

2026

수소산업 전주기 (생산, 저장/운송, 활용) 기술, 시장 전모와 사업화 전략



Hydrogen Industry

SAMPLE

1. 국내외 수소산업 밸류체인별 기술, 시장 동향과 전망

1. 수소 전주기별 기술개발 동향과 시장 전망

1-1. 글로벌 수소산업의 주요 이슈

- 에너지 위기와 화석 연료에서 벗어나려는 기운이 고조됨에 따라 수소 에너지의 이용에 대해 전에 없이 주목하고 있다. 수소는 지구상에 풍부히 존재하며 열에너지로도 이용할 수 있다. 또한 그때 이산화탄소(CO₂)를 포집할 수 있다는 장점이 있다.
- 전 세계가 탄소 중립을 위한 시책을 추진함에 따라 에너지, 제조업, 운송 등 각종 분야에서 연료 및 소재의 클린 전환 관점에서 수소의 이용 가능성이 기대를 받고 있다.

1) 그린 수소와 블루 수소

- 온실가스(GHG) 배출량 등에 따라 국가별로 분류에 차이가 있는 국가마다 다르다. 애초에 수소는 단기간으로 자연계에 존재하며, 화합물 형태로 지구상에 대량으로 존재한다. 수소 에너지의 이용을 위해서는 다양한 원료에서 수소를 꺼내야 한다.

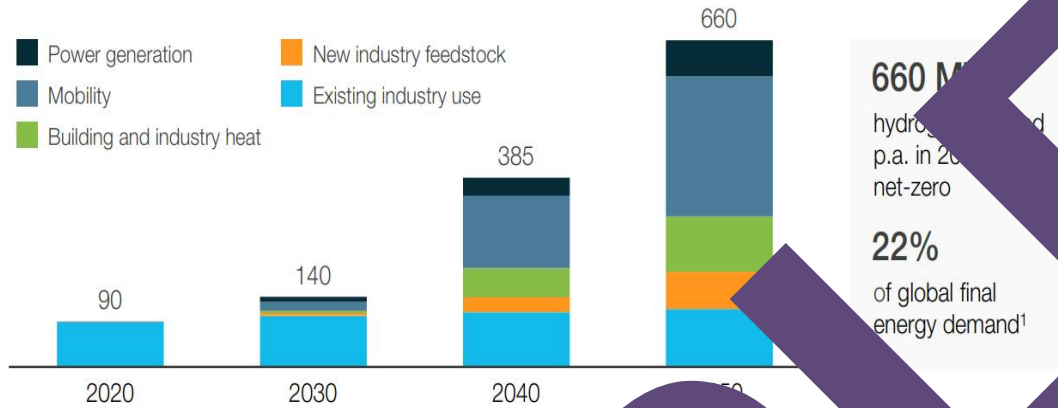
<표 I-1> 수소의 주요 색상과 정의

색상	내용
그린	재생 에너지를 사용하여 제조 공정에서도 CO ₂ 를 배출하지 않고 만들어진 수소
청록 (그린과 블루 수소의 중간단계)	천연가스 중 일부인 메탄의 열분해를 통해 생성되는 수소. 제조 공정에서 CO ₂ 를 배출하지 않고 생성되는 고정 탄소가 폐기물 및 연료로 활용될 가능성이 있어 그 중간단계의 중간에 위치
블루	천연가스 제조 공정에서 배출된 CO ₂ 를 '포집·저장/이용'(CCS/CCUS)하는 기술을 통해 포집하여 저장·이용하는 등 제조 공정에서 CO ₂ 의 배출을 억제한 수소
그레이/블랙	화석 연료를 바탕으로 하여 만들어진 수소이다. 그레이는 천연가스, 브라운은 갈탄, 블랙은 석탄을 통해 생성되는 경우를 가리킨다. 통틀어서 그레이 수소라고 불리기도 함
옐로/핑크	원자력발전에 의한 전력을 사용하여 제조되는 수소를 가리키는 경우가 많음
바이오키트	다른 제품의 부산물로 생성된 수소
골드	고갈된 유전 내 미생물을 발효시켜 생성되는 수소
클린	저탄소 수소로 번역할 수 있는데, 각국마다 정의가 다름

자료 : 일본 자원에너지청

<그림 I-1> 글로벌 수소 총수요 추이

Hydrogen end-use demand by segment, MT hydrogen p.a.



1. IEA net-zero scenario with 340 EJ final energy demand in 2050. H₂ demand is based on the IEA net-zero scenario.

자료 : Hydrogen for Net-Zero

○ 해당 보고서에서는 세계의 수소 수요를 최소화하거나 최적화하는 무역거래에 의해 시스템 전체의 비용을 절감할 수 있다는 점을 강조하며, 다음과 같은 전망에 대해 고찰했다.

○ 구체적으로는 수송 캐리어, 암모니아, 메탄올, 액성 케로신, 그린스틸(그린수소 사용에 의한 제철)을 포함한 수송 및 파생품의 세계 무역 거래 전개와 그 가능성을 최대한 끌어내기 위해 노력할 예정이다. 이 보고가 공급업체, 바이어, OEM, 투자자, 정부와 같은 이해관계자에게 수소 수요를 가속화하기 위한 의사결정을 지원하는 전략적 관점이 되기를 기대한다.

(2) 분기별 수소 수요 전망

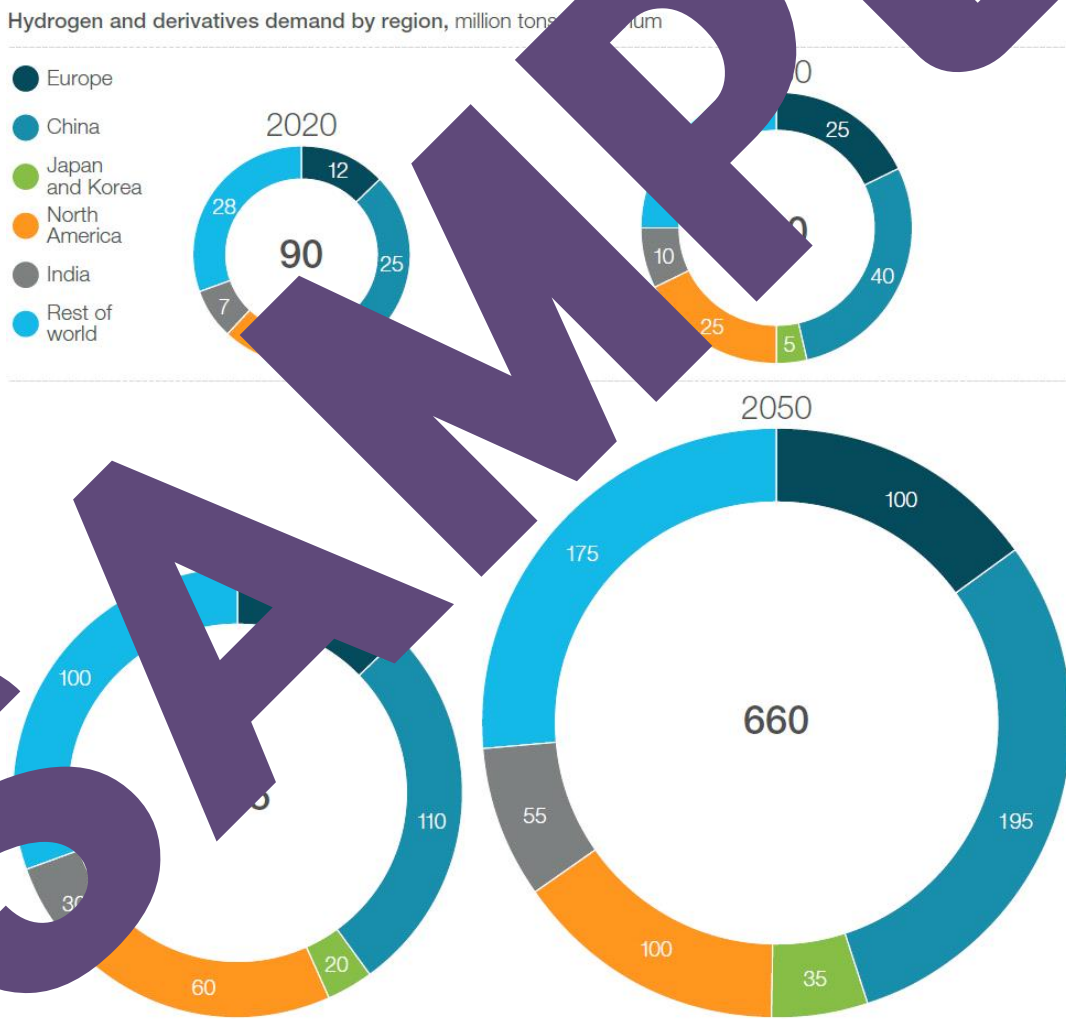
○ 'Global Hydrogen Perspective' 보고서는 수소위원회(Hydrogen Council)와 맥킨지(McKinsey & Company)의 공저로, 분석을 위해 전 세계 전 지역, 운송업체, 최종 제품에 대한 수요와 공급의 균형을 도모하는 최적화 모델을 이용한 결과, '글로벌 수소 거래 모델'은 150만 종의 최적화된 잠재적 거래 루트를 특정했다. 수요 측면은 이 두 가지 시나리오를 넷제로(Net-Zero) 달성 경로에 따른 것으로 2025년, 2030년, 2040년, 2050년의 세계 기후 목표 전망치가 모델화되어 있다.

이번에 개발한 레퍼런스 케이스 시나리오는 시스템 전체에서 최소화한 비용으로 경제적으로 효율적인 탈탄소화를 상정한 것이다. 이 시나리오에서는 현재의 지정학적 무역 제한을 장기적 고려에서 제외하고 있지만, 무역 루트 봉쇄 발생을 유연하게 최적 모델화하여 그 영향을 관찰하는 것이 가능하다.

(3) 수소 및 파생품의 지역별 수요와 미스매치

- 지역별로는 중국, 인도, 일본, 한국, 유럽, 북미에서 전 세계 수소 수요의 75%를 차지하고, 향후 몇 년간 중국이 최대 소비국이 될 전망이다. 2050년에는 수소가 전 세계 1차 에너지 시장의 주요 부분을 차지하고, 수소 자원을 활용해서 수입 석유나 천연가스 등 에너지에 대한 의존도를 줄이는 국가가 있는가 하면 새로운 수입 에너지 자원으로 자리매김하는 국가도 생길 것이다.
- 세계 최대의 1차 에너지 소비국인 중국은 2050년까지 2억톤(200MT) 규모의 1차 에너지 수요를 충족할 최대 단일 수요시장이 될 가능성이 높고, 뒤이어 유럽과 북미가 각각 1억톤(100MT), 북미가 55MT, 일본과 한국을 합쳐 35MT의 청정수소 수요를 창출할 것으로 예상된다.

<그림 I-6> 주요 지역별 수소 수요량 예측 (단위: 백만 톤)



※ [Legend] : 유럽, 중국, 일본 및 한국, 북미, 인도, 기타지역
 자료 : Hydrogen Council and McKinsey & Company

- '청정 수소'에 대한 국제적으로 통용되는 단일 표준과 인증 체계를 시급히 마련해야 한다.
 - 생산 방식부터 운송 과정까지 전 과정에서 발생하는 탄소 배출량을 투명하게 측정하고 (Carbon Intensity), 이를 기반으로 '청정 수소'를 인증하는 글로벌 표준이 없다면 국가 간 교역에 큰 혼란이 발생하고 '그린워싱(Greenwashing)'의 우려가 커진다.
 - 국제에너지기구(IEA), 국제재생에너지기구(IRENA) 등 국제기구를 중심으로 선진국들이 참여하는 표준화 논의를 조속히 마무리해야 한다.
- 국가 간 기술 격차 해소를 위한 개방적인 기술 협력 플랫폼을 활성화해야 한다.
 - 선도국들이 보유한 수전해, 탄소 포집, 액화, 연료전지 기술 등을 개발도상국과 공유하고 공동 연구를 추진함으로써 전 세계적인 기술 상향 평준화를 도모해야 한다.
 - 이는 글로벌 수소 시장의 전체 파이를 키우고, 모든 국가가 수소 전환의 혜택을 누릴 수 있도록 하는 포용적인 성장의 기반이 될 것이다.

1-5. 수소 밸류체인별 기술 개발 동향

1) 수소 제조 기술

- 수소는 다양한 방법으로 제조가 가능하며, 각각의 제조 방식에는 안전성과 이산화탄소 배출량, 경제성 등의 측면에서 장단점이 있다. 수소는 천연가스 등 화석연료를 이용한 개질법에 따라 천연가스 개질, 석유 개질, 공업에서의 부생수소도 존재한다. 향후에는 수전해에 따른 그린수소, 폐기물, 축매, 바이오매스, 물이나 메탄의 열분해를 이용한 제조 방법 등 다양한 제조방법에 대해서 기술 개요를 이하에 나타낸다.

(1) 화석연료

- 천연가스나 나프타를 개질해 수소를 제조하는 기술로 공업 분야에서 널리 이용되고 있다. 개질 방법으로는 수증기 개질공정(SR: Steam Reforming)과 부분산화공정(Partial Oxidation) 및 그 두 가지를 혼합한 오토서멀 개질공정(ATR: Auto Thermal Reforming)이 있다. 현재 주류인 기술로는 수증기 개질이 있으며, 특히 천연가스(메탄)을 원료로 이용하는 것을 수증기 메탄 개질(SMR: Steam Methane Reforming)이라고 부른다. 수증기 메탄 개질에 있어서의 반응을 이하에 나타낸다.



수증기 메탄 개질은 800°C 정도의 고온 하에서 축매가 반응하면 수증기가 메탄과 반응해 일산화탄소와 수소가 생성된다. 흡열 반응이기 때문에 외부로부터의 열 공급이 필요하다.

- 이 막은 톨루엔 투과 속도를 기존보다 약 20배 느리게 만들고, 수소화 반응 효율을 72.8%까지 높이는 성과를 거두었다. 이 기술은 2030년경 상용화가 가능할 것으로 전망되며, 수소 연료전지차, 수소 발전 등 다양한 친환경 에너지 시스템에 적용 가능성이 크다.

■ 팔라듐 기반 복합막 및 공정 집약형 반응기

- 팔라듐 합금은 수소에 대한 높은 투과성과 선택성을 갖는 물질이다. 기존보다 투과도를 갖는 다공성 지지체 위에 팔라듐 합금을 초박막 형태로 도금하여 초고순도 수소를 생산하는 막 분리 기술이 지속적으로 개발 연구가 진행되었다. 이 기술은 천연가스, 바이오메스, 수전해 등 다양한 수소 생산 방식과 결합하여 기존 기술의 문제점을 극복하고 효율적으로 수소를 생산 및 정제할 수 있는 핵심 기술이다.
- 나아가 팔라듐 분리막은 암모니아 분해 촉매와 결합하여 암모니아 분해와 수소 정제를 하나로 통합하는 공정 집약형 차세대 기술인 '일체형 분리막 반응기' 개발에 성공했다. 이 반응기는 100°C 이상 낮은 온도에서 암모니아를 수소와 질소로 분해하여 고순도 수소를 정제를 가능하게 한다. 이러한 공정 집약형 기술은 미국, 유럽, 일본 등 전 세계적으로 2010년 전부터 활발히 연구되고 있는 분야이다.

<표 I-13> 부생 수소 정제 기술 비교 분석

기술 유형	작업 원리	순도 수준
압력 변동 흡착 (PSA)	착 (PSA) 흡착제 이온 교환을 통한 선택적 흡착/탈착	초고순도 (99.99% 이상)
막 분리 기술 (고분자)	기체 크기/용해도 차이	고순도 (연구 목표: H ₂ /CH ₄ > 100)
막 분리 기술 (팔라듐)	수소 투과 특성 이용	초고순도 달성 가능 (복합막 형태)

기술 유형	상용화 장애 요인 사항	기술 개발 목표/과제
압력 변동 흡착 (PSA)	고순도 수소 공급 부족, 국내 독자 기술 미비 및 해외 의존 심화	고압/대용량 처리 공정 최적화 및 기술 국산화
막 분리 기술 (고분자)	수소 투과 특성 개선, 상용화 진입 중이며, 저온/저압 환경에 적용	낮은 투과도 및 선택도 개선, 저에너지 소모형 공정 개발
막 분리 기술 (팔라듐)	암모니아 분해 등 공정 집약형 반응기에 적용되며, 선진국 연구 활발	기계적 강도 및 내구성 확보, 초박막 도금층 제조 기술

자료 : 각종 기사

(4) 바이오메스

바이오메스(Biomass)를 활용한 수소 생산 기술은 재생 가능한 유기성 자원으로부터 수소를 추출하는 공정이다. 이 기술은 화석 연료 중심의 수소 생산 방식을 탈피하고, 폐기물 처리 문제를 동시에 해결하는 '자원순환형' 청정에너지 공급원으로 전략적 중요성이 크다. 바이오 수소 생산은 이산화탄소(CO₂) 배출을 줄일 수 있으며, 특히 도시 고체 폐기물(MSW) 처리 비용을 절감하는 경제적 이점을 동시에 제공한다.

- 이는 착화합물 리간드로 형성된 광감응제를 합성하고, 이를 TiO_2 에 결합하여 전환 수율이 높은 광감응/ TiO_2 계 복합 광촉매를 개발하는 연구를 포함한다. 이는 기존 재료의 경제성과 신규 재료의 효율성을 결합하여 실용성을 높이려는 전략적 시도이다.

2) 암모니아 제조 기술

- 청정 암모니아는 암모니아 생산 과정에서 CO_2 를 배출하지 않는 암모니아를 의미하며, 수소 생산 방식에 따라 블루 암모니아와 그린 암모니아로 구분한다.
- 블루 수소는 천연가스의 개질, 그린 수소는 물의 전기분해를 통해 생산되며, 얻어진 수소를 질소와 촉매반응이나 전기화학적 반응을 일으켜 최종적으로 청정 암모니아를 생산한다.¹¹⁸⁾

<그림 I-56> 청정 암모니아 생산 기술



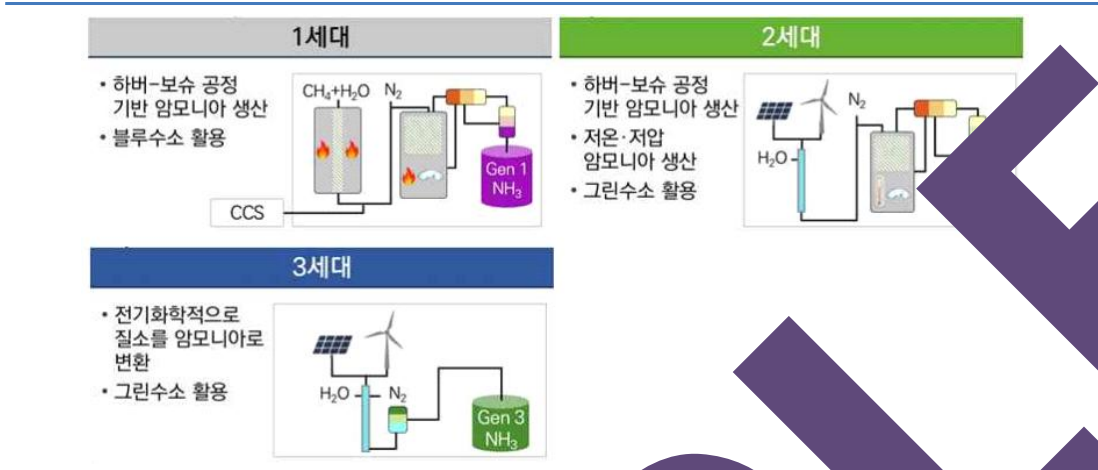
자료: 한국에너지기술연구원(2022), “청정 암모니아 심층 투자분석보고서”

수소 생산 방식에 따라 1세대, 2세대, 3세대로 구분되며, 3세대 암모니아가 기존 하버·보슈 과정에서 벗어난 진정한 친환경 청정 암모니아 생산 방식이다.

* 천연가스 및 수소에서부터 철을 촉매로 사용하여 고온·고압 조건에서 암모니아를 대량으로 생산하는 공업적 합성 방법

118) KISTEP 브리프 101, 청정 암모니아 생산·활용, 2023.12

<그림 I -57> 암모니아 생산 방식에 따른 구분



자료 : 한국에너지기술연구원(2022), “청정 암모니아 생산·활용 기술 분류 및 투자분류”

<표 I -16> 청정 암모니아 생산·활용 기술 분류

중분류	소분류	기술 개발 이슈	
생산	고온·고압(하버-보슈)	공정 에너지 효율 향상 기술	
	저온·저압	저온·저압 암모니아 생산 공정 최적화 및 규모 격상	
	전기화학	전기화학 암모니아 생산 기술 개발	
활용	발전	선박 암모니아 연료	수소율 증가 기술
		발전	암모니아 연료 터빈 재설계
	선박	선박	매연 저감 및 내구성 향상 기술
		수소 캐리어	암모니아 연료 엔진의 혼합 연료 및 NOx 배출 저감 기술
	수소 캐리어	암모니아 연료 엔진의 경제성 향상 기술 개발	

자료 : KRISS 리포트 101, 청정 암모니아 생산·활용, 2023.12

- 암모니아는 수소와 질소에 촉매 반응을 일으키거나 전기화학적 반응에 의해 암모니아를 생산하는 기술이며, 현재 대부분 하버-보슈 공정으로 생산한다.
 - (고온·고압) 하버-보슈법은 150~300bar의 고압 및 400~500°C의 고온에서 촉매를 이용해 암모니아를 생산하며, 대량생산성과 경제성 확보로 인해 현재까지 사용 중이다.
 - (저온·저압) 암모니아 생산 공정 중 가장 많은 에너지가 사용되는 압축 및 냉각 과정에서의 에너지 저감을 위해 저압에서 생산 가능한 촉매 개발에 관한 연구를 포함한 기술이다.
 - (전기화학) 저온(<100°C), 저압(<10bar)에서 물과 질소를 전기화학적으로 반응시켜 생산하는 방식이며, 기술의 핵심은 질소 분자에 수소를 첨가하는 반응속도가 빠른 촉매 개발이다.
- 하버-보슈법은 암모니아 제조기술로 확립되어 있으며 100년이 넘는 역사를 갖고 있다. 하지만 질소와 수소를 고온고압 하에서 반응시키기 때문에 이산화탄소가 많이 발생하기 쉽다.

2) 연도별 수소차 시장 현황 및 분석

- 최근 수소자동차 시장은 2022년을 정점으로 2023년과 2024년 연속으로 판매량이 감소하며 단기적인 침체에 진입했다. 이러한 시장 역성장의 주요 원인은 수소차 시장의 선두주자였던 한국 시장의 판매량 급감에 있으며, 이는 단일 모델(현대 넥쏘)에 대한 과도한 의존성으로 인해 시장의 구조적 취약성이 노출되었기 때문으로 분석된다. 또한, 부족한 충전 인프라, 상승하는 연료 비용, 그리고 제한적인 차량 선택지가 소비자 구매를 망설이게 하는 핵심 요인으로 작용했다.
- 현재의 난관에 대응하여, 현대자동차를 비롯한 주요 완성차 업체들은 승용차 시장의 침체를 인식하고 고정된 경로를 운행하는 버스, 트럭 등 상용차 시장으로 전략적 초점을 이동하고 있다. 동시에, 기술 개발 및 부품 생산 비용 절감을 위한 글로벌 기업 간의 전략적 제휴가 활발하게 이루어지는 추세이다. 이러한 움직임은 소비자 수요의 불확실성, 막대한 투자 위험을 분산시키려는 실용적 선택으로 여겨진다.
- 단기적인 시장 침체에도 불구하고, 미국, 유럽이 국가별 수소 로드맵 및 민관 협력체 결성은 시장의 장기적인 성장 가능성을 시사한다.
 - 현재의 역성장은 기술 중심의 시장에서 인프라 체계 구축 중심의 성숙 시장으로 전환하는 과정에서 발생하는 과도기적 현상임을 이해된다.
 - 수소차 시장은 충전 인프라와 안전성 강화라는 주요 과제를 극복한다면, 탄소 중립 시대를 견인할 핵심 모빌리티 솔루션의 잠재력을 여전히 보유하고 있다.
- 수소자동차는 탄소 배출이 없는 친환경 주류로 주목받으며, 수소와 산소의 화학 반응으로 전기를 생산하여 구동하는 차의 형태로 평가된다. 이 차량은 배기가스를 전혀 배출하지 않고 오직 물만 배출한다는 점에서 환경적 이점을 가진다. 특히, 5분 내 충전 시간과 600km에 달하는 긴 주행거리는 몇 시간씩 소요되는 전기자동차에 비해 비교해 명확한 강점으로 손꼽히며 미래 모빌리티 시장의 유력 후보로 평가된다.
- 그러나 잠재력에도 불구하고, 수소차 시장은 최근 몇 년간 현실적인 난관에 부딪히며 시장세가 꺾였다. 2022년 판매량 고점 이후 2023년과 2024년에 걸쳐 판매량이 연속적으로 감소하는 역설적인 상황이 발생한 것이다. 이러한 현상은 시장이 기술 발전에서 실제적인 상용화 및 대중화 단계로 진입하는 과정에서 발생하는 구조적인 문제를 여실히 드러내고 있다.

2023년 : 역성장 전환의 시작

- 2023년 글로벌 수소차 시장은 전년 대비 30.2% 감소한 총 14,451대의 판매량을 기록하며 역성장으로 전환되었다. 이 수치는 2022년에 2만 대를 돌파하며 정점을 찍었던 시장이 불과 1년 만에 큰 폭으로 하락했음을 보여줬다.

<표 I -35> 주요 기업별 수소 상용차 사업 전략 비교

기업	주요 전략	개발 동향 / 핵심 비즈니스 모델
현대자동차	글로벌 시장 선도 및 기술 고도화	엑시언트 FCEV 수출, H ₂ ICE 개발, 스택 출력 향상 생산부터 충전, 금융 서비스까지 아우르는 밸류체인
토요타	연료전지 인사이드' 전략	OEM 공급, PACCAR 및 BMW 등과 협력 완성차 판매보다는 핵심 부품(스택) 기술 개발에 집중
다임러/볼보	JV를 통한 기술 공유 및 협력	2020년대 하반기 출시 목표, 1,000km 주행 장거리 물류에 적합한 대형 트럭 개발
니콜라	구독형' 모델과 독자 인프라 구축	배터리 트럭으로 전환, 파산 보호 신청 한때 혁신적이었으나 기술 및 재무적 문제로 위기
중국 업체	정부 정책 기반의 보급 확대	상용차 위주 기술 개발 버스/트럭 등 상용차 시장에서의 빠른 시장 점유율 확대

자료: 각종 기사와 정보를 종합

6) 수소차 시장의 한계점 및 극복 방안

(1) 시장 성장의 구조적 한계

- 현재의 수소차 시장 침체 현상은 구조적 한계에서 비롯된 복합적인 문제이다.
 - 첫째, 경제성 문제가 가장 큰 장애 요인이다. 수소차의 연료전지 스택으로 인해 전 기차보다 초기 구매 비용이 높고, 충전 인프라는 소용돌이를 유도하기 어려운 구조이다. 또한, 수소 충전 가격은 여전히 높고, 충전소 운영 적자로 인해 지속적으로 인플레이션이 발생하고 있다. 이는 수소차의 매력도를 크게 떨어뜨려 소비자들의 외면을 초래하고 있다.
 - 둘째, 인프라 및 공급망 부족이다. 국내 누적 수소 충전소는 2024년 기준 386기(41.5만기(누적)에 불과하며, 이는 일반 가솔린 차량에 비해 턱없이 부족하다. 이러한 절대적인 인프라 부족은 소비자의 구매 결정에 대한 불안감을 심화시키고 구매 결정을 방해하는 주요 요인이다. 또한, 수소 생산 비용이 높고, 운송 과정에서 파이프라이이나 액화 비용이 높고, 충전 인프라 구축에 필요한 비용과 인프라 제약을 안고 있어 안정적인 공급망을 구축하는데 어려움을 겪고 있다.

(2) 주요국별 동향과 시장 기회

현재의 시장 침체를 극복하기 위해 주요국 정부는 적극적인 정책 지원과 로드맵을 수립하고 있다. 한국 정부는 2025년 수소차 보급 지원 예산 7,218억 원을 확정하고, 승용차 대비 상용차 보급에 중점을 두는 정책을 추진 중이다. 또한 수소 소재·부품·장비(소부장) 산업 육성을 통해 핵심 부품의 국산화 및 경쟁력 강화를 도모하고 있다.

- 미국 에너지부(DOE)는 2023년 국가 청정수소 전략 및 로드맵을 발표하며 2030년까지 연간 1,000만 톤의 청정수소 생산을 목표로 설정했다.

(1) 2023년

① 글로벌 시장 : 투자 확산과 청정 수소 정책의 태동

▣ 지속 가능한 성장 기초 형성

- 글로벌 수소 충전소 시장은 2024년을 기준으로 73억 달러 규모로 추정되며, 시장은 2025년부터 2034년까지 연평균 성장률(CAGR) 16.2%를 기록하며 지속해 성장할 것으로 예측된다. 이러한 장기적인 낙관론은 단기적인 수소차 판매량 변동성에 영향을 받지 않고 유지되고 있다. 실제로 2023년 글로벌 수소차 시장은 전년 동기 대비 30.2% 증가하는 부진을 겪었다.¹⁷⁷⁾
- 이러한 수소차 판매 부진에도 불구하고 인프라 투자가 지속적으로 성장을 예측하는 이유는, 글로벌 투자자들이 승용차 시장보다는 장거리 운송에 의존할 수 있는 시장의 지속적인 수요 창출에 초점을 맞추고 있기 때문이다. 또한, 석탄화력발전소 운영 중단으로 인한 오염 변화 이니셔티브가 시장의 성장에 촉진을 제공하고 있다.
- 인프라 구축의 근간이 되는 청정 수소 생산에 대한 관심이 강화되었다. 2022년 기준으로 수전해 설비 투자는 2021년 대비 2배 이상 증가하며, 2023년 말까지 100억 달러로 최고치를 기록했으며, 탄소포집·활용·저장기술(CCS)을 적용한 수전해 설비에 대한 투자액도 약 5억 달러로 증가했다. 이는 미래 청정 수소 수요를 충족시키기 위한 안정적인 자본 투입이 이루어지고 있음을 의미한다.
- 한편, 2023년 9월 12일 개국 이래 처음으로 상용 수소차를 판매하기 위한 국가 전략을 추진하고 있으며, 2022년 9월 14일 제1차 청정수소 로드맵을 발표하였다. 각국 정부는 장기적인 투자 위험을 완화하기 위해 세제 혜택, 가격차이 보조, 경쟁 입찰 시스템 등 청정 수소 생산에 대한 지원 제도를 도입했다. 청정 수소 수요를 창출하기 위한 국가적인 목표 설정과 함께, 민간 투자로 미흡하지만, 충전소 건설 및 연료전지 구매 지원 등 수송 분야에 대한 지원이 활발하게 진행되었다.

② 국내 수소산업 목표 대비 실적과 핵심 구조적 문제

▣ 2023년 충전소 구축 실적 평가 : 목표 달성률 미흡

정부는 2023년 12월 15일 국가 탄소 중립 녹색성장 기본계획에 따라 2030년까지 누적 660기 이상 수소 충전소를 구축할 계획을 세웠다. 그러나 인프라 구축 속도는 목표 대비 현저히 낮다. 2021년부터 2023년까지 누적 설치 실적은 당초 목표인 281기 대비 196기에 불과했다. 2023년 한 해만 보아도 8월까지의 설치 실적은 91기 목표 대비 37기에 불과하여, 구축 목표 달성률이 매우 저조했다.¹⁷⁸⁾

177) <https://www.gminsights.com/ko/industry-analysis/hydrogen-refueling-station-market>

178) <https://www.enertopianews.co.kr/news/articleView.html?idxno=45499>

- **틈새 시장 기술 확보 지원:** KAI가 주도하는 19인승급 커뮤터기 등 단거리, 중소형 수소 항공 기술 개발에 대한 정부 지원을 지속하여, 기술적 난이도가 낮은 분야에서 국내 기술 기반을 선점하고 확보해야 한다.
- **수소 공급망의 수직적 통합:** 대한항공, 인천공항공사와 에너지 공급사 간 협력을 통해 공항 중심의 액화 수소 공급망 구축을 최우선 과제로 추진해야 한다. 친환경의 조기 구축은 기술 개발 속도의 지연 리스크를 상쇄하고 미래 수소 항공기 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 전략적 핵심 요소이다.

2-4. 수소 UAM 기술개발 동향과 시장 전망

1) 수소 UAM 개요

- 수소 UAM(도심항공 모빌리티)는 수직이착륙(Fuel Cell)을 수소 연료전지 동력으로 활용하는 eVTOL(전기 수직 이착륙 항공기)을 기반으로 한 도심 항공 시스템을 지칭한다. 이 시스템은 궁극적으로 도심항공모빌리티(UAM)와 근거리 도심항공 모빌리티(RAM)를 포괄하는 미래항공모빌리티(AAM) 상용화를 위한 핵심 축을 담당할 것으로 예상된다.
- UAM이 초기에는 도심 내 교통 수단으로서 단거리 이동에 초점을 맞추는 반면, 수소 기술은 장거리 이동과 고속 이동에 중점을 둔다. 특히 RAM 영역에서 전략적 우위를 점하고 있다. 현대자동차는 이를 기반으로 UAM과 결합한 AAM 사업을 미래 핵심 사업으로 추진하는 근거리 도심항공모빌리티(H-UAM)를 개발하고 있다. H-UAM은 기존의 화석 연료 기반 항공 운송을 대체하며 탄소 배출을 최소화하는 친환경 교통수단으로서 그 가치를 인정받고 있다.

현대자동차의 미래항공모빌리티(AAM) 조감도

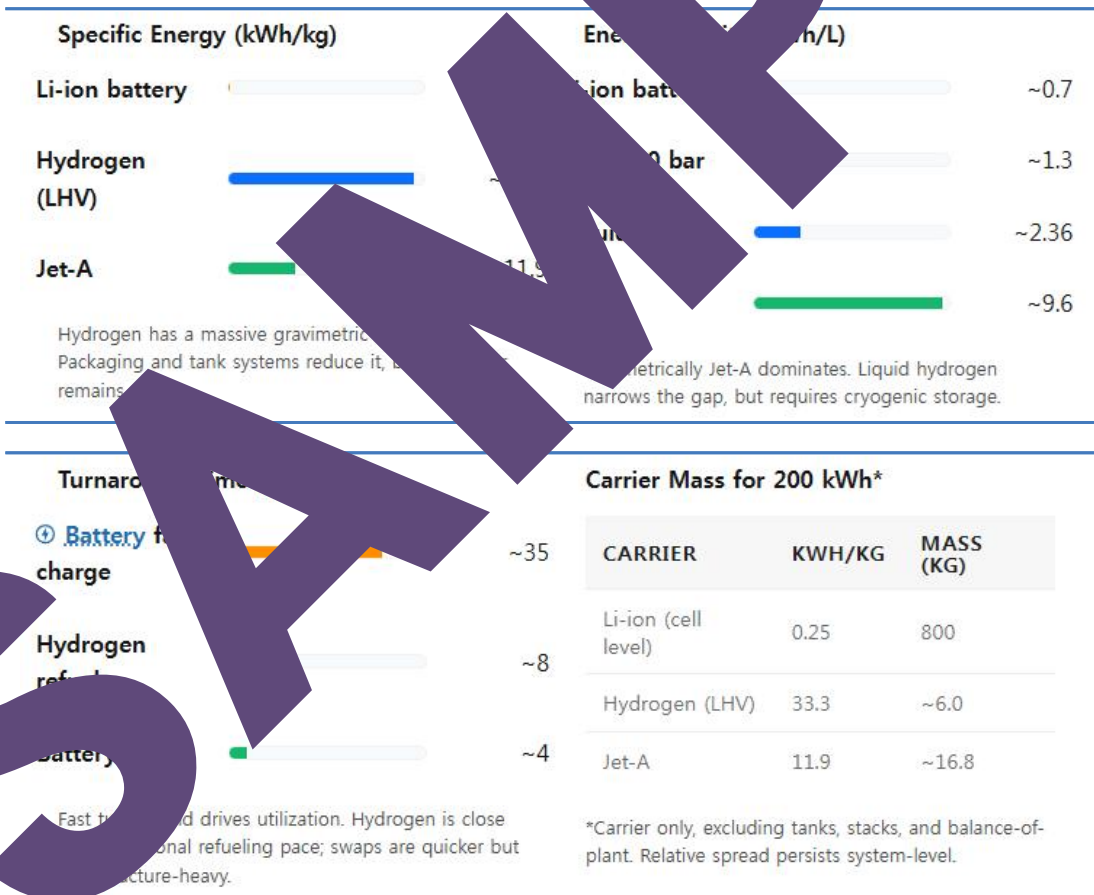


자료 : 현대자동차

I. 국내외 수소산업 밸류체인별 기술, 시장 동향과 전망

- H-UAM 기술이 급부상하는 주된 배경은 기존 배터리 기반 추진 시스템이 가진 결정적인 기술적 한계를 극복할 수 있다는 데 있다. 현재 eVTOL에 주로 사용되는 리튬이온 배터리의 중량 에너지 밀도는 약 0.25 kWh/kg 수준이다. 이러한 낮은 에너지 밀도는 항공기의 항속거리와 탑재 중량 확장에 직접적인 제약으로 작용하며, eVTOL을 상용화 시키는 주요 원인이 되었다.
- 반면, 수소는 약 33 kWh/kg의 월등히 높은 중량 에너지 밀도를 제공한다. 이 에너지 밀도 차이는 H-UAM이 배출가스 없이 장거리 비행(예: 500마일 이상)과 중량 부담을 감당할 수 있게 하는 핵심 동인이다. 따라서 수소 UAM은 배터리 UAM의 단순한 대체 기술이 아니라, 기존 배터리 시스템으로는 불가능했던 장거리/지역 간(RAM) 운항이라는 새로운 교통 수요를 창출하며 모빌리티 시장을 대폭으로 확장하는 역할을 수행한다. 이처럼 H-UAM은 '지역간/고용량' 세그먼트를 확대하는 AAM 기술로서 그 전략적 가치가 매우 높게 평가된다.¹⁹⁷⁾

<그림 I-99> 수소 기반 eVTOL



자료 : <https://flyingcarsmarket.com>

197) <https://flyingcarsmarket.com/what-role-could-hydrogen-based-propulsion-systems-play-in-evtol-technology-in-the-future/>

(2) 상용화를 위한 향후 5개년 핵심 과제

- 수소 UAM의 성공적인 상용화를 위해서는 단기적으로 다음과 같은 세 가지 핵심 과제에 집중해야 한다.
 - **규제 및 인증 표준 마련** : 항공 부문에서의 수소 품질 기준, 연료 전지 스택 내구성, 그리고 안전성에 대한 새로운 표준 코드(Standard Codes)를 국제적으로 표준화하여 마련해야 한다. 특히 액체 수소(LH2)의 운용 및 저장에 대한 안전 표준 확보는 상용화 규모 확대를 위한 필수 전제 조건이다.
 - **인프라 구축 전략** : 수소 생산, 운송, 저장 및 버티포트 충전 시스템을 기존 에너지 및 물류 인프라와 연계하여 초기 자본 비용을 분산하는 것이 요구된다. 전 세계 주요 항만 등 기존 화학 제품 취급 전문성을 활용할 수 있는 인프라를 초기 수소 공급 거점(First movers)으로 활용하여 비용 효율성을 높여야 한다.
 - **고성능 기술 개발 투자** : 장거리 RAM을 위한 고효율 연료 전지 스택(LH2)의 경량화 및 비용 효율화를 달성하기 위한 집중적인 R&D 투자가 필요하다. 또한, 연료 전지 스택 자체의 내구성을 높이고 추후 부품에 대한 비용 오차를 개선하는 기술 개발이 병행되어야 한다.

2-5. 수소선박 기술개발 동향과

1) 수소 선박 기술

(1) 개념

친환경 선박은 대기오염 물질인 질소·황산화물과 같은 공해물질이나 온실가스 배출을 줄이기 위해 친환경 동력원으로 사용되거나 해양오염 저감기술 또는 에너지 효율 향상 기술 적용한 친환경 선박을 의미한다. 친환경 선박(Green ship)이라고 한다.²⁰⁷⁾



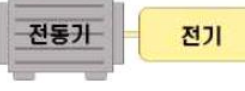
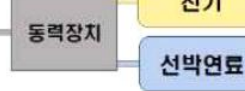

- 국제적 기후변화 대응을 위해서 2015년 파리에서 기후변화협정을 채택하였으나, 해상 운송 분야 전문기구인 IMO(국제해사기구)는 2018년 해운 분야에서 배출되는 온실가스를 줄이기 위한 전략적인 목표를 설정하였는데 이를 달성하기 위한 수단이 친환경 선박이라고 할 수 있다.

한 법률에서 정하는 친환경 선박은 '환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률' 제2조 3호에 다음과 같이 종류가 정의되어 있다.

207) KORIES, <https://www.kories.org/>

▣ “환경친화적 선박” : 다음 각 항목의 어느 하나에 해당하는 선박

<표 I -48> 친환경 선박 개념

구분	정의
오염저감·고효율선박	 <p>선박배출 오염물질 저감장치를 설치하여 배출되는 에너지 효율기술이 적용되어 설계된 선박</p>
해양오염 저감기술	<p>선박에서 배출되는 오염물질을 저감하는 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 황산화물 저감장치(Scrubber) ■ 질소산화물 저감장치(SCR) ■ 미세먼지(입자상물질) 저감 필터(DPF) ■ 배기가스 재순환 장치(EGR) ■ 선박평형수 처리장치(BWMS)
선박에너지 효율기술	<p>선박의 에너지 효율을 높이는 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 최적선형설계기술(선형설계, 선형저항 부가물(선형저항계 등) ■ 신소재 설계기술(고장력강, 내열소재, 내충격소재 등) ■ 마찰저항 저감기술(공기유할, 선체유할 등) ■ 추진기 설계 기술(프로펠러, 고효율추진기 등) ■ 운항효율 최적화 기술(자동감시시스템 등) ■ 에너지 하베스팅 기술(배터리 발전 등) ■ 이산화탄소포집장치(CCS)
친환경에너지 추진선박	 <p>친환경에너지를 이용하여 추진하는 선박</p>
LNG/CNG	액화천연가스(LNG) 또는 천연가스(CNG)를 연료로 사용하여 추진하는 선박
LPG	액화석유가스(LPG)를 연료로 사용하여 추진하는 선박
메탄올	메탄올을 연료로 사용하여 추진하는 선박
암모니아	암모니아를 연료로 사용하여 추진하는 선박
수소	수소를 연료로 사용하여 추진하는 선박
기타에너지	선박에너지관리규정이 인정하는 에너지를 사용하여 추진하는 선박 (수소, 메탄올, 바이오연료, 에탄올, 풍력, 태양열, 태양광 등)
전기추진선박	 <p>충전받은 전기에너지를 동력원으로 사용하는 선박</p>
하이브리드 추진선박	 <p>연료와 전기에너지를 조합하여 동력원으로 사용하는 선박</p>
연료전지 추진선박	 <p>수소·암모니아 등을 사용하여 발생한 전기에너지를 이용한 연료전지를 동력원으로 사용하는 선박</p>

자료 : 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K) 추진전략-제1차 친환경선박 개발·보급 기본계획('21~'30)

- 또한 아직 발전용 연료전지는 보급 초기단계로 발전단가가 높지만 2025년 경에는 기존 발전과 경쟁할 수 있는 수준까지 가격하락이 전망되고 있어 시장이 급성장할 것으로 예상했다.

3) 국내 연료전지 발전 동향 및 최근 이슈

- 본 절에서는 한국에너지공단의 '신재생에너지센터'에서 발표되고 있는 연료전지 발전 동향 등을 토대로 국내 연료전지의 발전과 산업 동향을 소개한다.

(1) 생산 실적

- 한국에너지공단이 최근 발표한 '2023년 신·재생에너지 생산 실적(2024년 12월 공표)' 결과에 따르면, 2023년 신·재생에너지 생산량은 1,705만 8천톤(천톤)으로 전년 대비 8.6% 증가했다.
 - 1차 에너지 중 신·재생에너지 공급 비중은 5.73%로 증가했으며, 연료전지 공급 비중은 7.8%로 0.56%p 증가한 것이다.
- 에너지 생산량은 전력에 대한 수요를 충족시키기 위해 공급한 에너지 양을 뜻한다. 전력 생산 설비에서 만들어내는 '발전용 연료전지'와 달리 열·수송 에너지도 공급량에 포함한다. 우리나라에 연료전지 공급량이 증가할 것으로 파악할 수 있다.

<표 I -69> 신·재생에너지 생산 실적(단위: 천톤) (단위: 천toe)

구분	생산량(천톤)	비중(%)	증감률	2023		
				생산량	비중(%)	증감률
1차에너지(천toe)	297,597	5.73				
신·재생에너지	15,706	12.19	8.6	17,058	100.0	8.6
연료전지	1,154	89.99	12.97	15,512	90.9	9.7
신·재생에너지(연료전지 제외)	10.0	5.5	1.6	1,547	9.1	△1.6
태양광	25	0.2	△3.8	24	0.1	△2.5
태양풍력	6,609	42.1	24.3	7,149	41.9	8.2
풍력	718	4.6	5.9	723	4.2	0.7
수력	755	4.8	16.0	792	4.6	4.9
해양에너지	90	0.6	△7.2	93	0.5	3.2
지열	280	1.8	9.4	280	1.6	0.2
열	27	0.2	8.0	28	0.2	3.8
바이오	4,373	27.8	2.6	5,030	29.5	15.0
폐기물	1,257	8.0	4.9	1,393	8.2	10.8
신·연료전지	1,154	7.3	12.7	1,334	7.8	15.7
IGCC	419	2.7	△10.3	212	1.2	△49.3

자료 : 한국에너지공단 신재생에너지센터

- 청정수소 발전입찰시장(CHPS) 운영을 통해 발전부문 발전단가 보전을 추진하고, 산업·수송부문 지원방안을 검토한다.

3-3. 수소·암모니아 발전 기술개발 동향

1) 수소·암모니아 발전 기술 개요

- 재생에너지 및 다양한 화석연료로부터 생산된 수소(그린·블루·청록수소 등)를 발전용 연료로 활용하거나 또는 연료전지의 연료로 직접 활용하면 온실가스 배출을 저감할 수 있다. 그러나 가스터빈 발전 연료인 LNG를 수소로 대체하기 위해서는 국내 수소 생산 잠재량(1.2백만 톤)에 비해 많은 양²⁴²⁾의 수소가 필요하기에 가스터빈 등의 발전 기술에 수소 활용을 위한 대용량 전력 생산 분야에서의 수소활용은 상당부분 해외에서 도입해 이를 연료로 활용하는 방안을 고려해야 한다.

<그림 I -156> 해외로부터의 수소 및 수소·암모니아의 생산 및 수송 그리고 발전 활용



출처: 한국수소에너지연구원, 수소·암모니아 가스터빈 발전의 기술 동향 및 전망

- 위와 같은 수소의 생산 및 이송, 저장 그리고 활용의 전체 흐름 개략도에서 보는 바와 같이, 국내에서 생산된 수소(그린 및 블루 수소 등)를 국내로 이송 및 활용 시에는 액화 수소를 통한 수송의 부피로, 즉, 최대한의 에너지밀도를 갖도록 하여 해상 운송하는 것이 기술, 경제적으론 허용 가능한 시나리오가 될 수 있다.
- 암모니아(-33°C)는 수소(-253°C)에 비해 액화온도가 높아 이송 및 저장 시 에너지 손실 적으며, 해외로부터 도입, 활용도 이미 수십 년간 상업화되어 운용된 만큼 수소캐리어로서의 기술·경제적 실현성이 단기적으로는 높게 평가된다.
- 더불어, 장거리 운송을 통해 도입된 암모니아를 직접 연료로 활용하거나 또는 수소를 추출해 활용하는 방법 등 다양한 기술적 옵션은 각 활용 기술의 성숙도 및 실현성 그리고 경제성 등을 고려하여 실현함이 바람직해 보인다.

242) 가스터빈의 수소 연료 사용량은 전력생산량 1.0GWh당 약 50톤 내외의 수소가 필요 (효율 60% 가정)

1-2. 수소 생산 기술

- 비재생 수소 생산 방식인 스팀 메탄 개질(Steam Reforming of Methane, SRM)은 전기분해와 같은 재생 수소 에너지 방식에 비해 에너지 효율이 높고 운영 비용이 저렴하다.
 - 하지만 SRM은 막대한 양의 이산화탄소를 배출하기 때문에 전기분해보다 친환경적이지 않다.
- 또 다른 비교 기준은 수소 생산 방식의 분산성이다. 분산 생산은 최종 사용자 가까이서 소량의 수소를 생산하는 것을 의미하며, 효율은 낮고 단위 질량 또는 부피당 비용이 더 비싸지만 운송 비용이 적게 든다.
 - 반면, 중앙 집중식 생산은 대규모 수소 생산을 위한 방식의 특징이 많고 효율이 높으며 생산 비용이 저렴하지만 운송 비용이 많이 든다. 현재 상용화된 SRM 방식의 수소는 대부분 중앙 집중식으로 생산되지만, 물이 풍부한 분산 생산 방식도 적용될 수 있다.²⁹⁰⁾
- 에어 프로덕츠(Air Products)는 뛰어난 성능을 자랑하는 PRISMs 현장 수소 생산 시스템을 도입했다. 이 시스템은 효율이 높고, 소형이며 무게가 가볍다.
 - 적은 양의 천연가스를 사용하여 절약하고, 운송 및 공급의 전체 비용을 낮추며, 금속 및 화학 처리(철강 및 유리), 석유 정제, 천연가스 처리, 기타 다양한 산업 응용 분야에 현장 수소 생산을 쉽게 통합할 수 있다.
 - 액체 백업 시스템인 PRISMs는 기존 시스템은 설치가 용이하고, 시동이 빠르며, 무인 운영이 가능하며, 안전성을 높여 공급을 안정적으로 한다. 에어 프로덕츠는 수소 파이프라인 네트워크를 구축하고, 공급업체 중 하나로서, 안전성이 향상된 비용 효율적인 공급 솔루션을 제공한다.

1) 스팀 개질

(1) 탄화수소 기반 스팀 개질

- 수소는 에너지 밀도가 낮아 직접 만들 수 없기 때문에, 스팀 개질, 자열 개질, 건식 개질 등 다양한 개질 기술을 수소 생산을 위해 개발되어 왔다.
 - 탄화수소는 고온($\geq 800^{\circ}\text{C}$) 조건에서 증기 또는 공기와 반응할 때, 이를 일반적으로 스팀 개질(steam reforming) 또는 부분 산화(partial oxidation)라고 한다.
 - 스팀 개질은 흡열 반응인 반면, 부분 산화는 발열 반응이며, 이 두 반응을 결합한 자열 개질(autothermal reforming)은 순수 엔탈피 값이 0에 가깝다.

스팀 개질 기술은 이미 성숙 단계에 있으며, 천연가스(메탄, 프로판), 알코올(메탄올, 에탄올, 부탄올), 제트 연료, LPG, 가솔린, 디젤 등 다양한 탄화수소원을 사용하여 수소를 상업적으로 생산하고 있다.

290) Hydrogen Gas Onsite Generator!Air Products,
<https://www.airproducts.com/equipment/hydrogen-onsite-generators>.

- 메탄 열분해를 통한 터콰이즈 수소는 고온의 반응열을 필요로 하는데, 이 열원을 친환경적으로 공급하지 못할 경우 전체 공정의 탄소 중립성이 훼손될 수 있으며, 생성되는 고체 탄소의 순도와 품질을 일정하게 유지하고 대규모 수요처를 확보하는 것 역시 중요한 기술적 과제이다.
- 마지막으로, 인프라 구축 및 환경적 고려사항이 수소 경제 확산의 주요 과제이다.
 - 그린 수소를 대규모로 생산하기 위해서는 막대한 양의 재생에너지 발전 단가를 낮추고, 계절할 안정적인 전력망이 선결되어야 하며, 깨끗한 물을 지속적으로 공급할 수 있는 물 자원 인프라도 필수적이다.
 - 블루 수소는 포집된 이산화탄소를 영구적으로 안전하게 저장할 수 있는 대규모 지중 저장소 확보가 관건이며, 장기적인 누출 가능성에 대한 모니터링과 환경적 책임 문제가 뒤따른다.
 - 또한, 생산된 수소를 색상으로만 구분하는 것에서 벗어나, 생산 과정에서 발생하는 탄소 배출량을 평가하는 탄소 강도(CI) 기준을 마련하고, 국제적 기준을 수립하는 것 역시 공정하고 투명한 청정 수소 시장 형성하기 위해 반드시 해결해야 할 제도적 도전과제이다.

<표 II -4> 수소 생산 도전과제

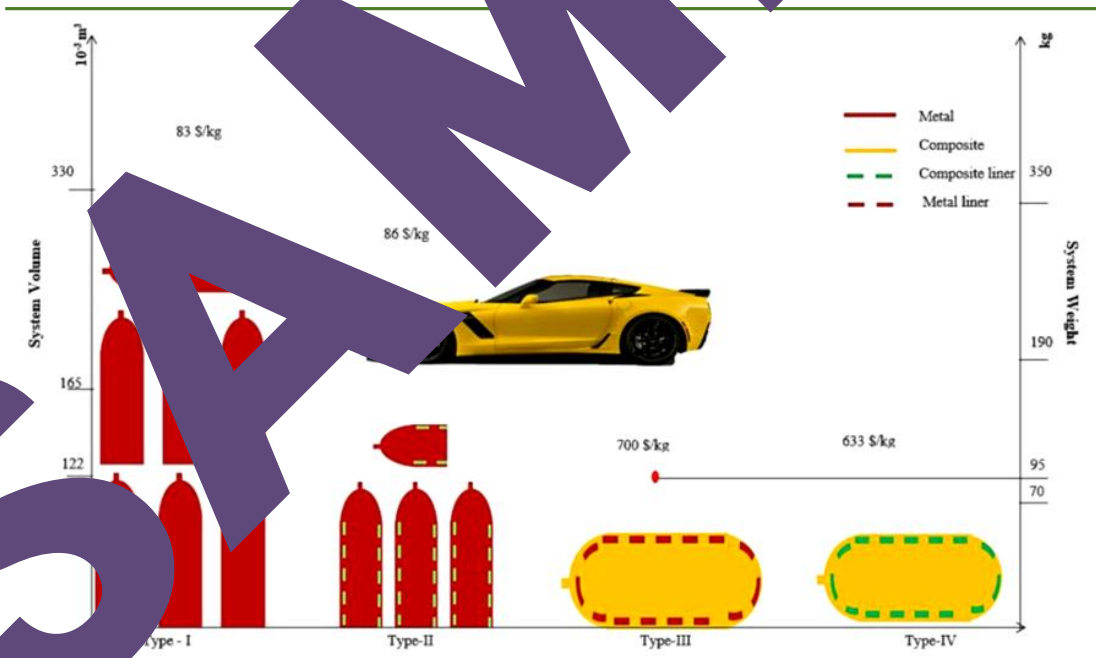
구분	주요 기술 / 과제	핵심 과제
경제성 확보	그린 수소	<ul style="list-style-type: none"> ■ 높은 생산 단가: 탄소 대비 3배 이상 비싼 가격 형성. ■ 주요 비용: 재생에너지 전력 비용과 그린 수소 생산에 투입되는 물 비용 ■ 목표 달성: 미국 에너지부(DOE)의 목표(\$1/kg) 달성을 위해 재생에너지 단가 하락과 기술의 획기적 혁신이 필요함.
	블루 수소 (CCUS)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 높은 초기 투자비: 탄소 포집·저장(CCUS) 설비 구축에 대규모 투자가 요구됨 ■ 에너지 패널티(Energy Penalty): CCUS 운영 과정에서 에너지 효율이 저하되어 생산 단가가 상승함.
기술적 효율	수소 (수전해)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 고가 희귀금속 의존: PEM 수전해 방식의 촉매로 백금(Pt), 이리듐(Ir) 등 고가의 귀금속(PGM) 사용이 필수적임. ■ 공급망 리스크: 특정 국가에 편중된 귀금속 자원으로 인한 공급망 불안정성 내재. ■ 내구성 문제: 장시간 운영 시 촉매 비활성화 및 전해질막 열화로 시스템 내구성이 저하되고 유지보수 비용이 증가함.
	터콰이즈 수소	<ul style="list-style-type: none"> ■ 불완전한 탄소 포집: 현재 기술로는 이산화탄소를 100% 완벽하게 포집하는 것이 불가능하며(최대 95%), 잔여 온실가스가 배출되는 명확한 한계 존재. ■ 탄소 중립성 훼손 가능성: 고온 반응열을 친환경적으로 공급하지 못할 경우, 전체 공정의 탄소 중립성이 훼손될 수 있음. ■ 부산물 처리 과제: 생성되는 고체 탄소의 순도와 품질을 일정하게 유지하고, 이를 활용할 대규모 수요처 확보가 중요 과제임.

탱크 유형	주요 소재 (라이너 + 강화재)	최대 압력	중량 저장 효율	특징 및 비용
Type III	금속 + 탄소섬유 (전체 강화)	350 ~ 700 bar	보통 (~4.2 wt%)	<ul style="list-style-type: none"> 무게 대폭 감소 고압 저장 가능
Type IV	플라스틱 + 탄소섬유 (전체 강화)	~ 700 bar	높음 (~5.7 wt%)	<ul style="list-style-type: none"> 가장 가볍고 효율적임 (차량용) 제조 공정이 복잡하고 고가

자료: 각종 기사와 정보를 종합

- 액체 수소 저장은 수소 압축기, 열 교환기 및 스톱 밸브를 사용하여 온도를 (-252.9°C) 아래로 낮추는 극저온 탱크에서 이루어진다.
 - 이 과정에서 가스는 1단계에서 압축된다. 2단계에서는 액체 질소와 액체 질소가 가스를 냉각하는 데 사용된다. 이 액화에 필요한 이론적 작업량은 1kg 당 3.23 kWh로 추정된다.³⁵⁴⁾
- 액체 형태로 수소를 저장하기 위해서는 대류 및 증발에 의한 열 손실을 최소화해야 한다. 따라서 액체 수소 저장 탱크는 단열 단열재로 잘 설계되어 있다.
 - 그러나 용기의 크기, 모양 및 열 특성에 따라 열 손실(heat-off)을 완전히 피하기는 어렵다. 구형은 부피에 대한 표면적이 가장 적어 열 손실을 최소화하는 데 이상적이다.

<그림 II-17> 수소 저장 탱크의 종류



자료: P. Muthukumar, A. Kumar, M. Afzal, S. Bhogilla, P. Sharma, A. Parida, S. Jana, E. A. Kumar, R. K. Pai and I. P. Jain, Int. J. Hydrogen Energy, 2023, 48, 33223-33259.

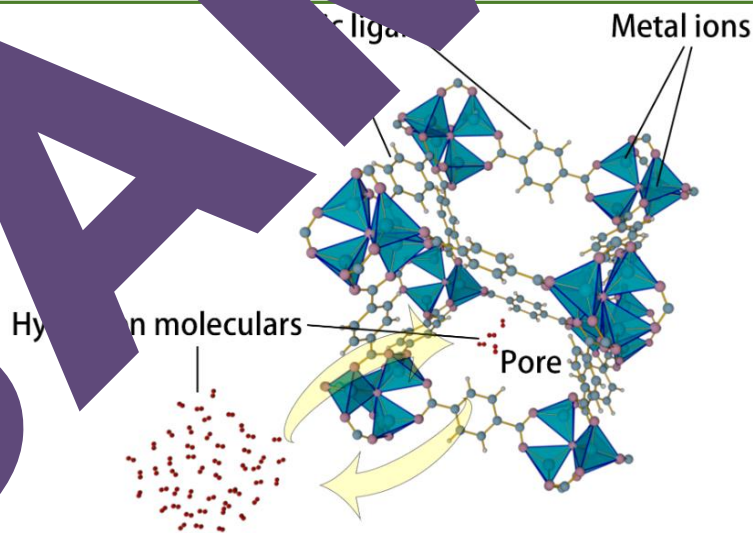
354) Hydrogen? Is that safe? | Toyota Europe, <https://www.toyota-europe.com/news/2015/hydrogen-is-that-safe>

- UHS는 주로 비용 최소화를 목표로 한다. 전체 자본 비용은 주로 부지 선정, 가스 분리, 위험 평가, 세균 활동 탐사, 주입 및 인출 기간, 인프라 및 인건비로 구성된다.⁴¹³⁾
- 기술적 진보에도 불구하고 UHS는 아직 널리 채택되지 않았으며, 추가적인 기술 및 재정적 투자가 필요하다.

6) 금속-유기 골격체(MOFs) 수소 저장

- 금속-유기 골격체(MOFs)는 금속 이온과 유기 리간드가 배위 결합을 통해 결합된 주기적인 네트워크 구조를 가진 다공성 물질이다.
- MOFs에서 금속 이온은 일반적으로 노드 또는 중심점 역할을 하며, 유기 리간드는 연결체 기능을 한다.
- 이들은 기존의 다공성 물질에 비해 더 넓은 비표면적과 높은 기공률을 가진다. 또한 MOFs는 유기 성분을 포함하고 있어 설계가 가능하여 특성을 맞춤형으로 기공 크기 조절하며 표면 기능화를 용이하게 할 수 있다.
- MOFs는 가스 저장에 대해 광범위하게 연구되고 있지만, 수소 저장 분야에서는 여전히 여러 도전 과제에 직면해 있다.
- MOFs를 수소 저장에 활용하려면 그들의 다공성 구조에 있으며, 이는 수소 분자를 흡착하고 저장할 수 있다.
- MOFs는 일반적으로 다수의 미세 기공을 제공하므로, 높은 비표면적을 제공하여 수소 분자와 MOFs 사이의 상호작용을 증가시키고 수소 흡착을 용이하게 한다.

Figure 1. MOFs의 수소 흡착 및 탈착의 매커니즘



자료: Xie, Z., Jin, Q., Su, G., & Lu, W. (2024). A review of hydrogen storage and transportation: progresses and challenges. *Energies*, 17(16), 4070.

413) Bin Navaid, H.; Emadi, H.; Watson, M. A comprehensive literature review on the challenges associated with underground hydrogen storage. *Int. J. Hydrogen Energy* 2023, 48, 10603-10635.

III. 수소 전주기 밸류체인별 연구개발 데이터 분석

1. 수소 생산 연구개발 동향 분석

1-1. 분석절차

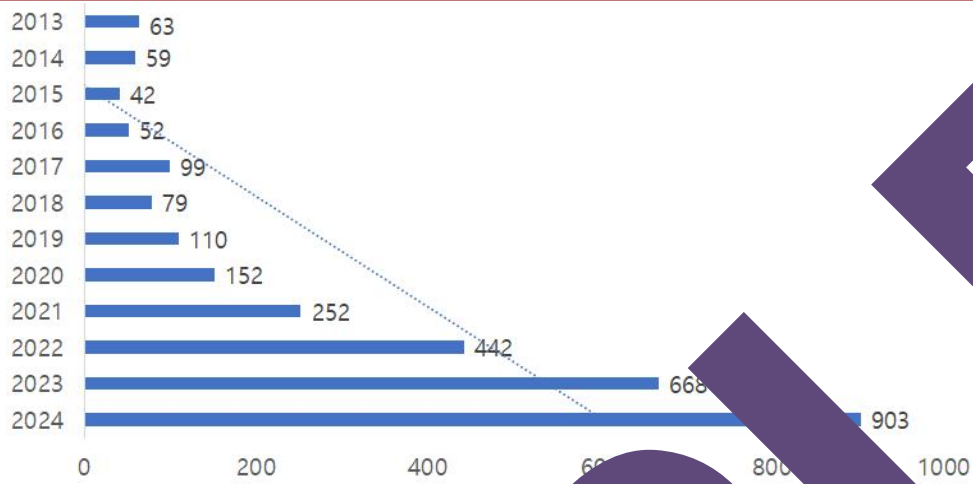
- 연구개발 동향을 분석하기 위해 SCOPUS 데이터베이스에 “hydrogen production, green hydrogen, water electrolysis” 단어가 제목, 키워드, 또는 포함된 연구를 1990년~2025년까지 추출하여 검색된 3,254개를 분석하였다.
- 전체 연구의 내용 및 연구 주제별 주제어와 관계를 파악하기 위해 코사인 유사도와 텍스트 네트워크 분석을 수행하였다. 네트워크 통계프로그램을 활용하였으며, 네트워크 분석은 quanteda 패키지를 활용하였다.
- 주제 분석에는 토픽 모델링(topic modeling) 방법을 활용하였다. 동일하게 R 통계프로그램을 활용하였으며 textmine 패키지를 활용하였다. 이 분석을 위해 적정 토픽 수를 산출한 후 토픽 수로 토픽 모델링을 수행하였다. 토픽 모델링(LDA; Latent dirichlet allocation)을 수행하였다. 토픽 모델링(topic modeling)을 활용하여 각 연구의 토픽을 할당하였다. 또한, 각 토픽의 분류는 나이브 베이즈(Naive bayes) 모델을 이용하여 산출하였다.
 - 나이브 베이즈 모델은 특정 클래스에 속할 확률을 계산하며, 주로 텍스트 분류에 활용된다. 나이브 라벨링 알고리즘은 probable 토픽을 기반으로 가장 적절한 토픽의 이름을 라벨링할 수 있다. 다음으로 깃스 샘플링(gibbs sampling)을 활용하여 수집한 연구의 주제를 개별적으로 분류하였다. 이러한 과정을 통해 토픽의 이름을 라벨링하고, 개별 연구가 각 주제에 해당할 사후 확률을 산출할 수 있었다.

수소 생산 연구 동향

연도별 연구 동향을 살펴보면, 1976년 1편의 연구가 발표된 이후 2000년대까지 연구가 소폭으로 발표되었다. 하지만, 2010년을 기점으로 연구가 크게 증가하였다. 구체적으로 2010년~2024년까지 연평균 20.51%의 증가세를 보이며 총 3,093편의 연구가 발표되었다. 가장 많은 연구가 발표된 연도는 2024년으로 903편의 연구가 발표되었다.

Ⅲ. 수소 전주기 밸류체인별 연구개발 데이터 분석

<그림Ⅲ-1> 수소 생산 연도별 연구 수 추이



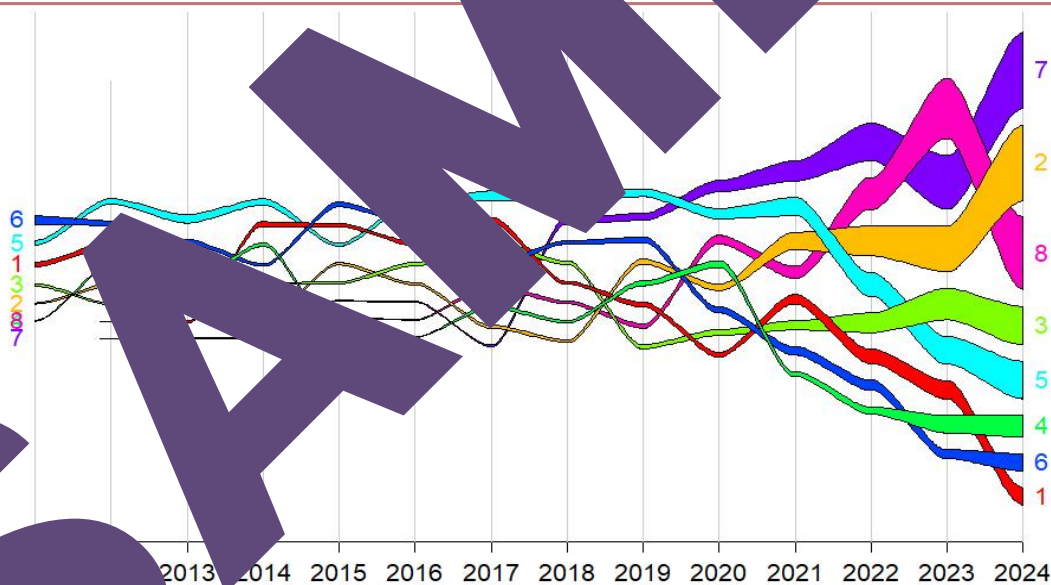
연도	연구 수	연도	연구 수
2024	903	2002	4
2023	668	2001	1
2022	442	2000	1
2021	252	1999	4
2020	152	1998	2
2019	110	1997	1
2018	79	1996	2
2017	99	1995	2
2016	52	1994	1
2015	42	1993	5
2014	59	1992	5
2013	63	1991	1
2012	68	1990	1
2011	77	1989	2
2010	79	1988	2
2009	80	1987	2
2008	83	1986	1
2007	93	1985	1
2006	103	1984	7
2005	113	1983	1
2004	123	1982	7
2003	133	1981	2
		1980	2
		1979	1
		1978	1
		1977	1
		1976	1
		1975	1
		1974	1
		1973	1
		1972	1
		1971	1
		1970	1
		1969	1
		1968	1
		1967	1
		1966	1
		1965	1
		1964	1
		1963	1
		1962	1
		1961	1
		1960	1
		1959	1
		1958	1
		1957	1
		1956	1
		1955	1
		1954	1
		1953	1
		1952	1
		1951	1
		1950	1
		1949	1
		1948	1
		1947	1
		1946	1
		1945	1
		1944	1
		1943	1
		1942	1
		1941	1
		1940	1
		1939	1
		1938	1
		1937	1
		1936	1
		1935	1
		1934	1
		1933	1
		1932	1
		1931	1
		1930	1
		1929	1
		1928	1
		1927	1
		1926	1
		1925	1
		1924	1
		1923	1
		1922	1
		1921	1
		1920	1
		1919	1
		1918	1
		1917	1
		1916	1
		1915	1
		1914	1
		1913	1
		1912	1
		1911	1
		1910	1
		1909	1
		1908	1
		1907	1
		1906	1
		1905	1
		1904	1
		1903	1
		1902	1
		1901	1
		1900	1
		1899	1
		1898	1
		1897	1
		1896	1
		1895	1
		1894	1
		1893	1
		1892	1
		1891	1
		1890	1
		1889	1
		1888	1
		1887	1
		1886	1
		1885	1
		1884	1
		1883	1
		1882	1
		1881	1
		1880	1
		1879	1
		1878	1
		1877	1
		1876	1
		1875	1
		1874	1
		1873	1
		1872	1
		1871	1
		1870	1
		1869	1
		1868	1
		1867	1
		1866	1
		1865	1
		1864	1
		1863	1
		1862	1
		1861	1
		1860	1
		1859	1
		1858	1
		1857	1
		1856	1
		1855	1
		1854	1
		1853	1
		1852	1
		1851	1
		1850	1
		1849	1
		1848	1
		1847	1
		1846	1
		1845	1
		1844	1
		1843	1
		1842	1
		1841	1
		1840	1
		1839	1
		1838	1
		1837	1
		1836	1
		1835	1
		1834	1
		1833	1
		1832	1
		1831	1
		1830	1
		1829	1
		1828	1
		1827	1
		1826	1
		1825	1
		1824	1
		1823	1
		1822	1
		1821	1
		1820	1
		1819	1
		1818	1
		1817	1
		1816	1
		1815	1
		1814	1
		1813	1
		1812	1
		1811	1
		1810	1
		1809	1
		1808	1
		1807	1
		1806	1
		1805	1
		1804	1
		1803	1
		1802	1
		1801	1
		1800	1
		1799	1
		1798	1
		1797	1
		1796	1
		1795	1
		1794	1
		1793	1
		1792	1
		1791	1
		1790	1
		1789	1
		1788	1
		1787	1
		1786	1
		1785	1
		1784	1
		1783	1
		1782	1
		1781	1
		1780	1
		1779	1
		1778	1
		1777	1
		1776	1
		1775	1
		1774	1
		1773	1
		1772	1
		1771	1
		1770	1
		1769	1
		1768	1
		1767	1
		1766	1
		1765	1
		1764	1
		1763	1
		1762	1
		1761	1
		1760	1
		1759	1
		1758	1
		1757	1
		1756	1
		1755	1
		1754	1
		1753	1
		1752	1
		1751	1
		1750	1
		1749	1
		1748	1
		1747	1
		1746	1
		1745	1
		1744	1
		1743	1
		1742	1
		1741	1
		1740	1
		1739	1
		1738	1
		1737	1
		1736	1
		1735	1
		1734	1
		1733	1
		1732	1
		1731	1
		1730	1
		1729	1
		1728	1
		1727	1
		1726	1
		1725	1
		1724	1
		1723	1
		1722	1
		1721	1
		1720	1
		1719	1
		1718	1
		1717	1
		1716	1
		1715	1
		1714	1
		1713	1
		1712	1
		1711	1
		1710	1
		1709	1
		1708	1
		1707	1
		1706	1
		1705	1
		1704	1
		1703	1
		1702	1
		1701	1
		1700	1
		1699	1
		1698	1
		1697	1
		1696	1
		1695	1
		1694	1
		1693	1
		1692	1
		1691	1
		1690	1
		1689	1
		1688	1
		1687	1
		1686	1
		1685	1
		1684	1
		1683	1
		1682	1
		1681	1
		1680	1
		1679	1
		1678	1
		1677	1
		1676	1
		1675	1
		1674	1
		1673	1
		1672	1
		1671	1
		1670	1
		1669	1
		1668	1
		1667	1
		1666	1
		1665	1
		1664	1
		1663	1
		1662	1
		1661	1
		1660	1
		1659	1
		1658	1
		1657	1
		1656	1
		1655	1
		1654	1
		1653	1
		1652	1
		1651	1
		1650	1
		1649	1
		1648	1
		1647	1
		1646	1
		1645	1
		1644	1
		1643	1
		1642	1
		1641	1
		1640	1
		1639	1
		1638	1
		1637	1
		1636	1
		1635	1
		1634	1
		1633	1
		1632	1
		1631	1
		1630	1
		1629	1
		1628	1
		1627	1
		1626	1
		1625	1
		1624	1
		1623	1
		1622	1
		1621	1
		1620	1
		1619	1
		1618	1
		1617	1
		1616	1
		1615	1
		1614	1
		1613	1
		1612	1
		1611	1
		1610	1
		1609	1
		1608	1
		1607	1
		1606	1
		1605	1
		1604	1
		1603	1
		1602	1
		1601	1
		1600	1
		1599	1
		1598	1
		1597	1
		1596	1
		1595	1
		1594	1
		1593	1
		1592	1
		1591	1
		1590	1
		1589	1
		1	

Ⅲ. 수소 전주기 밸류체인별 연구개발 데이터 분석

연도	연구주제(토픽)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
2024	63	48	178	103	183	148	114	66
2023	43	48	128	82	108	121	89	49
2022	50	30	85	45	74	77	52	29
2021	34	22	45	25	32	29	41	19
2020	26	10	29	14	17	18	19	19
2019	20	11	19	10	14	10	8	10
2018	17	7	17	5	6	5	10	10
2017	22	13	4	14	9	10	9	10
2016	14	10	2	8	5	2	3	8
2015	6	8	2	5	3	1	8	9
2014	15	12	2	3	5	1	7	12
2013	19	6	0	11	6	1	5	16

- 연구 초반인 2010년대에는 큰 증감없이 소수의 주제에서 연구가 이루어졌다. 그러나 2020년부터 토픽3과 토픽5를 기점으로 연구주제 동향의 변화가 증가하였다.
- 특히, 토픽3은 2020년대 초반에 연구가 시작되었으며, 최근에는 2022년 이후 급격하게 성장하였다.
- 최근에는 토픽5의 비중이 높아지는 추세이다.

<그림Ⅲ-5> 수소 생산 관련 연구 주제 동향 (2013~2024년)



주요 단어 및 네트워크 분석

- 주요 단어는 아래와 같다. hydrogen(12,433), production(7,411), energy(6,059), water(5,508), inf(5,032), electrolysis(4,978), green(2,988), sup(2,821), system(2,276), hinf(1,748), efficiency(1,705), renewable(1,673), process(1,600), cost(1,590), reaction(1,583), performance(1,471),

IV. 해외 주요 기업별 수소 사업 추진 동향과 대응 전략

1. 수소 생산 및 공급 분야

1-1. 린데(Linde plc)

1) 일반 현황

- 린데는 2024년 기준 매출 330억 1,000만 달러, 순이익 65억 달러를 기록하며, 세계 최대의 산업용 가스 및 엔지니어링 기업이다.
- 린데는 아일랜드 법률에 따라 설립된 기업이며, 법적 본거지(legal domicile)는 아일랜드 더블린에 위치하고 있었다. 또한, 금융 본거지인 Linde Finance B.V.의 주요 사무소도 더블린에 두고 있었다.
- 그러나, 린데의 주된 집행 본거지(executive offices)는 영국 워킹에 위치하며, 주요 사업 및 운영은 글로벌 차원에서 이뤄진다. 이 경우, 본 구조는 2018년 Praxair와의 합병 이후의 재편 과정에서 드러나고 알려졌다.
- 이는 린데의 본거지인 아일랜드에 본거지로서 의미가 있어 있음을 의미하지는 않는다. 오히려 린데가 아일랜드에 본거지를 둔 것은 운영적 특수성보다는, 새로운 투자 및 확장 기회를 모색하는 글로벌 기업 포트폴리오의 한 축으로 접근하고 있음을 시사한다.
- 이와 같은 배경은 린데가 글로벌 수소 시장의 발전 단계에 따라 어떤 전략적 결정을 내릴지, 그리고 이를 지원하는 데 중요한 역할을 제공한다.

2) 수소 사업 현황

(1) 수소 사업 전반에 걸친 통합적 사업 포트폴리오

- 린데는 수소 산업의 생산, 처리, 저장, 유통, 그리고 최종 적용 분야를 모두 아우르는 독립적이며 통합적인 사업 모델을 구축했다. 이러한 통합적 접근은 고객에게 전체 가치 사슬에 걸친 맞춤형 솔루션을 제공하는 기반이 된다.

생산: 린데는 원료에 따라 다양한 방식의 수소 생산 기술을 보유하고 있다. 가장 일반적인 방식인 천연가스 개질(Steam Methane Reforming, SMR)을 통해 그레이 수소를 생산하며, 여기에 탄소 포집 및 저장(CCUS) 기술을 접목하여 블루 수소를 생산하고 있다. 또한, 재생에너지(태양광, 풍력)를 활용한 물 전기분해(electrolysis)를 통해 탄소 배출이 없는 그린 수소 생산도 가능하며, 알칼라인(Alkaline) 및 양성자 교환막(PEM) 기술을 모두 제공한다.

IV. 해외 주요 기업별 수소 사업 추진 동향과 대응 전략

- 전 세계적으로 150개 이상의 SMR 및 PSA(Pressure Swing Adsorption) 플랜트와 80개 이상의 전기분해 플랜트를 운영하며, 수소 생산 분야의 선두 기업으로 자리매김했다.
- **처리:** 생산된 수소는 불순물 제거 및 이산화탄소 분리 과정을 거쳐 순도를 높인다. 운송 및 저장을 위해 수소를 액화시키는 극저온 공정 기술 분야에서 세계적인 선두 기업이다. 린데가 건설한 액화 수소(LH2) 생산 플랜트는 가스 형태의 수소를 -253°C까지 냉각하여 액체로 변환함으로써, 수소의 밀도를 높여 효율적인 운송 및 저장을 가능하게 한다.
- **저장 및 유통:** 린데는 전 세계적으로 약 1,000km에 달하는 수소 파이프라인 네트워크와 가장 큰 규모의 수소 운송 트레일러 차량을 보유하고 있다. 운송 및 저장의 경우, 미국 텍사스에서 10년 이상 상업용 고순도 수소 지하 소금 동굴 저장소를 운영한 경험을 갖고 있다. 고객사의 수요에 따라 액화 수소용 극저온 탱크도 제공한다.
- **최종 적용:** 린데의 수소는 다양한 산업 및 운송 분야에 적용된다. 중장비(트럭, 기차 등)의 연료로 사용되어 탈탄소화되며, 화학 및 정유 산업에서는 필수 원료로 사용된다. 또한, 철강 및 유리 산업의 원료로 사용된다. 그러나, 재생에너지로 생산된 전력을 저장하여 전력망의 안정성 확보를 위한 에너지 저장 매체로서의 역할도 수행한다.

<표IV-1> 린데의 수소 가치 사슬별 핵심 역량

가치 사슬 단계	린데의 핵심 역량 및 기술	주요 내용
생산	그레이, 블루, 그린 수소 생산	바이오 기반 개질, 재생에너지 전기분해(PEM, SMR)를 통해 수소를 생산한다. 전 세계 150개 이상의 SMR 플랜트, 80개 이상의 전기분해 플랜트를 운영한다.
처리	수소 액화	중저온 공정에서 생성되는 이산화탄소와 수소를 분리하기 위해 극저온 공정을 적용하며, 액화 수소(LH ₂) 생산을 위한 액화 플랜트 건설에 세계적인 선두 기업이다.
저장 및 유통	파이프라인, 동굴 수소 저장	1,000km의 파이프라인 네트워크와 세계 최대 규모의 운송 트레일러 차량을 보유하고 있다. 미국 텍사스에서 세계 최초의 상업용 고순도 수소 지하 소금 동굴 저장소를 운영한다.
최종 적용	산업 및 운송 솔루션	화학, 정유, 철강, 유리 산업의 원료 및 연료로 수소를 공급하며, 버스, 트럭, 기차 등 중장비 운송을 위한 연료전지 기술 및 재생유 솔루션을 제공한다.

자료: 각종 보고서, 린데 자료를 종합

수소 사업의 전략적 초점 : 투자 기준 및 비즈니스 모델

- 린데는 청정에너지 프로젝트에 대한 투자를 결정할 때, 오프테이크 계약(off-take agreements)으로 보증된 프로젝트를 최우선으로 고려하는 엄격한 자본 규율을 유지한다. 이러한 전략은 대규모 인프라 투자에 수반되는 재정적 위험을 최소화하고 장기적으로 예측 가능한 수익을 확보하기 위한 핵심적인 접근 방식이다.

3. 전해조 분야

3-1. 넬 ASA(Nel ASA)

1) 일반 현황

- 넬 ASA는 1927년 설립 이래 약 한 세기 동안 수전해 기술을 전문으로 발전시켜 '수소 전문 기업'으로 불린다. 동사는 오슬로 증권거래소에 상장된 최초의 수소 전문 기업으로, 세계에서 가장 오래된 타이틀을 보유하고 있으며, 노르웨이 오슬로에 본사를 두고 있다.⁶³⁴⁾
- 넬은 과거 수소 생산에서부터 충전에 이르는 전반적인 수소 공급망을 제공하는 사업 구조를 갖추고 있었다.
 - 그러나 2024년 6월, 넬 ASA는 기존의 수전해 충전 기술(Fueling distribution)을 중단하고 수소 하이드로젠(Cavendish Hydrogen)으로 전환하여 오슬로 증권거래소에 상장하는 전략적 결정을 내렸다. 이로써 넬은 '수소 전용 수전해 기업(fully dedicated electrolyser company)'으로 전환하는 데 성공했다.
 - 이러한 사업 구조의 재편은 넬이 역량인 수전해 기술에 자원과 노하우를 집중하고, 동시에 인프라 구축에 소모되던 자본과 인력의 부담을 줄여 재무 건전성을 강화하는데 목적이 있다. 한편, 이러한 사업은 수익성이 낮아 동사 전체의 현금 소모율을 낮추는 데 기여했다. 이 재편 움직임은 넬의 장기적인 지속 가능성을 위한 중요한 결정으로 평가된다.⁶³⁵⁾

2) 핵심 사업 및 기술 포트폴리오

넬은 알칼리(Alkaline)와 Proton Exchange Membrane(PEM)이라는 두 가지 핵심 전해조 기술을 상업적으로 제공하는 몇 안 되는 기업 중 하나이다. 이러한 기술 포트폴리오는 넬이 다양한 고객의 요구사항과 프로젝트 특성에 최적화된 맞춤형 솔루션을 제공할 수 있도록 하는데 강점으로 작용한다.

(1) 알칼리(Alkaline) 전해조 기술

알칼리 전해조는 1927년 설립 이래 넬의 오랜 역사를 함께한 전통적인 기술이다. 이 기술은 높은 신뢰성, 견고한 설계, 긴 내구성으로 정평이 나 있으며, 단순한 재료와 낮은 운영 덕분에 생산 비용이 낮고 대규모 연속 생산에 유리하다는 장점이 있다. 넬은 이 기술의 세계적 선두 주자임을 자부하며, 고객의 용도와 구성에 따라 설비를 자유롭게 맞춤 제작할 수 있는 역량을 갖추고 있다.

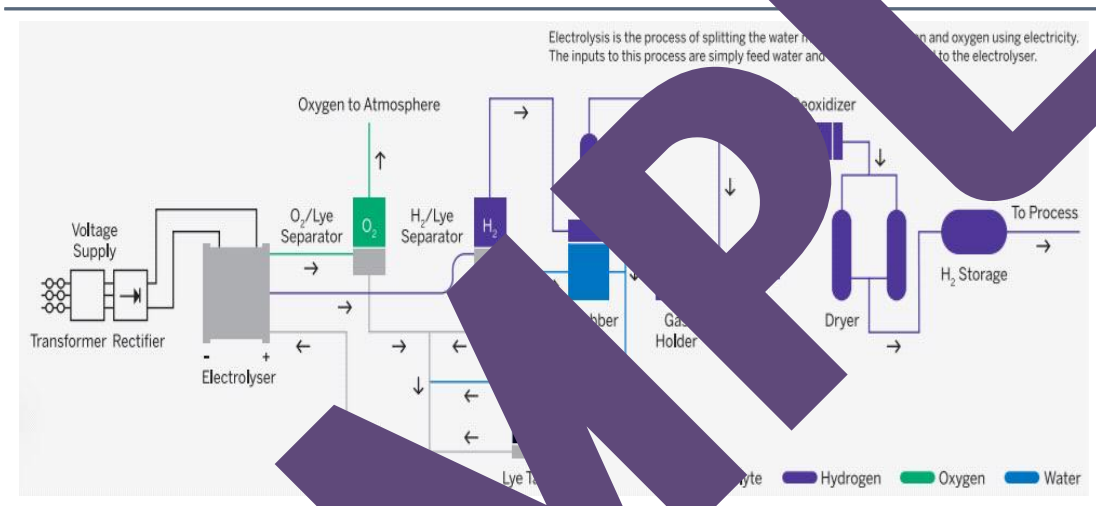
634) https://energy.ketep.re.kr/globalenergy/site/main/board/overseas_firm/21008

635) <https://nelhydrogen.com/press-release/nel-asa-a-fully-dedicated-electrolyser-company/>

IV. 해외 주요 기업별 수소 사업 추진 동향과 대응 전략

- 특히 최근 발표된 2024년 4분기 재무 보고서에 따르면, 알칼라인 사업부는 장비 납품 및 기술 라이선스 지급에 따른 견고한 총마진에 힘입어 긍정적인 EBITDA를 기록하며 동사의 수익성 개선을 견인했다.
- 넬의 주력 모델인 A485는 4.5kWh/Nm³의 낮은 전력 소비를 자랑하며, 암모니아, 정유, 철강 등 대규모 산업 공정의 탈탄소화에 가장 적합한 기술로 평가된다. A485 시리즈를 통해 최대 19,400Nm³/h의 수소 생산이 가능한 약 100MW 규모의 플랜트를 구축할 수 있는 역량을 보유하고 있다.

<그림IV-3> A485



자료 : <https://ureaknowhow.com/wp-content/uploads/2023/11/NEL-Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf>

(2) Proton Exchange Membrane (PEM) 전해조 기술

- 2017년 프로톤 온사이트(Proton OnSite) 인수를 통해 확보한 넬의 PEM 전해조 기술은 빠른 응답 속도와 광범위한 동적 운전 범위(0~100%)가 특징으로, 변동이 잦은 태양광, 풍력 등 재생에너지원과 연계한 수소 생산에 유리하다. 또한, 소형화 및 모듈화가 용이하여 분산형 생산에 유리하고, 생산된 수소의 순도가 높아 추가적인 정제 과정이 최소화된다는 장점을 갖는다.⁶³⁶⁾

넬은 MC 시리즈와 같은 컨테이너형 모델부터 C 시리즈, S 시리즈 등 다양한 소규모 산업 및 운송 분야에 특화된 PEM 전해조를 제공한다.

그러나 2024년 4분기 재무 보고서에 따르면, PEM 사업부의 고객 계약 매출은 1억 5,300만 NOK로 전년 동기 대비 12% 감소했으며, EBITDA는 2,200만 NOK의 손실을 기록하는 등 여전히 수익성 확보에 어려움을 겪고 있다. 이는 PEM 기술의 높은 생산 비용과 시장 수요 변동에 따른 결과로 분석된다.

636) <https://ureaknowhow.com/wp-content/uploads/2023/11/NEL-Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf>