New & Renewable Energy 2023. 6 Vol. 19, No. 2
ISSN 1738-3935 (Print)
ISSN 2713-9999 (Online)
https://doi.org/10.7849/ksnre.2023.0008
[2023-6-HE-002]

Check for updates

기술, 경제성을 고려한 최적 친환경 수소생산 기술 선정 방법

이지현[1)*] · 제갈성[2)]

Selecting Optimal CO_2-Free Hydrogen Production Technology Considering Market and Technology

Ji Hyun Lee[1)*] · Seong Jegarl[2)]

Received 27 March 2023 **Revised** 10 May 2023 **Accepted** 19 May 2023

ABSTRACT With the increased interest in renewable energy, various hydrogen production technologies have been developed. Hydrogen production can be classified into green, blue, gray, and pink hydrogen depending on the production method; each method has different technical performance, costs, and CO_2 emission characteristics. Hence, selecting the technology priorities that meet the company strategy is essential to develop technologically and economically feasible projects and achieve the national carbon neutrality targets. In addition, in early development technologies, analyzing the technology investment priorities based on the company's strategy and establishing investment decisions such as budget and human resources allocation is important. This study proposes a method of selecting priorities for various hydrogen production technologies as a specific implementation plan to achieve the national carbon neutrality goal. In particular, we analyze key performance indicators for technology, economic feasibility, and environmental performance by various candidate technologies and suggest ways to score them. As a result of the analysis using the aforementioned method, the priority of steam methane reforming (SMR) technology combined with carbon capture & storage (CCS) was established to be high in terms of achieving the national carbon neutrality goal.

Key words Hydrogen production(수소 생산), Technology selection(기술 선정), Energy storage(에너지저장), P2G(에너지가스변환)

1. 서 론

에너지 전환에 따른 재생에너지 증가와 함께 에너지 저장 기술의 확대가 예상된다. 에너지 저장 기술은 전기화학적, 기계적, 화학적 또는 열적 방법 등 다양한 기술적 방안이 제시되고 있으며 이중 수소, 암모니아 등을 활용한 화학적 방법의 에너지 저장 기술은 재생에너지와 연계한 P2G(Power to Gas) 기술로서, 장기 에너지 저장 특성을 활용하여 재생에너지의 간헐성 및 변동성에 대응할 수 있고 CO_2 배출이 없는 친환경연료로써 탄소중립 달성에 높은 기여가 예상된다.

관련하여 우리 정부에서는 '19년 1월 세계 최고 수준 수소경제 선도국으로 도약을 위한 「수소경제 활성화 로드맵」에 이어 「수소기술 개발 로드맵, 2019」, 「제1차 수소경제 이행 기본계획, 2021」등 정부 차원의 정책을 발표하였다. 「제1차 수소경제 이행 기본계획」의 주요 내용으로, '30년 기준 국내 총 수소 공급량은 3.9백만 톤, '50년 27.9백만 톤으로 재생에너지 자원이 부족한 우리나라의 특성상 해외

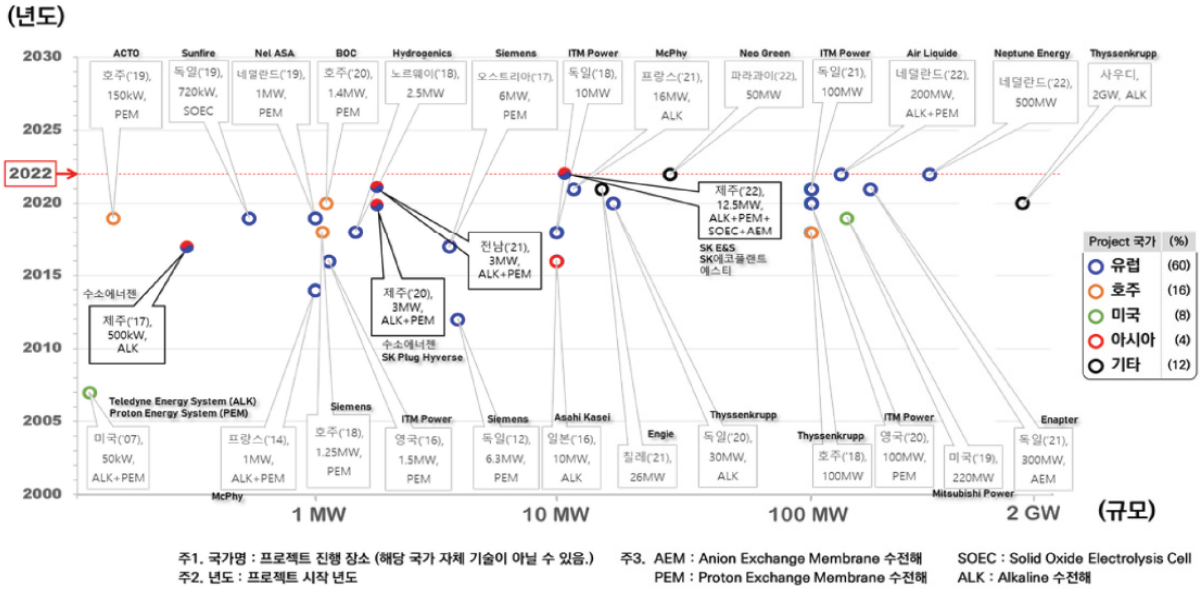
1) Principal Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute
2) Chief Researcher, New & Renewable Energy Laboratory, Korea Electric Power Research Institute
*Corresponding author: jihyun.lee@kepco.co.kr
Tel: +82-42-850-5350 Fax: +82-42-865-5390

Copyright ⓒ 2023 by the New & Renewable Energy
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도입 수소가 많은 비중을 차지하고 있다('50년 기준: 국내 생산 500만 톤, 해외 수입 2,290만 톤). 이러한 해외 생산 수소 도입을 위해 정부에서는 수소 인수기지를 구축하고 기체, 액화 수소 및 암모니아 등 다양한 형태로 트레일러, 수소 배관망 등을 통해 수소를 공급할 계획이다. 수요 측면에서는 발전, 수송, 산업 분야가 중요 수요처로서 '30년까지 발전, 수송이 수요량 대부분을 차지하며, '50년에는 산업 및 발전 분야가 전체 수요 중 약 86%를 차지할 전망이다.[1]

전 세계적으로 대규모 수소공급을 위한 다양한 공정이 현장 적용 또는 개발 중이다. 이를 수소의 생산방식에 따라 그레이, 블루, 그린, 브라운 및 청록수소 등으로 분류할 수 있으며 주요 특징은 다음과 같다. ①그레이수소(Grey H_2): 화석연료를 이용하여 생산되는 수소로, 가장 일반적인 수소생산 방법이나 수소생산을 위한 탄소 배출량이 높다. 그린수소나 블루수소 보다 수소 생산단가가 낮지만 공정에서 CO_2를 배출하므로 탄소중립 목표 달성을 위한 기술로서는 적합하지 않다. ②블루수소(Blue H_2): 천연가스와 같은 화석연료를 이용하여 생산되는 수소로, 천연가스 분해 공정 시 발생하는 CO_2를 포집하여 분리한다. 그린수소와 비교하여 비교적 저렴하게 생산될 수 있지만, 화석연료를 사용한다는 단점이 있다. ③그린수소(Green H_2): 재생에너지를 이용하여 생산되는 수소로 가장 친환경적인 수소생산 방법이며 전기분해, 생물학적 방법 등을 이용하여 생산될 수 있다. 재생에너지를 사용하기 때문에 친환경적이며 또한, 지속 가능한 에너지 원료로써 중요성이 매우 높으나 초기 투자 비용이 높고 수소 생산량이 한정적인 단점이 있다. ④브라운수소(Brown H_2): 가장 비친환경적인 수소생산 방법으로 산업용 프로세스에서 발생하는 폐기물을 연료로 사용하여 생산되는 수소이다. 그린수소와 비교하여 수소 생산단가는 낮지만, 공정에서 부가적으로 발생하는 폐기물을 처리하는 데 추가적인 비용이 발생하며 CO_2를 다량 배출하므로 환경적이지 않다. ⑤청록수소(Turquoise H_2): 천연가스를 고온의 반응기에 주입하고 열분해하여 수소를 생산한다. 블루수소에 비해 생산과정에서 전력도 더 적게 소모하며, 수소생산 공정에서 포집된 고상의 탄소는 카본블랙이나 인조흑연 등의 원료로 활용될 수도 있다. 이와 함께 암모니아로부터 열(암모니아 크래킹) 혹은 전기화학적 방법(암모니아 전해 등)을 통해 수소를 추출하는 기술도 암모니아 자체의 유독성 및 가연성의 한계에도 불구하고 높은 수소생산 효율성과 경제성을 갖춘 기술로 주목받고 있다. 특히 비료 등 질소 산업에서 이미 축적된 인프라와 체계를 활용할 수 있어 경제성이 높고 운송과 저장이 용이하며 안정적 공급이 가능한 장점이 있다.[2]

국내 수소생산 관련 연구는 대부분 한전 및 발전사 등이 참여한 정부 R&D 사업 기반의 P2G 기술 중심으로 진행 중이다(Fig. 1 참조). 대표 연구개발 사업으로 한전 전력연구



주1. 국가명 : 프로젝트 진행 장소 (해당 국가 자체 기술이 아닐 수 있음.)
주2. 년도 : 프로젝트 시작 년도
주3. AEM : Anion Exchange Membrane 수전해
PEM : Proton Exchange Membrane 수전해
SOEC : Solid Oxide Electrolysis Cell
ALK : Alkaline 수전해

Fig. 1. Current status of hydrogen production project[6]

원은 재생에너지 이용 극대화를 위한 2 MW급 하이브리드 수전해(알칼라인 및 고분자 전해질막 수전해) 기반 수소생산 기술개발 연구를 수행하였다('19~'21).[3] 또한, '21년부터 '그린수소 생산 시스템 신뢰성 제고 및 운영 기술개발' 과제가 착수되어 전남 영광에 알칼라인 및 고분자 전해질막 수전해 신뢰성 평가 센터 구축을 진행 중이다.[4] '22년에는 한국남부발전 주관 하에 총 12.5 MW급 재생에너지 연계 대규모 그린수소 실증장 구축 및 운영기술 개발 연구가 착수되었다. 본 기술개발을 통해 '26년까지 알칼라인 수전해(2 MW급), 고분자 전해질막 수전해(7 MW급), 음이온 전해질막 수전해(2 MW급), 고체산화물 수전해(1.5 MW급) 총 4가지 수전해 시스템이 제주도에 구축될 예정이다.[5]

이러한 기술개발과 함께, 향후 정부의 수소경제 이행 기본계획에 따른 친환경 수소의 생산 및 공급을 위해서는 다양한 기술별 투자(예산 및 인력 등) 우선순위 등을 포함하는 구체적인 기술개발 전략이 요구된다. 특히 효과적인 기술개발 및 사업 추진을 위해서는 실증 및 대규모 보급이 완료된 기술뿐만 아니라 초기 개발 단계에 있는 기술들을 포함하는 포괄적인 중장기 기술 전략 수립이 필요하다. 이를 위해서는 기술별 상이한 기술 수준과 기술 성숙도(Fig. 2 참조) 특성을 갖는 기술에 대해 세부적인 기술 타당성, 경제성 및 CO_2 감축 측면의 환경적 타당성을 고려한 기술별 전주기 분석이 요구된다. 그러나 수소생산 관련 다양한 수준의 기술이 지속적으로 제안되어 개발되는 상황 하에서, 개별 기술의 세부 공정 모사를 통한 전주기 분석은 상당한 데이터와 시간이 소요될 뿐만 아니라 급변하는 시장·기술 환경을 빠르게 반영하는 데에 한계가 있다.

이의 대안으로서, 검토 대상 후보 기술의 핵심 성능지표를 바탕으로 기술 특성을 상대 비교하여 점수화함으로써 종합 타당성 측면에서 우수한 기술을 제시하는 연구가 제시되고 있다. 해당 방법론은 공개 또는 비공개된 기술 및 시장 데이터를 바탕으로 회사의 전략과 연계한 평가지표 및 가중치 설정을 통해 프로젝트 추진전략에 부합하는 현실적이고 효과적인 분석이 가능하다는 장점이 있다.[8,9]

주요 사례 연구로 Acar and Dicer(2022)은 총 16개의 수소 생산 기술에 대해 에너지 및 엑서지 효율, 수소생산 비용 등 7개의 평가 항목을 바탕으로 최적 기술적 방안을 선정하는 연구 결과를 제시하였다.[10] Khan *et al.*(2022)은 열분해, 광전해 및 광발효 등 10개 기술을 대상으로 기술 및 설치 부지의 지리적 특성을 고려할 수 있는 8개의 항목에 대한 상대 점수를 매긴 후 이를 바탕으로 분석 대상 국가(모로코)에 적합한 수소생산 기술을 제시한 바 있다.[11]

이와 유사하게 Ourya and Abderafi(2023)은 최적 수소생산 입지 선정과 관련, 호주 내 41개 잠재 부지에 대해 재생에너지 잠재량, 위치 적합성, 수소 활용 및 저장 기회 등 총 14개 평가 항목에 대해서 상대적 점수를 평가하여 최

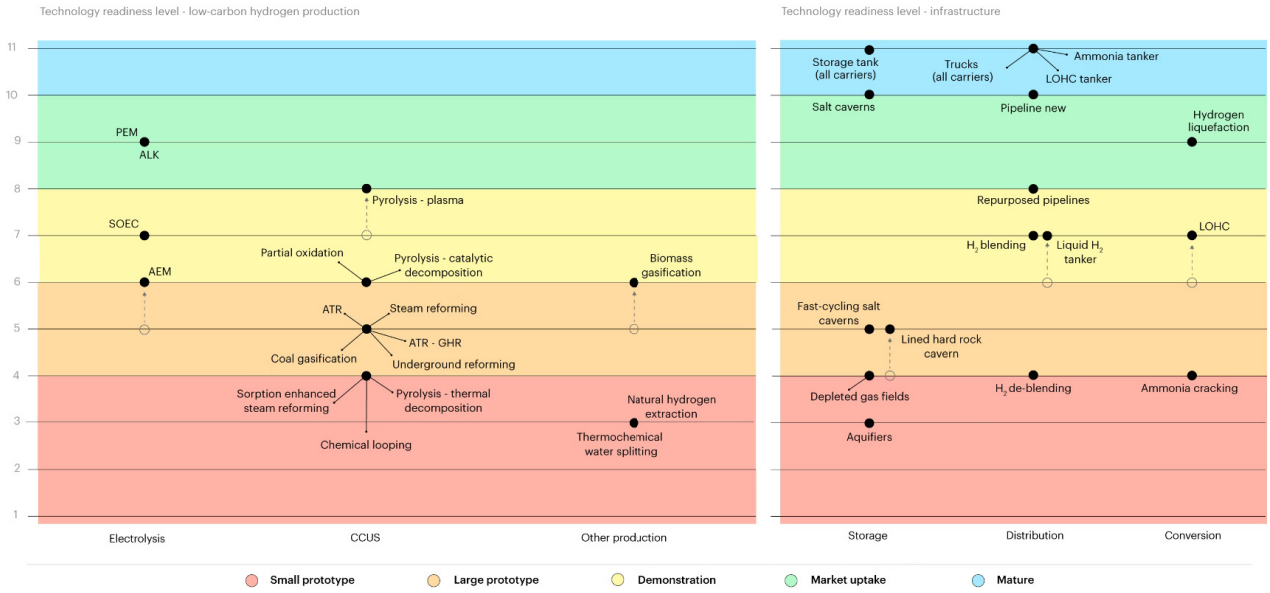


Fig. 2. Hydrogen production technology: Technology readiness level[7]

적 입지를 선정하는 방안을 제시하고 있다.[12] 상기 제시된 연구와 관련, 최적 수소생산 기술/실증 부지선정을 위해 활용된 평가 항목은 다음의 Table 1과 같다. 이에 따라, 본 연구에서는 상기 제시된 방법론을 바탕으로 정부의 수소경제 이행 기본계획[1]을 참조하여 다양한 수소생산 기술 옵션별 우선순위를 선정하고 구체적인 투자 전략을 수립하는 방안을 제시한다. 구체적으로는 현재까지 제시된 다양한 수소생산 기술의 핵심 특성치, 잠재 시장 규모 및 수소공급 관련 정부 로드맵을 활용하여 후보 기술의 기술, 경제성 및 환경적 타당성을 종합적으로 분석하고 정부의 수소공급 목표 달성을 위한 기술적 방안과 우선순위를 제시한다.

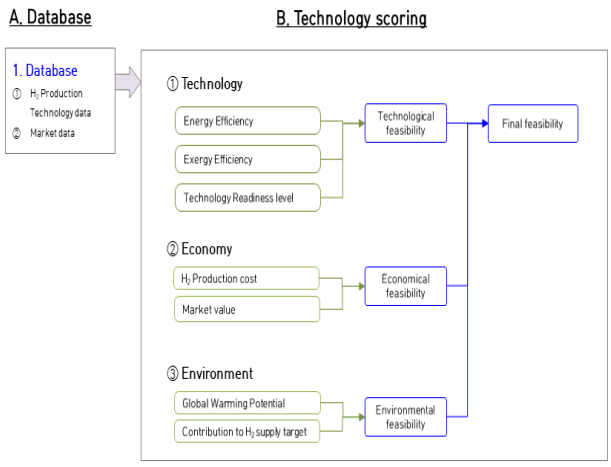


Fig. 3. Optimal hydrogen production technology selection algorithm

2. 최적 수소생산 기술 선정 방법

2.1 수소생산 기술 선정 알고리즘

본 논문의 최적 수소생산 기술 선정을 위해 기술의 특성치, 시장 데이터 및 정부의 수소공급 정책을 포함하는 Database를 구축하고 이를 바탕으로 후보 기술의 타당성을 종합적으로 점수화하여 기술별 우선순위를 선정한다. 이때 우선순위 선정은 ①후보기술별 기술 성숙도 및 수소생산 에너지/엑서지 효율을 고려한 기술 타당성 ②수소생산 비용 및 시장 규모를 고려한 경제적 타당성 ③기술별 지구 온난화 지수(Global Warming Potential, GWP) 를 고려한 환경적 타당성을 종합적으로 분석하여 진행한다(Fig. 3 참조).

상기 평가항목별 세부 사항은 다음과 같다.

a. 기술적 타당성

기술 우선순위 선정을 위한 기술적 타당성 분석의 평가항목으로 후보 기술별 기술 성숙도 및 수소 생산 에너지/엑서지 효율을 활용한다. 상기 내용은 수소생산 기술개발의 타당성 및 용이성을 평가할 수 있는 주요 지표이다. 예를 들어 수소생산에 있어 에너지 효율이 증가할수록 동일 전력하에서 수소의 생산량이 높아지며 투자 비용의 저감이 가능

Table 1. Technology selection parameters

Target	Technology selection parameters	Ref.
Technology selection	① Energy efficiency ② Exergy efficiency ③ Cost ④ Global warming potential (GWP) ⑤ Acidification potential (AP) ⑥ Production cost ⑦ Social cost of carbon	[10]
Technology selection	① Greenhouse gas emissions ② The availability in Moroco of the energy used ③ The availability in Moroco of waste generation ④ Cost of hydrogen ⑤ Maturity ⑥ Yield ⑦ Security ⑧ Availability of raw materials in Moroco	[11]
Technology & Site selection	· Renewable energy potential: ① capacity factor ② variability · Location viability: ③ recycled water availability ④ Existing desalination plant ⑤ Proximity to coast ⑥ Fresh water availability ⑦ Existing infrastructure · End use opportunity: ⑧ Existing port with energy export capabilities ⑨ Proximity to coast ⑩ Local H_2 demand ⑪ Gas pipeline for H2 injection ⑫ Opportunity to displace natural gas/ diesel power generators · Storage opportunities: ⑬ Salt cavern ⑭ Depleted gas field	[12]

하다. 또한 엑서지 효율의 경우 수소 생산 공정에서 발생하는 에너지 손실 등의 고려가 가능하며 이는 전체 수소 생산 공정의 효율 및 비용에 영향을 미치므로 에너지 효율과 함께 고려되어야 한다. 기술의 적합성 측면에서 기술 성숙도 항목도 중요한 평가 항목으로서 활용 될 수 있다. 예를 들어 수전해 기술이나 열 분해 공정 기술의 경우, 이미 국내에서 MW급 규모의 대규모 실증이 진행되고 있는 반면,[3~5] 태양광 수전해 및 인공광합성 기술의 경우 기술 잠재력은 유망하나 TRL 수준이 1~2단계로 평가되어[10] 실제 사업화를 위해서는 상당한 기간 소요가 예상된다.

상기 제시된 평가항목별 주요 배점 기준은 Table 2와 같다. 본 분석에 있어 에너지 효율(η)은 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.[10]

$$\eta = \frac{\dot{m} LHV}{\dot{E}_i} \quad (1)$$

여기서 $\dot{m}$: 단위 시간당 수소 생산량, LHV: 수소 저위 발열량(121 MJ/kg), $\dot{E}_i$: 공정 에너지 투입량

또한 엑서지 효율(Ψ)은 다음의 식 (2)와 같이 정의된다.[10]

$$\psi = \frac{\dot{m} ex_{H_2}^{ch}}{\dot{E}x_i} \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}$: 단위 시간당 수소 생산량, $ex_{H_2}^{ch}$: 수소 화학 엑서지, $\dot{E}x_i$: 공정 엑서지 투입량

항목별 배점은 수소생산 에너지 효율의 경우, 에너지 효율이 60% 이상인 경우 3점을 부여하고, 40~60%인 경우에는 2점 그리고 40% 이하인 경우 1점을 부여한다. 수소생산 기술별 엑서지 효율도 이와 유사한 방식으로 배점한다. 기술 성숙도의 경우 기초 연구단계인 1에서 3단계인 경우는 1점, 4에서 6단계인 경우는 2점, 상업화에 근접한 7단계 이상인 경우 3점을 부여한다. 상기 내용과 유사하게 생산된 수소의 순도, 공정 운영 안정성 및 수소 생산 공정 조건(온도 및 압력) 등에 대해서도 플랜트 설계 및 에너지 사용량 측면에서 유리한 조건을 고려한 평가가 가능하며 이는 본 방법론을 활용하는 기관 고유의 기술개발 전략에 따라 결정될 수 있다.

b. 경제적 타당성

경제적 타당성 분석은 수소생산 단가 및 해당 기술의 시장 규모를 고려하여 산출한다. 수소 생산 기술의 경제적 타당성 조사를 위해 사전에 해당 공정데이터를 바탕으로 대략적인 비용을 분석하는 것이 중요하다. 이중 수소생산 단가는 단위 수소생산을 위한 비용(US$/kg$H_2$)으로 성능시험 데이터 또는 관련 문헌 자료를 활용하여 산출할 수 있다. 본 논문의 수소생산 시장 규모는 해당 기술 분야(그린, 블루 및 그레이 수소 등)별 잠재 시장 규모를 의미한다. 상기 수소생산 기술의 경제적 타당성 평가를 위한 항목별 주요 배점 기준은 Table 2와 같다.

예를 들어 수소생산 단가의 경우 생산 비용이 1 US$/kg$H_2$ 이하인 경우 3점, 1 내지 4 US$/kg$H_2$ 이하인 경우 2점, 마

Table 2. Criteria for allocation of technology selection component

Component		Conditions	Ref.
Technology	Technology Readiness Level	1점 = 1~3, 2점 = 4~6, 3점 = 7~9	[10]
	Energy Efficiency (%)	1점 〈 40%, 2점 = 40~60%, 3점 〉 60%	[10]
	Exergy Efficiency (%)	1점 〈 40%, 2점 = 40~60%, 3점 〉 60%	[10]
Economy	Production cost (US$/kg$H_2$)	1점 〉 4 US$/kg$H_2$ 2점 = 1–4 US$/kg$H_2$ 3점 〈 1 US$/kg$H_2$	[10]
	Market Size	1점 = Green H_2, 2점 = Blue H_2, 3점 = Grey H_2	[1]
Environment	Global warming potential (tonCO_2/tonH_2)	1점 〉 5 tonCO_2/tonH_2, 2점 = 1~5 tonCO_2/tonH_2 3점 〈 1 tonCO_2/tonH_2	[10]

지막으로 4 US$/kg$H_2$ 이상인 경우 1점을 부여한다. 시장 규모의 경우 정부 수소경제 로드맵 상 2030년 기준 수소공급 목표 포트폴리오를 참조하여, 수소공급 목표량이 높은 그레이 수소(공급 목표: 94만 톤) 생산기술의 경우 3점, 블루수소 생산 기술(공급목표: 75만 톤) 2점, 그린수소 생산 기술은 1점(공급 목표: 25만 톤)을 부여한다(Table 2, 3 참조).

c. 환경적 타당성

기술·경제적 타당성 분석과 함께 중요한 요소는 탄소중립 달성을 위한 환경적 타당성이며 이를 위한 핵심 평가 항목은 수소 생산 기술의 지구온난화 지수를 들 수 있다. 지구온난화 지수는 1 ton의 수소생산 시 공정에서 직간접적으로 발생되는 CO_2의 양(tonCO_2/tonH_2)으로 관련 문헌데이터를 활용하여 확보할 수 있다. 상기 수소생산 기술의 환경적 타당성 평가를 위한 항목별 주요 배점 기준은 Table 3과 같다. 구체적으로는 1 톤의 수소생산을 위한 CO_2 배출량이 1 톤 이하인 경우(1 tonCO_2/tonH_2) GWP 값은 3점, 1 내지 5톤 CO_2인 경우 2점(1~5 tonCO_2/tonH_2), 마지막으로 5 톤 이상인 경우(5 tonCO_2/tonH_2) 1점을 부여한다. 상기 후보 기술의 기술, 경제성 및 환경성 평가항목별 점수와 각 항목에 가중치를 곱하여 최종 점수를 산정하며 이를 통해 후보 수소생산 기술의 우선순위를 산정한다. 이는 기술, 경제성 및 환경적 타당성 분석을 위한 세부 항목들에 대한 가중치 부여를 통해 다양한 이해관계자들의 입장에 맞는 분석을 가능하게 하기 위함이다.

d. 종합 타당성 분석

상기 후보 기술의 기술, 경제성 및 환경적 타당성 평가별 점수를 바탕으로 청정 수소생산을 위한 다양한 후보 기술의 우선순위를 산정한다(식 (3) 참조). 이때 세부 평가 항목별 가중치를 부여할 수 있도록 함으로써, 다양한 이해관계자들의 입장에 맞는 분석이 가능하도록 한다. 상기 방법으로 분석된 수소생산 기술별 타당성 점수를 바탕으로 각 후보 기술을 점수순으로 서열화하고 우선순위를 선정한다.

$$\text{수소생산기술 타당성 점수} = \sum_i a_i C_i \quad (3)$$

여기서 α: 평가 항목별 가중치(1~5점), C: 평가 항목별 점수, i: 평가 항목

Table 3. National hydrogen supply plan[1]

10k Ton / Year		2020	2030	2050
Domestic production		22	194	500
Fossil Fuel	Grey H_2	22	94	–
	Blue H_2	–	75	200
Renewable energy	Green H_2		25	300
International import		–	196	2,290
Sum		22	390	2,790

3. 분석 결과

3.1 대상 기술 선정

‘21년 우리 정부가 발표한 “제 1차 수소경제 이행 기본계획”에 따르면 수소생산 분야에 있어 그린수소 생산의 경우 ‘30년 25만 톤(생산단가: 3,500 원/kgH_2), ‘50년 300만 톤(생산단가: 2,500 원/kgH_2)의 대규모 그린수소 생산 기반 구축을 목표로 하며 블루수소 생산은 탄소포집 및 저장 기술 상용화 일정에 맞춰 탄소 저장소를 확보하여 ‘30년 75만 톤, ‘50년 200만 톤 규모의 블루수소 생산 체계 구축을 목표로 한다(Table 3 참조).[1]

관련하여 본 연구의 최적 수소생산 기술 선정과 관련하여 두 가지 그룹군에 대하여 분석을 진행하였다. 먼저 정부의 2030 수소공급 로드맵에 따라, Table 4에 제시된 바와 같이 그린, 블루 및 그레이수소 생산에 해당하는 기술(총 6개, 기술별 2개)에 대해 우선순위를 분석하였다(Case #1). 이와 함께 향후 재생에너지 확대에 따른 P2G 기술로의 활용 시 그린수소 생산 기술의 중요성 확대가 예상됨에 따라 다양한 그린수소 생산 기술 중 초기 단계에 있는 기술을 대상으로 우선순위를 분석하였다(Case #2). 상기 내용과 관련한 주요 반응조건과 관련한 데이터는 관련 문헌을 참조하였다(Table 5 참조). 항목별 주요 배점 기준에 대한 세부 사항은 앞서 Table 2에서 제시된 바와 같다. 평가항목별 세부 배점 기준은 저자 소속기관의 기술개발 전략을 반영한 값으로, 개별 추진전략에 따라 유연한 변동이 가능하다.

Table 4. Hydrogen production technologies[10]

Class	Technologies	Pathway	Case #1	Case #2
Green H_2	Water electrolysis	(Renewable Energy) H_2O → Electrolysis → H_2	○	
	PV Electrolysis	(Photonic) H_2O → Electrolysis → H_2	○	○
	Photocatalysis	(Photonic) H_2O → Photocatalysis → H_2		○
	Artificial Photosynthesis	(Photonic) H_2O → Photosynthesis → H_2		○
	Photofermentation	(Photonic) Biomass → Photofermentation → H_2		○
	Photoelectrochemical cell	(Photonic) H_2O → Photoelectrochemical water splitting → H_2		○
Blue H_2	Coal gasification with CCS	Coal → Gasification + CCS → H_2	○	
	Steam methane reforming with CCS	Methane → Steam Methane Reforming + CCS → H_2	○	
Grey H_2	Steam methane reforming	Methane → Steam Methane Reforming → H_2	○	
	Plasma reforming	Feedstocks → Plasma reforming → H_2	○	

Table 5. Hydrogen production technology database[1,10]

Class	Technology	Technology Readiness Level	Energy Efficiency* (%)	Exergy Efficiency (%)	Production cost [US$/kg$H_2$]	Market Size [million Ton/yr]	GWP [tCO_2/tH_2]
Green H_2	Water electrolysis	9	76.0	36.0	2.76	0.25	0.5
	PV Electrolysis	5	12.4	7.0	5.70		3.0
	Photocatalysis	1	2.0	1.0	4.98		0.5
	Photoelectrochemical cell	4	6.3	1.3a	6.36		0.5
	Photofermentation	2	0.9	0.9	2.45		0.5
	Artificial photosynthesis	2	3.3	2.9	2.55		0.5
Blue H_2	Coal gasification with CCS	9	61.0	44.0	0.96	0.75	2.1
	Steam methane reforming with CCS	9	65.8	42.0	2.66		1.0
Gray H_2	Steam methane reforming	9	72.5	46.0	0.75	0.94	9.0
	Plasma reforming	2	47.0	21.0	0.85		11.0

* Green H_2: cell or reactor efficiency

3.2 Case #1 분석

상기 제시된 기술별 핵심 데이터 및 우선순위 선정 알고리즘을 바탕으로 친환경 수소생산을 위한 다양한 기술의 개발 우선순위를 분석하였다. 이를 위해 총 6개의 분석 대상 기술의 기술성, 경제성 및 환경 타당성을 평가하고 이의 누적 점수를 바탕으로 전체 종합 타당성 점수를 산정, 이를 바탕으로 후보 기술의 우선순위를 산정하였다. Fig. 4는 본 연구의 친환경 수소생산 기술별 기술, 경제성 및 환경적 타당성 및 종합 우선순위를 나타낸다. 제시된 바와 같이 앞서 제시된 조건 하에서 정부의 수소공급 목표 달성을 위한 기술개발 우선순위는 [블루수소] 수증기 메탄 개질 + 탄소포집 및 저장 [그린수소] 대규모 수전해 기술 [블루수소] 석탄 가스화 + 탄소포집 및 저장 기술 순으로 분석되었다.

이에 반해 그레이 수소 기반의 플라즈마 개질기술 및 그린수소 기반의 태양광 수전해 기술은 기술 타당성 등이 상대적으로 낮아 타 기술 대비 우선순위가 낮은 것으로 분석되었다. 상기 기준 조건하에서의 분석에 이어 가중치 배점

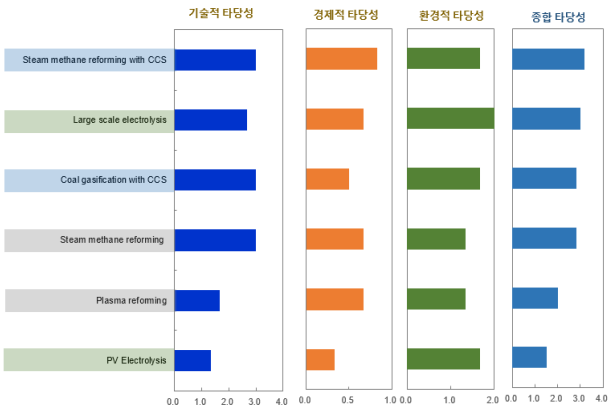


Fig. 4. hydrogen production technology feasibility evaluation

별 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 Table 6에 제시된 바와 같이 기술, 경제성 및 환경성 평가 항목에 대한 가중치를 조정하여(3점~5점) 이에 따른 그린, 블루 및 그레이 수소생산 기술의 우선순위 변화를 분석하였다.

상기 제시된 조건에서 분석 결과, 모든 분석 사례에 대해 수증기 메탄 개질 + 탄소포집 및 저장기술, 수전해 기술 및 석탄 가스화 + 탄소포집 및 저장기술의 우선순위가 높은 것으로 분석되었다(Table 7 참조). 특히 본 분석을 통해 현재 국내에서는 대규모 CO_2 저장을 위한 저장소가 구축되어 있지 않은 상황이나 추후 석탄발전소 등 대규모 배출원에서 배출되는 CO_2의 처리뿐만 아니라 친환경 수소 생산을 위한 핵심 인프라로서 대규모 CO_2 포집 및 저장을 위한 인프라 구축이 시급함을 확인할 수 있다.

3.3 Case #2 분석: 초기단계 그린수소 생산기술

상기 case #1 분석에 이어 재생에너지와 연계한 P2G 기술로의 활용을 위한 추가 분석을 수행하였다. P2G 기술로의 활용을 위해서는 재생에너지와의 연계를 고려한 그린수소 기술이 이에 해당되며 그레이 수소 및 블루수소 등은 분석 시 제외하였다. 이를 위해 본 논문에서는 주요 문헌 결과를 참조하여 인공광합성, 광전기화학적 물 분해 기술 등 5개 기술을 대상으로 분석하였다. 상기 기술군에 대하여 Case #1과 동일한 조건 하에서의 분석결과, 기술개발 우선순위는 인공광합성, 광발효 기술 및 광전기화학적 물 분해 기술 순으로 분석되었다(Fig. 5 참조).

다음의 Fig. 6은 앞선 우선순위 분석에 있어 우선순위가 낮은 기술(광전기화학적 물 분해 기술, 태양광 수전해 기술 및 광촉매 수소생산 기술)에 대한 세부 분석사항이다. 해당 기술의 주요 평가지표에 대한 레이더 차트 분석결과 대규모 수전해 기술과 비교하여 GWP 지수는 동일한 수준이나 기타 기술 특성치는 상당히 수준이 낮은 것으로 분석되어 현 시점에서 상용화를 위해서는 장시간의 연구 기간이 소요될 것으로 분석되었다.

Table 6. Weighting conditions for sensitivity analysis

Cases	Technology			Economy		Environ-ment
	TRL	Energy efficiency	Exergy efficiency	Production cost	Market size	GWP
Base line	3	3	3	3	3	3
Case #1-1	5	5	5	3	3	3
Case #2-1	3	3	3	5	5	3
Case #3-1	3	3	3	3	3	5

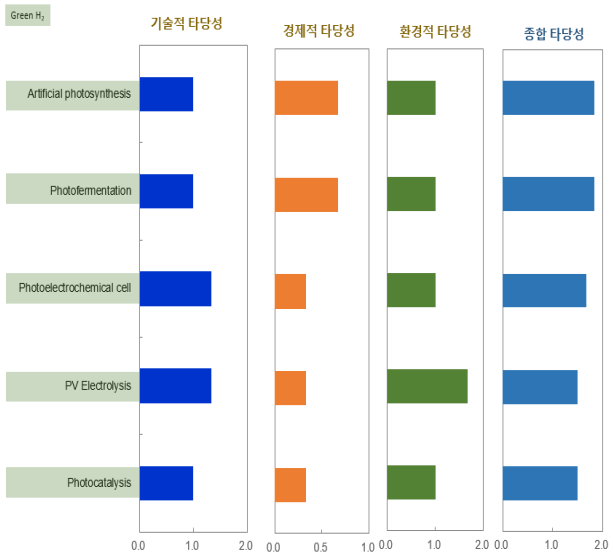


Fig. 5. Green hydrogen production technology feasibility evaluation

Table 7. Sensitivity analysis results

Priority	Base case	Case #1-1	Case #1-2	Case #1-3
1	Steam methane reforming with CCS	Steam methane reforming with CCS	Steam methane reforming with CCS	Steam methane reforming with CCS
2	Water electrolysis	Water electrolysis	Water electrolysis	Water electrolysis
3	Coal gasification with CCS	Coal gasification with CCS	Steam methane reforming	Coal gasification with CCS
4	Steam methane reforming	Steam methane reforming	Coal gasification with CCS	Steam methane reforming
5	Plasma reforming	Plasma reforming	Plasma reforming	Plasma reforming
6	PV Electrolysis	PV Electrolysis	PV Electrolysis	PV Electrolysis

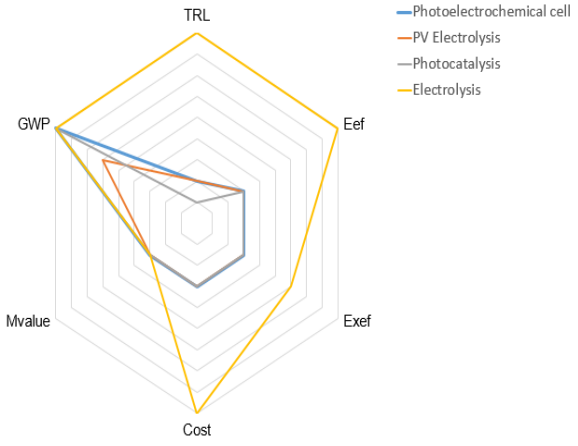


Fig. 6. Radar chart analysis

4. 결 론

2030 정부 수소공급 목표 달성을 위한 주요 수소생산 기술의 우선순위 분석결과, 탄소포집 및 저장 기술과 결합한 수증기 메탄 개질 및 수전해 기반의 그린수소 생산 기술이 유망한 것으로 분석되었다. 또한 재생에너지와 연계한 P2G 기술로서의 활용을 위해 초기 단계 그린수소 생산 기술에 대한 분석결과 인공광합성 및 광발효 기술의 우선순위가 높은 것으로 분석되었으나 현재 상용화된 수전해 기술과는 기술성숙도, 수소생산 비용 및 에너지 효율 등의 측면에서 상당한 격차가 있는 것으로 분석되었다.

'21년 정부는 수소경제 전주기 생태계 구축을 위한 「제1차 수소경제 이행 기본계획」을 발표하였으나 구체적 실행 전략은 제시되고 있지 못하다. 이러한 상황에서 본 논문에서 제시하는 최적 친환경 수소생산 기술 선정 방법은 기술의 고유 특성과 시장 상황을 고려한 경제성 및 환경적 타당성에 대한 종합적 고려가 가능하여 향후 지속 가능한 수소 보급 확대 및 재생에너지 연계 ESS 프로젝트 발굴, 기술개발 로드맵 및 사업전략 수립 등에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 관련하여 본 연구진은 연구 결과의 활용 및 확산을 위해 다양한 수소생산 기술에 대한 광범위한 문헌조사를 통해 완성도 높은 DB를 구축하고 이를 바탕으로 친환경 수소 공급 및 재생에너지 연계 장주기 ESS 기술로의 활용을 위한 세부 추진전략 수립연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 2022년도 한국전력공사의 지원을 받아 수행한 연구과제 성과물입니다(과제번호: R22EA10).

References

[1] A joint statement from related ministries of the Republic of Korea, "The first basic plan for the implementation of the hydrogen economy", Announcement No. 2021-806, http://www.motie.go.kr/motie/ms/nt/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=67130&bbs_cd_n=6.

[2] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2019, "Hydrogen: A Renewable energy perspective", chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Hydrogen_2019.pdf.

[3] Jo, J.H., Lee, T.H., Jeon, S.Y., Choi, B.B., and Yoo, Y.S., 2020, "A study on development of MW class alkaline and polymer electrolyte membrane water electrolysis", Proc. Korean Electrical Society Smart Grid Research Society Autumn Conference, 24-26.

[4] NewsWorker, "Jeonnam Techno Park selected 'Younggwang Green Hydrogen Performance Sealing Center Construction Contest Project'", 2021.12.12., http://www.newsworker.co.kr/news/articleView.html?idxno=140003.

[5] Korea Southern Power Co., Ltd. (KOSPO), "Korea Southern Power Co., Ltd. Launches Demonstration Project to Create a Korean Green Hydrogen Ecosystem", Accessed 20 March 2023, https://www.kospo.co.kr/bbs/kospo/139/104750/artclView.do.

[6] Jo, J.H., 2023, "Development of various water electrolysis technologies for the production of green hydrogen", KEPRI NEWS, **306**, 28-31.

[7] International Energy Agency (IEA), "Hydrogen supply", https://www.iea. org/reports/hydrogen-supply.

[8] Seong, J., Lee, J.H., Kim, H.S., Shin, J.S., and Lim, J.H., 2023, "Technology selection method for optimal energy storage", New. Renew. Energy, **19**(1), 31-40.

[9] Lee, J.H., Jegarl, S., and Jo, J.E., 2023, "Optimal carbon upcycling technology selection method considering

technology and market", New. Renew. Energy, **19**(1), 41-52.

[10] Acar, C., and Dincer, I., 2022, "Selection criteria and ranking for sustainable hydrogen production options", Int. J. Hydrog., **47**(95), 40118-40137.

[11] Khan, M.H.A., Heywood, P., Kuswara, A., Daiyan, R., MacGill, I., and Amal, R., 2022, "An integrated framework of open-source tools for designing and evaluating green hydrogen production opportunities", Commun. Earth Environ., **3**, 1-18.

[12] Ourya, I., and Abderafi, S., 2023, "Clean technology selection of hydrogen production on an industrial scale in Morocco", Results in Engineering, **17**, 100815.