | 714.9   | 720.5   | 721.3         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 경유                       | 자동차용                    | 1,525.0 | 1,554.2 | 1,643.3 | 1,656.3 | 1,658.1       | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 선박용                     | 1,401.1 | 1,427.9 | 1,509.8 | 1,521.7 | 1,523.4       | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수입                      | 581.7   | 592.8   | 626.8   | 631.8   | 632.5         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 552.9   | 563.5   | 595.8   | 600.5   | 601.1         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 중질중유 (B-C)               | 국내                      | 748.5   | 762.9   | 806.6   | 813.0   | 813.9         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수입                      | 414.9   | 422.9   | 447.1   | 450.7   | 451.2         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 427.2   | 435.3   | 460.3   | 463.9   | 464.5         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 항공유                      | 수입                      | 1,360.7 | 1,386.7 | 1,466.2 | 1,477.8 | 1,479.5       | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 568.6   | 579.5   | 612.7   | 617.5   | 618.2         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 납사                       | 국내                      | 675.2   | 688.2   | 727.6   | 733.4   | 734.2         | e-나라지표                 |
|     |                          | 수입                      | 539.4   | 549.7   | 581.2   | 585.8   | 586.5         | 한국석유공사 petronet        |
|     |                          | 수출                      | 540.0   | 550.3   | 581.9   | 586.4   | 587.1         | 한국석유공사 petronet        |
|     | 석유코크스                    | 국내                      | 141.3   | 144.0   | 152.2   | 153.4   | 153.6         | 삼표시멘트 2019년도 사업보고서     |
| 프로판 | 국내                       | 956.1                   | 974.4   | 1,030.3 | 1,038.4 | 1,039.6 | 한국석유공사 Opinet |                        |
| 부탄  | 일반용                      | 1,032.3                 | 1,052.1 | 1,112.4 | 1,121.2 | 1,122.4 | 에너지통계연보 2018  |                        |
|     | 자동차용                     | 756.9                   | 771.4   | 815.6   | 822.0   | 822.9   | 에너지통계연보 2018  |                        |
| 가스  | 천연가스(LNG) <sup>29)</sup> | 수입                      | 398.6   | 406.2   | 429.5   | 432.9   | 433.4         | 에너지통계연보 2018           |
|     | 시가스(LNG)                 | 국내                      | 720.6   | 734.4   | 776.5   | 782.6   | 783.5         | 한국도시가스협회               |
|     | 도시가스(LPG)                | 국내                      | 985.6   | 1,004.5 | 1,062.1 | 1,070.5 | 1,071.7       | 한국도시가스협회               |
| 신재생 | 신탄                       | 국내                      | 888.9   | 905.9   | 957.9   | 965.4   | 966.5         | 산림청                    |

28) 세계에너지시장인사이트(제 18-31호)의 2017년 CIF 기준 연료탄 가격.

29) 에너지통계연보 2018의 총 수입량과 수입액으로부터 계산

## 부록 2 주요 기술 특성치에 대한 가정

### □ 발전 분야

| 기술명                            | 투자비       | 고정유지비     | 변동유지비    | 효율                  | 이용률      | 피크 기여도 | 기준년도 용량          |
|--------------------------------|-----------|-----------|----------|---------------------|----------|--------|------------------|
|                                | 백만원/GW    | 백만원/GW-y  | 백만원/천TOE | %                   | %        | %      | GW               |
| 무연탄                            | 1,588,100 | 101,170   | 23.4     | 0.35                | 0.85     | 0.98   | 0.6              |
| 유연탄 <sup>30)</sup>             | 1,449,000 | 38,760    | 21.3     | 0.38                | 0.77     | 0.98   | 34.715           |
| 유연탄 with CCS <sup>31)</sup>    | 1,449,000 | 38,760    | 360.2    | 0.34                | 0.77     | 0.98   | 0                |
| 암모니아혼소발전 <sup>32)</sup>        | 1,390,000 | 66,000    | 0        | 0.45                | 0.77     | 0.98   | 0                |
| 암모니아전소발전 <sup>33)</sup>        | 1,390,000 | 66,000    | 0        | 0.45                | 0.77     | 0.98   | 0                |
| 디젤                             | 2,462,000 | 123,100   | 125.9    | 0.24                | 0.02     | 0.97   | 0.725            |
| 중유화력                           | 2,462,000 | 123,100   | 91.8     | 0.47                | 0.02     | 0.97   | 2.950            |
| 중유내연                           | 2,276,000 | 43,840    | 116.4    | 0.47                | 0.02     | 0.97   | 0.080            |
| 천연가스복합 <sup>34)</sup>          | 1,052,000 | 34,200    | 19.6     | 0.42                | 0.87     | 1.00   | 24.340           |
| 천연가스복합 with CCS <sup>35)</sup> | 1,052,000 | 34,200    | 224.9    | 0.38                | 0.87     | 1.00   | 0                |
| 천연가스터빈 <sup>36)</sup>          | 593,000   | 37,470    | 94.9     | 0.42                | 0.87     | 1.00   | 0                |
| 수소혼소터빈 <sup>37)</sup>          | 1,300,000 | 9,636     | 0        | 0.63                | 0.87     | 1.00   | 0                |
| 수소전소터빈 <sup>38)</sup>          | 1,300,000 | 9,636     | 0        | 0.63                | 0.87     | 1.00   | 0                |
| 경수로PWR <sup>39)</sup>          | 2,378,000 | 135,240   | 12.8     | 0.44                | 0.79     | 1.00   | 8.350            |
| 경수로OPR <sup>40)</sup>          | 2,587,000 | 150,280   | 13.9     | 0.44                | 0.79     | 1.00   | 11.400           |
| 중수로                            | 2,509,200 | 198,700   | 13.5     | 0.44                | 0.79     | 1.00   | 2.779            |
| SMR <sup>41)</sup>             | 4,400,000 | N.A.      | N.A.     | 0.315               | 0.9      | 1.00   | 0                |
| 수력 <sup>42)</sup>              | 3,709,445 | 111,283   | 0.0      | 0.40                | 0.20     | 0.28   | 1.582            |
| 소수력-0.4MW <sup>43)</sup>       | 4,483,115 | 134,493   | 0.0      | 0.51                | 0.20     | 0.36   | 0.004            |
| 소수력-3MW <sup>44)</sup>         | 4,483,115 | 134,493   | 0.0      | 0.51                | 0.20     | 0.50   | 0.053            |
| 태양광 <sup>45)</sup>             | 1,610,833 | 37,365    | 0.0      | 0.40                | 시간대별 세분화 | 0.16   | 5.062            |
| 차세대태양광 <sup>46)</sup>          | 647,058   | 64,705    | 0.0      | 0.40 <sup>47)</sup> | 4.6%p 증가 | 0.16   | 0 <sup>48)</sup> |
| 육상풍력 <sup>49)</sup>            | 2,526,228 | 72,193    | 0.0      | 0.40                | 시간대별 세분화 | 0.02   | 1.215            |
| 해상풍력 <sup>50)</sup>            | 6,874,400 | 88,056    | 0.0      | 0.40                | 시간대별 세분화 | 0.02   | 0                |
| 바이오매스 <sup>51)</sup>           | 2,980,000 | 103,303   | 55.8     | 0.40                | 0.95     | 0.29   | 0.425            |
| 매립가스                           | 2,809,080 | 89,050    | 0.0      | 0.40                | 0.40     | 0.29   | 0.069            |
| 폐기물                            | 1,863,720 | 65,940    | 87.9     | 0.40                | 0.80     | 0.24   | 0.212            |
| 부생가스                           | 1,863,720 | 65,940    | 87.9     | 0.41                | 0.64     | 0.75   | 1.356            |
| 해양                             | 4,034,020 | 214,100   | 0.03     | 0.40                | 0.40     | 0.01   | 0.255            |
| 태양열                            | 5,149,200 | 87,408    | 0.0      | 0.41                | 0.25     | 0.25   | 0                |
| 지열                             | 6,379,200 | 152,912   | 1,389.0  | 0.41                | 0.8      | 0.25   | 0                |
| MCFC <sup>52)</sup>            | 4,539,395 | 0         | 341.5    | 0.47                | 0.8      | 0.74   | 0.291            |
| SOFC <sup>53)</sup>            | 5,000,000 | 500,000   | 0        | 0.55                | 0.8      | 0.74   | 0                |
| IGCC <sup>54)</sup>            | 3,342,776 | 33,258    | 156.6    | 0.42                | 0.77     | 0.60   | 0.346            |
| ESS <sup>55)</sup>             | 1,772,400 | 변동유지비에 포함 | 5,670.0  | 0.885               | 0.314    | 1.00   | 0                |

30) 조성진 et al. 2015, 에너지경제연구원 기본연구보고서; 한국전력공사 2017, 한국전력통계; 전력거래소, 2016, 2015년 발전설비현황

31) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, CCS 포집비용 62~97 \$/t (Liquid absorption 기준)을 변동비에 반영

■ 수소 에너지 분야

• 수소 생산 기술

| 기술명                              | 주요기술특성치               | 기준연도(2017) | 미래연도 |
|----------------------------------|-----------------------|------------|------|
| 개질 (중앙형) <sup>56)</sup>          | 최대가동률 (%)             | 80         | 80   |
|                                  | 효율 (%)                | 72.6       | 72.6 |
|                                  | 기술수명 (년)              | 20         | 20   |
|                                  | 투자비용 (백만원/kgH2)       | 16         | 16   |
|                                  | 고정O&M비용 (백만원/kgH2/yr) | -          | -    |
|                                  | 변동O&M비용 (백만원/1000TOE) | 84         | 84   |
| 개질 (중앙형) with CCS <sup>57)</sup> | 최대가동률 (%)             | 80         | 80   |
|                                  | 효율 (%)                | 68.6       | 72.6 |
|                                  | 기술수명 (년)              | 20         | 20   |
|                                  | 투자비용 (백만원/kgH2)       | 16         | 16   |
|                                  | 고정O&M비용 (백만원/kgH2/yr) | -          | -    |

- 32) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 1,000MW(50% 혼소) 기준
- 33) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 1,000MW 기준
- 34) 민대기 외 2인, 탈원전·탈석탄·신재생 에너지 확대 정책에 따른 신규 전원구성의 수급 안정성 평가, 에너지경제연구, 제17권, 제1호, pp. 1-35, 2017. (효율, 가동율은 한전통계 등에 기반한 추정 결과)
- 35) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, CCS 포집비용 74~94 \$/t (Liquid absorption 기준)을 변동비에 반영
- 36) 민대기 외 2인, 탈원전·탈석탄·신재생 에너지 확대 정책에 따른 신규 전원구성의 수급 안정성 평가, 에너지경제연구, 제17권, 제1호, pp. 1-35, 2017. (효율, 가동율은 한전통계 등에 기반한 추정 결과)
- 37) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 복합용량 550MW(50% 혼소) 기준
- 38) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 복합용량 550MW 기준
- 39) 조성진 et al. 2015, 에너지경제연구원 기본연구보고서; 한국전력공사 2017, 한국전력통계; 전력거래소, 2016, 2015년 발전설비현황
- 40) 조성진 et al. 2015, 에너지경제연구원 기본연구보고서; 한국전력공사 2017, 한국전력통계; 전력거래소, 2016, 2015년 발전설비현황
- 41) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 2050년 최대 보급가능 용량은 2.1 GW로 전망
- 42) 한국에너지공단, 2018 신재생에너지백서, p.160, 1000kW 기준
- 43) 한국에너지공단, 2018 신재생에너지백서, p.160
- 44) 한국에너지공단, 2018 신재생에너지백서, p.160
- 45) 100kW 기준 (태양광 원가분석을 통한 균등화 비용 국제 비교 분석, 에너지경제연구원, 2017)
- 46) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, 차세대 페로브스카이트/결정질 실리콘 탠덤 태양전지(기술특성치는 2050년 기준)
- 47) 모듈효율은 25년 26%, 30년 28%, 50년 34\$ 증가로 태양광 발전 잠재량 증가에 기여
- 48) 2050 최대 보급 가능 용량은 483 GW로 전망
- 49) 제주상명풍력 #1~7 실적치 적용
- 50) EIA, NREL, IRENA 평균치 적용
- 51) KPX, 2017년도 발전설비현황(2018): GS 당진 바이오매스
- 52) KPX, 2017년도 발전설비현황(2018): 분당연료전지 #3, 효율은 KIER 연구자 제공자료(포스코에너지 제품 기준)
- 53) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견
- 54) KPX, 2017년도 발전설비현황(2018): 태안GCC
- 55) Lazard 보고서의 출력 100MW, 저장용량 400MWh급 Wholesale ESS(리튬이온전지)의 특성치를 참고

| 기술명                                 | 주요기술특성치                               | 기준연도(2017)               | 미래연도                             |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
|                                     | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | 176                      | 176                              |
| 개질 (분산형) <sup>58)</sup>             | 최대가동률 (%)                             | 80                       | 80                               |
|                                     | 효율 (%)                                | 69.2                     | 78(in 2030), 80(KIER목표)          |
|                                     | 기술수명 (년)                              | 20                       | 20                               |
|                                     | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | 51.2                     | 24.0 (in 2025)                   |
|                                     | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | -                        | -                                |
|                                     | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | 268                      | 268                              |
| 개질 (분산형)<br>with CCS <sup>59)</sup> | 최대가동률 (%)                             | 80                       | 80                               |
|                                     | 효율 (%)                                | 65.2                     | 78(in 2030), 80(KIER목표)          |
|                                     | 기술수명 (년)                              | 20                       | 20                               |
|                                     | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | 51.2                     | 24.0 (in 2025)                   |
|                                     | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | -                        | -                                |
|                                     | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | 365                      | 365                              |
| 수전해 <sup>60)</sup>                  | 최대가동률 (%)                             | 80                       | 80                               |
|                                     | 효율 (%)                                | 65.8                     | 79.0 (in 2030)<br>91.8 (in 2040) |
|                                     | 기술수명 (년)                              | 10                       | 10                               |
|                                     | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | 53                       | 53                               |
|                                     | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | 0.795<br>(1.5% of CAPEX) | 0.795<br>(1.5% of CAPEX)         |
|                                     | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | -                        | -                                |

56) 수소기술개발로드맵(2019), 수소경제활성화로드맵 수립 연구(2019), The Future of Hydrogen(2019)

57) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, Pilorge et al., "Cost Analysis of Carbon Capture and Sequestration of Process Emissions from U.S. Industrial Sector", Environmental Science and Technology, 54(12), 7524-7532 (2020)

58) 수소기술개발로드맵(2019), 수소경제활성화로드맵 수립 연구(2019), The Future of Hydrogen(2019)

59) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견, Pilorge et al., "Cost Analysis of Carbon Capture and Sequestration of Process Emissions from U.S. Industrial Sector", Environmental Science and Technology, 54(12), 7524-7532 (2020)

60) 수소기술개발로드맵(2019), 수소경제활성화로드맵 수립 연구(2019), The Future of Hydrogen(2019), JRC-EU-TIMES model (2019)

## • 수소 저장/이송/이용 기술

| 기술명                          | 주요기술특성치                               | 기준연도(2017)              | 미래연도                     |
|------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 기체수소저장 <sup>61)</sup>        | 최대가동률 (%)                             | 98                      | 98                       |
|                              | 효율 (%)                                | 96.49                   | 96.49                    |
|                              | 기술수명 (년)                              | 22                      | 22                       |
|                              | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | 1                       | 0.45 (in 2030)           |
|                              | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | 0.046<br>(4.6 of CAPEX) | 0.0207<br>(4.6 of CAPEX) |
|                              | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | -                       | -                        |
| 기체수소 파이프라인 이송 <sup>62)</sup> | 최대가동률 (%)                             | 70                      | 70                       |
|                              | 효율 (%)                                | 99.4                    | 99.4                     |
|                              | 기술수명 (년)                              | 20                      | 20                       |
|                              | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | -                       | -                        |
|                              | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | -                       | -                        |
|                              | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | 0.839                   | 0.420 (in 2030)          |
| 기체수소 트레일러 이송 <sup>63)</sup>  | 최대가동률 (%)                             | 100(임시)                 | 100(임시)                  |
|                              | 효율 (%)                                | 95.5                    | 95.5                     |
|                              | 기술수명 (년)                              | 20                      | 20                       |
|                              | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | -                       | -                        |
|                              | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | -                       | -                        |
|                              | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | 1.334                   | 0.417 (in 2030)          |
| 수소충전소 (기체) <sup>64)</sup>    | 최대가동률 (%)                             | 77                      | 77                       |
|                              | 효율 (%)                                | 94                      | 94                       |
|                              | 기술수명 (년)                              | 20                      | 20                       |
|                              | 투자비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> )       | 240                     | 72.0 (in 2030)           |
|                              | 고정O&M비용<br>(백만원/kgH <sub>2</sub> /yr) | -                       | -                        |
|                              | 변동O&M비용<br>(백만원/1000TOE)              | -                       | -                        |

61) JRC-EU-TIMES model(2019), 수소기술개발로드맵(2019), 수소생산 전과정 평가(2019)

62) JRC-EU-TIMES model(2019), 수소생산 전과정 평가(2019), 수소 경제가 온다(2020)

63) JRC-EU-TIMES model(2019), 수소생산 전과정 평가(2019), 수소 경제가 온다(2020)

64) 수소기술개발로드맵(2019), 수소경제활성화로드맵 수립 연구(2019), JRC-EU-TIMES model(2019), The Future of Hydrogen (2019)

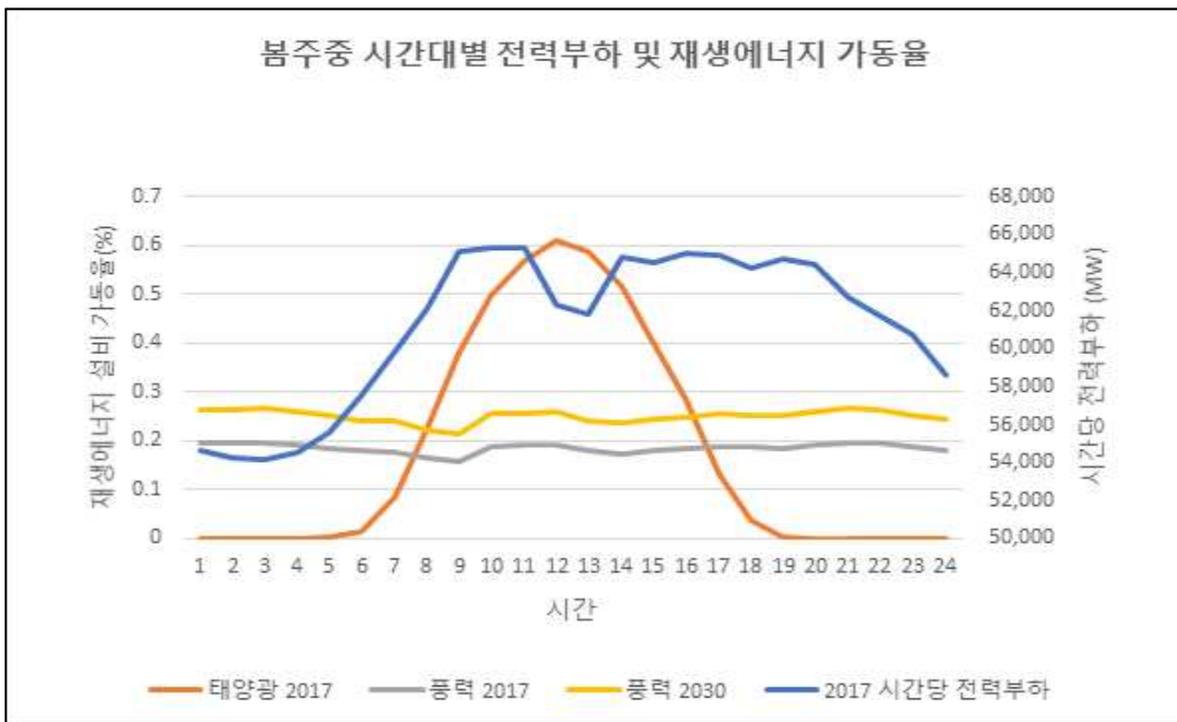
■ 열 에너지 분야

• 열 생산 기술

| 기술명                                   | 투자비   | 고정유지비 | 변동유지비 | 효율   | 이용률     | 피크기여도 | 기준년도용량 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|------|---------|-------|--------|
|                                       | 천원/kW | N/A   | N/A   | year | % / COP | %     | year   |
| 히트펌프<br>(상온, 전기-) 냉난방) <sup>65)</sup> | 200   | -     | -     | 15   | COP 3   | 18    | 2020   |
| 히트펌프<br>(고온, 저온) <sup>66)</sup>       | 600   | -     | -     | 20   | COP 1.5 | 22    | 2035   |

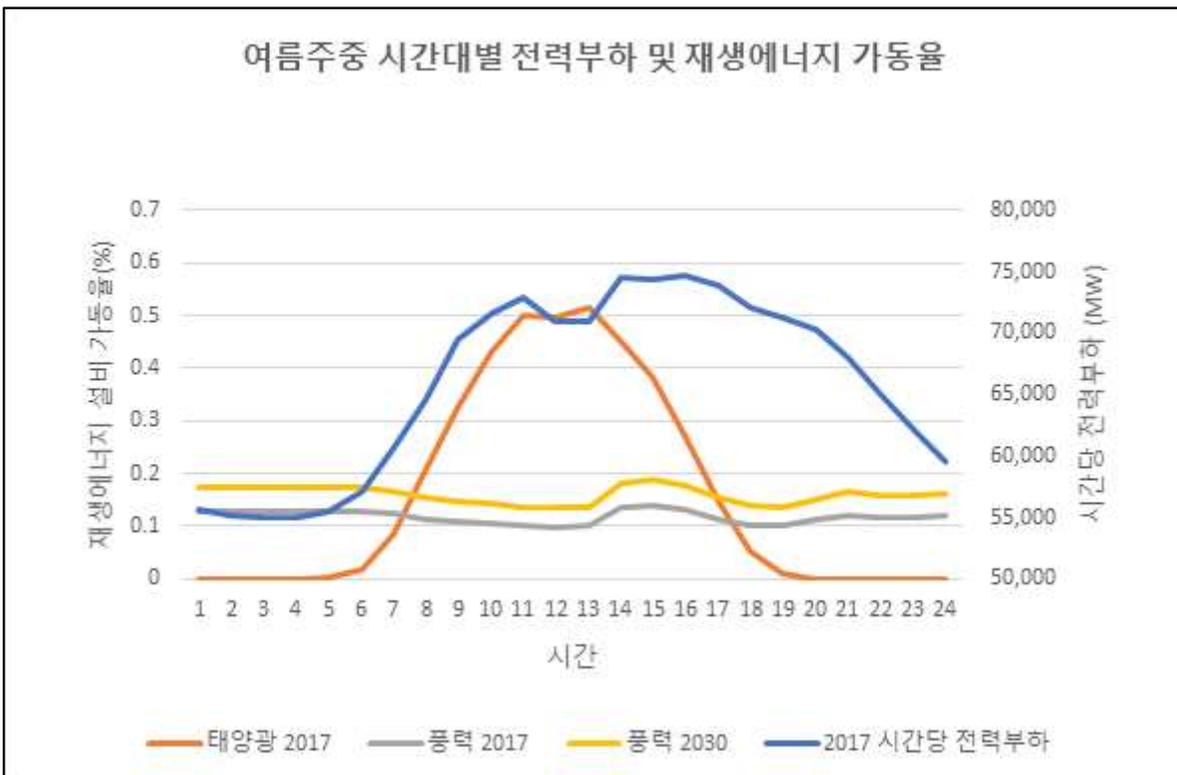
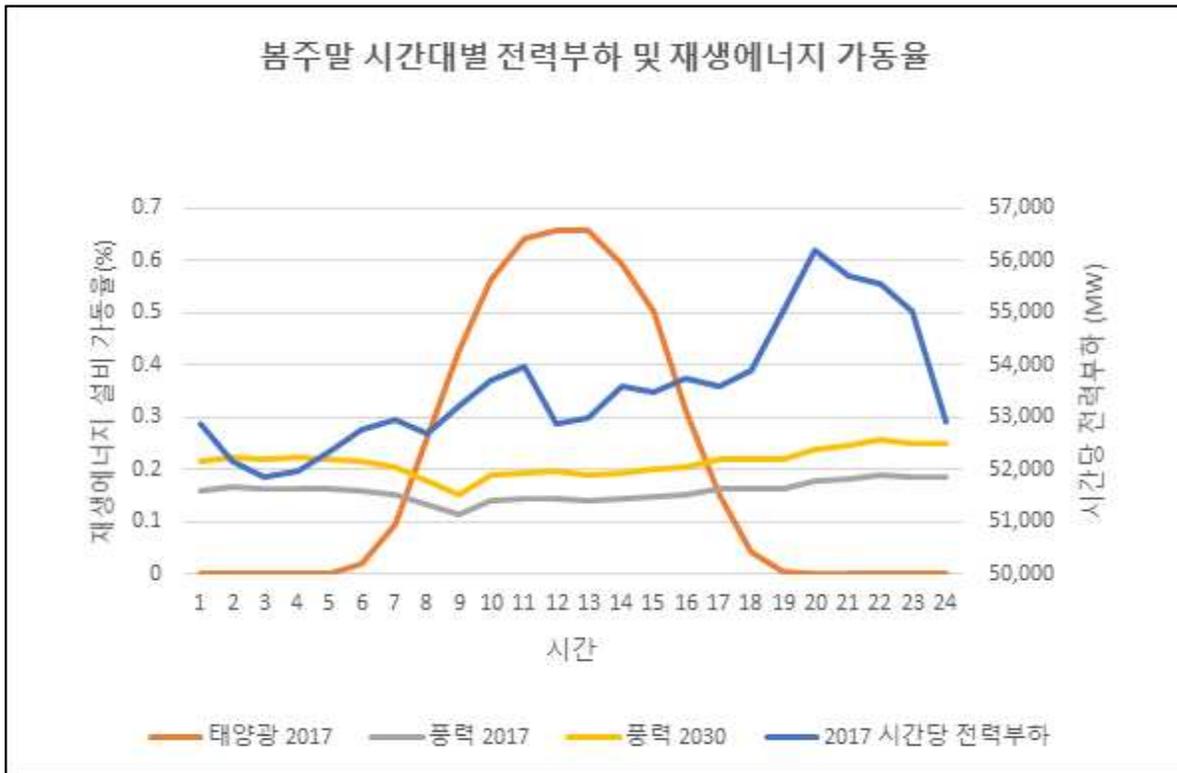
■ 타임 슬라이스별 전력 분하 패턴 및 풍력/태양광 이용률

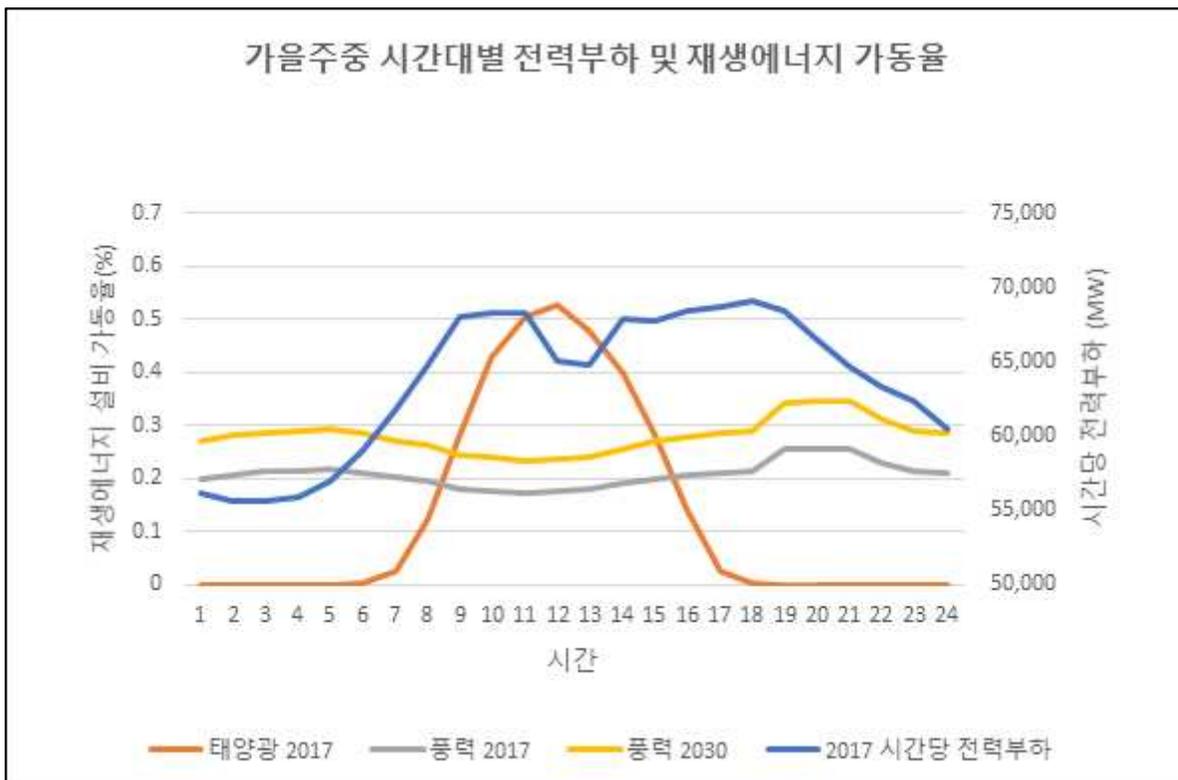
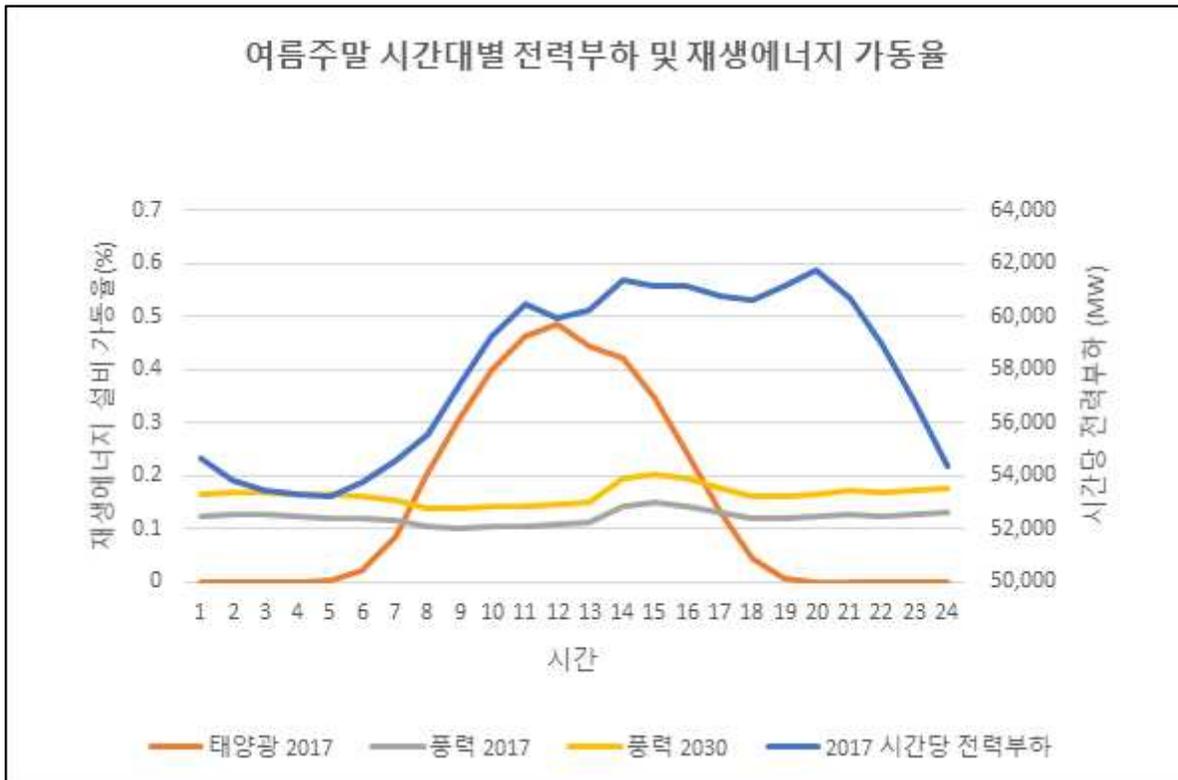
- 시간대별 전력 수요는 공공데이터포털의 2017년도 시간별 전력 수요 자료에 기반하여 설정하였으며, 전력 부하 패턴은 분석 기간 동안 일정하게 유지되는 것으로 가정
- 태양광 발전의 2017년 이용률은 공공데이터포털의 2017 한국서부발전 태양광 발전 현황을 이용하여 타임 슬라이스별 이용률 설정
- 육상풍력 발전의 2017년 이용률은 공공데이터포털의 한국남동발전 풍력 발전 현황을 이용하여 타임 슬라이스별 이용률 설정
- 2050년 이후 이용률은 2020 신재생에너지 백서를 기반으로 추정

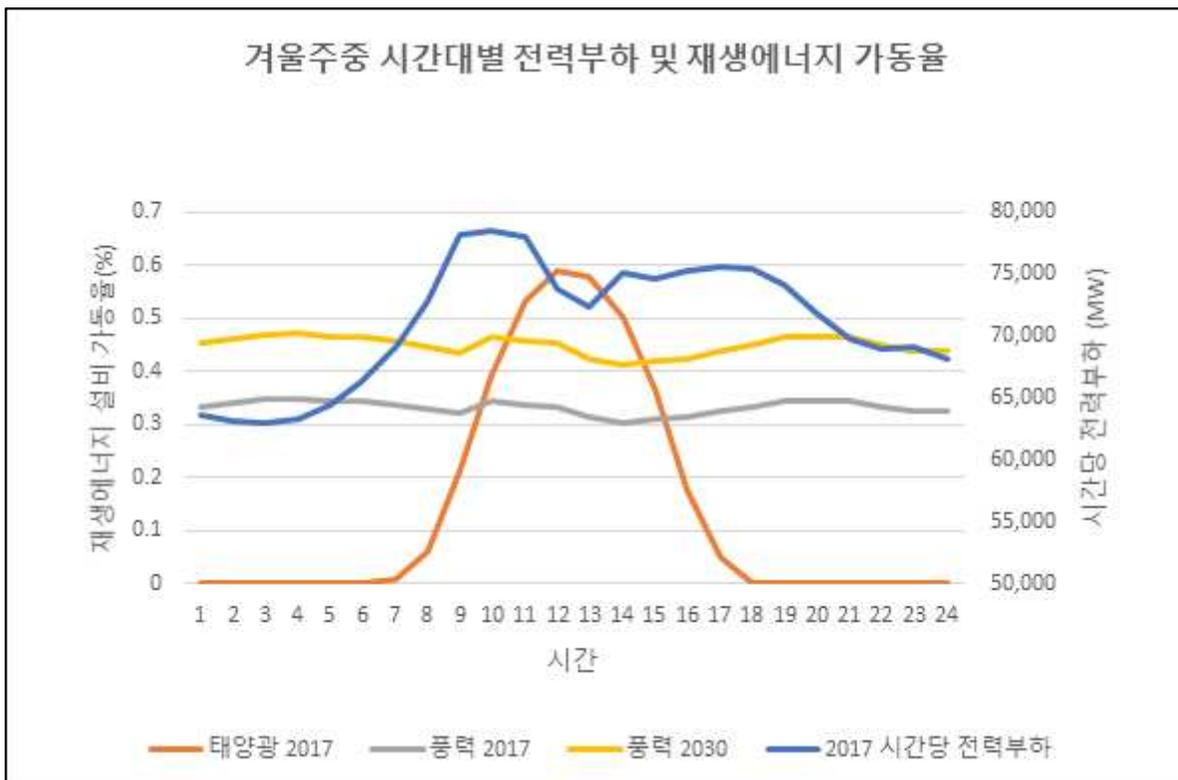
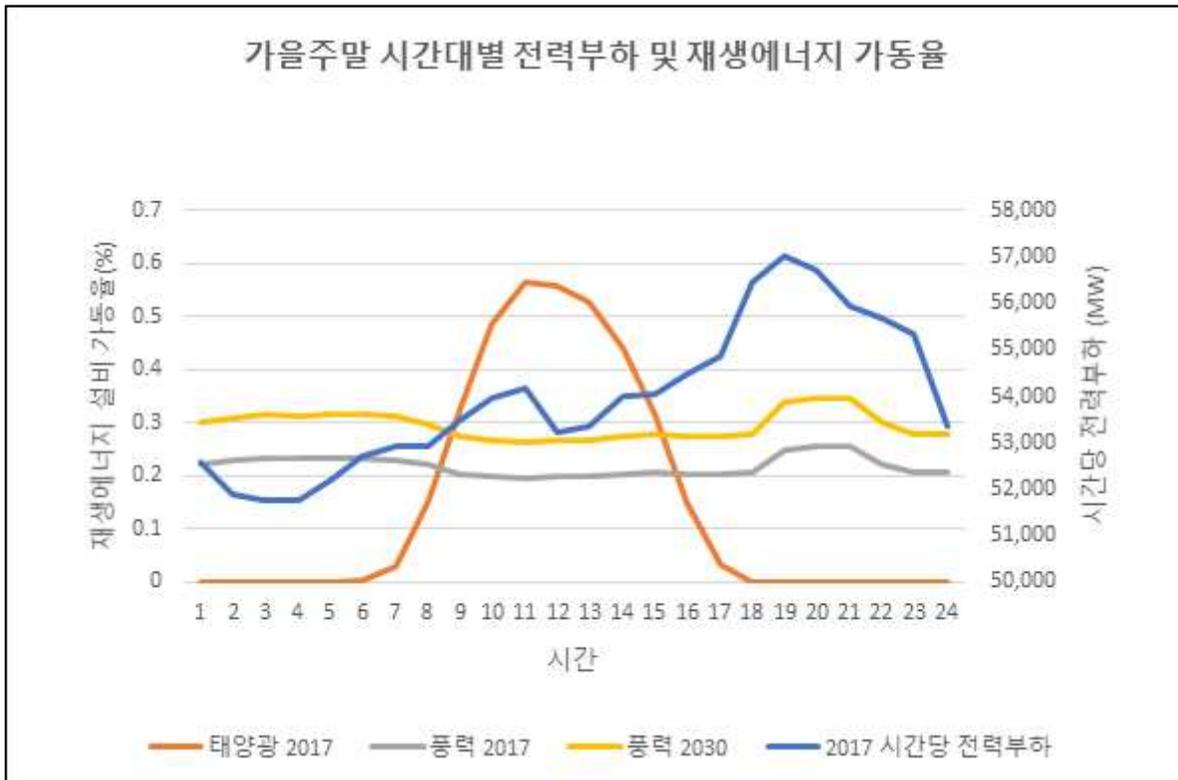


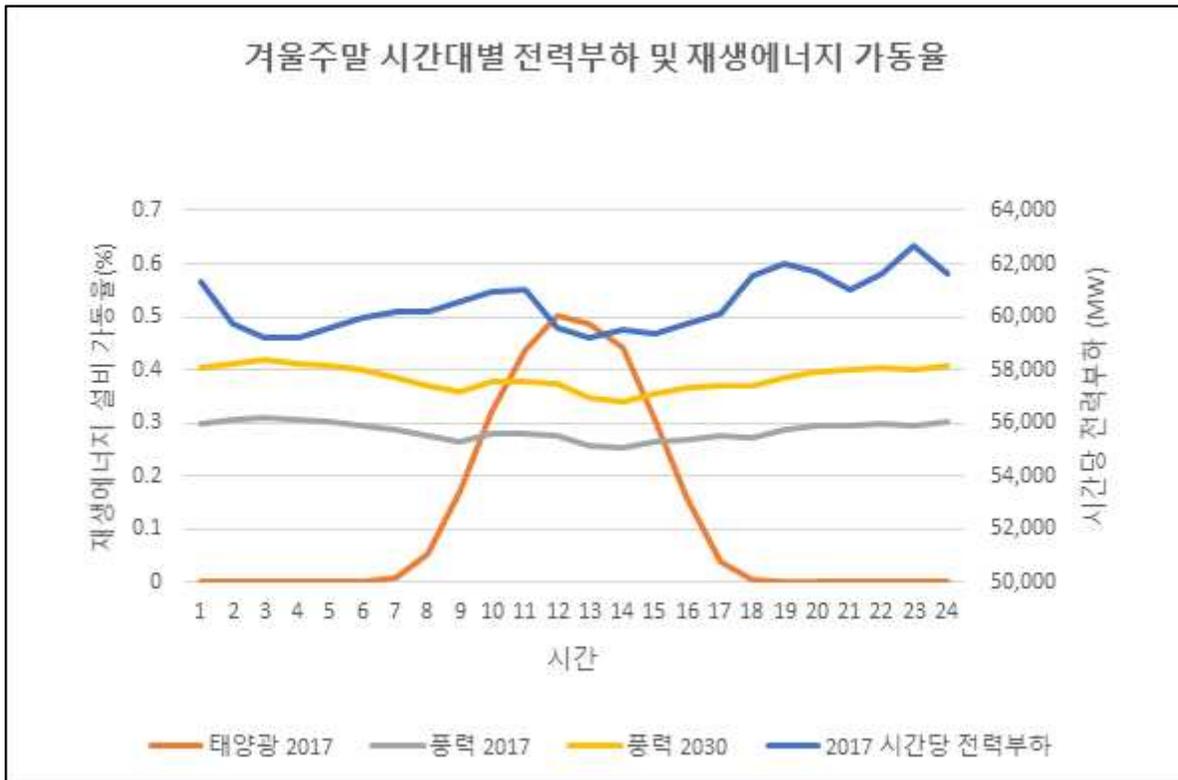
65) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견

66) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵 작업반 자문 의견





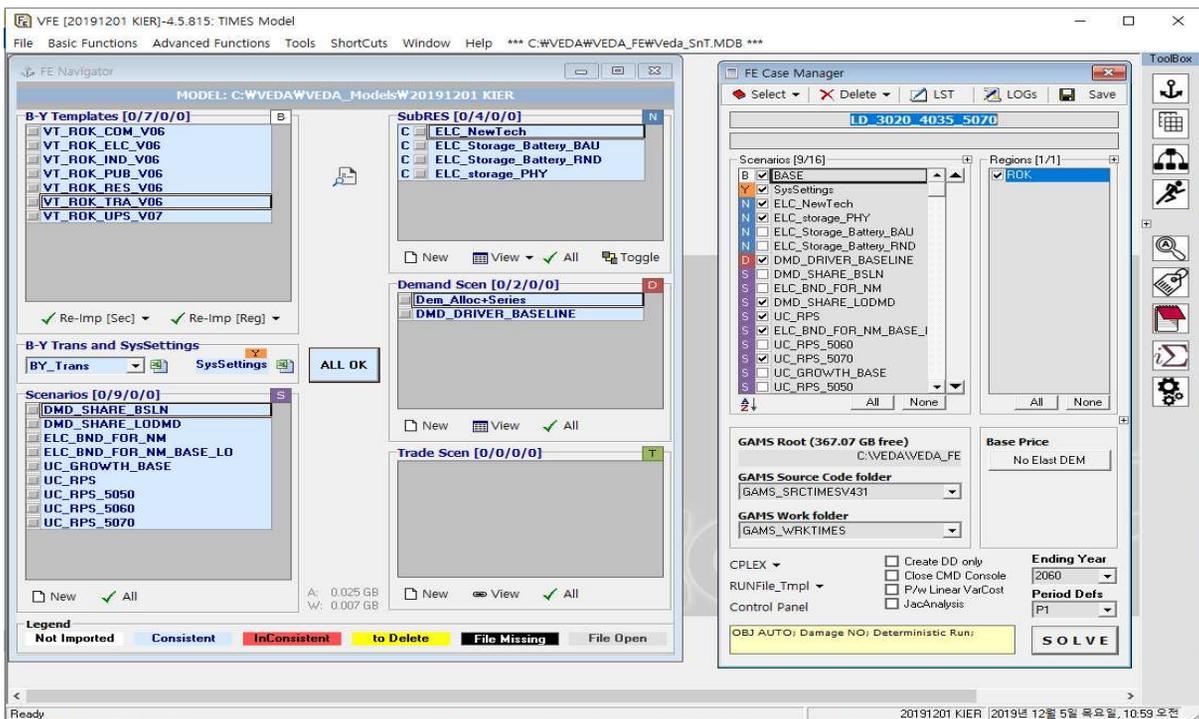




## 부록 3 모형 구현 화면

■ KANORS라는 업체에서 개발하여 판매하고 있는 VEDA FE/BE라는 사용자 인터페이스를 통하여 KIER-TIMES 모형 개발

- 모형은 1차에너지공급, 발전, 산업, 가정, 상업, 수송, 공공의 7개 모듈로 구성
- 1차에너지공급 모듈은 석탄, 석유, 원자력, 신재생에너지(수력 포함), LNG와 관련된 국내생산, 수입, 수출의 흐름을 반영하기 위한 기술, 원유 정제 기술, 그리고 도시가스 제조 기술을 포함
- 발전 모듈은 열병합발전을 포함한 발전기술, 산업단지용 고온 열 생산기술, 지역난방용 저온 열 생산기술, 그리고 양수발전과 ESS를 포함하는 전력저장기술에 대한 상세한 기술 특성치를 기반으로 개발
- 산업, 가정, 상업, 수송, 공공으로 분류되는 최종에너지소비 분야의 5개 모듈은 분야별 에너지원별 수요를 정의하기 위한 기술로 구현<sup>67)</sup>
  - 따라서 발전모듈과 같이 TIMES 모형의 최적화 기능을 이용한 분석은 수행할 수 없으며, 효율향상에 따른 에너지소비 저감 또는 연료 대체 등에 따른 효과는 외부적인 시나리오로 반영



[VEDA 기반의 KIER-TIMES 모형 구현 화면]

67) 에너지소비 분야에 대하여 개별 기술 수준의 상세한 모형 개발이 이루어지지 않은 이유는 상세한 기술 특성치 확보에 어려움이 존재하였으며, 소비자의 기술선택에 비용 외에 편리성, 심미성 등의 기타 요인이 크게 작용하기 때문에 최적화 기반의 모형 개발이 적합하지 않다고 판단하였기 때문

**KIER 에너지기술 분석 리포트**(KIER Energy Technology Analysis Report)는 주요 에너지 기술들의 에너지·환경·경제 측면의 파급효과에 대한 상세한 분석을 통하여 관련 R&D 기획 및 기술정책 수립에 기여하기 위하여 발간되었습니다.

**발행일** 2021년 12월

**발행인** 김종남

**발행처** 한국에너지기술연구원  
(34129) 대전광역시 유성구 가정로 152

**문의처** 한국에너지기술연구원 정책연구실  
박상용 책임연구원 042-860-3037 / gspeed@kier.re.kr  
안지석 연구원 042-860-3183 / jiseok@kier.re.kr