

KEEI ISSUE PAPER

이슈페이퍼 23-02

청정 수소 생산의 경제성 확보를 위한 수전해의 기술적·제도적 개선 방안 연구

김종우·이태의



이슈페이퍼 23-02

**청정 수소 생산의 경제성 확보를 위한
수전해의 기술적·제도적 개선 방안 연구**

김종우·이태의

1. 연구의 필요성 및 목적

□ 연구의 필요성

- 전 지구적으로 기후변화 대응을 위한 탈탄소 사회로의 전환은 이미 세계 경제·사회를 주도하는 트렌드로 자리매김함.
 - 청정수소(블루수소와 그린수소)는 재생에너지와 함께 탄소중립 실현을 위한 핵심 수단으로 인식되고 그 중요성이 점차 커지고 있음.
 - 수소는 풍부한 공급 잠재력과 탈탄소화가 어려운 산업부문을 포함하여 발전, 건물, 수송 등 다양한 부문에서 활용될 수 있으므로 그 역할이 점차 확대
- 우리 정부는 2021년 11월 ‘청정수소경제 선도국가(first mover)’로의 도약을 목표로 첫 법정계획인 「제1차 수소경제 이행 기본계획」을 발표
 - 대규모 수전해 실증 및 상용화를 통해 그린수소는 2030년 25만 톤, 2050년에는 300만 톤까지 국내에서 생산·공급 예정
 - 이와 더불어 국내 자본과 기술을 활용하여 해외로부터 청정수소를 직접 생산 및 도입하여 2050년 국내 자급률 60%를 목표로 제시
- 그러나 정부가 제시한 정책적 목표와는 달리 그린수소 생산의 핵심인 수전해의 국내 기술 수준은 선도국보다 낮고, 수전해 설비의 높은 비용으로 인해 대규모 상업화에 도달하지 못한 것이 현실
 - 그린수소의 본격적인 확대를 가로막는 가장 큰 걸림돌은 높은 재생에너지 전기요금과 낮은 기술성숙도에 의해 야기되는 높은 생산단가
 - 그린수소의 경제성 확보는 미래 수소경제로의 전환을 위해 해결해야 하는 최우선 과제로 인식

-
- EU, 미국 등 수소경제 선도국은 대규모 프로젝트를 통해 장기적인 목표를 갖고 기술 개발 및 상업화를 위한 투자를 진행 중
 - 국내 수전해 기술 및 수소생산 경제성의 현황을 파악하고, 탄소중립의 필수 요소인 그린수소 생산을 위해 우선 높은 수준의 수전해 비용을 낮추기 위한 방안을 기술적·정책적 측면에서 심도 있게 살펴볼 필요가 있음.

□ 연구의 목적

- 본 연구는 청정수소생산의 핵심인 수전해 기반 수소생산 비용을 낮추기 위한 기술적·제도적 개선방안을 제시하는 것을 목적으로 함.
- 수소경제에서 수전해 수소의 공급 시장을 선도하기 위한 향후 투자 방향을 결정하기 위해서는 저렴한 수전해 수소생산을 위한 기술 개발 및 정책지원의 방향성 파악이 요구됨.

2. 연구내용 및 주요 분석 결과

□ (제2장) 국가별 청정수소 정책 및 국내외 수전해 기술 현황

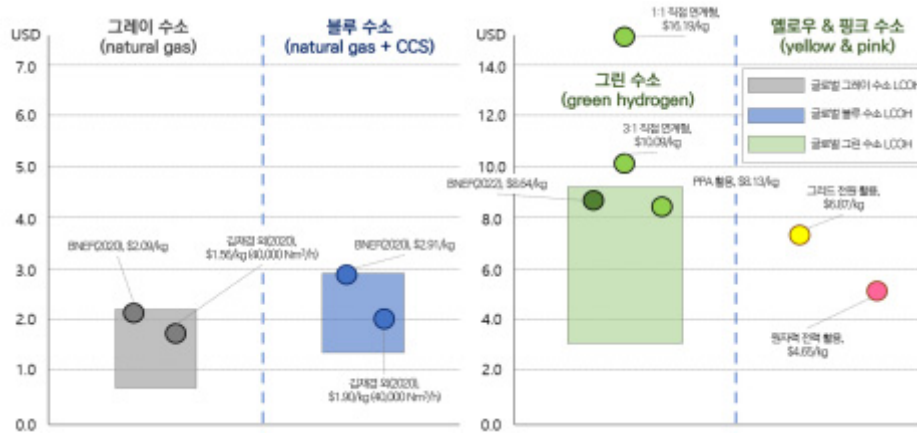
- (국가별 청정수소 전략) 단기에는 경제성 확보가 쉬운 블루수소가 활용될 수 있겠지만, 궁극적으로 대규모 수전해 설비에서 생산된 그린수소를 산업, 수송, 건물 등 광범위한 부문에서의 활용을 단계적으로 확대하는 것임.
- (EU) 기후중립 달성을 위해 「Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe」을 발표(2020.8)함. 2030년까지 40GW의 수전해 시설 구축을 통해 1천만 톤의 그린수소 생산이 전략 중 하나이며, 2050년까지의 3단계 전략을 제시

- (독일) 2020년 6월 독일연방 경제에너지부에서 「국가 수소 전략(Nationale Wasserstoffstrategie)」을 발표하고 2030년까지 5GW의 수소생산설비를 구축 예정
- (프랑스) 2020년 프랑스 정부는 향후 10년간 수소 에너지 기술 개발 및 인프라 구축에 70억 유로의 재정을 투입하기 위한 「청정수소국가전략」을 발표하여 2030년까지 6.5GW의 수전해 설비를 구축 계획
- (수전해 기술의 개념) 물을 원료로 전기 화학적 분해 반응을 통해 수소와 산소를 생산하는 기술로 사용되는 전해질에 따라 알칼라인(AEC), 고분자전해질막(PEM), 음이온교환막(AEM), 고체산화물(SOEC) 수전해로 구분
 - (AEC) 현재 기술성숙도가 가장 높은 방식으로 상업화 및 대규모 그린수소 생산을 위해 널리 활용
 - (PEM) 상용화된 최신 기술로 실증 및 상용화 단계에 진입, 가동정지 특성이 우수하고 고압 작동에 적합하지만, 고가의 소재 사용으로 설비 비용이 높음.
 - (AEM & SOEC) 연구개발 단계로 소수의 기업만이 제조와 상업화에 참여, 기술성숙도가 상대적으로 낮음.
- (국내외 수전해 기술 수준 비교) 단일 MW급 스택 기준으로 알칼라인 및 PEM 수전해 방식의 국내외 기술 수준 격차는 크지 않음.
 - 스택 설계·제작 및 핵심 소재 개발 등 기초기술은 우수한 편이지만 대규모 실증 및 재생에너지 연계 수전해 기술 등 응용 및 상용화 기술경쟁력은 선도국보다 낮음.
 - 해외의 경우, 대규모 실증 및 스택 모듈화를 기반으로 시스템 운영 기술을 확보하고 있어 절대적 시스템 규모에서 차이가 발생

□ (제3장) 국내 수소생산비용 및 해외 도입 비용

- (LCOH 분석) 국내 수소생산방식별 비용 수준을 선행연구 검토와 균등화 수소 생산원가(levelized cost of hydrogen) 추정을 통해 비교·분석 실시
 - 통상적으로 그레이 수소는 가장 저렴한 수소생산방식이며, 다음으로는 블루 수소, 그리고 그린수소의 LCOH는 블루수소보다도 약 2~3배 높음([그림 요약-1], 글로벌 수소의 LCOH 범주, 즉 막대그래프로 표시).
 - 한국은 모든 수소생산방식에서 LCOH가 가장 높아 가격경쟁력 확보가 매우 어려운 상황([그림 요약-1]의 동그라미 표시)
 - (재생에너지 직접 연계형 그린수소) 동일 규모의 태양광 설비를 5MW급 수 전해 설비와 직접 연계할 경우(1:1 직접 연계형, 이용률 14.9%), LCOH는 \$16.19/kgH₂이며, 3:1로 구성할 경우(이용률 37.1%)는 \$10.09/kgH₂
 - (PPA를 활용한 그린수소) LCOH는 \$8.13/kgH₂로 이는 3:1 직접 연계형 대비 생산원가를 약 \$2/kgH₂ 절감 가능한 것으로 분석됨.
 - (원자력 전력을 이용한 핑크 수소) 원자력 발전 정산단가를 가정하여 도출된 추정치는 \$4.65/kgH₂로 이는 그리드 전원(산업용(을))을 활용한 수소생산 비용(\$6.87/kgH₂)보다도 저렴한 수준
- (해외 도입 비용) BNEF(2019)에 따르면, 선박을 이용한 수소 운반 비용 (10,000km 운반 거리)은 2019년 기준 액화수소(LH₂)가 \$7.77/kgH₂, LOHC \$5.92/kgH₂, 암모니아는 \$3.14/kgH₂(재전환 비용 제외 시 \$1.72/kgH₂)로 분석
 - 향후 운반체별 기술 향상(future best case)을 가정할 경우, 암모니아가 \$2.11/kgH₂(재전환 비용 제외 시 \$1.18/kgH₂)로 가장 저렴한 선박 운송 수단이며, 액화수소는 \$2.57/kgH₂, LOHC는 \$2.32/kgH₂로 전망

[그림 요약-1] 수소생산방식별 균등화 생산원가(LCOH) 비교



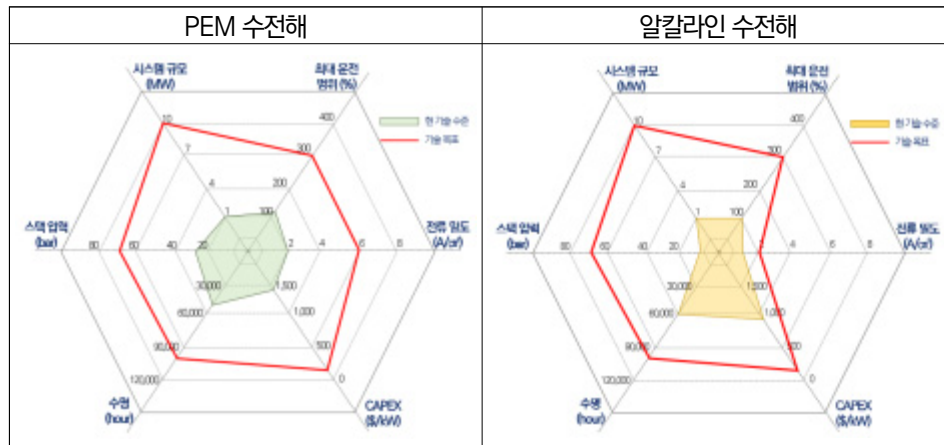
주: 1) 글로벌 그레이, 블루, 그린수소의 LCOH 값의 범주는 IEA(2020), BNEF(2020 & 2022)의 분석 결과를 종합하여 최대 범위(최소~최대 LCOH)로 산정
 2) BNEF(2020, 2022)와 김재경 외로 표시(동그라미)된 비용 수치는 선행연구들의 한국 LCOH 분석 결과를 나타내며, 그 외에 LCOH는 본 연구에서 분석한 균등화 생산원가를 의미
 3) 국내 LCOH 분석 결과는 2020년 매매기준 평균 USD 환율(1 USD ≒ 1,180.11원)을 적용하여 단위 변환
 자료: 제3장의 분석 결과를 바탕으로 저자 작성

□ (제4장) 수전해 경제성 확보를 위한 기술적 개선방안

- 그린수소의 경제성을 조기에 확보하기 위해서는 국내 재생에너지 구매 단가(재생에너지 기반 전기요금)를 낮추는 것이 필수 조건이지만, 이와 함께 수전해 설비 비용의 하락을 유도할 수 있는 기술 개발이 반드시 수반되어야 함
- 수전해 설비 비용에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 6개의 핵심 성과지표(KPI)로 구분하고 각 지표에 대해 국내 기술 수준과 향후 그린수소 경제성 확보를 위한 기술 목표를 제시([그림 요약-2] 참고)
- 수전해 수소생산의 효율 향상과 규모의 경제를 통해 비용을 낮추기 위해서는 수전해 핵심 구성 요소인 단일 스택의 대용량화 및 전류밀도 향상이 요구
- 수전해 장치의 내구성과 긴 수명을 보장하면서 CAPEX를 낮추기 위해서는 각 수전해 유형의 특성을 극대화할 수 있는 핵심 소재(전극 및 촉매 소재 개발, 백금, 티타늄 등 값비싼 소재를 대체할 수 있는 기술 등) 개발이 필요

- 수전해의 안정적 운영(가스 혼합으로 인한 폭발 방지)을 위해 부하 운전범위를 확대하고 적정 수전해 압력 설정이 필요

[그림 요약-2] 핵심 성과지표별 현재 기술 수준과 기술 목표



주: 1) CAPEX(\$/kW)의 경우, PEM 수전해는 \$700~2,100의 중앙값을, 알칼라인은 \$500~1,400의 중앙값을 사용하였으며, 타 성과지표는 기술 목표가 증가하는 형태이지만, CAPEX는 기술 향상으로 인해 감소로 나타남.

2) 수전해 기술에 대한 성과지표별 기술 개선 방향은 본문의 <표 4-1>을 참고

자료: 제4장의 내용을 바탕으로 저자 작성

□ (제5장) 수전해 경제성 확보를 위한 정책 및 제도적 개선방안

○ 선도국과의 수전해 기술 격차를 해소하기 위해서는 향후 체계적인 수전해 R&D 투자계획의 수립 필요

- 지난 5년간 수전해 기술별 R&D 투자 규모는 총 1,382억 원으로, 대부분 기술성숙도가 높고 상용화 단계에 접어든 알칼라인과 PEM 수전해에 집중 (약 88.2%), 반면 AEM과 SOEC 수전해는 상대적으로 미미
- 기후대응기금 중 2022년 수소 관련 주요 사업의 예산은 약 424억 원으로 전체 기금의 1.7%에 불과
- 일본의 경우, 2조엔 규모의 ‘그린이노베이션 기금’ 중 수소 관련 11가지 프로젝트에 전체 기금의 20%인 3,840억 엔을 투자

- 국가별로 재생에너지를 이용한 그린수소 생산비용의 차이를 보전하기 위한 인센티브 정책도 환경에 맞게 마련 중
 - 특히, 미국은 2022년 8월 인플레이션 감축법(IRA)을 발표하고, 향후 10년 동안 청정수소에 최대 \$3/kgH₂까지 세액공제를 제공
 - 우리나라의 경우, 수소법 개정안을 통해 ‘청정수소 인증제도’와 ‘청정수소발전 의무화제도(CHPS)’의 법적 근거를 마련
 - 수소법 개정안이 본격적으로 시행될 경우, 청정수소의 경제성 확보 및 높은 생산원가를 보전할 수 있는 구체적인 방안이 제시될 것으로 예상

3. 결론 및 정책 시사점

□ 수전해 수소의 경제성 확보를 위한 기술적 개선 방향

- 기술성숙도가 높고 상용화 단계에 진입한 알칼라인과 PEM 수전해를 중심으로 전술한 KPI에 대해 기술 개선의 방향성을 제시
 - (시스템 규모) 현재 1MW 수준의 단일 스택은 장기적으로 단일 스택을 모듈화한 10MW급 스택 개발이 요구되며, 모듈화 시스템을 운영할 수 있는 제어 기술이 필요
 - (전류밀도) 현재 알칼라인 수전해의 MW급 전류밀도는 0.2~0.8A/cm², PEM은 1~2A/cm² 수준이며 궁극적으로 각각 2A/cm², 4~6A/cm²까지 전류밀도 향상이 필요
 - (압력) 현재 대부분 상압(PEM은 30bar 수준)에서 운전되는 알칼라인 수전해의 경우 향후 70bar 이상을 목표(PEM도 동일 목표)로 기술 개발이 요구됨. 그러나 가스 혼합에 의한 폭발 위험을 방지하기 위해 가스 차단성이 우수한 다이어프램막(PEM은 분리막) 개발이 핵심

- (부하 운전 범위) 알칼라인 수전해의 통상적인 운전 범위가 15~100%(PEM은 5%~120%)인 것을 감안할 때 미래에는 5~300%까지 확대 필요함. 단, 최대 운전 범위의 확대는 전극, 분리막 등 핵심 부품의 열화 반응으로 인해 수명 단축을 초래할 수 있어 시스템 규모와 안정성을 고려하여 설계 필요
- (수명) 수전해 수소의 경제성 확보를 위해 100,000시간 이상의 수명이 보장되어야 함. 하지만, 수전해는 강산 또는 강염기와 같이 극단적인 화학적 환경에서 운전되기 때문에 극단적인 화학적 환경에서도 열화를 억제할 수 있는 전극(알칼라인), 촉매, 분리막, 다공성 확산체(PTL) 개발이 필수적
- (CAPEX) PEM 수전해 기준, 현재 \$700~2,100/kW(알칼라인은 \$500~1,400/kW)인 CAPEX를 \$200/kW 이하로 낮출 수 있는 소재 개발이 필요함. 특히, PEM 수전해의 경우는 티타늄(Ti), 이리듐(Ir) 등 고가 비용 소재를 대체할 수 있는 획기적인 소재 개발이 되지 않는다면 가격 저감 한계가 있음.

□ 수전해 수소의 경제성 확보를 위한 정책적·제도적 시사점

○ 청정수소의 정의 및 인센티브 범위의 명확화 필요

- 수소법에서 정의하고 있는 청정수소(무탄소수소, 저탄소수소, 저탄소 수소화합물)의 분류를 위한 이산화탄소 배출량의 기준을 명확하게 제시하고 이를 통해 청정수소의 등급별 지원 규모와 방법에 대한 구체화 필요
- 2030년 이후 청정수소의 해외 도입이 본격화될 것으로 예상되므로 이를 국내 청정수소 인증 대상으로 포함하기 위한 명확한 근거 및 분류 기준 마련
- 중단기적인 관점에서 핑크 수소의 가격경쟁력을 고려할 때, 청정수소 인증제도에 원자력을 활용한 수소생산을 포함하는 것을 심도 있게 검토하고 향후 별도의 계약요금 체계 마련 등 관련 법·제도적 지원 필요

- 수전해 기술 격차를 빠르게 해소하고 독자적인 국내 기술 확보를 위해 R&D 투자의 우선순위를 합리적으로 결정하고 핵심기술에 집중적인 투자와 지원 필요
 - 기술성, 경제성, 탄소 감축 기여도 등을 종합적으로 고려할 때, 향후 수소생산 R&D의 투자 우선순위는 ① 알칼라인과 PEM 수전해, ② 블루수소, ③ SOEC와 AEM 수전해, ④ 개질 수소 순으로 나타남(제5장 참고).
 - 최우선 순위인 알칼라인과 PEM 수전해의 경우, 제4장에서 도출된 핵심 성과지표를 향상시킬 수 있는 세부 기술에 집중적으로 투자와 지원이 필요
 - EU와 일본과 같이 정부 주도로 추진하는 대규모 프로젝트가 필요하며, 기후 대응기금 내 수소생산과 관련된 프로젝트를 확대하는 등 그린수소 R&D 투자를 위한 추가적인 재원 마련 필요
- 그린수소 생산 R&D를 선도하고 각자의 전문성을 보유한 선도기업을 육성
 - 국내 수전해 기업은 대부분 비상장 중소기업이므로 재정적 어려움 없이 사업 기반을 조성할 수 있도록 적극적인 지원과 투자가 필요함.
 - 수전해 수소생산의 경제성을 확보하기 위해서는 시스템 전반에 걸쳐 다양한 기술이 요구되며, 소수 기업에서 시스템 전체 기술 개발을 주도할 수 없는 구조
 - 정부 주도하에 각 세부 기술에 전문성을 갖춘 선도기업을 지원·육성하고 개발된 우수한 소재 및 부품이 실증 및 상용화에 활용될 수 있도록 체계 마련
- 청정수소생산 인프라 구축을 지원할 수 있는 인센티브 정책이 필요
 - 세계 각국은 청정수소의 높은 생산단가를 보전하기 위한 보조금 지급(칠레, 독일, 네덜란드 등), 세액공제(미국, 브라질, 독일 등), 전력망 수수료 면제(오스트리아) 등 다양한 정책을 발표 또는 시행
 - 국내에서도 청정수소를 조기에 공급하고 수소경제 활성화를 위해 구체적인 지원제도 마련 필요