

GT 워싱턴DC 거점



GT Insight

GLOBAL TECH KOREA

2023-GT-DC-021

에너지 산업대전환 시대에서의
수소 에너지 개발 및 적용 현황

CONTENTS

I. 에너지 대전환 시대에서의 수소경제

II. 수소생산 분야

1. 수전해 시스템
2. 해수 전기분해를 통한 수소생산
3. 수전해를 통한 친환경 재생 에너지 저장 시스템
4. 수소충전소 배치현황
5. 수소 터빈
6. 수소차
7. 해양 및 항공 분야 적용
8. 수소생산에 사용되는 재료

III. 맺음말

주요 내용 요약

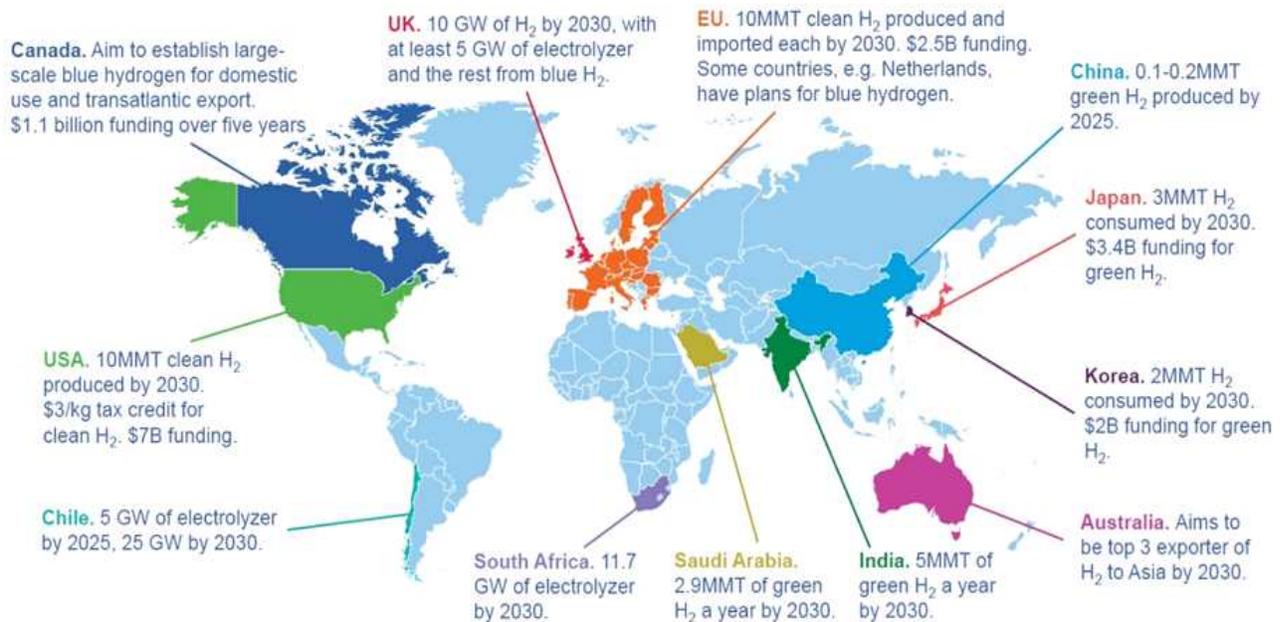
- 수소는 현재의 글로벌 에너지 전환 체제에서 수전해, 연료전지, 수소 선박, 수소차, 및 수소 터빈 기술개발 및 적용에 있어 추진력을 얻고 있음
- 본 보고서에서는 에너지 산업대전환 시대에 있어 현재의 수소 에너지 개발 및 산업 적용 현황에 대해서 알아보하고자 함



에너지 대전환 시대에서의 수소경제

- 세계는 탄소 경제에서 수소경제로 전환하는 에너지 대전환 시대를 맞고 있음
- 탄소 중립과 에너지 자립에 수소가 핵심적인 역할을 할 것으로 예상하며, 이에 따라 정책적 지원을 추진하고 있고, 글로벌 에너지 기업들 역시 수소 산업으로 사업영역을 확대하고 있음
- 2022년 기준 수소 로드맵을 발표한 국가는 전 세계 30개국으로 앞으로도 수소경제 도입정책을 발표하는 국가는 증가할 것으로 예상된다 [그림 1]

[그림 1] 글로벌 수소 정책¹⁾

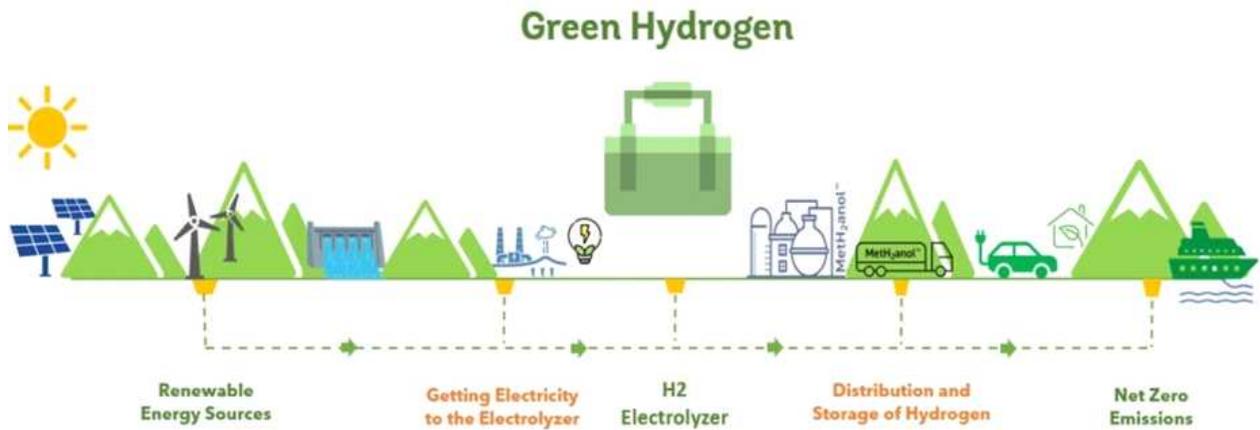


- 우리나라의 경우 최근 산업통상자원부는 산업시스템의 근본적 개선을 위한 산업대전환의 필요성과 전략을 발표하며, 산업의 구조적인 문제를 개선하여 10년 후 닥쳐올 위기를 극복하고자 산업대전환을 본격적으로 추진 중에 있음

1) Holland A. (2023). Green hydrogen production: Electrolyzer Markers 2023 - 2033 (www.IDTechEx.com/electrolyzer)

- 각 지자체에서도 신재생에너지 분야에서 미래 청정에너지 시대를 선도하기 위해 수소 산업 생태계 구축 방안도 활발히 모색 중임
 - 예를 들면, 포항시의 경우 작년 10월 연료전지 전문기업인 에프씨아이(FCI: Fuel Cell Innovation)와 투자 양해각서를 체결하고, 2027년까지 연료전지 및 수소생산 설비 제조시설 건립을 추진할 예정임
 - 전남도의 경우 그린 수소 에너지 섬 조성과 광양시 수소 도시 조성 등 수소 산업 육성 인프라 구축 사업을 진행하고 있음
 - 경북 울진군은 국내에서 가장 많은 원전 (7기)를 보유하고 있는 지자체로, 원전에서 남아도는 비 송전 전력 (약 0.94 GW)을 이용하여 수소를 생산하는 원자력 수소 산업단지 구축을 계획 중에 있음
 - 액화천연가스 (LNG) 인수기지가 입지해 있는 평택시는 천연가스를 원료로 수소를 생산하는 수소 에너지와 수소 도시 조성을 위한 단계별 로드맵을 세워나가고 있음
 - 제주의 경우 풍력 및 태양광 등 풍부한 재생 에너지를 이용한 에너지 전환 로드맵을 만들고 있으며, 그린 수소 에너지 자립 경제를 만들어 1차 산업인 농축수산업에 하우스와 양식장, 농기계, 선박 등에 수소 및 수소 연료전지를 사용할 예정임
- 그린 수소는 전력 시스템에 필요한 유연성을 제공하고 급전 불가능한 재생 가능 발전에 대한 완충 역할을 할 수 있으므로 미래의 재생 가능 에너지 기반 전력망을 위한 선순환을 만들 수 있는 잠재력을 가지고 있음[그림 2]
- 실제로 기존 및 재생 가능 발전소에서 제공되는 초과 에너지는 수소로 저장한 다음 전기 (연료전지 또는 전력 시스템) 및 열 (연소)을 생산하거나 열병합 발전을 하는 데 사용되어 온실가스 생산을 크게 줄일 수 있음

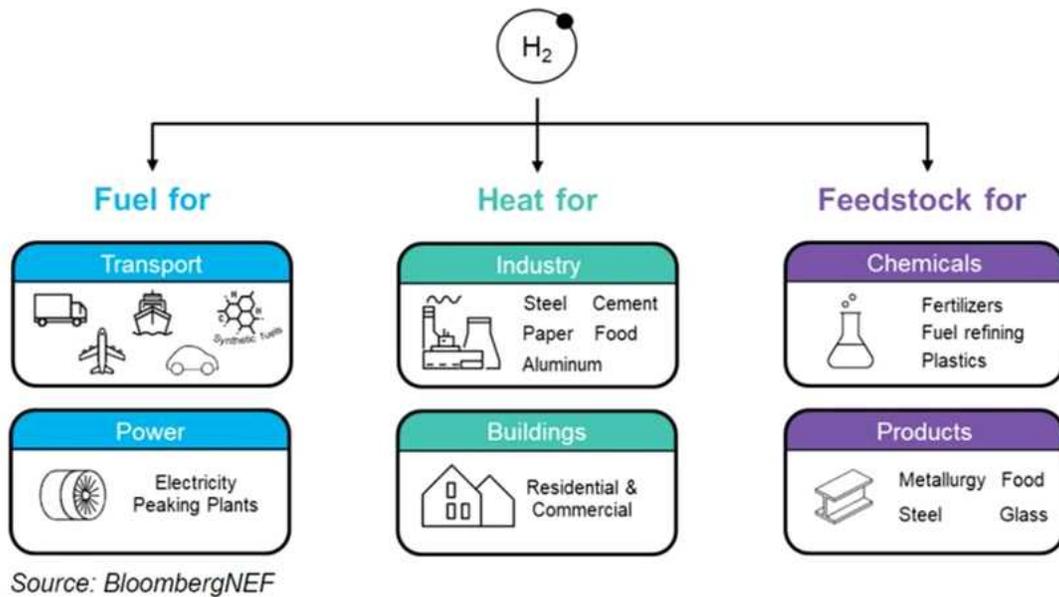
[그림 2] 에너지 전환을 위한 핵심기술: 그린 수소²⁾



- 수소 수요는 2020년에 약 8,700만 톤(MT)에 도달했으며 2050년까지 5억~6억 8,000만 톤으로 성장할 것으로 예상되고, 2020년부터 2021년까지 수소생산 시장은 1,300억 달러로 평가되었으며 수소생산 또한 2030년까지 매년 최대 9.2%까지 증가할 것으로 예상됨
- 그러나, 현재 수소생산의 95% 이상이 화석연료 기반이며, 전 세계 천연가스의 6%와 전 세계 석탄의 2%가 수소생산에 사용되고 있음
- 그럼에도 불구하고 친환경 수소 생산 기술에 관한 관심이 다시 높아지고 있는데, 이는 발전, 제강, 시멘트 생산 등 산업의 제조공정, 전기자동차용 연료전지, 해운과 같은 중량물 운송, 비료용 녹색 암모니아 생산, 세정제, 냉장 등 다방면으로 수소의 활용 가능성이 확대되고 있기 때문임[그림 3]

2) M.K.Kane and S.Gil. Green Hydrogen: A key investment for the energy transition, World Bank Blogs (<https://blogs.worldbank.org/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition>) (June 23, 2022)

[그림 3] 친환경 수소의 활용³⁾



- 청정 수소는 중공업 및 대형 운송과 같이 저감하기 어려운 부문을 탈탄소화하는데 도움이 되는 중요한 도구가 될 가능성이 있음
- 수소 위원회(Hydrogen Council)는 수소에 대한 수요가 2050년까지 7배 증가할 것으로 예상하고 있으며, 2050년에는 재생 가능한 전기 및 전해조를 통해 생산량의 2/3가 생산되고 나머지는 탄소 포집 및 격리(CCS)를 동반한 메탄 개질(SMR)이 될 것으로 예상하고 있음
- 마찬가지로, 세계에너지기구(IEA)는 2020년에서 2030년 사이에 135% 이상의 수소생산 증가를 예상하고 있음
- 국제재생에너지기구(IRENA)는 1.5 °C 시나리오에서 청정 수소가 2050년까지 최종 에너지 소비의 12%를 차지할 수 있다고 예상하는 반면, 블룸버그 뉴 에너지 파이낸스(BNEF)는 최대 24%까지 더 높은 역할을 추정했음

3) M.K.Kane and S.Gil. Green Hydrogen: A key investment for the energy transition, World Bank Blogs (<https://blogs.worldbank.org/ppps/green-hydrogen-key-investment-energy-transition>) (June 23, 2022)

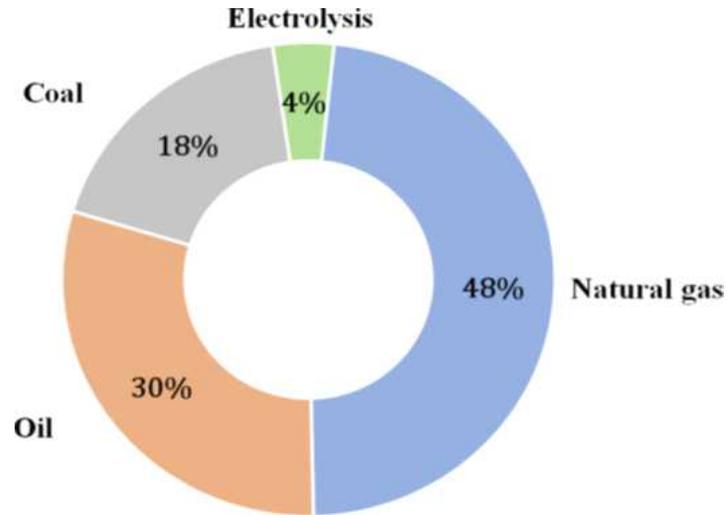
- 이 규모의 확장에는 수소를 생산, 운송, 저장, 유통 및 소비하기 위한 장비의 주요 배치가 필요하게 됨
- 타당성 및 잠재적 영향 평가를 위한 주요 질문들은 다음과 같음
 - 1) 일반적인 수소 배치 또는 특정 생산 또는 소비 기술에 대한 중요한 재료의 가용성에 공급 제약이 있는지
 - 2) 핵심 재료에 대한 더 넓은 수요 맥락은 무엇인지
 - 3) 수소가 저탄소 전환의 다른 부분에서 대규모 수요 증가와 경쟁할 수 있는 재료가 있는지
 - 4) 온실가스 배출(GHG) 및 물 발자국(water footprint)과 같은 광범위한 환경 영향이 수소의 광범위한 배치에 필요한 재료의 채굴 및 처리로 인해 발생할 수 있는지
- 저탄소 수소 연료 비용은 점점 낮아지는 경향이 있지만 적어도 2030년까지는 천연가스보다 2 - 10배 더 비쌀 것으로 예상됨
- 탄소세 또는 기타 인센티브는 화석연료에 비해 수소의 경제성을 향상시킬 수 있지만, 수소가 전력 부문에서 광범위하게 채택되기 전에 장거리 운송, 해상 운송 및 산업에서 사용될 것으로 예상됨

II

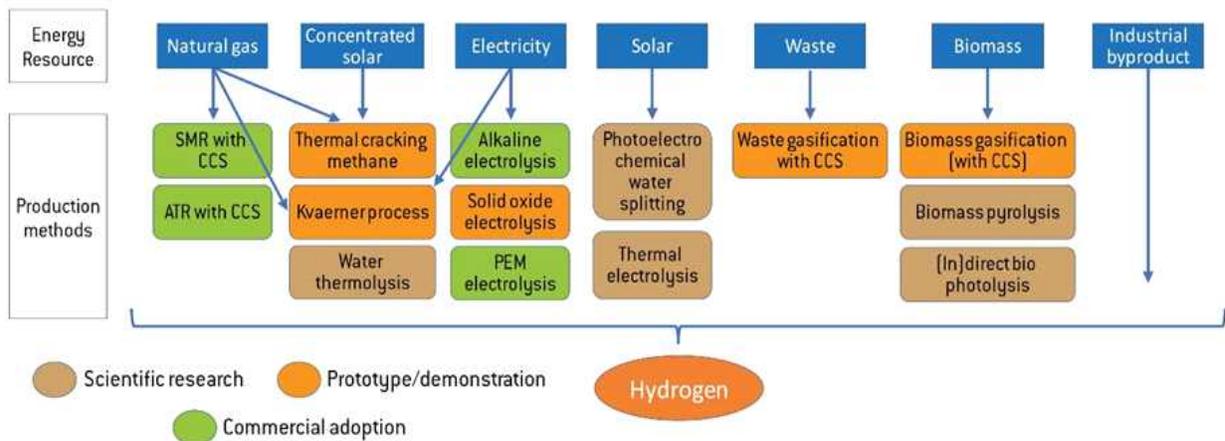
수소생산 분야

- 수소는 1차 에너지원이 아니지만 다양한 방식으로 생산될 수 있으며 각각 다른 색상으로 식별할 수 있음
- 일반적으로 재생 가능한 에너지를 이용한 전기분해를 통해 생산되는 수소를 녹색 (Green) 수소라고 하고, 수증기로 석탄 가스화에서 나오는 경우를 갈색(Brown) 수소라고 하며, 일반 화석연료(예: 천연가스)에서 생산되는 경우 회색(Gray) 수소라고 하고, 반면에 CO2를 포집하고 저장하는 과정(CCS - Carbon Capture and Storage)을 통해 메탄에서 수소가 생성되는 경우 이를 청색 (Blue) 수소라고 함
- 수소는 이미 산업계에서 사용되고 있으며 현재 연간 약 120Mt의 회색 수소가 생산되고 소비되며, 주로 정제 산업과 암모니아 생산을 위해 사용되고 있음
- 또한 전용 수소 파이프라인이 수십 년 동안 운영되어왔으며, 수소생산은 이미 대규모이지만 아직 친환경적이지는 않음
- 현재 모든 수소의 96%는 화석연료(천연가스 48%, 석유 30%, 석탄 18%)에서 생산되고, 나머지 4%만 전기분해에서 생산되고 있음[그림 4]
- 이는 수소생산과 관련하여 여전히 상당한 CO2 배출량이 있음을 의미함
- 이러한 이유로 녹색 수소는 미래 변환 에너지 시나리오에서 점점 더 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, [그림 5]는 현재 저탄소 수소 생산방법의 개략적인 모식도임

[그림 4] 다양한 수소생산 분야⁴⁾



[그림 5] 저탄소 수소 생산방법⁵⁾



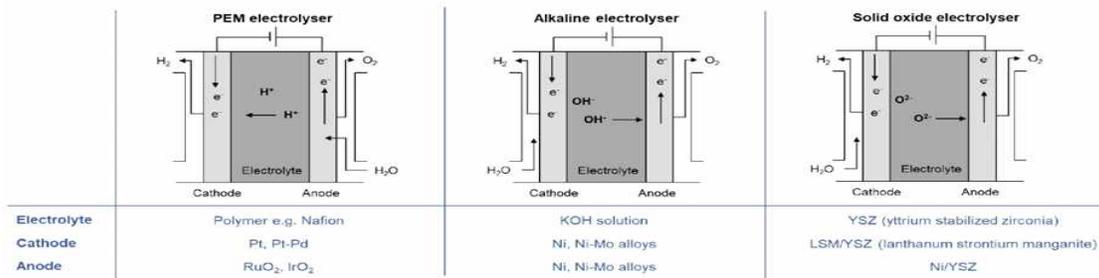
- 수소 수요는 정제 및 암모니아 생산을 포함한 기존 시장뿐만 아니라 메탄올, 녹색 철강 및 운송 응용 분야와 같은 새로운 시장에서 전 세계적으로 증가할 것으로 예상됨
- 이러한 수소생산 및 사용의 증가는 에너지 안보를 개선하려는 열망과 탈탄소화 노력에 의해 주도되고 있음
 - 그러나 탈탄소화 역할을 하기 위해서는 생성된 수소 자체가 저탄소여야 함

4) Capurso et al. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition, Energy Conversion and Management, 251, 114898

5) McWilliams and Zachmann (2021). Navigating through hydrogen. Policy Contribution. 08/2021, Bruegel.

- 청정 및 녹색 수소 산업 개발에 관한 관심이 다시 높아짐에 따라 IDTechEx는 수전해질 시장이 2033년까지 1,200억 달러 이상으로 성장할 것으로 예측했음
- 유럽 연합, RePowerEU 전략 및 미국의 인플레이션 감소법 계획은 향후 10년 동안 청정 수소생산 및 소비를 크게 늘릴 계획임
- 일본과 한국을 포함한 국가들의 야심찬 수소 전략도 이에 추가되며, 향후 녹색 및 청색 수소 생산 시스템, 저장 및 유통을 위한 인프라 개발, 수소 사용 장려에 상당한 공적 자금이 투입될 것으로 예상됨
- 현재까지 알칼리성 물 전해조(AWE), 양성자 교환 막 전해조(PEMEL) 및 고체 산화물 전해조(SOEL) 이렇게 세 가지 일반적인 유형의 전해조가 개발되었음[그림 6]
- 알칼리 전해조는 Auyun, LONGi Hydrogen, John Cockerill, Thyssenkrupp 등 중국과 유럽의 대형 제조업체에서 가장 널리 상용화된 전해조임
- 수전해를 통한 수소생산의 원리는 (물과 전기를 사용하여 물을 수소와 산소로 분리) 동일하나, 세 가지 시스템은 두 전극 사이에서 교환되는 서로 다른 이온 (AWE, PEMEL 및 SOEL에 대해 각각 OH⁻, H⁺ 및 O²⁻), 사용된 전해질 및 전극 재료, 스택 설계 및 시스템 설계를 특징으로 함
- AWE 시스템은 1920년대에 처음 설치되어 수소생산 산업에 가장 많이 채택되었음
- PEMEL 시스템은 2000년대 설치되었고, 최근 들어 SOEL이 시장에 진입하기 시작했음

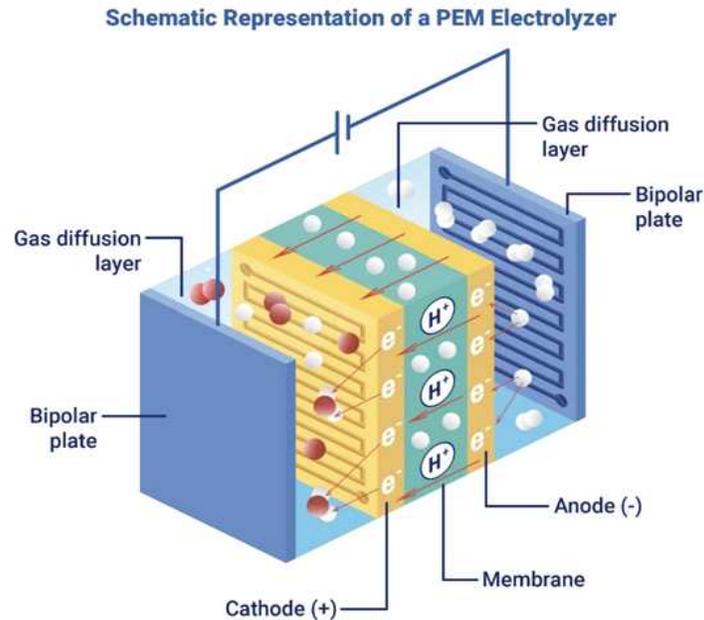
[그림 6] 전해조 시스템 개요도⁶⁾



- 양성자 교환막 (PEM) 전해조는 비싸고, 아직 상용화 초기 단계에 있지만 자본 비용이 감소함에 따라, 알카라인 시스템에 비해 더 높은 출력 밀도와 더 큰 동적 범위와 같은 유리한 성능 특성으로 인해 시장점유율을 확보할 것으로 예상됨
- PEM 스택 및 시스템 제조업체는 중국, 미국 및 유럽 전역에 퍼져 있음
- 고체 산화물 전해조(SOEL)는 고온에서 작동하여 더 높은 총효율을 제공하지만, 현재 더 비싸고 수명이 더 짧으며 상용화 초기 단계에 있음
- 덴마크 회사인 Topsoe는 2024년에 500MW SOEL 제조시설을 가동하는 것을 목표로 알카라인 제품과 함께 SOEL을 구현하려고 함
- 미국의 Bloom Energy는 고체 산화물 연료전지 기능을 활용하여 전해조 시장에 진입을 가속화하는 것을 목표로 하고 있으나, 아직까지 SOEL 개발에 적극적으로 참여하는 회사의 수는 알카라인 또는 PEMEL 시스템에 비해 훨씬 적음
- 양성자 교환막 또는 고분자 전해질막 전해기(PEMEL)는 양성자 교환막 물 전해기 (PEMWE) 라고도 하며 수소 및 산소 생산에 사용되는 전기화학 장치로 물을 공급원료로 사용하고 전기를 에너지원으로 사용하여 물 분자를 분리함[그림 7]
- PEM Fuel Cell과 구조적으로 유사한 PEMWE는 촉매, 재료, 운전조건 등에서 기술적으로 차이가 있음

6) Holland A. (2023). Green hydrogen production: Electrolyzer Markers 2023 - 2033 (www.IDTechEx.com/electrolyzer)

[그림 7] 전해조 시스템 개요도⁷⁾



- 고체 산화물 전해조(SOEL)에 사용되는 전극은 다음과 같음
 - 양극 (산소 전극): 가장 일반적인 재료는 Sr 도핑된 LaMnO₃ (LSM) 페로브스카이트 산화물인데, 이는 고온에서 우수한 촉매 활성, 높은 전기 전도성 및 이트리아 안정화 지르코니아 (YSZ: Ytria-stabilized zirconia) 전해질과의 우수한 열 및 화학적 호환성 때문임
 - 산화물 및 나노 입자 (NP) 전극 특성을 향상시키기 위해 기본 LSM 재료에 포함됨
 - 고성능 애플리케이션의 경우 LSCF (lanthanum-strontium-ferritecobaltite) 또는 LSC (lanthanum-strontiumcobaltite)와 같은 혼합 전도체를 기반으로 하는 전극이 있음
 - YSZ 산화물은 가돌리늄이 도핑된 세리아(GDC: gadolinium-doped ceria)의 NP 및 LSM으로의 Pd와 함께 복합 전극 YSZ-LSM을 형성하여 삼상 경계 (TPB) 및 전극 활성을 개선하기 위해 사용됨
 - 더욱이, 0.1-5- μm 의 가돌리니아 첨가 세리아(CGO: gadolinia-doped ceria)의 얇은 층은 일반적으로 산소 전극 물질과 YSZ 사이의 반응을 방지하는 데 사용됨

7) Holland A. (2023). Green hydrogen production: Electrolyzer Markers 2023 - 2033 (www.IDTechEx.com/electrolyzer)

- 음극(수소 전극): Ni계 서멧(cermet:세라믹-금속 복합재료)은 높은 전기 및 촉매 활성과 저렴한 비용으로 인해 가장 일반적으로 사용되는 양극 재료임
 - 또한 Ni-YSZ는 양극 측에서 삼상경계(TPB)를 확대함
 - 수소 전극의 촉매 및 전기 전도성의 향상은 Ni-YSZ에 세리아 나노 입자를 첨가하고 Ni 침투 세리아 전극을 통해 얻을 수 있음
- 유럽 기업들은 전해조 제조 용량과 기능을 확장하고 성장시키려는 계획에 특히 적극적이지만 중국과 미국 회사에서도 전해조 제조에 대한 상당한 투자가 예상되고 인도와 호주 업체도 시장에 진입하려고 하고 있음
- 전해조 시장은 현재 알카라인 및 PEM 전해조 제조업체가 지배하고 있으며 고체 산화물 전해조를 제조하거나 상업화하는 회사는 비교적 적음
- 그러나 고체 산화물 전해조와 고체 산화물 연료전지 간의 유사성은 연료전지 제조업체가 녹색 수소 시장에 진입할 수 있는 여건을 제공할 수 있음
- 확실히, 친환경적이고 깨끗한 수소생산을 위한 국가 및 지역 목표를 달성하려면 세 가지 유형의 전해조 시장의 성장이 필요할 것임

2

해수 전기분해를 통한 수소생산

 최근 호주 애들레이드 대학(University of Adelaide)의 연구원들은 전처리 없이 바닷물에서 깨끗한 수소 연료를 만들었다고 2023년 1월 네이처 에너지에 연구 결과를 발표했음⁸⁾

 세계가 탄소 경제에서 수소경제로 전환하는 격변기 시대에 청정 에너지원인

8) J. Guo et al. (2023). Direct seawater electrolysis by adjusting the local reaction environment of a catalyst, Nature Energy (<https://doi.org/10.1038/s41560-023-01195-x>)

수소 연료에 대한 수요는 세계의 에너지 탈탄소화에 따라 향후 몇 년 동안 증가할 것으로 예상됨

- 연구에 따르면 저렴하고 쉽게 구할 수 있는 촉매를 사용하여 천연 해수를 거의 100% 효율로 산소와 수소로 분리하여 상용 전해조에서 전기분해를 통해 녹색 수소를 생산하였고, 이러한 기술을 해안 지역에 더 저렴한 녹색 에너지 생산을 가능하게 할 것으로 전망됨[그림 8]
- 연구팀은 촉매로 표면에 산화크롬이 있는 코발트 산화물을 사용한 결과가 백금 및 이리듐 촉매를 고순도 및 탈이온수에 적용하는 표준 공정과 유사한 성능을 보였다고 밝혔음
- 해수는 일반적으로 전기분해로 수소와 산소로 분리되기 전에 정화되어야 하며, 담수에 비해 해수는 풍부한 자원이며 전처리 없이 해수에서 수소 연료를 추출할 수 있어 비용을 절감할 수 있음
- 성공적으로 확장된다면, 해수가 풍부한 해안 지역 사회에서 실용적일 가능성이 높을 것으로 전망됨
- 연구팀의 다음 단계는 더 큰 전해조로 시스템을 확장하는 것이며, 아직 개발 초기 단계인 연료전지 및 암모니아 합성을 위한 상업적 수소생산에 연구 결과를 적용하는 것임
- 이러한 연구는 전처리 시스템과 알칼리 첨가 없이 해수를 직접 활용할 수 있는 솔루션을 제공하며, 이는 기존 금속 기반 순수 전해조와 유사한 성능을 보여줌으로 차세대 해수를 이용한 수소생산에 박차를 가하고 있음

[그림 8] 저렴하고 재생 가능한 수소 에너지 생산을 위한 해수⁹⁾



3

수전해를 통한 친환경 재생 에너지 저장 시스템

- 새로운 친환경 저장 시스템은 사용자가 필요로 할 때 언제든지 재생 에너지를 제공할 수 있음
- 이 기술은 지역 사회가 보다 탄력적이 되도록 돕고 유틸리티 회사들이 태양광 및 풍력과 같은 재생 가능한 자원에서 나오는 잉여 에너지를 저장함으로써 소비자 전력 수요의 균형을 맞추도록 도울 수 있음
- 영화 "백투더퓨처"를 보면 "플렉스 커패시터"라는 시간 여행을 허용하는 가상의 장치가 나오는데 그 장치는 아직 존재하지 않지만 최근 센트럴 플로리다 대학(UCF)의 연구팀에 따르면 NASA에서 개발한 극저온 플렉스 커패시터 (CFC: Cryogenic Flux Capacitor)를 사용하면 태양열 및 풍력과 같은 재생 가능 에너지를 저장하고 필요할 때 사용할 수 있는 방법으로 사용될 수 있음을 발견했음[그림 9]

9) Researchers can now pull hydrogen directly from seawater, no filtering required (<https://www.engadget.com/clean-hydrogen-fuel-split-seawater-214042411.html>)

- 즉 잉여 재생 가능 에너지를 비용 효율적으로 수소와 산소로 변환하고 이를 장기간 저장할 수 있는 방법으로, 나중에 에너지가 필요할 때 다시 변환되어 전기 그리드에 추가되는 형식임
- 이러한 온디맨드 (On-demand) 기능을 통해 전력 회사는 계절에 따라 커뮤니티의 에너지 요구 사항을 충족하고 균형을 맞출 수 있게 될 것
- 리튬 배터리 시스템의 경우 단기간 (몇 시간에서 하루까지) 에너지 저장과 사용에는 문제가 없지만, 예를 들어 허리케인이 와서 일주일 동안 정전이 되는 경우 또는 서부지역 겨울철과 같이 재생 가능한 자원이 많지 않은 경우 이러한 친환경 재생 에너지 저장 시스템이 해결책이 될 수 있음

[그림 9] 재생 에너지를 수소와 산소로 장기간 저장할 수 있는 극저온 플렉스 커패시터의 프로토타입¹⁰⁾



- UCF 연구팀의 기술은 "수소/산소 직접 점화 초임계 이산화탄소 전력 시스템"으로 불리는데, 처음 재생 에너지에서 나오는 여분의 전기를 사용하여 물을 전기분해하고 수소와 산소를 만든 다음 별도로 저장하게 됨
- 그 다음 전기가 필요할 때 연소실에서 저장된 수소와 산소를 결합하여 물을 형성하게 되고, 물은 초임계 이산화탄소(sCO₂)와 함께 혼합 가열됨

10) New Green Storage System Offers Renewable Energy On-demand
 (https://www.ucf.edu/news/new-green-storage-system-offers-renewable-energy-on-demand/?utm_source=gmucl&utm_medium=email&utm_campaign=news_announcement_email&utm_content=2023-02-06)

- 폐쇄 루프 전력 시스템의 일부인 sCO₂는 전기를 생성하는 터빈 시스템을 실행하는 데 사용되는 무독성, 불연성, 저비용 작동 유체임
- 이 기술은 질소나 공기가 없는 폐쇄 시스템이며 연소에서 물을 재활용하여 다음 주기를 위해 저장소에 저장함
- NASA의 CFC를 저장 메커니즘으로 사용하는 이 시스템은 도관과 압력 밸브를 사용하여 수소와 산소를 별도로 필요할 때까지 보관할 수 있음
- 또한 CFC에는 저장을 위해 수소와 산소를 흡착하는 보유 물질이 포함되어 있는데, 액화할 필요 없이 적당한 압력과 온도를 적용하면서 가스를 액체와 같은 밀도로 유지할 수 있음
- 따라서 액체 수소와 비교할 때 에너지 요구 사항은 시간이 지남에 따라 무게가 줄어들어 장기 저장에 더 효과적임
- 다른 시스템에 비해 이 기술의 이점 중 하나는 수소-산소 연소 과정에 공기가 포함되지 않기 때문에 유해한 질소산화물(NO_x)을 배출하지 않는다는 것임
 - 질소산화물은 산성비, 스모그, 및 오존층을 손상시키는 온실가스를 유발하는 것으로 알려져 있음
- 두 번째 환경적 장점은 시스템을 수원이 거의 또는 전혀 없는 지역에 설치하고 운영할 수 있다는 것임
- 또한, 컴팩트한 시스템으로 시스템을 구축하는 데 많은 공간이 필요하지 않음
 - 이러한 기술은 전통적인 전력망 외에도 다른 응용 분야에 사용될 수 있는데, 첫 번째로 데이터 센터, 병원 또는 연중무휴로 사용할 수 있어야 하는 일부 시설의 백업 시스템으로 사용할 수 있음
 - 또는 탄소 발자국을 줄이기 위한 디젤 발전기 대체 기술로 사용될 수 있음
- 현재 발전 시장이 급격하게 변화하고 있으며 유틸리티 회사가 공급하는 대형 중앙

전력망 방식은 향후 20년 안에는 존재하지 않을 수도 있음

- 예를 들어, 과거에는 수십만 가구에 전력을 공급하는 하나의 시스템을 사용했다면, 미래는 지역 사회를 위해 각각 수천 가구에 전력을 공급하는 소규모 분산 시스템이 운영될 수 있음
- 소규모 에너지 분산 시스템을 사용하게 되면 사회 전체 구조가 더 탄력적이게 되며, 즉 다른 모든 사람이 자신의 에너지 저장 시스템으로 생활할 수 있기 때문에 문제 발생 시 오직 소수의 사람만 영향을 받게 되고, 이러한 형식은 또한 더 많은 제어 기능을 제공할 수 있음
- 이러한 수전해를 이용한 에너지 저장 시스템은 항공과 같은 다른 산업의 에너지 저장이 필요한 경우에도 재생 에너지를 수소로 저장한 다음 에너지로 사용할 수 있음

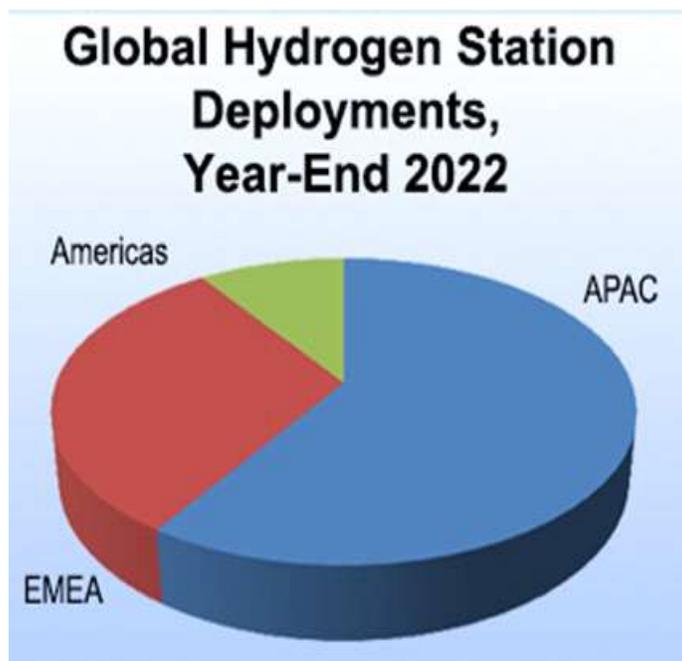
4

수소충전소 배치현황

- 📊 2022년 말 전세계적으로 배치된 수소충전소의 수가 1,000개를 넘어섰음
- 📊 중국은 전 세계 배치의 약 1/3을 차지하지만, 미국은 100개 미만의 수소충전소로 훨씬 뒤쳐진 상황임[그림 10]
- 📊 2023년 수소 연료 보급소 글로벌시장 연구에 따르면, 현재 수소충전소 배치를 위한 전 세계적 움직임이 있고, 중국이 선두를 달리고 있다고 함
- 📊 미국은 미래의 연료를 채택하는 데 아직 고려 중이지만 나머지 세계는 향후 에너지 수요를 위해 수소를 빠르게 수용하고 있음
- 📊 중국 다음으로 수소충전소를 가장 많이 배치한 국가는 일본과 한국임
- 📊 수소 스테이션 배치에 대한 공격적인 계획을 가진 다른 아시아 태평양 국가에는 호주, 뉴질랜드 및 인도가 포함되며, 또 다른 아시아 태평양 국가 4개국도 수소충전소를 배치했음

- 👤 지금까지 독일은 100개 이상의 수소충전소를 배치한 유일한 유럽 국가임
 - 👤 수소충전소를 적극적으로 배치하는 다른 유럽 국가로는 프랑스, 영국, 슬로베니아, 네덜란드, 스위스, 스페인이 있음
 - 👤 유럽은 수소 연료전지 생태계를 빠르게 성장시키고 있지만, 중동과 아프리카에서도 수소충전소 배치가 제한적으로 총 30개국에 수소충전소를 배치했음
 - 👤 지금까지 배치된 대부분의 수소충전소는 수소 연료전지 승용차용으로 설계되었지만, 상업용 차량, 기관차 및 선박용 수소충전소 배치가 가속화되고 있는 상황임
 - 👤 대부분의 리튬 배터리 공급망을 통제하는 국가는 조용히 수소에 대해 가장 빠르게 움직이고있는 추세임
- 즉 리튬 자원 압박으로 인해 가격이 천정부지로 치솟고 이러한 속도가 빨라지는 즉시 전기 혁명이 무릎을 꿇을 위험이 있는 상황에서 수소 대안을 조기에 추진하는 것이 현명해 보일 수도 있음

[그림 10] 글로벌 수소충전소 설치 현황¹¹⁾



11) Hydrogen Station Deployments Surpass 1,000 With China Leading the Way, Information Trends (<https://informationtrends.com/global-market-for-hydrogen-fueling-stations-2023/press-release.php>)

- 수소-가스터빈은 많은 환경 및 경제적 이점을 가지고 있으며 현재 가와사키, 독일 지멘스, 미국 제너럴일렉트릭, 일본 미쓰비시중공업 등이 치열한 경쟁을 벌이고 있음
- 수소-가스터빈은 기존 발전시설에 장착할 수 있으며 액체 수소에서 암모니아에 이르기까지 어떤 형태로든 운반할 수 있는 수소로 작동할 수 있는 장점이 있음
- 유럽이 무탄소 미래로 전환함에 따라 최근 Kawasaki 중공업은 유럽에서의 수소 추진 터빈에 대한 수요를 촉진하고자 도매 업그레이드보다 저렴한 기존 가스 구동 시설에 대한 수정을 제안함
- Kawasaki는 현재 소형 천연가스 터빈에 대한 독일 시장 점유율 약 50%를 포함하여 유럽에 확고한 고객 기반을 보유하고 있고, 다중형 터빈의 출력 용량은 30,000kW로 약 60,000가구의 전기 수요를 충족할 수 있음[그림 11]
- 유럽의 발전용 수소 수요는 2030년 약 10만 톤에 달할 것으로 예상되며, 터빈 출력으로 환산하면 50만 킬로와트에 해당하며 Kawasaki는 유럽 시장의 20% 시장 점유율을 목표로 하고 있음
- 먼저 기존 고객에게 터빈 수정 서비스를 제안하여 해당 접근 방식의 비용 효율성을 강조할 전략임

[그림 11] 일본 고베에 있는 가와사키 공장의 수소가스 터빈¹²⁾



- 대형 터빈을 포함한 천연가스 터빈 시장은 지난 10년 동안 축소되고 있음
- 재생 에너지의 보조 동력원으로 수소 터빈의 사용이 확대되고 있으며, 러시아의 우크라이나 침공으로 러시아 화석연료에서 벗어나는 계기가 됨에 따라, Kawasaki는 수소 터빈으로의 전환이 유럽에서 견인력을 얻을 것으로 예상하고 있음
- 일본 경제 산업성에 따르면 수소 터빈의 세계 시장은 2050년에 약 23조 엔(1,783억 3,000만 달러)까지 성장할 것으로 예상하고 있음

6

수소차

- 🔧 현재 토요타, 현대, 혼다, BMW 같은 대형 자동차 회사들은 수소 동력 자동차 기술에 막대한 투자를 하고 있음
- 🔧 전 세계가 탈탄소화를 목적으로 함에 따라 수소가 "녹색"으로 분류되려면 재생 가능 에너지로 전기를 생성해야 함
- 🔧 전기 자동차와 수소 자동차를 비교한다면, 에너지원은 태양광 및 풍력과

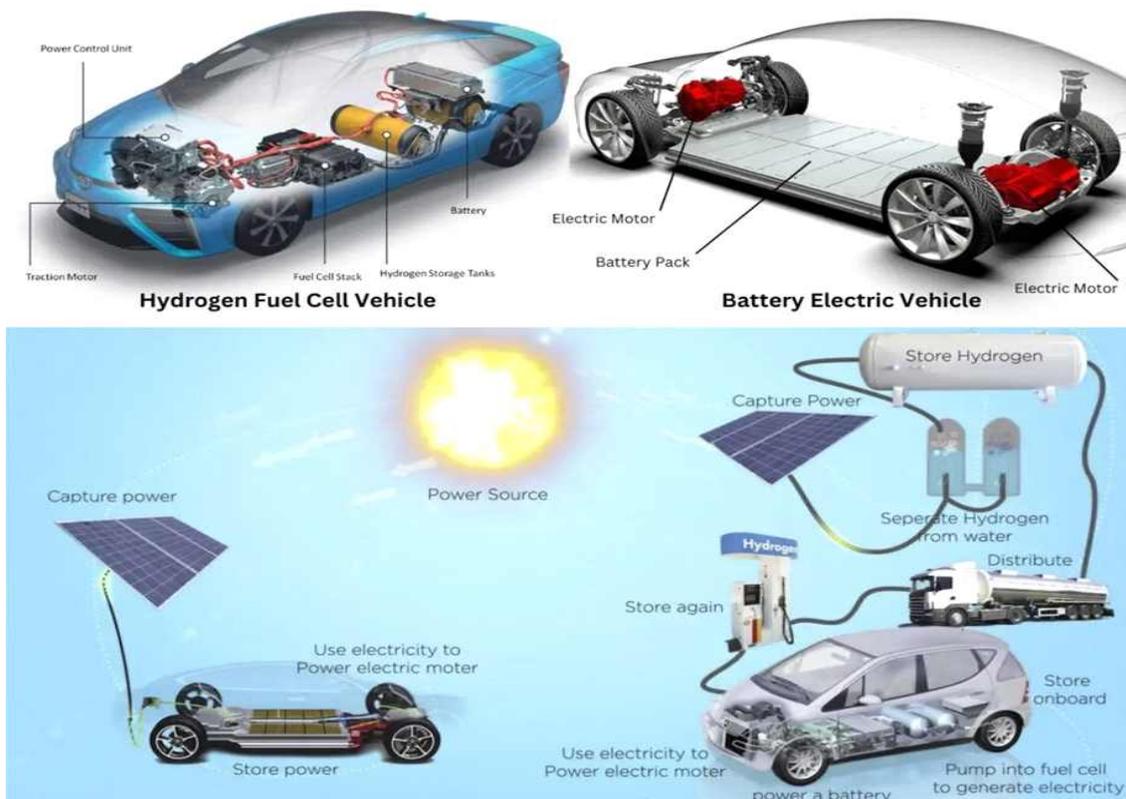
12) Arata Shigeno, Kawasaki Heavy seeks to propel hydrogen turbine demand in Europe (<https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Kawasaki-Heavy-seeks-to-propel-hydrogen-turbine-demand-in-Europe>), Feb. 6, 2023

같은 재생가능 에너지로 둘 다 동일하다고 볼 수 있음

그러나, 수소차는 전기자동차와 마찬가지로 전기 모터와 배터리가 필요할 뿐만 아니라 수소를 저장하기 위한 수소 탱크와 수소를 전기로 변환하기 위한 연료전지가 필요함[그림 12]

- 두 자동차 디자인을 비교하면 수소 자동차가 훨씬 더 복잡할 뿐만 아니라 에너지 손실 측면에서 비효율적이라고 볼 수 있음
- 열역학 측면에서 보면 수소 동력 자동차를 움직이기 위해 동일한 사용 가능한 에너지 출력을 얻으려면 배터리 전기 자동차에 비해 3~5배 더 많은 재생가능 에너지 입력이 필요하고, 이는 수소 자동차의 연료 비용이 EV보다 최소 3~5배 높다는 것을 의미함

[그림 12] 수소차와 전기차의 비교¹³⁾



13) Bleakly D. The madness of big auto's push for hydrogen-powered cars, The Driven, Feb. 10, 2023 (<https://thedriven.io/2023/02/10/the-madness-of-big-autos-push-for-hydrogen-powered-cars/>)

- 전기차의 경우 분산형 에너지 시스템인 반면, 수소차는 중앙 집중식 에너지 시스템으로 볼 수 있음
- 즉, 수소는 고도로 중앙 집중화되고 독점된 화석연료 동력 시스템을 사용한다고 볼 수 있음
- 수소는 중대형 트럭과 관련된 배출량을 줄이는 데 도움이 될 수 있으며, 이러한 차량의 경우 정차와 재충전 없이는 장거리를 보장할 수 없는 전기 배터리에 비해 연료전지가 더 매력적인 것으로 간주됨
 - 이에 대해 많은 연구가 필요하지만, 현재 유효한 옵션은 수소와 디젤 모두에서 작동할 수 있는 이중 연료 연소 엔진을 사용하는 것임

7

해양 및 항공 분야 적용

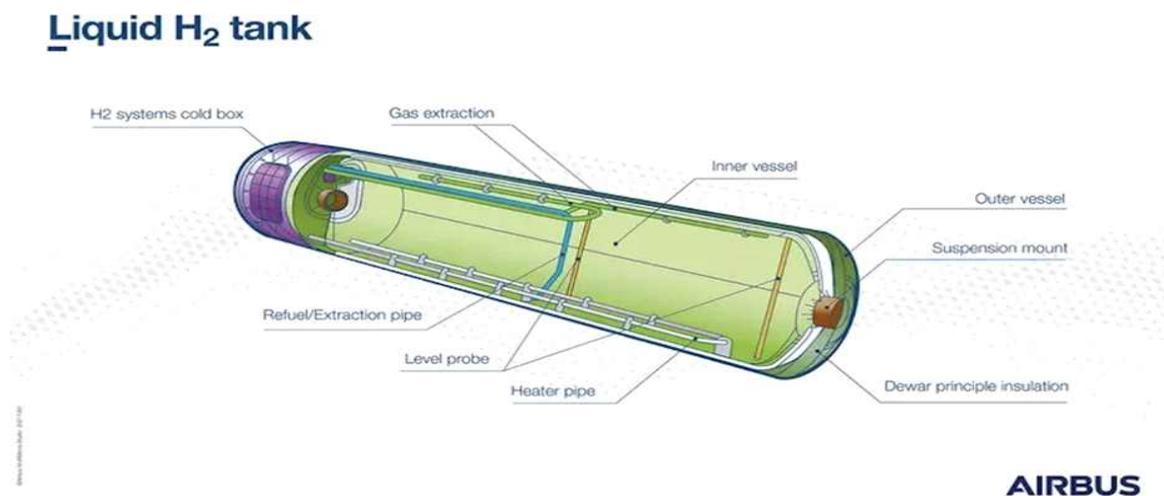
가. 수소 비행기

- ▣ 상업용 항공 여행은 전 세계적으로 온실가스 배출량의 약 2%를 차지하며, 미국에서는 온실가스 배출량의 3% 이상, 총운송 배출량의 약 10%를 차지하고 있음
- ▣ 현재의 자동차 배터리 기술은 아직 장거리 상업 노선이나 더 큰 비행기를 비행하는 데 필요한 만큼 에너지 밀도가 높지 않음
- ▣ 수소 저장 또한 항공기에 필요한 에너지 밀도를 활용하기 위해서는 새로운 종류의 솔루션이 필요함
- ▣ 현재로서는 전기 및 순수 H₂ 항공기는 특히 단거리 노선에서 하늘 탈탄소화의 중요한 견인차가 될 수 있음
 - 에어버스는 최근 4년 이내에 극저온 수소 저장을 갖춘 수소 연료전지 기술을 특징으로 하는 대규모 여객기를 위한 "메가와트급 추진 시스템"을 설계, 구축 및 시연할 계획이라고 발표했음
 - 물론 이것은 수소 연료전지 기술로 제트 엔진을 완전히 대체한다는 의미는 아니지만,

내연기관이 자동차에서 완전히 사용되지 않기 전에 미리 작은 규모로 일부 제트 엔진을 대체할 수 있음을 의미함

- 수소 연료 사용에는 세 가지 옵션이 있는데, 첫 번째는 수정된 가스 터빈 엔진에서 수소를 사용하거나, 두 번째, 수소 연료전지를 사용하여 전력을 생성할 수 있고, 세 번째로는 이 두 가지를 조합하여 사용할 수 있음
 - 이러한 경로의 경우 풍력 및 태양열과 같은 재생 가능 에너지에서 수소를 생산할 수 있고 연료전지-EV 경로로 이동한다면 효과적으로 탄소 배출량을 줄일 수 있음
- 700bar와 같은 높은 압력에서 수소를 저장하는 것은 쉽지는 않지만, 극저온 (영하 253도 미만)으로 수소를 저장하게 되면 에너지 밀도가 높은 액체가 될 수 있음[그림 13]
- 다만 현재 기술로서는 4리터의 액체 수소는 표준 제트 연료 1리터밖에 되지 않으므로 아직 표준 제트 연료와 동일하게 사용하기에는 제약이 있음
- 또한, 상업용 항공기는 20,000번의 이착륙을 견뎌야 할 뿐만 아니라 액체 수소를 더 오래 유지해야 하기 때문에 안전 및 내구성 요구 사항은 우주 발사기보다 더 엄격할 수 있음
- 그 해결책으로서는 복합재료 개발 및 적용에 있음

[그림 13] 에어버스 극저온 액체 수소 탱크¹⁴⁾



14) Halvorson, B. (2023) Could hydrogen fuel-cell tech replace aircraft jet engines? Green Car Reports, Jan. 17, 2023 (https://www.greencarreports.com/news/1138447_could-hydrogen-fuel-cell-tech-replace-aircraft-jet-engines)

나. 수소 열차

- ▶ 철도 부문은 특히 현재 운영되고 있는 디젤 열차를 고려할 때 수소에 대한 또 다른 흥미로운 부문임
- ▶ 향후 10년 동안 연료전지로 구동되는 열차는 디젤 열차보다 비용 면에서 더 경쟁력을 갖게 될 것으로 예상됨
- ▶ 독일과 같은 일부 유럽 국가에서는 수소 여객 열차가 운영중에 있으며 정기적으로 승객들을 태움
 - 예를 들어, 2018년 말에 Alstom Ltd.가 생산한 2대의 연료전지 열차가 독일에서 운행되기 시작했음
 - 이탈리아 밀라노에서 첫 번째 열차의 운영은 2023년에 가능할 것으로 보임
 - 영국과 네덜란드도 Alstom 수소 열차에 관심을 보이기 시작했고, 2019년에는 중국 포산(Foshan)에서 연료전지 트램이 운행되기 시작했음
 - 최근 중국 국유산업 모노리스 CRRC와 Chengdu Rail Transit이 공동으로 슈퍼커패시터 버퍼가 있는 수소 연료전지로 작동하는 무공해 열차를 개발 출시하였음 [그림 14]
 - 이 열차는 현재까지 가장 빠른 중국 최초의 수소 동력 여객 열차로 시속 100마일 (160km/h)로 운전이 가능하며. 총 4량 열차로 373마일(600km)의 주행거리를 제공하며 물만 배출함
 - 5G 통신, 자동 웨이크업, 시작 및 중지, 창고 기능으로 돌아가는 자율 주행이 가능함
 - 독일은 작년 약 14대의 수소 연료 Alstom 열차를 이미 운행하고 있고, 약 620마일 (1,000km)로 훨씬 더 넓은 주행거리를 제공함

[그림 14] CRRC에서 개발한 4편성 수소 열차¹⁵⁾



다. 수소 선박

- 수소는 직접 연료로 사용이 가능하며, 예를 들면 수소를 연료로 사용하는 대양 횡단 선박은 톤 킬로미터당 약 0.98g CO_{2,eq}를 배출할 수 있는 반면 기존의 중유 탱커에서 배출되는 CO_{2,eq}는 톤 킬로미터당 약 5.33g인 것으로 연구되었음
- 초 냉각 수소를 운반할 선박을 건조하는 것은 수소 사용을 위해 필요한 많은 요인 중 하나이며, 기후 변화에 대처하기 위해 세계가 탈탄소화하는 데 도움이 되는 열쇠로 여겨짐
 - 지난해 1월 일본 선박건조업체인 가와사키 중공업이 건조한 수이소 프론티어(Suiso Frontier) 호는 호주에서 일본으로 시험 운항을 성공적으로 마쳐 액체수소운송이 기술적으로 실현이 가능하다는 것을 보여주었음[그림 15]
 - 운항 도중 제어시스템의 전원공급장치 사양이 잘못되어 가스 연소장치의 자동밸브가

15) Blain, L. (2023) China launches 100-mph hydrogen/supercapacitor train, New Atlas, Jan. 22, 2023 (<https://newatlas.com/transport/china-hydrogen-supercapacitor-train/>)

손상되는 문제가 발견되었는데, 이를 통해 수소를 보다 안전하게 사용함에 있어 정밀한 결합 감지 시스템의 필요성이 강조되었음

- 즉 오작동 시 위험한 결과를 방지하기 위해 자동화된 선상 운영 시스템에 안전 제어 장치를 갖추도록 하는 것이 중요함
- 가와사키 중공업은 상업용 규모의 수소 운반선을 계속 건설할 계획임

[그림 15] 일본 가와사키 중공업이 건조한 세계 최초의 수소 운반선인 수이소 프론티어(Suiso Frontier) 호¹⁶⁾



8 수소생산에 사용되는 재료

- 수소생산에 필요한 부품 재료 수요에 있어 가장 큰 분야는 재생 가능한 수소 배치에 필요한 재생 가능한 전기 생성 분야임
- 대부분 알루미늄, 구리, 니켈 및 아연이 포함되지만, 실제 규모와 구성은 전해조에 전력을 공급하는 데 사용되는 재생 전기의 유형에 따라 크게 달라짐
- 태양광 발전(PV)을 더 많이 사용하면 알루미늄 수요가 증가할 수 있고, 풍력을

16) Paul, S. (2023) Safety improved on world's first liquid hydrogen carrier after malfunction, Reuters, Feb. 6, 2023 (<https://www.reuters.com/business/energy/safety-improved-worlds-first-liquid-hydrogen-carrier-after-malfunction-2023-02-06/>)

더 많이 사용하면 아연 수요가 증가할 수 있으며, 영구 자석이 있는 풍력 터빈을 사용하는 경우 디스프로슘과 네오디뮴까지도 필요함

이러한 물질 외에도 백금과 이리듐에서 세륨과 코발트에 이르기까지 다양한 유형의 수소 관련 기술에 걸쳐 더 작은 절대 부피가 필요하지만 광범위한 다른 물질 그룹이 있음

일부는 연료전지용 세륨과 같은 단일 기술에만 사용되는 반면 다른 일부는 니켈 및 티타늄과 같은 부문에서 널리 사용되기도 함

이러한 광물 수요의 범위는 일반적으로 기존 생산 수준에 비해 상대적으로 작음

- 예를 들어, 2050년 아연용 청정 수소생산 수요는 현재 아연 생산 수준의 4%를 차지할 것으로 예상됨
- 저탄소 수소생산에 사용되는 알카라인 전해조 및 코발트에 필요한 흑연과 같이 다양한 수소생산 경로에 필요한 광물은 전체적으로 저탄소 전환으로 인해 수요가 크게 증가할 가능성이 높음
- 청정 수소생산 자체에 대한 수요는 현재 광물 생산의 작은 부분에 불과하지만 다른 곳에서의 수요 규모가 부족하거나 더 높은 가격이 발생할 수 있음을 의미할 수 있으므로 이러한 물질의 소싱은 수소 부문에 문제를 일으킬 수 있음
- 세계은행의 수요 위험 매트릭스와 같은 도구를 사용하여 수소 부문의 핵심 재료가 사용되는 다양한 수요 상황을 이해하는 것은 청정 수소 배치를 위한 재료 공급을 확보하려는 정부와 민간 부문에 필수적인 조치임[그림 16]

[그림 16] 수소경제에 필요한 수요 위험 매트릭스 및 재료¹⁷⁾



17) Moreira S. and Laing T. (2022) Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen, International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank

III

맺음말

- ❏ 청정 수소는 다른 방법으로는 저감하기 어려운 부문을 탈탄소화하는 데 중요한 역할을 하고, 국제 환경 목표에 기여하는 독특한 위치를 차지할 것임
- ❏ 수소 수요는 주로 운송 및 산업 응용 등 광범위한 부문으로 나타날 수 있음
- ❏ 특히 항공 및 운송 부문에서 수소가 2030년 이후 탈탄소화에 중요한 역할을 할 것으로 예상됨
- ❏ 잠재적으로도 재료 집약적인 저탄소 전환이라는 더 넓은 맥락을 염두에 두어, 청정 수소 개발에 있어 재료 및 소재의 재활용 및 재사용 촉진, 재료 집약도 감소, 재료 대체 장려 및 순환 설계 장려가 필요할 전망이다
- ❏ 정부와 민간 부문 모두 올바른 정책 프레임워크 설정에서 기술 이전 구현, 효율성 및 신기술에 대한 혁신 및 투자에 이르기까지 수소경제를 이끌기 위한 중요한 역할이 필요함



에너지 산업대전환 시대에서의 수소 에너지 개발 및 적용 현황

발 행 일 | 2023년 7월

작 성 자 | 워싱턴 거점 김은정 소장 (ejkim@kiat.or.kr)

문 의 처 | KIAT 국제협력기획팀 (jskim11@kiat.or.kr)

-
- ※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식적인 견해가 아님을 밝힙니다.
 - ※ 본 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우, 반드시 원문출처를 명시하여야 합니다.
 - ※ 본 자료는 GT온라인 홈페이지(www.gtonline.or.kr)를 통해서도 보실 수 있습니다.



KIAT(한국산업기술진흥원)
미국 워싱턴 D.C. 거점
김은정 소장



KIAT
유럽 벨기에 거점
강주석 소장



KIAT
베트남 하노이 거점
이재민 소장



KEIT(한국산업기술평가관리원)
미국 실리콘밸리 거점
박성환 소장



KEIT
유럽 독일 거점
박효준 소장



KORIL(한국이스라엘산업연구개발재단)
유럽 이스라엘 거점
최정인 소장