

플래티넘 에센셜

수소 101 – 투자자들을 위한 입문

백금(플래티넘, platinum) 수요는 장기적으로 지속적인 성장을 할 것으로 예상된다. 탈탄소화가 전 세계적인 의제로 부각되어 있는 가운데 수소 경제의 새로운 수요가 백금 수요에 박차를 가하는 상황이다. 플래티넘 에센셜 이번 호에서는 수소 경제와 관련 기술 및 그것이 백금에 미치는 영향에 대한 개요를 제공하고자 한다. 이는 본 협회의 최근 수소 관련 백금 수요 예측을 보완하며 백금 투자자들이나 백금을 투자자산으로 고려하고 있는 사람들에게 백금 관련 수소 시장의 근본적 역학을 이해할 수 있는 토대를 제공할 것이다.

수소는 재생 가능한 에너지원으로 생산 가능할 뿐만 아니라 다양한 모빌리티 및 산업 부문에 적용되어 탈탄소화를 촉진시키는 등 용도가 다양한 에너지 운반체 역할을 한다. 이러한 잠재력에도 불구하고 현재 연간 9500 만 톤 규모의 수소 시장은 주로 화석 연료에 의존해 수소를 생산하고 있다. 백금 및 기타 백금족금속(이하 PGM)은 재생 가능한 에너지를 통해, 탄소배출 없는 공정을 거쳐 수소와 산소가 발생되도록 촉매하는 전기분해장치(이하 전해조)에 포함됨으로써 중추적인 역할을 하게 될 것이다. 또한 수소를 활용하여 전기를 생산하는 백금 함유 양성자 교환막(Proton Exchange Membrane, 이하 PEM) 연료 전지의 상업적 개발로 운송수단에서 화석 연료를 대체할 수 있는 가능성이 커졌고, 녹색 수소의 사용으로 다른 부문에서 탈탄소화가 실현될 수 있게 되었다.

오늘날 수소 수요는 주로 화학 및 석유화학 산업에서 원료로 사용되는 데 있다. 그러나 국제에너지기구(IEA)에서는 에너지 전환과 연관된 연료 전지 사용과 직접환원철(Direct Reduced Iron, DRI) 제강 같은 새로운 산업 공정 및 가스 터빈 발전소에서의 사용으로 인해 2030년까지 수소 수요가 1억 5천만 톤까지 증가할 것으로 예상하고 있다. 전해조 및 탄소 포집 기술을 활용하여 6000만 톤의 수소를 새로 생산함으로써 화석 연료 기반의 수소 생산이 대체되고 새로운 부문들이 탈탄소화될 것이다. 기존 연 9500만 톤 규모의 회색 수소 시장을 탈탄소화하면 CO₂ 배출량 4억 3천만 톤을 줄일 수 있으며, 이는 1년 동안 1억 2천만 대의 자동차를 도로에서 퇴출시키는 것과 맞먹는 효과이다. 수소위원회(Hydrogen Council)에 따르면 2050년 수소는 다른 응용 분야와의 결합을 통해 전 세계 배출량 감축의 최대 20%를 담당할 수 있을 것으로 예상된다.

수소 경제 내에서 백금의 수요는 두 가지 주요 응용 분야에 걸쳐 있다. 즉, 수소 생산을 위한 PEM 전해조와 수소 사용을 위한 PEM 연료전지 분야이다. 연료 전지는 주로 연료전지 전기 자동차에 보급되지만 2030년까지 해양, 철도, 비도로, 고정형 발전 분야에서도 그 사용이 증가할 것으로 예상된다. 2024년은 정부 정책의 발전과 재정 지원 확대에 힘입어 수소 관련 수요가 전년 대비 두 배로 증가하면서 수소 경제 성장면에서 전환점이 될 것이다. 탄소 순배출량 제로 달성을 위한 수소의 중추적인 역할을 인정할 때 다양한 부문으로의 통합은 필연적인 것이다. 2030년까지 수소 경제가 전체 백금 수요의 약 10%인 875 koz에 달하는 백금 수요를 차지하며 지속적인 성장을 이룰 것으로 예상된다. 이하는 수소 관련 수요를 요약하고 최신 [수소 전망](#)을 통해 종합적인 분석을 한 내용이다. 이 보고서를 통해 필수적인 수소 기술 선택과 탈탄소화에 대한 그 기여도에 초점을 맞추어, 투자자들이 2030년까지 10년 단위 기간 중 후반기 백금 수요의 주요 동인을 파악하는 데 도움을 주고자 한다.

Edward Sterck

Director of Research

+44 203 696 8786

esterck@platinuminvestment.com

Wade Napier

Analyst

+44 203 696 8774

wnapier@platinuminvestment.com

Jacob Hayhurst-Worthington

Associate Analyst

+44 203 696 8771

jworthington@platinuminvestment.com

Brendan Clifford

Head of Institutional Distribution

+44 203 696 8778

bclifford@platinuminvestment.com

World Platinum Investment Council

www.platinuminvestment.com

Foxglove House, 166 Piccadilly

London W1J 9EF

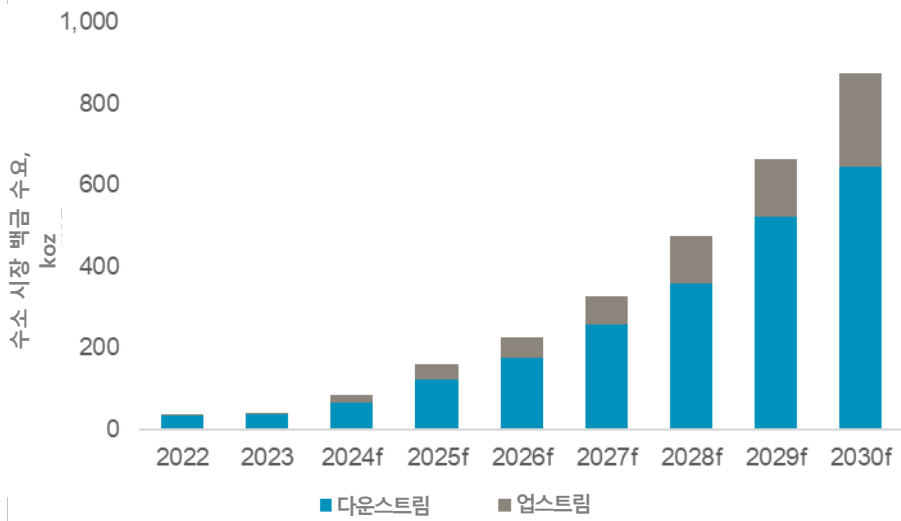
2024년 4월 25일

도표 1 수소 부문 백금 수요 요약표

		WPIC 수소-백금 수요 예측								
		2022	2023	2024f	2025f	2026f	2027f	2028f	2029f	2030f
백금 수요 (koz)	모빌리티	19	16	44	95	143	219	312	461	564
	- FCEV	19	15	42	93	138	208	293	427	505
	- 철도	0	0	0	0	1	1	1	3	5
	- 해양	0	1	1	1	2	4	8	14	24
	- 비도로	0	0	0	0	1	5	10	17	30
전해조	고정형 동력장치	0	4	16	39	52	71	116	141	229
	고정형 동력장치	17	20	23	27	32	39	48	61	81
	총 수요	36	40	83	161	226	328	476	663	874

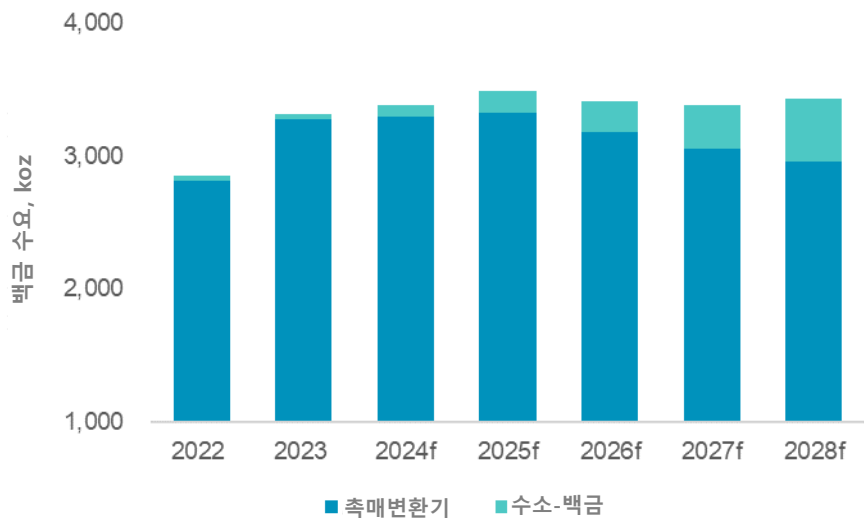
출처: WPIC 리서치

도표 2 수소 연계 백금 수요가 2030년에 이르기까지 연간 875 koz에 이를 것으로 예상된다.



출처: 국제에너지기구(IEA), 회사 자료, WPIC 리서치

도표 3 수소 애플리케이션의 백금 수요 증가가 내연기관 촉매변환기 수요 감소를 상쇄한다.



출처: 메탈 포커스(Metals Focus) 2022~2024f, 그 이후로는 WPIC 리서치

목차

수소란 무엇인가?	4
수소 경제란 무엇인가?.....	5
정책 설정의 역할	8
수소는 어떻게 생산되는가?.....	9
전기분해 심층분석: 알칼리성 vs PEM	17
수소 운송 및 지원 인프라	33
결론	36

수소란 무엇인가?

수소는 주기율표의 첫 번째 원소이며 기체 상태의 수소는 우주에서 가장 풍부한 원소이다. 이원자 수소(H₂)는 무취, 무색, 무미의 기체이다. 수소는 그 높은 발열량으로 인해 활용되며, 가연성 연료 중 단위 질량당 에너지 함량이 가장 높은 원소 중 하나로 꼽힌다. 하지만 매우 가볍고 다루기 어렵다는 특징이 있다. 운반하거나 활용하기 위해서는 수소를 압축하거나 액체 형태로 생각하는 경우가 많다.

수소는 직접 연소 또는 전기화학 반응이라는 두 가지 방식으로 에너지 잠재력을 방출하며, 두 가지 경우 모두 대기 중 산소와 결합하여 물을 생성한다. 실제로 액체 수소는 20세기 중반부터 로켓 발사에 사용되어 왔으며, 백금 연료 전지는 제미니(Gemini) 우주 임무 서비스 모듈의 온보드 전원 공급 장치로 처음 사용되었다. 연료로 쓰이는 역할 외에도 오늘날 경제에서 수소의 주요 사용처는 화학 원료이며 특히 전 세계 농업에서 비료로 사용되는 암모니아 생산에 주로 사용된다.

도표 4 제미니 미션에 명령 전력 공급을 위한 서비스 모듈에 사용된 연료 전지.



출처: 미국 국립항공우주박물관(National Air and Space Museum)

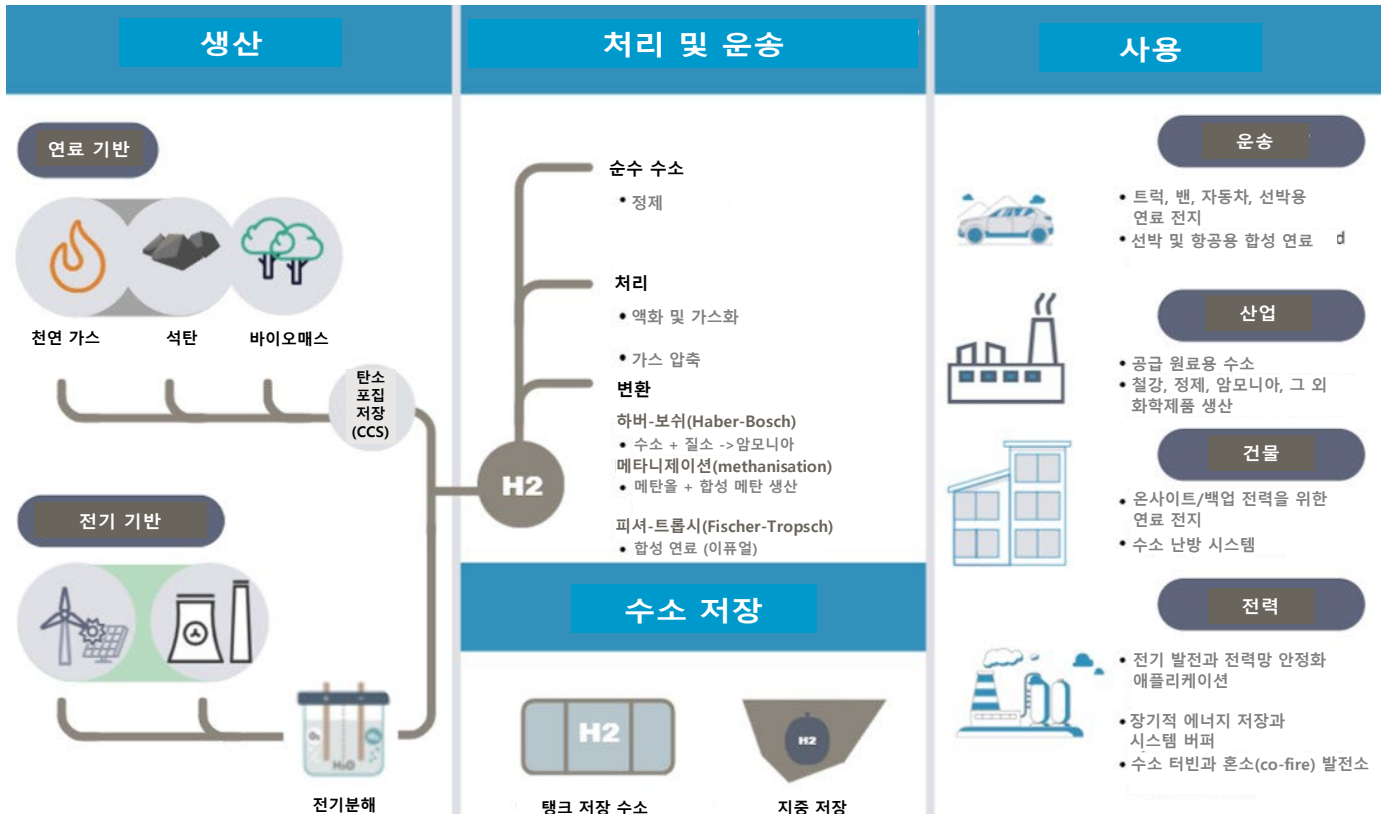
에너지 전환에 수소가 중요한 이유

화석 연료(석탄, 천연가스, 석유)를 태우면 온실가스(GHG)가 배출되며 이는 산업혁명 이후로 계속 증가해 왔다. 온실가스 배출은 기후 변화, 특히 지구 온난화와 연관이 있다. 2015년에 체결된 파리 협정은 온실가스 배출량 감축을 통해 2050년까지 지구 온난화를 1.5°C 이내로 제한하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 달성하기 위해서는 화석 연료 기반 경제에서 금속 기반 경제로 전환하는 것과 같은, 인류의 에너지 생산 방식에 근본적인 변화가 필요하며, 그것을 에너지 전환이라고 한다. 이는 화석 연료를 대체하기 위해 여러 기술을 구현해야 하는 복잡한 사회경제적 과제이다. (풍력 및 태양광 같은) 재생에너지와 배터리 기술이 온실가스 배출량의 대부분을 감소시킬 수 있지만, 배터리를 사용하기에는 배터리가 너무 크고 무겁다거나 고용량 가동률이 필요한 분야, 또는 단순히 전기화가 불가능한 분야에는 적용되지 않는다. 이런 분야를 '감소시키기 어려운'(hard-to-abate) 분야라고 한다. 전 세계 이산화탄소 배출량의 최대 10%를 차지하는 철강 생산은 철을 환원시키는 화학 반응에서 석탄과 천연가스가 사용될 때 온실가스를 배출시켜 그 대표적인 예가 된다. 이 공정은 현재 기술로는 전기화할 수 없기 때문에 철강 산업에서 탄소 배출을 감축시킬 수 있는 재생 에너지가 없지만, 수소로는 가능하다. 수소는 직접 환원이라는 공정을 통해 석탄을 대체하여 철을 환원시키며, 이때 주요 배출물은 유해한 온실가스가 아니라 수증기일 뿐이다.

연료, 화학 원료, 에너지 운반체 등 다양하게 쓰일 수 있는 수소는 탄소 배출이 어려운 부분의 탈탄소화를 위한 핵심 요소로 점점 더 많이 인식되고 있다. 저탄소 또는 무탄소 기술을 통해 생산되는 수소는 모빌리티, 중공업, 전기발전 분야에서 온실가스 배출을 줄인다. 아래 도표는 총 온실가스 배출량에 대한 산업 하위 부문의 글로벌 기여도를 보여주며(도표 5), 수소 기술이 적용될 수 있는 분야를 색상으로 구분하여 적용 가능한

수소 저장은 단기 및 중기의 경우 탱크 저장이 가능하고, 장기간 저장을 위해서는 자연적으로 발생하는 적절한 지질 구조에 저장할 수 있다. 장기간 저장은 재생 가능한 에너지원과 함께 사용될 때 그리드 안정성을 위한 핵심 요소이다. 재생 에너지원은 변동성이 크데 과잉이 발생할 때 배터리 충전처럼 저장할 수 있는 수소를 만드는 데 쓸 수 있게 되면, 재생 에너지원이 부족할 때 다시 사용할 수 있도록 하는 조정인자 역할을 하게 되는 것이다.

도표 6 수소 경제는 수소 사용의 주요 부문을 맥락화한다.



출처: WPIC 리서치

수소를 실현시키는 백금족 금속(PGM)

수소 경제는 화학 및 전기화학 공정에 의해 주도되며, 여기에는 반응을 용이하게 하거나 촉진시키기 위한 PGM 촉매가 필요하다. 백금의 물리화학적 특성으로 인해 백금은 수소 경제 확장에 특히 필수적이며, 수소 경제가 확장됨에 따라 2030년까지 추가적인 백금 수요가 850~900 koz에 달할 것으로 추정된다. 이 입문서에서는 수소 경제에 사용되는 기술 및 특히 PGM과 백금의 역할에 대해 설명하고 있다. 먼저 수소 경제에서 PGM이 어디에 활용되는지에 대한 고급 과정에 해당하는 개요부터 보자면 다음과 같다.

업스트림

PGM 촉매는 효율적이고 빠른 수소 변환이 중요한 전기분해와 연료전지 전기화학 등의 공정에서 필요로 하는 표면 반응성을 제공하며, 백금은 이리듐, 루테튬과 함께 전기분해를 통한 업스트림 수소 생산에 사용되는 핵심 촉매이다.

전기분해는 간접적인 백금 수요도 창출한다. 로듐과 합금된 백금은 풍력 터빈과 태양광 패널의 핵심 자재로 쓰이는 유리섬유 제조에 필요한 부싱(bushings)에 사용된다. 수소 생산을 위한 재생 에너지에 대한 수요가 증가함에 따라 유리 관련 백금 수요도 증가할 것이다.

미드스트림

백금의 미드스트림 용도에는 운송을 위해 액상유기수소운반체(LOHC)에 수소를 적재하고 전해조에서 수소를 정제하는 것이 포함된다. 수소가스의 불순물은 연료전지의 성능과 수명에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로 효과적인 촉매 사용이 중요하다.

다운스트림

백금, 팔라듐, 로듐은 석유 정제 및 화학 공정과 관련된 수소화 반응에 지난 수십 년 간 사용되어 왔으며, 이는 백금의 산업 수요의 약 6%를 차지한다(2023 년 기준). 마찬가지로 백금망(Platinum gauze)은 하버-보쉬 반응(Haber-Bosch reaction)에 사용되어 암모니아의 효율적인 생산을 돕는다.

새로운 다운스트림 백금 수요는 모빌리티 또는 고정식 전력 애플리케이션용 연료전지 부문에서 나오며, 도로, 해양, 오프하이웨이 부문 전반에 걸쳐 사용 가능한 솔루션을 제공한다. 그 외 친환경 철강 및 합성 연료와 같은 다운스트림 수소는 직접적으로 백금을 필요로 하지는 않지만 전해조 제조 및 저공해 수소 생산 증가의 필요성을 촉진함으로써 간접적으로 백금 수요를 증가시킨다.

도표 7 수소 경제에 사용되는 PGM.

생산 (업스트림)	공정 및 운송 (미드스트림)	사용 (다운스트림)
전기분해 • 백금, 이리듐, 루테튬 유리섬유 생산 • 백금, 로듐	수소 정제 • 백금, 팔라듐 암모니아 생산 • 백금, 루테튬, 팔라듐 액상유기수소운반체(LOHC) • 백금, 루테튬	연료전지 모빌리티 • 백금 고정식 연료전지 • 백금

출처: WPIC 리서치

정책 설정의 역할

정책은 성장, 혁신, 지속가능성을 지원하는 환경을 제공함으로써 초기 단계에 있는 산업을 지원하는 데 중요한 역할을 한다. 초기 단계에 있는 친환경 수소 경제는 높은 생산 비용, 기술적 불확실성, 인프라 부족 등 다양한 도전 과제에 직면해 있다.

탈탄소화라는 전 세계적 목표를 염두에 둘 때, 성공적인 수소 경제의 성장을 위해서는 이를 뒷받침하는 정책적 조치가 필수적이다. 2023년 말 기준 총 61개국의 정부가 수소 전략을 채택했으며, 이는 전 세계 에너지 관련 이산화탄소 배출국의 80% 이상을 차지한다. 전 세계적으로 수소 전략은 구속력 없는 수소 생산 목표부터 수요 창출과 투자 위험 완화를 위한 정책 개입에 이르기까지 다양한 성숙도를 보이고 있다. 도표 8은 다양한 전략과 목표를 강조하는 일부 국가들의 수소 로드맵을 자세히 보여준다. 수소의 주요 용도는 산업의 탈탄소화부터 합성연료 생산에 이르기까지 국가적 차원에서 목표가 설정되어 있다.

도표 8 각국 정부 차원에서의 수소 목표 개요의 예.

국가	내용
미국	2030년까지 '청정' 수소 생산량 1,000만 톤, 2040년까지 2,000만 톤, 2050년까지 5,000만 톤 달성.
유럽연합	2030년까지 국내 수소 생산량 1,000만 톤, 수입량 1,000만 톤 달성, 2030년까지 산업에서 사용되는 수소의 42%를, 2035년까지는 60%를 재생가능한 에너지로 전환.
중국	지방별 생산 목표가 있으며 2025년 총 목표 110만 톤.
독일	2030년까지 10GW의 전해조 설치하여 산업 및 모빌리티 수소 수요를 늘림. 1,800km 수소 파이프라인을 통해 천연가스에 대한 의존도를 수소로 대체함.
인도	2030년까지 '친환경' 수소 500만 톤, 재생가능한 에너지 125GW 추가. 연간 1,000만 톤씩 확대할 계획이므로 수출 개발도 포함됨.
아랍에미리트	2030년까지 140만 톤, 2040년까지 750만 톤, 2050년까지 1,500만 톤의 수소 생산할 계획. 전기분해 및 증기메탄개질(SMR)과 탄소포집저장(CCS)의 혼합.
파나마	2030년까지 해상 벙커링의 5%에 수소 파생 연료를 활용.
일본	2030년까지 300만 톤, 2040년까지 1,200만 톤, 2050년까지 2,000만 톤의 수소 생산. 기존 파이프라인의 가스 공급량 중 1%를 합성 메탄으로 대체하여 2050년까지 90%까지 끌어올리는 것을 목표로 함. 철강 및 석유화학 산업에서 산업용 수소 사용을 목표로 함.
한국	2030년까지 전체 발전량의 2.1%를 수소와 암모니아를 통해 달성하고, 2036년까지 7.1%로 늘리는 것을 목표로 함.

출처: 각국 정부 언론 발표, WPIC 리서치

전략적 목표는 대체로 구속력이 없으며 정부의 탈탄소화 계획의 방향을 제시하는 역할을 한다. 이는 투자자들에게는 도움이 되기는 하지만 수요 동기나 투자에 대한 확신을 제공하지는 못한다. 강력한 정책의 부재로 인해 최근 몇 년 동안 대규모 수소 개발은 정체되었다. 그러나 유럽연합(이하 EU)과 미국 등 주요 국가에서 의무적인 목표 설정과 주요 재정 지원이 결합되면서 모멘텀이 형성되고 있다. 구속력 있는 목표가 업계에 미래 시장에 대한 명확한 신호를 보낸다. EU에서는 2030년까지 수소 수요의 42%를 재생 수소를 통해 생산해야 하며, 이는 저탄소 투자에 대한 수요를 창출한다.

수소 기술 비용은 초기 단계에서 높으며 기존의 탄소 기반 대안과 비슷한 수준으로 맞추기 위해서는 R&D와 규모의 경제 모두가 필요하다. 이는 시간이 걸리는 일이다. 각국 정부는 이러한 격차를 해소하고 전체 가치 사슬에 중장기적인 안정성을 제공하기 위해 다양한 금융 수단을 도입하고 있다. 사용 가능한 주요 자금 조달 방법을 아래와 같이 나열해 보았으나, 변화가 빠르게 진행된다는 점에 유의할 필요가 있다.

- **보조금 및 재정지원:** 수소 프로젝트의 설비 투자를 줄이고 진입 장벽을 낮추기 위해 일반적으로 직접자금이 지원된다. 일례로 대규모 재생 수소 프로젝트를 지원하는 20억 호주 달러 규모의 호주 정부가 추진하는 프로그램인 '수소 헤드스타트'(Hydrogen Headstart)를 들 수 있다.

- **세제 혜택:** Tax credits 수소 생산 1kg 당 최대 3 달러의 세액 공제를 포함하는, 5 천억 달러가 투자된 미국 인플레이션 감소법(Inflation Reduction Act, IRA) 같은 세액 공제 및 세금 환급 방법이 있다.
- **차액 결제 계약(CfD):** 영국의 저탄소 수소 협약(Low-Carbon Hydrogen Agreement)과 같은 모델로, 수소 생산비용이 높을 때 수소 생산업체에 수익을 지원하는 것을 목표로 한다. 15 년 계약을 통해 저탄소 연료와 고탄소 연료의 운영 비용 차이를 보전해 준다.
- **경쟁 입찰 방식:** 유럽연합의 8 억 유로 규모의 수소은행(Hydrogen Bank) 시범 프로젝트와 같은 방식으로, 수년의 기간 동안 생산된 수소 1kg 당 지급되는 수익금을 받게 되는 입찰을 진행하며, 이때 생산된 수소 1kg 당 최대 4.5 유로를 10 년간 받을 수 있다.

수소 관련된 정부의 강력한 목표는 수요를 창출하는 데 도움이 된다. 강력한 재정 지원과 결합하면 투자자들과 프로젝트 개발자들에게 수소 경제를 구축할 수 있는 기반을 제공한다.

수소는 어떻게 생산되는가?

수소는 풍부한 양이 있지만 사용 가능한 형태로 단독으로 존재하는 경우는 거의 없다. 일반적으로 수소는 산소와 결합된 형태로 물에 있거나 천연가스처럼 탄소와 결합된 유기 화합물에서처럼 다른 화학 원소와 결합하여 존재한다. 따라서 수소를 생산하려면 원천 분자로부터 수소를 제거하기 위한 물리적 또는 화학적 공정이 필요하다.

기술적 관점에서 볼 때, 상업적 수소 생산 공정은 기본적으로 두 가지 주요 경로로 분류된다. 첫 번째는 천연가스, 석유, 석탄과 같은 탄화수소 연료를 분리시키는 (수소와 이산화탄소 생성) 열 공정과 연관되어 있다. 두 번째는 전기 기반 시스템에서 전기 에너지를 이용해 물을 화학적으로 분리시키는 것이며, 전기분해라고 한다. 그 외에도 생물학적, 열화학 및 광분해 공정과 같은 경우 수소를 생산해 낼 수 있지만 현재는 그 규모가 제한적이다.

화석 연료 기반 열 시스템:

증기 메탄 개질 및 석탄 가스화

오늘날 수소 수요는 거의 전적으로 (공급량의 99.9%)가 화석연료를 통한 생산을 통해 충족되고 있다. 석탄 가스화, 부분 산화, 증기메탄개질(steam methane reformation, 이하 SMR) 등의 화석 연료 생산 방법을 사용하면 풍부하고 저렴하게 (수소 1kg 당 약 1~1.5 달러) 수소를 생산할 수 있다.

SMR 은 경질 탄화수소, 일반적으로 메탄(CH₄)을 고온 고압에서 증기(H₂O)와 반응시켜 수소(H₂)와 일산화탄소(CO)를 생성하는 방식이다. SMR 은 효율적이면서도 쉽게 구할 수 있는 천연가스 공급 원료에 의존한다는 점에서 선호되는 이제 자리 잡힌 기술이다. 비용 측면에서 효율적이지만 이산화탄소가 부산물로 발생한다.

석탄 가스화는 석탄을 수소 생산의 원료로 활용하는 대안적인 방법이다. 석탄은 산소 및 증기와 고온 반응을 통해 합성 가스(syngas)로 변한다. 합성 가스에는 수소, 일산화탄소 및 기타 가스가 포함되어 있으며 이는 여러 제품 스트림으로 분리될 수 있다.

일반적으로 SMR 은 대규모 수소 생산의 경우 공급을 동일 장소에 배치하는 것이 비용면에서 더 효율적이기 때문에 석유화학 공정과 함께 활용된다. 석탄 가스는 석탄 자원이 풍부할 경우 화학 원료용 수소를 생산할 때 선택할 수 있는 옵션이다. 이는 공급 원료의 다양성을 제공하지만 CO₂ 배출량이 많기 때문에 일부 국가에서는 선호도가 떨어질 수 있다. 석탄 가스화는 중국에서 널리 사용되고 있으며, 미국과 EU에서는 SMR 이 선호되고 있다.

일부 추정에 따르면 화석연료 기반 수소 생산은 전 세계 CO₂ 배출량의 최대 3.5%를 차지한다. 전 세계적인 탈탄소화 추세를 고려할 때, 각국은 탄소 집약도가 높은 생산을 단계적으로 중단하고, 대신 저탄소 연료 기반 생산과 궁극적으로는 재생가능한 전기 기반 생산을 선호할 것이다.

저탄소 연료 기반 생산

저탄소 및 잠재적으로 탄소 중립적인 연료 기반 생산 방법이 부상하고 있다. 현재 실행 가능한 수소 생산 경로로는 탄소포집저장(CCS) 처리를 하는 SMR, 메탄 열분해, 바이오매스 가스화 등 세 가지 기술이 제시되고 있다. CCS는 비교적 성숙한 기술이며 화석 연료 기반 수소 생산의 탈탄소화를 위해 선호되는 경로로 자리잡고 있다. 반면 메탄 열분해와 바이오매스 가스화는 개발 초기 단계에 있으며 극복해야 할 몇 가지 과제가 있다.

탄소포집저장(CCS)은 SMR이나 석탄 가스화에 추가되는 기술이다. 이 기술로 이산화탄소를 포집하여 저장하거나 다른 산업 공정에 활용하며, 대기로의 CO₂ 방출을 약 75% 감소시켜 공정의 이산화탄소 집약도를 낮춰준다. 이 접근법은 기존의 화석 연료 인프라를 활용하고, 재생 에너지에서 추출한 수소에 비해 (현재 가격 기준) 저렴한 비용을 자랑한다는 점에서 매력적이다. 하지만 천연가스에 지속적으로 의존한다는 점과 이산화탄소 배출량이 제로가 아니라는 점이 큰 단점으로 작용하기 때문에, 많은 국가에서 이 방법은 친환경 수소 생산이라는 궁극적인 목표로 가기 위한 과도기적 방법으로 간주되고 있다.

메탄 열분해(Methane pyrolysis)는 천연가스의 주성분인 메탄(CH₄)을 그 구성요소인 수소(H₂)와 고체 탄소를 주로 분해하는 과정을 말한다. 메탄 열분해는 저탄소 공정으로 간주되며, 공정에서 생산되는 고체 탄소는 포집 및 저장될 수 있어 이산화탄소 형태로 대기 중 방출되는 것이 방지되며, 따라서 전체 탄소 배출량을 줄일 수 있다. 또한 생산된 하드카본은 시장 가치가 있으며 자동차 타이어, 검정색 잉크, 흑연과 같은 제품에 응용될 수 있다.

이 공정은 SMR이나 전기분해에 비해 아직 경제적으로 경쟁력이 없다. 지원 정책과 결합된 기술 확장을 통해 향후 이 방법이 주목받을 수 있을 것이다.

바이오매스 가스화(Biomass gasification)에서 바이오매스란 식물이나 동물에서 추출한 유기 물질을 말하며 바이오매스 가스화에는 이러한 물질을 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 및 기타 가스를 포함하는, 합성가스라고 알려진 가스 혼합물로 전환하는 과정이 포함된다. 바이오매스에서 생산된 합성가스는 수소를 추출할 수 있도록 처리될 수 있다. 바이오매스 가스화는 가스화 과정에서 방출되는 탄소가 식물이 성장하는 동안 처음에 식물 자체에 의해 격리되기 때문에 잠재적으로 탄소 중립적인 공정으로 간주된다. 그러나 전체 탄소 균형은 바이오매스 조달의 지속 가능성, 운송, 전환 과정의 효율성 등의 요인에 따라 달라진다.

전기분해 - 전기 기반 시스템:

재생 가능한 수소는 탈탄소화라는 글로벌 과제에서 근본적인 부가가치를 창출한다. 재생 가능한 '친환경' 수소 생산의 주요 경로는 전기분해라는 공정으로 통해 이루어진다. 전기분해에서는 수소를 생산하기 위해 전해조라는 장비가 사용된다.

전해조는 물 분자(H₂O)의 결합을 끊어 그 구성 요소인 산소와 수소로 분리하는 장치이다. 각자의 장단점이 다른 서로 경쟁 관계에 있는 다양한 전해조들이 있지만, 전기 에너지를 사용해 물을 분리하고 사용 가능한 수소를 생산한다는 기본 개념은 동일하며, 전기 공급처에 따라 생산되는 수소가 다르게 분류된다. 서로 다른 다양한 전해조 기술에 대해서는 보고서의 뒷부분에서 자세히 설명하고 있다.

오늘날 전기분해 수소는 화석 연료 기반 수소에 비해 약 2배 정도의 생산 비용이 든다. 그러나 이 기술은 전 세계 공급량의 0.1%에 불과한 상업적 초기 단계에 있으나, 그 기술 규모가 확장될 것이며 2030년까지는 일부 프로젝트에서 SMR 및 석탄 가스화와 비슷한 가격대로 수소를 생산할 수 있을 것으로 예상된다.

천연수소 매장층

수소가 자연적으로 형성되는 방법에는 여러가지가 있다. 주된 과정에는 감람석과 같이 철분이 풍부한 광물과 지하수의 상호작용이 있다. 이런 경우 물이 자연적으로 철과 결합하는 산소, 그리고 수소로 분리된다. 이는 화학적으로는 가능하지만, 경제적으로 이용할 수 있을 만큼 충분한 수소가 농축되지는 않는 것으로 알려져 있었다.

그러나 이것이 우연히 반증되었는데, 1987년 아프리카 말리(Mali)에서 물을 얻기 위해 시추공을 뚫었다가 물 대신 무취의 가연성 가스가 방출되었다. 이 시추공은 다시 뚜껑이 덮혀 잊혀졌으나, 2012년 천연가스 시추를 하던 탐사대가 다시 발견해 서아프리카 지하에 풍부한 수소가 매장되어 있음을 확인했다. 이 수소는 현재 말리 서부의 부라케부구(Bourakébougou) 마을에 전력을 공급하고 있다. 경제성이 있는 수소 매장층의 존재가 확인되면서 이런 수소의 개발이 급증하기 시작했다. 천연수소는 매우 낙관적인 생산 방법으로 보이지만 탐사 및 추출 연구가 매우 초기 단계에 있다는 점을 간과해서는 안 된다.

수소 무지개

앞서 설명한 바와 같이, 연료로서 수소는 다양한 수준의 친환경 신뢰성과 도전 과제를 가진 여러가지 공급원을 가질 수 있다. 다양한 수소 공급원을 빠르게 구분하기 위해 종류에 따라 서로 다른 색상으로 구분하는데, 이를 '수소 무지개'(hydrogen rainbow)라고 하며 업계에서 생산된 수소를 지칭할 때 일반적으로 이 용어가 사용된다.

그린 수소: 녹색 수소는 재생 에너지를 사용하여 물을 전기분해함으로써 생산되며 CO₂ 배출량을 최소화하고 불순물 함량이 낮다.

옐로우 수소: 물의 전기분해로 생산되기는 하지만 가동률을 극대화하기 위해 혼합 출처의 전력망을 사용하거나 재생에너지 사용이 가능할 때는 재생에너지를 쓰지만 그렇지 않을 때는 기존 전력망에서 공급받은 전력을 사용하여 생산된 수소이다. CO₂ 배출량은 중간 정도이지만 불순물 함량은 낮다.

핑크 수소: CO₂ 배출량을 최소화하고 불순물 함량도 낮추기 위해 원자력을 사용해 물을 전기분해해서 생산된 수소이다.

청록 수소: 천연가스나 메탄의 열분해로 생산되는 수소로, 부산물로 고체 탄소를 생성한다. CO₂ 배출량이 최소화되고 불순물 함량도 낮다.

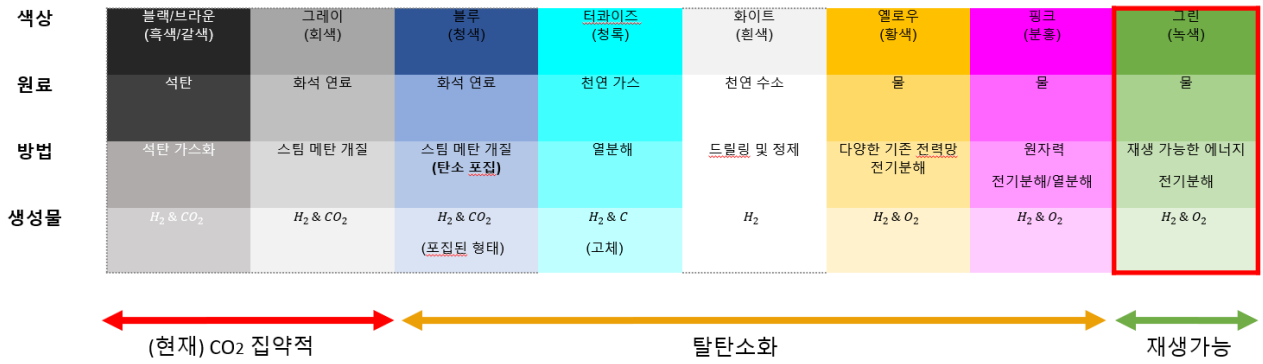
블루 수소: 천연가스나 석탄의 증기 개질을 통해 생산되며 이때 CO₂는 포집 및 격리된다. CO₂ 배출량은 낮거나 중간 정도이며, 불순물 혼입이 있다.

그레이 수소: CO₂ 저감 없이 천연가스의 증기 개질을 통해 생산된다. CO₂ 배출량은 중간 이상으로 많은 편이며, 불순물 혼입이 있다.

브라운/블랙 수소: CO₂ 저감 없이 갈탄이나 흑탄의 가스화로 생산된다. CO₂ 배출량이 많으며 불순물 혼입이 있다.

화이트 수소: 자연적으로 발생하는 수소를 말한다.

도표 9 수소무지개는 다양한 수소 생산 방식에 따라 탄소 집약도의 변화를 맥락화한다.



출처: WPIC 리서치

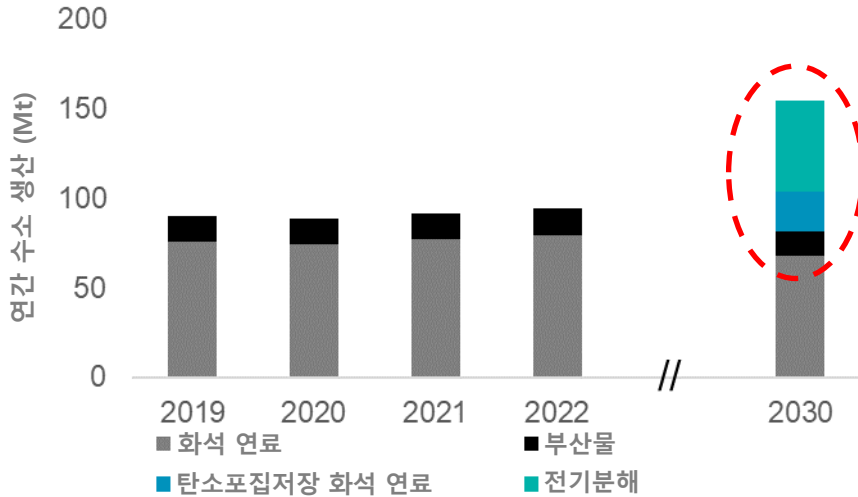
수소 공급 측면 트렌드와 기술적 승자들

수소 생산 방식을 확인했으므로 다음으로 볼 부분은 어떤 생산 기술이 우세할 것인지에 대한 확인이다. 95 백만 톤의 기존 수소 시장은 거의 독점적으로 화석 연료 기반 생산을 통해 공급되고 있다. 하지만 시장이 변화할 태세를 갖추고 있다. 향후 10 년 동안 운송, 전력, 산업 분야에서 전용 수소 사용을 필요로 할 새로운 에너지 전환 애플리케이션이 등장할 것이다. 수소는 그 양이 풍부하고 공급도 탄력적이지만, 새로운 수요는 저공해 수소를 사용하도록 의무화될 가능성이 높다. 따라서 수소의 성공 가능성과 최종적인 공급 궤적은 저탄소 기술을 통한 생산 비용에 의해 결정된다.

IEA에서는 전 세계 수소 공급량이 2030년까지 50% 증가할 것으로 전망하고 있다 (도표 10). 2030년 이후에는 전기분해와 탄소포집 기술이 주요 생산 방식이 되어 화석 연료 기반 생산 방식을 추월할 것이다. 이러한 전망은 증가하고 있는 수요에 의해 뒷받침될 것이지만, 초기 단계에 있는 산업을 확장하기 위해서는 다음과 같은 핵심 요소들이 필요하다.

- **정책, 인센티브, 규제적 기반:** 정부에 의해 설정되는 이 요소들은 수소 생산에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 보조금 및 재정지원이나 지원적 규제로 생산량 증가가 힘을 받을 수 있다.
- **보조금 및 탄소 가격제:** 탄소 가격 책정 매커니즘이 실행되고 탄소 배출량 감축에 대한 관심이 높아지면서 저탄소 및 탄소 제로 수소 생산 방식 채택이 힘을 받을 수 있다. 탄소 가격제는 탄소 배출 기술에 적용되어, 해당 기술과 그 기술을 통한 제품의 가격을 더 비싸게 만들어 경쟁력을 떨어뜨리는 것이다. 반면, 보조금은 친환경 기술에 적용되어 초기 개발 비용을 절감시키고 해당 제품들의 상업적 매력도를 높이는 데 도움을 준다. 이 두 가지 제도가 결합하여 에너지 전환 기술을 촉진하는 매커니즘으로 작용한다.
- **국제 협력:** 국가 및 국제기구 간의 협력을 통해 수소의 글로벌 무역을 촉진함으로써 수소 공급에 영향을 미칠 수 있다. 국가 간 운송 및 무역 인프라를 위한 협정은 필수적이다.
- **기술 개발:** 전해조와 탄소포집저장(CCS)에 대한 선행적 투자가 현재 저탄소 수소의 고비용과 관련해 중추적인 역할을 한다. 규모의 경제가 실현되고 기술이 성숙해짐에 따라 설비투자가 개선될 가능성이 있으며, 이는 시장에 진입하려는 공급업체 증가에 기여하고 있다.
- **재생 가능 전력 가용성:** 녹색 수소의 가장 큰 비용 요소는 재생 에너지의 전기 비용과 활용 한계이다. 수소 비용을 낮추고 공급량을 늘리기 위해서는 비용 우위 지역에서 재생 에너지와 전해조를 결합하는 것이 핵심적이다.

도표 10 IEA 에 따르면 전기분해는 2030 년까지 수소 공급의 50% 증가를 뒷받침할 것으로 예측된다.



출처: IEA, WPIC 리서치

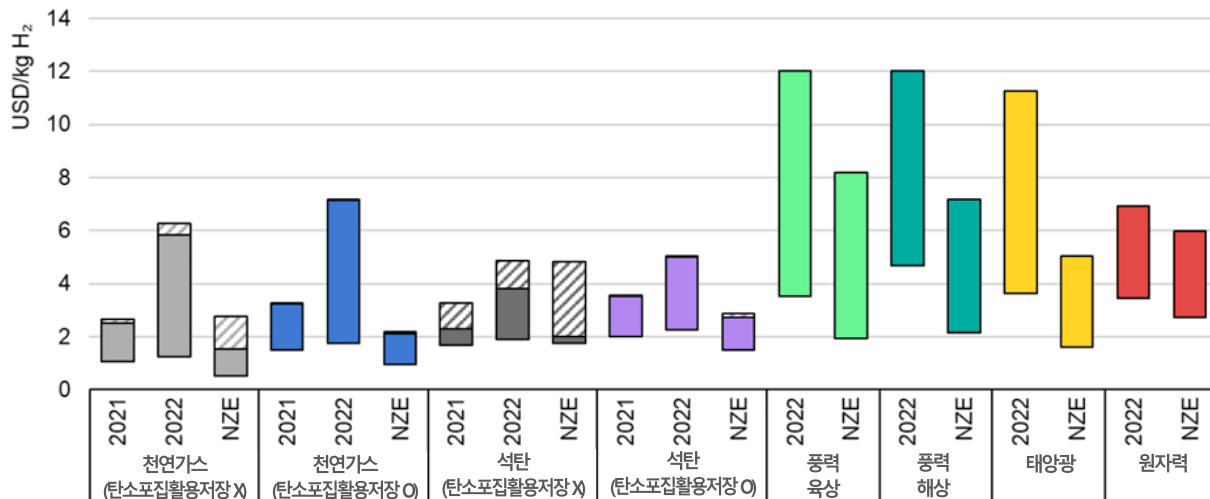
탄소포집저장 기술과 전기분해 비교

탄소포집 기술을 이용한 화석 연료를 통한 생산과 전기분해가 저탄소 수소를 생산하는 두 가지 주요 미래 경로이다. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 2030 년까지 신규 수소 공급의 약 70%는 전기분해에서, 나머지 30%는 탄소포집저장(CCS)에서 생산될 것으로 예상된다. CCS 는 CO₂ 를 포집하지만 화석 연료 추출에 의존하는 과도기적 기술로 간주된다. 화석 연료 사용을 단계적으로 중단하기로 한 제 28 차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP 28) 합의에 비추어 볼 때, 2030 년 이후에는 CCS 의 적용이 감소할 것으로 예상된다. 이러한 변화의 초기 징후는 2030 년까지 재생 수소를 42%까지 의무화하고 2035 년까지는 60%까지 늘리는 EU 수소 제 2 위임법(EU Hydrogen Second Delegate Act, 2023)에서 명백하게 드러난다. 탄소 포집을 사용해 지속 불가능한 연료의 연소를 제거하려는 장기적인 목표도 있다. 예상되는 경로 중 하나는 시간의 흐름에 따른 온실가스 집약도에 따라 저탄소 수소에 대한 정의의 기준이 강화되는 것이다.

현재 CCS 는 비용이 저렴해서, 고가의 전해조와 재생 에너지 비용을 들이지 않아도 된다는 장점이 있다. 또한 기존의 석탄 및 가스 인프라를 활용하므로 공급망이 더 단순하다. 이는 전통적인 석유 및 가스 산업이 있는 지역에서 선호되며, 미국, 영국, 네덜란드에서 이 기술을 많이 채택하고 있다 (도표 11). 또한 CCS 는 미국과 EU 모두에서 저탄소 수소 생산 방식으로 보조금 혜택을 받고 있다.

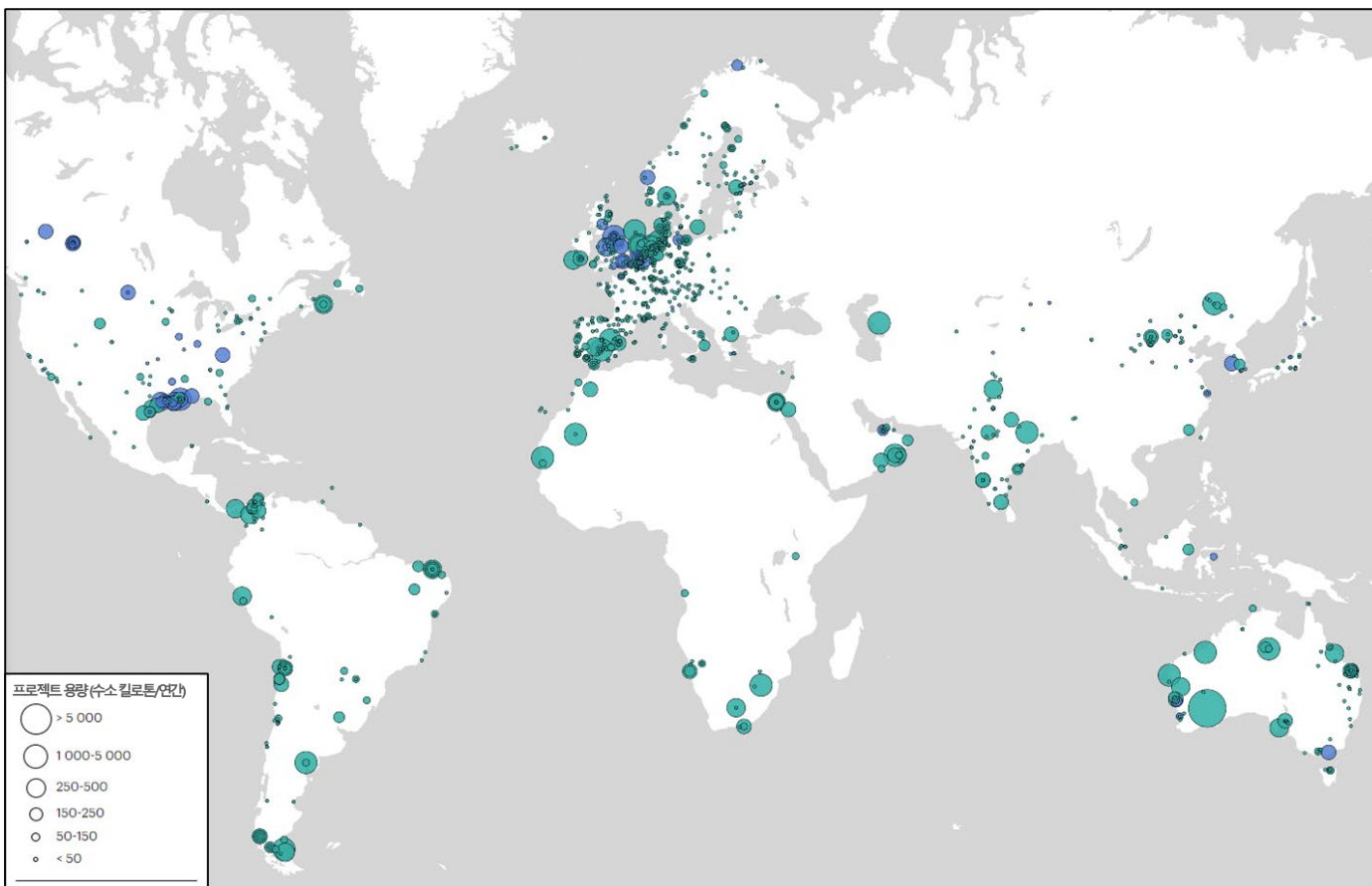
그럼에도 불구하고 규모의 경제가 증가함에 따라 전해조 비용이 감소할 것으로 예상되는 것은 널리 알려진 사실이다. 재생 에너지가 비용 면에서 유리한 지역에 전략적으로 배치될 경우, 전해조는 CCS 와 가격이 비슷해질 수도 있다 (도표 10). 본질적으로 블루 수소는 산업 성장을 촉진하는 전환 기술로 간주된다. 이는 재생 수소의 비용이 여전히 높은 상황에서 기초 수소 애플리케이션들의 탈탄소화를 위한 효과적인 수단으로 특히 적절하다.

도표 8 생산 방식에 따른 수소 비용 2021 년, 2022 년 및 2030 년(예측) 생산방식별 수소 생산 비용 (2050 년까지 넷제로(Net Zero, 탄소중립)에 도달하겠다는 미국에너지정보국(EIA) 시나리오).



출처: IEA

도표 11 2030 년까지 시운전 예정인 전해조(초록색) 및 CCS(파란색) 프로젝트 지도.



출처: IEA

전해조의 종류와 백금에 미치는 영향

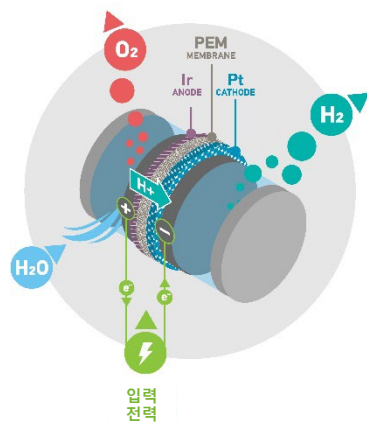
전해조는 2030년까지 새로운 수소 생산에서 가장 큰 비중을 차지한다. 현재 알칼리성 전해조(AEL)와 백금 함유 양성자교환막(PEM) 전해조는 비교적 성숙되어 상용화된 상태이다. 음이온교환막(AEM) 전해조와 고체산화물전해기(SOEC) 전해조는 개발 잠재력이 크지만 아직 상업적으로는 덜 성숙된 상태이다.

보급 시나리오와 향후 동향에 대해 논의하기에 앞서, 주요 전해조 기술 선택에 대한 개요를 먼저 제공하고자 한다.

양성자 교환막(Proton Exchange Membrane, PEM): 기밀성 고체 폴리머 기반 멤브레인을 전해질로 사용하여 물을 수소와 산소로 분리하는 기술이다. 알칼리성 기술보다 덜 성숙하고 자본 비용이 높지만, PEM 전해조는 가변 전원 공급 장치에 반응하여 훨씬 더 잘 순환하므로 간헐적 재생 에너지와의 조합에 더 적합하다. 제조 규모가 확대됨에 따라 PEM 비용은 크게 감소할 것으로 예상된다.

PEM 전기분해는 백금과 이리듐을 코팅 촉매로 사용하여 알칼리성 전해조와 비슷한 효율을 제공하지만 설치 공간은 최대 5 배까지 훨씬 더 작다. 이런 컴팩트한 디자인은 해상 풍력 발전 단지나 도심 공간에 유리하다. PEM 전해조는 연료전지 애플리케이션에 바로 사용할 수 있는 99.99% 순도의 수소를 생산하므로 추가 정제 단계가 필요 없다. 또한 다른 전기분해 기술과 달리 일반적으로 최대 200bar의 높은 압력에서 작동한다. 이는 후속 압축 필요성을 줄여 다른 기술에 비해 설비 비용을 낮출 수 있다. 백금과 이리듐이 PEM 전기분해에서 사용되는 주요 촉매이지만, 주어진 출력 전력에 필요한 이리듐의 양을 줄이기 위해 루테튬이 도입되고 있다. 일반적으로 촉매의 필요량은 시간이 지남에 따라 기술이 발전하면서 감소할 것이라고 가정하는 것이 타당하며, 이를 '절감'(thriftling)이라고 한다.

도표 13 백금(Pt)과 이리듐(Ir.)을 사용해 수소를 생산하는 PEM 전해조 개략도



출처: WPIC 리서치

알칼리성 전해조(Alkaline electrolyzers, AEL): 가장 오래된 전해조 유형으로 금속 전극이 있는 알칼리성 전해질을 사용하여 물을 수소와 산소로 분리한다. 부식성이 강한 산성 조건의 PEM 전해조와 달리, 알칼리성 환경의 AEL 전해조는 비교적 저렴한 비귀금속으로 전극을 만들 수 있으며, 따라서 PEM에 비해 설비 투자를 낮추는 데 도움이 된다. 산소가 생성되는 양극은 일반적으로 니켈 코팅 스테인리스 스틸이고, 수소가 생성되는 음극은 활성 니켈 합금으로 일반적으로는 황화니켈, 니켈-몰리브덴 또는 니켈-주석 혼합물이다. 또한 AEL은 다공성 멤브레인을 사용하여 수소와 산소를 분리한다는 점이 주요 차이점이다. 이 분리막은 공정 비용은 저렴하지만 일부 가스가 장벽을 통과할 수 있기 때문에 재생 에너지원과 결합할 경우 성능 문제가 발생할 수 있다.

백금은 과전위가 낮기 때문에 알칼라인 전해조에서 수소 발생 반응에 우수한 촉매이지만, 비용 대비 성능을 고려해 니켈 합금이 선택되는 경우가 많다. 한 가지 단점은 니켈 합금의 경우 전해조가 시작-정지 작동에 노출될 때 성능이 저하되는 열화 현상이 증가하기 쉽다는 것이다. 이로 인해 시간이 지남에 따라 수소 전환 효율이 감소하게 된다. 일부 제조업체에서는 고성능 알칼리성 전해조에 백금 촉매를 사용해 전류 밀도와 수명을 늘리는 등 성능을 향상시키기 시작했다.

음이온교환막(Anionic exchange membrane, AEM): PEM과 유사하게 작동하는 더 새로운 알칼리성 기술이다. 이 시스템은 PEM처럼 비다공성 멤브레인을 활용하고 더 높은 압력에서 작동하도록 설계되었다. 그 목적은 가동 중단과 유지보수 증가를 초래하는 크로스오버 손실을 제거하는 것이다. PEM과 마찬가지로 AEM은 전해질을 사용하지 않으므로 부식성 누출과 관련된 환경 물질 취급 문제를 제거한다. 이렇게 설계를 변경하면 크기와 무게도 줄어든다.

전극을 저가의 전이금속(철, 니켈, 코발트)으로 만들기 때문에 PEM 대비 비용적 이점이 있지만 일부 제조업체에서는 성능을 높이기 위해 소량의 백금을 포함시키고 있다. 또한 상용화되기 전에 극복해야 할 기술적 과제가 남아있는데, 첫째로, 음이온 전도도가 PEM에서 사용되는 양이온 전도도보다 훨씬 낮아서 수소와 산소 생산율에 영향을 미친다는 점이다. 둘째로는 멤브레인의 내구성이 더 낮아서 스택 수명에 영향을 미친다. 이러한 문제는 시간이 지남에 따라 개선될 가능성이 높으며 상용 유닛이 출시되어 확장되고 있다.

고체 산화물(Solid Oxide): 고체 산화물은 유망한 초기 단계의 전해조 기술로 부상하고 있다. 500~850 도 사이의 고온에서 작동하여 열로 물을 분리하며, 약 90%의 효율을 달성한다. 이에 비해 AEL과 PEM은 현재 60~80%의 효율을 달성하고 있다.

고체 산화물 전해조는 잠재력에도 불구하고 현재 사용 가능한 기술 중 가장 가본 비용이 많이 들고 혹독한 고온의 작동 조건으로 인해 내부 구성품의 성능이 저하되어 상당한 유지보수 비용이 발생한다. 고온 전기분해의 경우 가열에 전원이 사용되면 실현 가능성이 낮아진다. 그러나 폐열을 제공하는 산업 공정과 통합되면, 추가 투입해야 할 에너지가 크게 감소하여 화석 연료 기반 화석 수소와 비교할 때, 수소 생산 1kg 당 가장 낮은 전기 투입 비용을 제공하게 된다.

특히 유명한 응용 분야는 고체산화물 전해전지(Solid Oxide Electrolysis Cells, SOEC)를 원자력과 결합해 핑크 수소를 생산하는 것이다. 저비용, 저탄소배출의 원자력 전기와 폐열을 결합한 이 혁신적인 기술은 녹색 수소에 비해 저렴한 비용으로 수소를 생산할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 또한 SOEC 통합은 폐열을 쉽게 얻을 수 있는 철강이나 암모니아 생산 같은 산업에서 유리한 것으로 입증되었다.

도표 14 전기분해 기술 관련 요약.

	알칼리성	PEM	SOE	AEM
전해질	수산화 칼륨 용액	과불화술폰산 이오노머 멤브레인 (예. 나피온(Nafion))	이트리아 안정화 지르코니아 (YSZ)	음이온 교환 이오노머
음극	니켈, 니켈-몰리브덴 합금	백금, 백금-팔라듐 합금	니켈/YSZ	니켈 및 니켈 합금, 백금
양극	니켈, 니켈-코발트 합금	산화 이리듐, 산화 루테튬	YSZ	니켈, 철 코발트 산화물
작동 온도	60 - 80	50-80	500-850	50-60
작동 압력	30	70	1-25	1-30
스택 수명 (시간)	6 만-8 만	6 만-8 만	1 만 미만	
기술 준비성	성숙	상용화	시운전	대형 프로토타입
자본 비용	USD 500-1400/KW	USD 1000-1800/KW	USD 2800-5600/KW	

출처: 에너지파이낸스센터(Centre for Energy Finance), WPIC 리서치

전기분해 심층분석: 알칼리성 vs PEM

2023 년에 전 세계에 설치된 전해조 용량은 1GW 를 넘어섰고, 발표된 프로젝트에 따르면 2030 년까지 250GW 를 넘어설 것으로 예상된다. 현재는 유럽과 중국이 개발을 주도하고 있지만 미국 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act, IRA)의 영향으로 현재 발표된 프로젝트에 나타난 총 설치 용량에서 더 큰 비중을 차지하면서 판도에 변화가 생길 수 있다. 단, 인플레이션 감축법은 미국에서 정치적 반대에 직면해 있으며, 도널드 트럼프가 2024 년 대선에서 승리할 경우 폐지될 위험이 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

발표된 프로젝트의 실현 여부는 매우 불확실하다. 2030 년 이전 납품 목표를 발표했던 전체 프로젝트 중 착공은커녕 최종투자결정(final investment decision, 이하 FID)에라도 도달한 프로젝트가 20% 미만에 불과하다. 명판 시운전까지 6 년이 남은 많은 프로젝트 관련 이런 이 드문 일은 아니다. 희망적인 것은 50%가 타당성 조사를 완료해서, 2022 년 대비 계획 및 발표된 프로젝트에 대한 약정 자본이 74% 증가했다는 점이다. 모든 프로젝트가 시공되지는 않겠지만, 모멘텀이 형성되고 있다. 지역 정책이 성숙해짐에 따라 발표와 FID 가 증가할 것이다.

알칼리성 전해조와 PEM 전해조는 전 세계적으로 상용화되어 있으며, 2030 년까지 공개된 용량의 거의 95%를 차지한다. 백금 촉매가 알칼리성 전해조에 사용되기 시작했지만, 그 사용 규모는 아직 알려지지 않았고, 현재 대부분의 가정으로는 백금 수요에 직접 기여하는 것이 오르지 또는 주로 PEM 이라고 하므로 기술 분할에 대한 이해가 중요하다. 기술 전망에 대한 본 협회의 견해를 설명하기에 앞서, 전해조 선택에 영향을 미치는 요인들에 대한 고급과정 개요를 제공하고자 한다.

전기분해 선택의 동인

생산업체들은 전략적으로 투자수익을 극대화하는 전해조 기술을 선택한다. 최저 수소 비용의 결정에는 주로 재생 가능한 전기와 같은 운영 비용과 수소 생산량에 대한 연간 자본 상환액 합산이 관련되어 있다. 프로젝트 입지의 에너지 비용이 동일하다고 가정할 때 수소 생산 비용을 최소화하는 데는 설비투자, 운영 비용, 활용도라는 세 가지 변수가 있으며, 각 기술이 갖는 서로 다른 장단점을 다음 섹션에서 살펴볼 것이다. 일반적으로 PEM 은 AEL 보다 설비투자 비용이 더 높지만(도표 15), 더 낮은 유지보수 비용과 높은 활용률 등 운영 중 기술적 측면을 고려하면 운영 비용과 단가가 낮춰져 균형이 맞춰진다.

자본 비용의 동인

새로운 기술이 등장하면 초기 비용이 많이 드는 경향이 있다. 그러나 규모의 경제, 수량의 경제, 혁신이라는 세 가지 핵심 방안을 통해 자본 비용을 절감할 수 있다.

규모의 경제: 운영 규모를 확장하면 상당한 비용적 이점을 얻을 수 있다. 공장이나 프로젝트 규모가 커질수록, 고정 비용을 더 큰 생산량에 분산할 수 있고 대량 구매력과 건설 및 엔지니어링 부문의 시너지 효과를 통해 비용을 절감할 수 있다. 예를 들어 화학 산업에서는 공장이 10 배 더 커질 때 자본 비용은 5 배 커질 뿐이다. 전해조 프로젝트가 대형화될수록 단위 용량당 자본 비용은 감소할 것으로 예상된다.

수량의 경제: '수량의 경제'란 제조 자동화와 공급망 최적화로 동일 제품을 많이 생산할수록 비용이 절감되는 현상을 말한다.

혁신: 비용 절감의 세 번째 동인으로 작용하는 것은 혁신이다. 여기에는 성능을 향상시키고 수소 생산 비용을 낮추는 기반 기술의 발전뿐만 아니라 제조 설계 및 규모와 수량의 경제 활용 면에서의 향상이 포함된다.

이런 개념들을 통합함으로써 지속적인 연구 개발을 통해 기술을 개선하고, 산업 확장을 통해 규모를 늘리고, 대규모 프로젝트를 구축하여 비용을 절감할 수 있다. 이러한 반복적인 과정을 학습 곡선이라고 한다.

다시 기술 선택의 문제로 돌아와서, 알칼리성 전기분해는 PEM(양성자교환막) 시스템에 비해 학습 곡선에 따라 더 성숙된 기술이다. 이러한 성숙도는 더 높은 수준으로 내재된 혁신과 더 큰 규모의 프로젝트를 수행할 수 있는 능력으로 이어진다. 일반적으로 단일 알칼리성 스택은 이제 10MW 까지 확장할 수 있는 반면, PEM은 5MW 까지 확장할 수 있으며, 평균적으로 알칼리성 시스템 구축 비용은 PEM 시스템의 약 절반 정도이다 (도표 15).

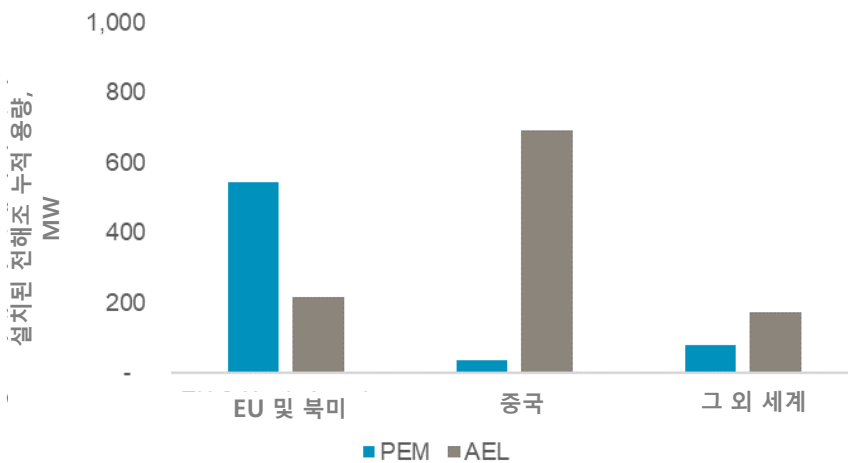
이러한 비용 격차는 지역적으로 볼 때 더욱 두드러진다. 알칼리성 제조가 크게 발전한 중국의 경우, 전해조는 전 세계 평균에 비해 60% 할인된 가격으로 조달 가능하다. (단, 운영 안정성, 출력 및 운영비 측면에서 불이익이 있을 수도 있다.) 반대로 PEM 시스템은 중국 내에서 약 3 배의 비용이 발생한다 (도표 15). 이러한 극명한 대조는 2023년 말까지 PEM 대비 전 세계 설치 용량의 65%에 달하는 시장 점유율을 차지한 AEL 전기분해의 초기 우위를 뒷받침한다.

도표 15 전기분해 기술에 대한 기술 요약.

2022 미설치 장비 비용 (\$/ Kw)			
	글로벌 평균	중국 평균	델타
PEM	1,000	630	-0.4x
AEL	500	210	-0.6x
델타	2.0x	3.0x	

출처: 미국 에너지국(U.S. Department of Energy, DOE), CEDC, WPIC 리서치

도표 16 AEL은 중국 및 기타 지역에서 지배적인 기술로, (2023년) 시장 점유율이 65%에 이르렀다. 유럽 및 북미에서 더 인기가 높은 것은 PEM이다.



출처: IEA, WPIC 리서치

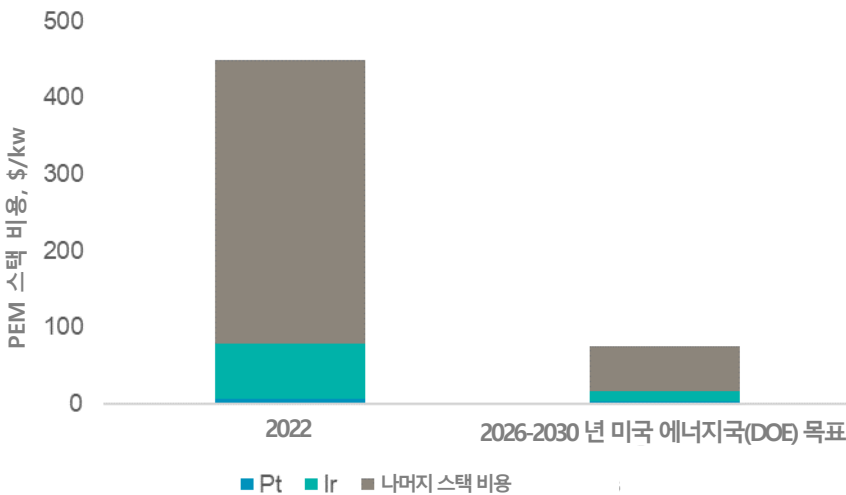
PEM은 AEL에 비해서 혁신이 덜 내재되어 있고 덜 발전했지만, 이는 비용을 절감할 수 있는 향후 혁신의 여지가 많다는 의미이기도 하다. 학습 곡선은 단기간에 큰 절감 효과가 발생하는 가파른 기울기로 시작했다가, 점차 많은 이익을 달성하기 어려워지면서 완만해진다. 초창기 태양광 설치 비용은 매우 비쌌지만 10년이 지나면서 비용이 90% 감소했다. PEM에서 이 정도 규모의 비용 절감은 달성하기 어려울 수도 있지만, 태양광 혁신은 분명 유사한 예가 된다. 알칼리인 기술이 100년 동안 사용되어 왔고, 곡선을 따라 더 앞서 있기 때문에 비용 절감 가능성은 높지만 PEM 비용이 훨씬 더 빠르게 떨어질 것으로 예측된다. 많은 기술 평론가들은 PEM과 AEL의 비용 평준화가 2030년경에야 중국 이외 지역에서 가능할 것으로 전망하고 있다.

귀금속 절감을 포함할 수 있는 촉매의 발전적 개선과 함께 제조 자동화 같은 쉬운 과제를 달성해 PEM 비용 절감을 이끌어낼 수 있을 것이다. 한 엔지니어링 컨설팅 업체(우드그룹, Wood Group)는 최근 수소 컨퍼런스에서 현재 PEM 스택 제조에서 수작업의 비율이 높다고

밝혔다. 스택 하나를 조립하기 위해서는 풀타임 인력 2 명이 이들을 작업해야 하지만, 자동화된 생산라인에서는 2.5 시간만에 제품을 만들어낼 수 있으므로 분명히 이점이다.

귀금속(백금과 이리듐)이 현재 PEM 전해조 스택 설계의 재료비 중 약 15%를 차지한다. 촉매지지체 설계가 성숙해지면서 촉매의 수명과 효율을 더 연장시키는 동시에 금속 함량은 최소화하는 방향으로 절감이 발생할 가능성이 높다. 이리듐은 2030년까지 80%의 절감이 예상되는데, 최근 백금에 비해 (약 4 배의) 높은 가격에 거래되고 있으며 귀금속 재료 비용의 많은 부분을 차지하고 있기 때문이다. 백금 탑재량도 감소할 것이지만 그래도 더 느리게 진행될 것이다. 성숙도를 감안할 때 이미 높은 수준의 절감을 경험한 상태에서, 촉매 연구개발은 고비용의 이리듐에 집중될 것으로 예상된다. 여기에서 중요한 점은 백금이 아니라 이리듐이 PEM 에 사용되는 귀금속 촉매 관련 주요 비용에 해당한다는 것을 이해하는 것이다.

도표 17 자본 비용을 낮추는데 도움이 되는 이리듐 절감(thrifting). 현재 백금은 낮은 가격으로 인해 적극적으로 절감하려는 동기가 약하다.



출처: 헤레우스(Heraeus), DOE, 존슨 매트(Johnson Matthey), WPIC 리서치

마지막으로 혁신은 전해조 성능 향상에 중추적인 역할을 할 것이다. 도표 18에서 볼 수 있듯이 미국에너지국은 2030년까지 PEM(양성자교환막) 기술의 발전으로 알칼리성 기술의 비용과 수명을 맞출 수 있을 것으로 전망하고 있다. 결정적으로 PEM 시스템은 우수한 성능을 제공하면서도 비용 평준화를 달성할 준비가 되어 있다.

PEM 전해조는 알칼리성 전해조에 비해 더 높은 효율과 더 높은 전력 밀도를 달성하는 것을 목표로 한다. 이는 PEM 전해조가 더 적은 전기로 더 많은 양의 수소를 생산할 수 있고, 더 작은 공간을 차지할 뿐이라는 뜻이 된다. 이러한 장점들은 공간 제약이 많고 효율성이 가장 중요한 해양 및 도시 환경에서 특히 유용하다.

도표 18 미국 에너지국이 2030년까지 알칼리성 전해조와 비용 및 성능 동등성을 목표로 하고 있는 2030년 미국 PEM 및 알칼리성 성능 목표

특징	단위	알칼리성		PEM	
		2022년	2030년	2022년	2030년
성능	A/cm ²	0.5	2	2	3
효율성	kwh/kg H ₂	51	45	51	43
수명	운영 시간	60,000	80,000	40,000	80,000
자본비용 (스택)	\$/kw	250	50	450	50
시스템 비용	\$/kw	500	150	1,000	150

출처: DOE, WPIC 리서치

운영 비용 동인 및 재생 에너지 호환성

다음으로 두 기술과 재생 에너지원과의 호환성을 고려해 보고자 한다. 현재 PEM 과 AEL 모두 녹색 수소 생산에 활용되고 있다. 하지만 주목할 점은 어떤 종류의 재생 에너지를 쓰느냐에 따라 수소 생산과 운영 비용 측면에서 두 기술의 성능이 크게 달라질 수 있다는 것이다. 알칼리성 전해조는 일정한 전력으로 작동하도록 설계된 반면, PEM 은 더 큰 유연성을 허용할 수 있다. 이러한 차이는 시스템 설계에 내재되어 있다.

바람이 불지 않는다거나 구름이 태양을 가려 재생 가능한 전력이 간헐적으로 공급되면 전해조와 직접 결합되어 사용할 수 있는 전력이 감소하는데, 이를 부분 부하 운전 상태라고 한다. 알칼리성 전해조는 수소와 산소 스트림의 혼합을 제한하지만 완전히 막지는 않는 다공성 멤브레인을 사용한다. 부분 부하 조건이 되면 이러한 혼합이 증가하여 가스 농도가 4% (예. 산소 96%, 수소 4%)를 초과해 연소 또는 폭발의 위험이 높아진다. 이러한 위험을 완화하기 위해 전해조 시스템은 4% 미만의 안전계수에서 가동중단을 시작한다. 이는 일반적으로 전력이 정격 용량의 25~30% 이하로 떨어지면 수소 생산이 중단되는 것을 의미한다. 이로써 다음과 같은 두 가지 문제가 생긴다.

- **재시작 시간 연장:** PEM 에 비해 알칼리성 전해조는 재시작에 더 많은 시간이 필요하기 때문에, 전원을 정격 출력의 25% 수준으로 복원하는 데 필요한 시간 그 이상으로 가동중단 시간이 길어진다. (PEM 에 비해 약 +30 분.)
- **전극 노후화:** 알칼리성 전해조의 잦은 가동중단 및 재시작은 전극의 노후화를 가속화하여 장비 수명을 단축하고 유지보수 및 자본 비용을 증가시킨다. 예를 들어, 알칼리성 전해조에 사용되는 니켈 전극은 5,000~10,000 회의 시작/정지 주기 후에 상당한 성능 저하를 보인다.

재생 에너지원 사용시 이러한 요소들의 조합으로 주어진 시간 내에 알칼리성 전해조에서 생산되는 수소의 양이 PEM 전해조의 경우에 비해 실질적으로 줄어들게 된다. 이는 결과적으로 생산되는 수소의 kg 당 총비용을 증가시킨다.

이 문제는 배터리 같은 중간 에너지 저장 장치를 통해 전력 변동을 흡수하거나 고급 전해조 스택 시스템 관리를 쓰는 등의 솔루션을 통합하여 완화시킬 수 있다. 하지만 두 가지 접근법 모두 추가 비용과 한계가 있다. 또 다른 방법은 일정한 부하를 유지할 수 있도록 전해조를 그리드에 연결하여 재생 가능한 전기 공급과의 균형을 맞추는 것인데, 이는 그리드 전력원에 따른 (재생가능/녹색, 화석연료/회색처럼) 수소 제품의 정의에 영향을 미치고 보조금 자격에도 영향을 줄 수 있다. 이 방법은 중국 같은 국가에서는 인기가 있지만 엄격한 정책이 적용되는 서구에서는 널리 적용되지 않을 수 있다.

이에 비해 재생 에너지원과의 호환성은 양성자교환막(PEM) 기술의 두드러진 특징이다. 0~10%까지의 낮은 부분 부하 수준에서도 작동할 수 있기 때문에 재생 에너지와 직접 결합할 수 있다. 이는 부하가 10%로 떨어지기 전까지는 가동중단 없이 작동이 가능하다는 것이고, 시스템 설계에 따라서는 아예 가동중단을 하지 않을 수도 있다는 것이다. PEM 시스템은 다른 전기분해 시스템에 비해 부하 증가 및 재가동에 더 빠르게 반응한다. PEM 은 초기 비용이 더 높을 수 있지만, 시스템적인 장점과 잠재적인 운영 비용 절감으로 균형이 맞춰질 수 있다.

정책적 동인

중국 외 지역에서는 태양광과 풍력 등 변동이 심한 전원에 유연하게 대응할 수 있는 PEM 을 선호하는 업체들이 많다. 미국과 EU 에서 정책이 성숙해짐에 따라 전해조는 직접적으로 또는 전력 구매 계약(Power Purchase Agreement, 이하 PPA)을 통해 가상으로 재생 에너지 프로젝트에 연계되어야 할 것으로 보인다. EU 재생에너지 지침(EU Renewable Energy Directive)에서는 2023 년 재생 수소를 생성하기 위해 전기분해를 활용하는 것과 관련하여 엄격한 추가성(additionality) 및 시간적 상관관계 규정을 정했고, 미국에서도 비슷한 법안(세액공제규정 45V)이 초안 작성 중이다. 이런 규정들을 충족시켜야 수소 제품을

재생가능 또는 녹색 수소로 분류할 수 있다. 이는 결과적으로 세금, 보조금, 그리고 잠재적으로 생산된 수소의 최종 시장과 가격에 다음과 같이 영향을 미친다.

추가성: 기존 그리드 믹스 사용 또는 '추가' 재생 에너지 건설 요건. EU에서는 2027년까지 전해조보다 3년 이상 먼저 건설된 재생에너지 프로젝트에서 전력을 공급받아야 한다.

시간적 상관관계: 수소 생산에 사용되는 전기는 PPA에 따라 재생에너지를 주입한 지 1시간 이내에 공급되어야 한다.

즉, EU에서는 2027년부터 전해조에 전력을 공급하는 데 사용되는 전기를 두 가지 방식으로 공급해야 한다는 것인데, 첫째는 재생에너지 공급원에 직접 연결된 전용 전력을 쓰는 것이고, 둘째는 PPA에 연결된 그리드를 통해 신재생에너지로 전력을 공급하는 것이다. 이중 두 번째 방법을 선택할 경우 재생에너지원이 작동하는 동안에만 그리드의 전력을 활용해야 한다는 것이며, 이는 사실상 직접 결합된 전해조이다. 결과적으로 그리드에 연결된 전해조까지도 에너지 변동과 부분부하를 겪게 된다.

시간적 상관관계의 경우, 기본 재생 자산에서 생산되는 전력 생산에 신속하게 대응할 수 있는 유연한 전해조에 적합하며, 백금 함유 PEM 전기분해가 선호된다. 반응형 전해조는 AEL에 비해 공급 전력의 변동을 면밀히 추적하여 활용도를 높이는 동시에 운영 시나리오에서 유지보수를 위한 가동 중단 시간을 잠재적으로 줄일 수 있다. 또한 시동 시간이 빨라서 다른 전원으로부터 운영 시간을 늘리는 옵션을 용이하게 한다. 이는 제한된 그리드 전력을 활용하여 이루어질 수 있게 되거나 그리드 운영자들에게 주파수 억제 예비력(frequency containment reserve) 제공을 가능하게 한다. 제어 예비 계약(control reserve agreement)에 따라 그리드 운영자는 그리드 안정화를 위해 전력 잉여 및 수요 저조 기간 동안 작동하고 전력을 사용한 전해조 운영자에게 보상한다. 이런 계약과 함께 활용도가 향상되면 프로젝트 순현재가치(NPV)가 증가하여 AEL의 초기 자본 투자의 이점을 잠재적으로 상쇄할 수 있다. 또한 2024년에 수소 은행을 통해 생산된 수소 1kg 당 최대 4.5 유로의 보조금이 지급될 것으로 예상되어, 수소 생산 및 활용도 증가의 이점이 더욱 증폭될 것으로 보인다.

중국 외 지역에서의 비-PEM 전해조는 주로 알칼리성 전해조를 일정하게 운영할 수 있는 지역과 프로젝트로 구성될 것이다. 재생에너지가 풍부한 그리드가 있거나 저탄소 원자력 구역이 있는 국가 및 지역은 그리드에서 직접 전해조로 전력을 공급하여 저탄소 수소를 생산할 수 있다. 또한 수력과 지열 같은 일부 재생 에너지원 또는 보완적인 재생 에너지원의 혼합으로 전력을 보다 일정하게 공급하기 때문에 알칼리성 기술에 적합할 수 있다. 일관된 전력이 공급되고 공간 제약이 없는 경우, 알칼리성 기술은 현재 비용 효율적인 수소 생산을 위해 선호되는 선택지이다.

모든 힘을 합치다 - 동서양 트렌드

지역에 따른 전해조 배치 추세는 이미 뚜렷하게 나타나고 있어서 (도표 19) 중국을 비롯한 아프리카, 남미, 호주 등의 지역에서는 알칼리라인이 우세한 반면, 유럽과 북미에서는 PEM이 더 큰 시장 점유율을 차지하고 있다. 이러한 지역별 선호도는 지속될 것으로 예상되며, 알칼리성이 우위를 유지하겠지만 2030년까지는 PEM이 전 세계 시장 점유율 38%를 차지하기에 이를 것으로 전망된다 (도표 17).

2030년까지는 전 세계 전해조 용량의 3분의 1 이상이 중국에 설치될 것으로 예상되며, PEM 대비 자본이 덜 드는 데 힘입은 알칼리성 기술이 시장 점유율의 90~95%를 유지할 것으로 보인다. 한편 북미와 유럽에서는 엄격한 재생 수소 정책과 소형 설치 공간 및 장기적인 확장에 유리한 측면에 힘입어 PEM 기술이 성장할 것으로 예상된다.

도표 19 2023 년 PEM 과 알칼리성 전기분해의 지역별 분할

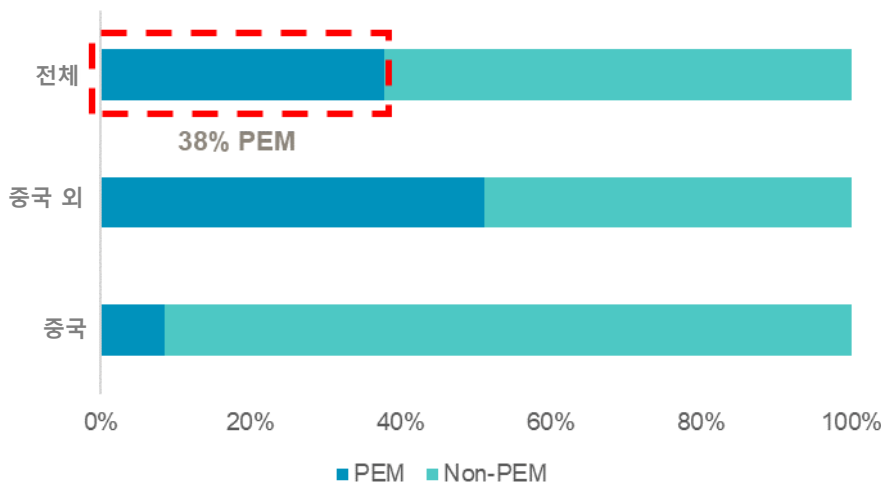
	PEM	ALK
미국 & EU	70%	30%
중국	5%	95%
기타 국가	30%	70%

출처: IEA, WPIC 리서치

요즘 PEM 을 선택하면 비용은 더 많이 들지만 전략적 가치는 높일 수 있다. 프로젝트 수명이 수십 년인 전력 설비를 고려할 때, 현재로서는 PEM 의 운영 비용이 더 높을 수 있다. 그러나 10~15 년마다 전해조 스택을 교체하는 차세대 전해조는 성능이 향상되고, 재생 에너지 활용도가 높아지며, 서구 국가들의 경우 비용도 비슷해질 것으로 예상된다. 동일한 부지면적에서 후속 교체가 이루어질 경우 알칼리성 기술에 비해 훨씬 더 큰 용량의 프로젝트를 설치할 수 있어서 수소 생산량과 수익의 확장성이 커질 수 있다.

재생 에너지 프로젝트의 가용성 증가와 비수기 때 재생에너지 잉여 전력의 증가를 고려할 때, 오늘날 PEM 기술에 투자하는 것은 경험을 쌓고 장기적인 전략적 가치를 실현할 수 있는 기회를 제공하는 일이다. 이런 전략적 전망으로 인해 PEM 은 지속가능한 성장과 유연성을 목표로 하는 미래 지향적인 에너지 프로젝트를 위한 강력한 선택지로 자리매김하고 있다. 업계는 빠르게 진화하고 있으며 기술 선택은 혁신과 확장이라는 요소에 따라 크게 좌우된다.

도표 20 알칼리성은 낮은 설비투자로 인해 지배적인 시장 점유율을 유지할 것이다. PEM 의 시장 점유율은 재생에너지와 직접 연결되는 지역에서 높아질 것이다.

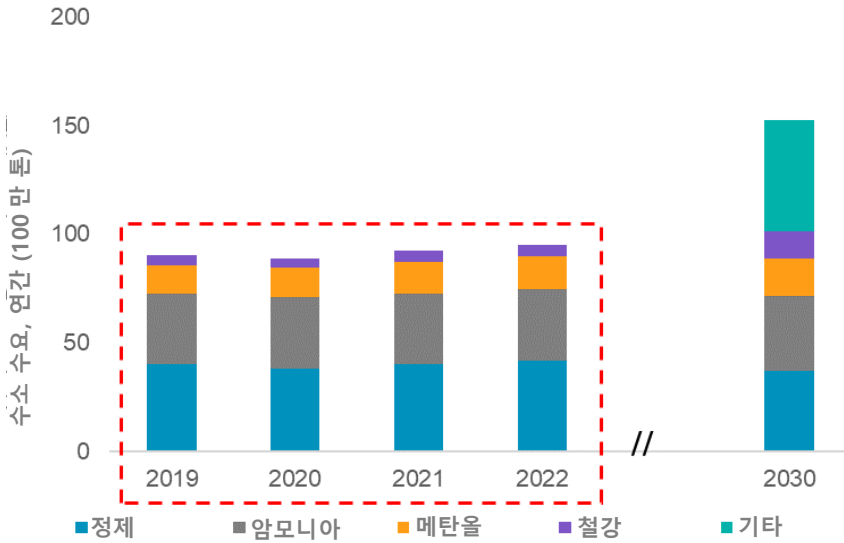


출처: IEA, 오렌지그룹(The Orange Group), WPIC 리서치

수소는 어디에 사용되는가?

수소 수요는 전통적인 용도와 미래 용도로 나누어 볼 수 있다. 전통적인 수소 시장은 화학 연료 사용의 부산물로 현장에서 생산된 수소를 사용하며, 석유화학 또는 농업용 파생물을 생산하는 데 활용한다. 현재 수요량 95 Mt 는 주로 회색 수소 생산으로 충족되며 실제로 수소 자체를 원료로 필요로 하는 용도는 대부분 감소시키기 어렵다. (암모니아 및 정유 같은) 전통적인 수요 부문은 2030 년까지 제자리걸음을 하겠지만, (FCEV 나 DRI 철강 같은) 새로운 수요 부문이 CAGR 37%로 추가 수요 증가분의 대부분을 뒷받침할 것이다 (도표 21).

도표 21 화학 및 석유화학 생산에서 수소에 대한 전통적인 수요는 2019년 이후 제자리걸음을 하고 있다.



출처: IEA

전통적인 수소의 용도

석유 정제:

수소는 석유 정제 공정에서 수소화 반응의 반응물질, 촉매 및 운반체로 중요한 역할을 한다. 이렇게 사용된 수소로 인해 성능 특성이 개선된 더 깨끗한 연료를 생산함으로써 규제 요건과 고품질 정제 제품에 대한 시장 수요를 충족할 수 있다. 석유 정제에서 수소의 주요 용도는 다음과 같다.

수소첨가분해(Hydrocracking): 수소화분해 반응에서 수소가 촉매 역할을 하여 장쇄 탄화수소를 가솔린, 디젤, 제트 연료와 같은 더 작은 분자로 전환하는 것을 촉진한다.

수소 처리(Hydrotreating): 수소화탈황(hydrodesulfurization, HDS)이라고도 하는 수소처리 공정은 석유 분획물에서 유황, 질소 및 기타 불순물들을 제거하는 데 사용된다.

접촉 개질(Catalytic Reforming): 접촉 개질은 저옥탄가 나프타 분획을 고옥탄가 휘발유로 변화시키는 데 사용되는 공정이다.

수소화(Hydrogenation): 수소화 반응은 올레핀과 디올레핀과 같은 불포화 화합물을 파라핀과 같은 보다 안정적이고 가치있는 제품으로 전환하는 데 사용할 수 있다.

이성질체화(Isomerisation): 수소는 이성질화 반응에서 반응물로 사용되어 분자 구조의 재배열을 촉진하고 휘발유의 품질을 향상시킨다.

화학 제품 생산

암모니아 생산은 두 번째로 큰 전통적 수소 수요 분야이다. 암모니아는 중요한 화학적 구성 단위로 특히 농업용 비료에 필수적이다. 암모니아는 주로 하버-보쉬 공정(Haber-Bosch process)으로 생산되는데, 질소(N₂)와 수소(H₂)가 고압, 고온의 조건에서 반응하게 하는 방법이 연관되어 있다.

암모니아는 또한 에너지 운반체 또는 연료로 직접 활용될 수 있는 많은 가능성을 지니고 있다. 연료 전지 및 내연 기관의 에너지원으로뿐만 아니라 선박을 통한 수소 운송에 대한 적합성을 테스트하는 작업이 진행 중이다.

메탄올은 다양한 산업과 응용 분야에서 필수적인 화학 물질이다. 메탄올은 일반적으로 촉매(일반적으로 구리-아연 산화물)가 있는 상태에서 일산화탄소와 수소를 함께 반응시켜 생산된다.

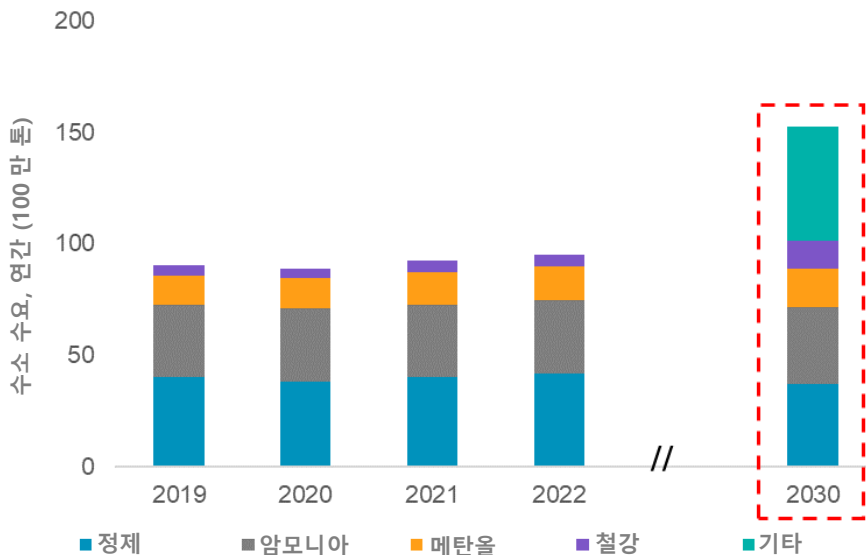
탈탄소화를 위한 수소

탈탄소화에서 수소의 역할은 두 가지이다. 첫째, 위에서 설명한 전통적인 산업에서 회색 수소를 녹색 수소로 교체시키는 것이다. 둘째, 이미 사용 중인 에너지원의 대체 에너지원으로 저탄소 수소를 적용함으로써 환경오염 산업을 탈탄소화한다는 근본적인 목적으로 새로운 수요를 창출할 수 있다.

이에 대해서는 나중에 자세히 다루겠지만, 잠시 간단히 말해두자면 오늘날 전통적인 최종 용도로 사용되는 95Mt의 회색 수소를 탈탄소화하면 430Mt의 CO₂ 배출을 줄일 수 있으며, 이는 1년 동안 도로에서 1억 2천만 대의 자동차를 빼내는 것과 맞먹는 효과이다.

또한, 새로운 수요가 실행 가능하려면 두 가지 조건을 충족해야 한다. 첫째는 애플리케이션의 CO₂ 배출 강도를 줄여야 한다. 둘째는 수소가 제공하는 솔루션이 현재 사용하기에, 그리고 규모와 상용화를 위한 대안에 비해 경제적으로 경쟁력이 있어야 한다. 새로운 수소 애플리케이션을 정량적으로 평가하는 데 도움이 되는 하나의 방법론이 '수소 사다리'(hydrogen ladder)이다.

도표 22 FCEV나 전기 연료(e-fuel) 생산 같은 새로운 수요가 연간 수소 수요 약 50%의 증가를 이끌어낼 것이다.



출처: IEA

수소 사다리(Hydrogen Ladder)

수소 사다리 방법론은 탈탄소화 노력의 일환으로 수소가 기술적으로 활용될 수 있는 애플리케이션을 보여준다. 이 사다리는 기술 채택을 촉진하는 요소와 대안적인 탈탄소화 기술을 고려하여, 2035년까지 수소의 주요 시장 사용자가 될 가능성에 따라 애플리케이션의 순위를 매긴다.

불가피한 것부터 경쟁력이 없는 것까지 위에서부터 아래로 애플리케이션의 순위가 매겨진 것이며, 불가피하다는 것은 사실상 수소가 공정상 투입될 수밖에 없거나 현재로서는 수소를 대체할 기술적 대체물이 없다는 뜻이다. 경쟁력이 없는 단계에서는 수소가 사용될 수 있지만 대체 기술들에 비해 현재 경쟁력이 떨어지는 것이다. 주의할 점은, 수소 사용이 불가피하다고 해서 반드시 수요가 증가하는 것은 아니며 다만 수소 사용이 해당 애플리케이션의 핵심이므로 수소 수요 시나리오를 예측할 때 반드시 고려해야 한다.

도표 23 FCEV 나 전기 연료 생산과 같은 새로운 수요가 약 50%의 점진적인 수요 증가의 동인이 될 것이다.



출처: 마이클 리브라이히(Michael Liebreich)/리브라이히 어소시에이츠(Liebreich Associates)

가장 위 첫 줄(A)은 (암모니아 생산처럼) 오늘날 대체할 수 없는 수소의 주요 기능으로 이루어져 있다. 현재 수소에 대한 수요는 거의 전적으로 화석 연료를 통해 생산되며 전 세계 온실가스 배출량의 약 2%를 차지한다. 이러한 산업이 가장 먼저 탈탄소화될 것이다. 백금은 회색 수소에서 녹색 수소로의 전환이 의무화됨에 따라 백금 함유 전해조가 필요하므로 혜택을 받을 것으로 예상된다.

사다리 아래로 내려오면서, 현재는 수소를 사용하지 않지만 탈탄소화를 위해 수소를 채택할 수 있는 시장(B~G)이 나타난다. 이들은 새로운 수요 부문이다. 항공용으로 녹색 수소와 포집된 탄소가 결합되는 '전기 연료'(e-fuel, 이하 이퓨얼)부터 연료 전지로 구동되는 '자동차'에 이르기까지 다양하다.

이러한 새로운 애플리케이션을 소개하기 전에 새로운 애플리케이션이 백금에 미치는 영향에 대해 잠시 살펴보고자 한다.

틈새 애플리케이션이 높은 백금 수요를 창출한다:

도표 23 에서 빨간색으로 테두리가 쳐진 블록은 연료 전지 및 전해조 사용을 통해 직접적으로 백금에 기여하는 요소들이다. 대부분의 백금 함유 애플리케이션은 "일부 시장 점유율"에서 "일부 지역의 틈새 애플리케이션"을 나타내는 C 부터 G 그룹에 자리하고 있다. 이 점을 이해하는 것이 중요하다. 수소 경제는 전체적인 탈탄소화 노력을 뒷받침하는 다른 기술들과 나란히 자리하고 있으며, 도표 23 에서 강조된 바와 같이 배터리/전기 대체가 가능하다 (노란색).

수소 기술은 배터리 전기차(BEV) 기술에 비해 에너지 효율이 낮기 때문에 주로 고용량, 고효용 사이클 애플리케이션에 적용될 것이라는 점을 인정해야 한다. 배터리가 지나치게 크고 재충전 시간이 비현실적일 경우 수소가 대안이 될 수 있다.

도표 24 FCEV 와 전기연료 생산 같은 새로운 수소 수요 분야가 백금 수요를 약 50% 증가시킬 것이다.

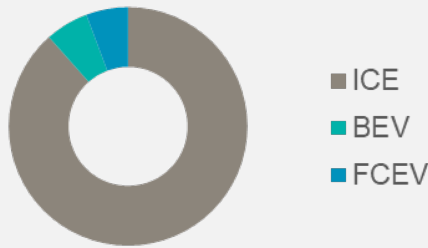
애플리케이션	사용 사례	2030 년 시장점유율	2030 년 백금(Koz)
FCEV 자동차	프리미엄 SUV/ 선도 국가	0.3%	91
FCEV 트럭/밴	레인지 익스텐더/ 냉동냉장 보관	1%	42
FCEV 대형	고활용 사이클	6%	372

출처: 국제자동차제조업자기구(OICA), WPIC 리서치

2030 년까지 소형, 경상용, 대형 FCEV 차가 각각 0.003%, 1%, 6%의 시장 점유율을 차지할 것이라고 본 협회는 예측하고 있다. 이러한 제한적 시장 점유율에도 불구하고 이는 2023 년

ICE 총 백금 수요 약 3,000 koz 에 비해, 2030 년까지 500 koz 이상의 FCEV 부문 예상 백금 수요를 의미한다. 중대형 연료전지 트럭이 2040 년까지 10% 중반대의 시장 점유율을 차지하면서 그 이후로도 성장이 계속될 것으로 보인다.

도표 25 대형 FCEV 의 시장 점유율이 2030 년까지는 6%를 넘어설 것으로 예상된다.



출처: WPIC 리서치

수소 연료 전지

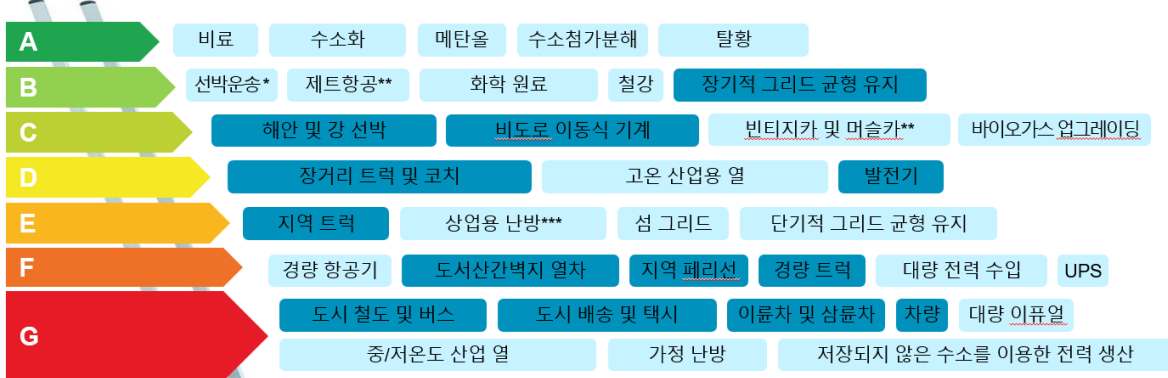
CO₂ 감축이 전 세계적인 의제가 된 가운데, 연료 전지는 백업 전력이나 해양 보조 전력에 사용되는 디젤 발전기를 대체하는 데에서부터 일반 모빌리티 및 화물 애플리케이션에 이르기까지 다양한 애플리케이션에서 탄소 배출 연소를 대체할 수 있다 (도표 26. 진한 파란색으로 강조).

연료 전지는 전기화학 반응을 통해 수소와 산소를 결합시켜 전기를 생산하는 데 수소를 쓰는 장치로, 열과 물만 부산물로 남는다. 연료 전지 기술은 성숙한 기술로 지난 100년 이상 수소를 전기와 물로 변환시켜 왔다.

도표 26 기술적으로 실현 가능한 많은 연료 전지 애플리케이션이 수소 사다리 내에 존재한다 (진한 파란색).

불가피한 것

분류: 연료 전지 애플리케이션 *기타 수소 기술



경쟁력 없는 것

*암모니아 또는 메탄올로 **이퓨얼 또는 전력과 바이오매스 액체 변환으로 ***하이브리드 시스템으로

출처: 마이클 리브라이히/리브라이히 어소시에이츠

연료 전지는 휴대용, 이동형, 고정형 등 다양한 애플리케이션이 있으며 (도표 27), 각각 다른 출력 범위와 연료 전지 유형(아래 참조)이 있다. 백금은 수소와 산소 간의 최적의 반응을 촉진하여 이동식 연료 전지 애플리케이션에서 촉매로서 두각을 나타낸다. 백금은 까다로운 화학적 환경과 높은 전류 밀도를 견딜 수 있는 안정성으로 장기적인 효율성을 보장한다.

모빌리티 영역에서 유망한 분야로는 연료 전지 자동차뿐만 아니라, 철도, 해양 및 이동식 중장비 등의 오프로드 애플리케이션이 있다. 이러한 부문은 상당한 발전 잠재력을 가지고 있으며, 배터리 기술과 함께 전기화하기 힘든 애플리케이션에 연료전지 기술의 채택을 촉진하고 있다.

도표 27 다양한 많은 유형의 연료 전지가 사용 가능하다. 일반적으로 PEM 연료 전지는 모빌리티 애플리케이션에 활용되고, 다른 연료 전지는 고정형 발전에 활용된다.

이름	약어	일반적 용도	산업 분야	작동 온도 °C	전기 효과 (%)	백금 포함 여부
양성자 교환막 연료전지	PEMFC	휴대용, 이동형	도로 운송, 소비자	<120	~55%	그렇다
인산 연료전지	PAFC	고정형	고정형 전력	120-150	~40%	그렇다
알칼리성 연료전지	AFC	고정형, 이동형	고정형 전력	<100	~65%	약간
용융 탄산염 연료전지	MCFC	고정형	고정형 전력	600-700	~55%	아니다
고체 산화물 연료전지	SOFC	고정형	고정형 전력	500-1000	~60%	아니다

출처: WPIC 리서치

자동차 FCEV 애플리케이션

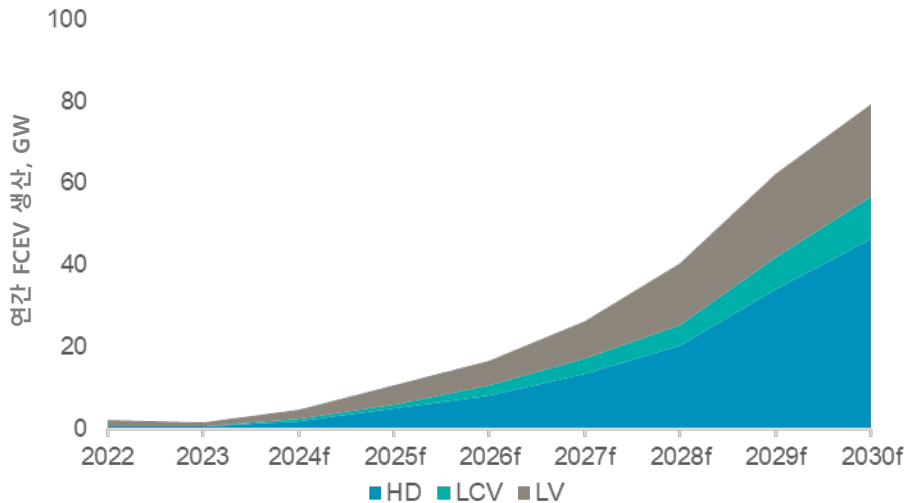
수소연료전지자동차(FCEV)는 배터리전기자동차(BEV) 및 마일드 하이브리드 전기자동차(MHEV) 모두와 유사한 점이 있다. BEV와 마찬가지로 하나 이상의 전기 모터가 원동력을 제공하며, 에너지원은 무거운 대형 배터리팩이 아닌 연료 전지이다. 연료 전지를 구성하는 것은 '스택' 또는 막전극집합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)로, 각 막은 백금이 도포된 음극과 양극 사이에 끼워져 고체 전해질 역할을 한다. 수소 가스는 양극으로 전달되어 백금 촉매와 반응하면서 각 수소 원자가 전자와 양성자로 분리된다. 전자는 추진력을 제공하는 전류로서 음극으로 흘러가고, 양성자는 멤브레인을 가로질러 공기 채널의 산소와 결합하여 음극으로 흐르며, 전자의 흐름으로 인해 순수한 물이 차량의 배출물로 생성된다.

연료전지를 제외하고 FCEV는 일반적으로 BEV에 사용되는 부품과 시스템의 약 80%를 공유한다. FCEV의 경우 주 동력이 ICE가 아닌 전기모터에서 나오지만, MHEV와 마찬가지로 비교적 작은 보조 배터리가 있어서 회생제동 시 에너지를 저장하고 급가속 시에 모터에도 사용될 수 있다. 무엇보다도 FCEV는 '오프그리드(off-grid)로, 충전을 위해 플러그를 꽂을 필요가 없기 때문에 노외 주차장과 가정용 충전기를 이용할 수 없는 도심 지역에서 상당히 유리하다. 또한 FCEV는 (주유시간이 3~5 분인) ICE에 비해 충전 시간이 짧고 주행거리는 더 길면서 총 시스템 무게는 훨씬 가볍다.

현재까지 FCEV 모델은 승용, 경상용, 대형 운송용으로 개발되어왔다. 전 세계적으로 FCEV 규모는 2022년 말까지 약 72,000대에 이르렀고 그 중 승용차가 80%, 경상용차가 1%, 트럭과 버스가 19%를 차지했다. 현재 FCEV는 소규모지만 현대, 토요타, 보쉬 등의 다국적 기업들이 FCEV 제조에 자본을 투입하면서 빠르게 확대될 것으로 예상된다. 본 협회의 [수소 전망](#)에 요약된 상향식 분석에 의하면 제조업체 생산능력 확충에 기반하여 2030년까지 200만 대 이상의 FCEV가 종류대로 다 도로 위를 달릴 수 있을 것으로 보인다.

향후 FCEV의 수요 증가는 특히 단기간에 대형차 부문에서 주로 나타날 것이다 (도표 28). EU에서는 대형 차량이 도로 운송 온실가스(GHG) 배출량의 약 25%를 차지하며, 이는 전 세계 전체와 대체로 비슷한 수준이다. 대형 운송 산업의 변화 필요성과 상업적 특성으로 인해 환경을 생각하는 조직들은 집중된 참여자 그룹을 통해 능률적인 변화를 이끌어낼 수 있다. 이는 승용차 부문에서 소비자 선택에 영향을 미치는 복잡한 풍경과는 다르다.

도표 28 자동차 연료전지 수요는 대형 애플리케이션이 주도할 것이다.



출처: WPIC 리서치

상용차 애플리케이션은 일반적으로 높은 가동률, 장거리 주행 능력, 높은 적재 용량을 필요로 한다. FCEV 와 BEV 의 뚜렷한 특성을 고려할 때, 탈탄소화를 위한 기술 선택은 운송 애플리케이션에 따라 아래와 같이 달라진다.

대형차(Heavy Duty Vehicles, HD): 대형 차량의 연료전지 시스템은 동일한 출력을 내기 위해 필요한 동급 배터리보다 훨씬 가볍다. 미국의 환경단체 클린에어 태스크포스(Clean Air Task Force)에 의하면, 8 등급 크기의 미국 배터리전기차(BEV) 화물 트럭은 디젤 트럭에 비해 적재 용량이 10~20% 감소할 수 있지만, 수소연료전기차(FCEV)의 경우 5% 미만의 손실만 발생한다. 이로 인해 화물 수송 목적의 BEV 에서 필요로 하는 크고 무거운 배터리로 인해 발생하는 용량 및 적재량 손실을 완화할 수 있다. 또한 FCEV 는 일반적으로 500~1,000km 에 이르는 훨씬 더 먼 거리를 이동할 수 있으며, 오프그리드로 빠르게 연료를 충전할 수 있어서 외딴 지역에서 장거리 화물 수송시에 BEV 에 비해 상당한 이점을 제공하고 배터리 충전에 필요한 운행 중단 시간을 최소화할 수 있다.

경상용차(Light Commercial): 연료 전지 애플리케이션도 등장하고 있다. 두 가지가 있는데, 첫 번째는 필요한 전력을 충족시키기 위해서는 배터리 크기가 부적절할 정도로 커지는 냉장 차량의 사례이다. 두 번째는 밴과 경트럭에서 소형 연료전지를 활용해서 BEV 주행거리를 연장시키는 경우이다. 즉, 핵심은 상업용 애플리케이션에서 높은 활용도를 보장하고 손실은 최소화하는 것이다. 또한 상업용 BEV 가 적재 하중이 높을 때 견인 및 주행 거리 문제로 어려움을 겪고 있다는 보고가 있어서 연료전지 시스템에는 도움이 되고 있다. 스텔란티스(Stellantis), 포레시아(Faurecia), 미쉐린(Michelin)의 합작 투자사인 심비오(Symbio)는 이 시스템을 활용하여 2030 년까지 연간 20 만 대의 경상용 FCEV 를 생산하는 것을 목표로 하고 있다.

승용차(Passenger): 현재 상용화된 승용차는 현대 넥쏘(Nexo)와 토요타 미라이(Mirai) 두 가지가 있다. 배터리 기술은 승용차의 경우 연료전지를 대체하는 기술이다. 기술 발전, 충전 가용성 향상, 정부 보조금, 신모델 출시로 인해 BEV 시장 점유율은 2020 년 이후 4 배 증가하여 2023 년에는 12%가 되었다. 소비자들의 반발에도 불구하고 BEV 는 승용차의 탈탄소화를 위해 필요한 경로로 확고히 자리잡은 것으로 보이며, 단기적으로는 FCEV 글로벌 시장 보급률이 완만하게 성장할 것으로 예상된다.



출처: BMW, 현대

장기적으로는 상업용 애플리케이션을 위한 수소 충전 인프라가 개발됨에 따라 승용 수소연료전지차 부문이 틈새 시장으로서 출현하는 것을 생각해 볼 수 있다. 2016 년을 되돌아보면 시장이 얼마나 빠르게 발전하거나 축소될 수 있는지 알 수 있다. 한때 EU 에서 디젤 차량은 경량차 시장에서 50%의 점유율을 차지했다. 하지만 디젤 게이트 사건과 소비심리 위축으로 인해 8 년 후인 2023 년에 이르러서는 점유율이 약 15%로 감소했다. 반대로, 같은 기간에 유럽에서 경량 배터리전기차의 생산 비중은 1%에서 약 25%로 급증했다. 요점은 승용 FCEV 수치가 현재는 낮은 상태에 있지만, 소비자 심리가 크게 변화할 수 있다는 것이다. 수소 충전 네트워크의 구축을 감안하면 승용 FCEV 에는 상승 잠재력이 있을 수 있다. 그러나 이러한 잠재력은 대형 프리미엄 승용차 부문 및 국내 자동차 산업이 발달한 연료전지 선도 국가에 국한될 가능성이 높다.

- 선도 국가들:** 연료전지 제조의 주요 기업들이 본사를 두고 있는 지역, 특히 한국과 일본에서는 승용 수소연료전지차(FCEV)의 지속적인 도입이 예상된다. 이들 선도적 국가들에서 현대 넥쏘와 토요타 미라이 같은 모델들이 생산되고 있는 것이 이를 잘 보여준다. 이런 모멘텀의 원동력은 연료전지 기술력의 가능성을 보여줘야 한다는 전략적 필요성과 정부의 지원에 있다. 이러한 노력에도 불구하고 배터리전기차(BEV)가 현재 비용 면에서 유리하고 더 광범위한 충전 인프라의 혜택을 누리면서 우위를 점하고 있기 때문에, 경량 FCEV 의 시장 보급률은 주변적 상태에 머물 가능성이 높다.
- 프리미엄/SUV:** BMW 나 재규어-랜드로버(Jaguar-Land Rover) 같은 일부 고급차 제조업체에서 대형 고급 스포츠유틸리티 자동차(Sports Utility Vehicle, SUV)를 위한 프로토타입 또는 생산라인 개발 계획을 발표했다. 배터리전기차(BEV)는 수소연료전지차(FCEV)에 비해 에너지 전환 금속에 대한 의존도가 매우 높으며, FCEV 가 전통적인 내연기관(ICE)에 더 가깝다. 매출 감소와 실리콘칩 부족으로 인한 리드타임 장기화 등 최근의 공급망 문제를 고려할 때, 제조업체들은 향후 잠재적인 생산 리스크를 완화하는 데 집중하고 있다. 또 다른 예로 [리튬 공급 부족](#)이 현실화될 경우 BEV 생산 라인 관련 차질이 생길 수 있다. 따라서 BEV 와 FCEV 모델 옵션을 동시에 제공할 수 있는 통합 생산라인을 모색하는 방향으로 눈에 띄게 변화하고 있다.

도표 30 FCEV의 장점과 단점 요약.

애플리케이션	장점	단점
FCEV	<ul style="list-style-type: none"> - 모델 가용성 확대 - 무거운 짐에 이상적 - 높은 탑재 능력 - 확장된 주행 거리 - 짧은 급유 시간 - 탄소 배출량 제로 	<ul style="list-style-type: none"> - 현재 가장 높은 설비투자 - 현재 높은 수소 가격 - 제한된 급유 인프라
BEV	<ul style="list-style-type: none"> - 배기관 탄소 배출량 제로 - 최고의 에너지 효율 - 운영 비용 절감 - 주류 기술 - 광범위한 모델 선택 	<ul style="list-style-type: none"> - ICE 보다 높은 설비투자 - 높은 감가상각 - 충전 인프라 가용성에 대한 의존도 - 배터리 생산 및 폐기 관련 환경 문제
ICE	<ul style="list-style-type: none"> - 광범위한 급유 인프라 - 익숙한 기술 - 긴 주행거리 - 짧은 급유 시간 - 높은 출력 및 성능 	<ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 배출 및 대기 오염 - 전기자동차 대비 높은 운영 비용

출처: WPIC 리서치

연료전지에서 백금 사용을 결정하는 요인은?

ICE 와 마찬가지로 FCEV 부문에서 백금 수요에 영향을 미치는 것은 차량의 유형이다. 연료전지 차량의 백금 함량은 LV, LCV, HDV 각각에 실리는 백금의 양에 영향을 미치는 세 가지 기본 요소와 연관이 있다. 일반적으로 HDV는 승용차보다 4~8 배 더 많은 백금을 함유할 수 있으며 LCV는 그 용도에 따라 달라진다.

- 정격 출력:** 크기나 질량이 더 큰 차량에 동력을 공급하기 위해 더 많은 전위를 생성하려면 일반적으로 연료전지는 H+ 수소 이온을 전도하기 위한 더 큰 막전극접합체(MEA) 표면적을 가져야 한다. MEA가 클수록 이를 코팅할 더 많은 백금이 필요하다. 180 KW 연료전지는 90 KW 연료전지보다 더 많은 백금을 사용하게 된다는 것이다.
- 정격 수명:** PEM 연료전지는 부식성 및 산성 환경이어서 시간이 지날수록 촉매의 기능이 저하되어 연료 전지 성능이 저하되는 결과를 낳는다. 더 까다로운 대형 애플리케이션의 경우, 촉매 열화를 보완하기 위해 KW 당 백금 로딩량을 높여서 더 오랜 기간 동안 지속적으로 정격 출력을 유지하며 사용할 수 있다.
- 차량의 용도 및 구동계:** 기본적으로 정격 출력의 확장이지만, 차량이 클수록 일반적으로 더 높은 정격 출력이 필요하므로 더 많은 백금이 필요하다는 점을 명확히 하는 것이 중요하다. 물론 항상 그런 것은 아니다. 애플리케이션과 구동계는 사용되는 연료전지의 크기에 영향을 주며, 특히 LCV에 적용된다. 일부 수소 밴과 수소 버스는 승용차보다 크지만 BEV 구동계를 사용하고 소형 연료전지를 주행거리 연장 장치로 사용한다. 그 외에도 전기 소모량이 많은 냉장 차량과 같이 크기에 비해 연료 전지가 불균형적으로 큰 경우도 있다.

수소연료전지차(FCEV)는 2030년까지 총 수소 관련 백금 수요의 55% (505 koz)를 차지할 것으로 예상된다. 대형 FCEV 차량의 경우 백금 로딩량이 높으므로, 승용이나 경상용 부문에 비해 도로에 운행되는 대형 FCEV가 많을수록 백금 수요 증가에 상대적으로 더 큰 영향을 미친다. 대형 FCEV가 전체 FCEV 수요의 75%를 차지할 것으로 예측하는 바이다.

비도로용(오프로드) FCEV 애플리케이션 (철도, 해양, 중장비)

대형 운송수단이 FCEV 를 도입해야 하는 이유와 함께, 높은 적재량 관리 및 극한의 연속 사용 시간을 견뎌야 하는 등 BEV 가 직면한 과제가 산업용 애플리케이션에서 더 분명하게 드러나고 있다. 많은 산업 애플리케이션이 이러한 까다로운 조건에서 작동하기 때문에 FCEV 가 유망한 솔루션이 된다. 따라서 철도, 해양, 비도로용 부문에서 FCEV 애플리케이션이 등장할 것으로 예측하고 있다. 연료전지 제조 분야에서 저명한 기업인 발라드(Ballard)의 경우, 이미 이 부문들에 수많은 MW 급 시스템을 구축하여 열악한 환경에서 커져가는 FCEV 의 견인력을 뒷받침하고 있다.

도표 31 FCEV 는 화물 및 토공 같은 애플리케이션에 적합한 고출력을 제공하도록 확장될 수 있다.



출처: 캐나다인 퍼시픽(Canadian Pacific), 앵글로 아메리칸(Anglo American)

철도: 수소 동력 철도는 디젤 기관차에 대한 지속가능한 대안으로 온실가스 배출량과 지역 대기 오염 물질을 크게 줄여준다. 수소 동력 열차는 배터리 구동 열차보다 운행거리가 더 길기 때문에 전기화되지 않은 여객 철도 노선이나 장거리 화물처럼 전기화하기에 어렵거나 비용이 많이 드는 곳에 적합하다. 또한 충전 시간이 기존 디젤 열차와 비슷하게 짧다. 특히 원거리 화물 운송이 특히 필요한 지역으로는 캐나다 및 호주 등이 있다. WPIC 예측으로는 수소 동력 철도로 인해 2030 년까지 5 koz 의 백금 수요 증가가 있을 것으로 보인다.

해양: 수소는 해양 선박의 대체 연료로서 상당한 잠재력을 가지고 있다. 특히 보조 전력을 공급하거나 주 추진 시스템 역할을 하는 면에서 그렇다. 보조 전력이어서 수소 연료전지는 조명, 난방, 보조 기계 구동 등 다양한 선상 작업을 지원함으로써 기존 디젤 발전기에 대한 의존도를 낮추고 따라서 정박 중이거나 유휴 상태인 선박의 탄소배출량을 줄일 수 있다. 또한 수소는 선박용 연료전지 기반 추진 시스템에서 주 동력원으로 사용되거나, 아니면 배터리처럼 다른 동력원과 결합하여 무공해 운행을 실현시켜 줄 수 있다. WPIC 예측으로는 수소 동력 해양 부분이 2030 년까지 24 koz 의 백금 수요 증가를 뒷받침할 것으로 보인다.

비도로(오프로드): 연료전지는 건설, 광업, 농기계 등 비도로 환경에 맞게 충분히 확장될 수 있다. 수소 연료전지의 토크와 동력 전달은 오프로드 기계의 까다로운 요구사항에 적합하여 무거운 물건을 들어 올리거나 굴착 또는 농업 작업에 충분한 동력을 제공하는 동시에 온실가스 배출을 줄이고 이처럼 중요한 부문에서 지속가능성을 높인다. 앵글로 아메리칸(Anglo American)과 포테스큐(Fortescue)는 채취 산업이 탈탄소화를 모색함에 따라 수소 운반 트럭을 도입하고 있다 (도표 31). WPIC에서는 수소로 구동되는 비도로 부분이 2030 년까지 백금 수요 증가분 30 koz 를 뒷받침할 것으로 예상하고 있다.

고정형 FCEV 애플리케이션

고정형 연료전지는 분산형 발전, 백업 발전 및 전력망 안정성을 위한 확장 가능한 저공해 솔루션을 제공하는 동시에 화석 연료에 대한 의존도를 낮춘다. 자세한 내용은 아래와 같다.

마이크로그리드 및 백업 전력: 그리드타이(grid-tied) 또는 오프그리드 시나리오에서 안정적인 전력을 제공하며, 중요 인프라에 중단 없는 전력 공급을 보장한다.

주거 및 상업용: 독립형 전력체계로 또는 열병합 발전(CHP) 설정에서 그리드 전기와 결합하여 가정, 사무실 및 상업용 건물에 전력을 공급한다.

도서산간벽지 및 오프그리드 지역: 중앙집중식 전력망에의 접근이 제한적인 곳에서는 필요한 전력을 해결하는 것이 중요한 과제이다. '수소 섬'(hydrogen islands)이라는 개념은 지속가능성과 신뢰성을 제공하는 통합 솔루션으로 떠오르고 있다. 전해조를 사용해 사용자가 적은 시간대의 재생에너지 전력에서 수소를 생성한 후 향후 보급을 위해 또는 백업 전원으로 저장하는 일이 이 체계에 포함된다. 신뢰할 수 있고 지속가능한 에너지 저장소를 외딴 지역에도 제공함으로써 수소 섬은 에너지 복원력과 자율성을 강화하는 데 기여한다.

산업용 애플리케이션: 다양한 산업 공정에 열과 전력을 공급하여 제조 공정의 효율성 향상과 탄소배출량 감소에 기여한다.

직접환원철(Direct Reduced Iron, DRI) – '그린 철강'(Green Steel)

제철 부문은 주요 이산화탄소 배출원으로, 다수의 논평가들에 의하면 전 세계 이산화탄소 배출량의 10%가 여기에서 발생한다. 전통적으로 철광석은 용광로에서 코크스로 가열된다. 철광석은 주로 적철석(Fe_2O_3) 및 자철석(Fe_3O_4) 같은 산화철로, 제강을 위한 원소 철(Fe)을 얻기 위해서는 환원되어야 한다. 석탄의 탄소는 원소 철에서 환원제 역할을 할 뿐만 아니라 산소와 결합하여 이산화탄소를 생성시키고 방출한다.

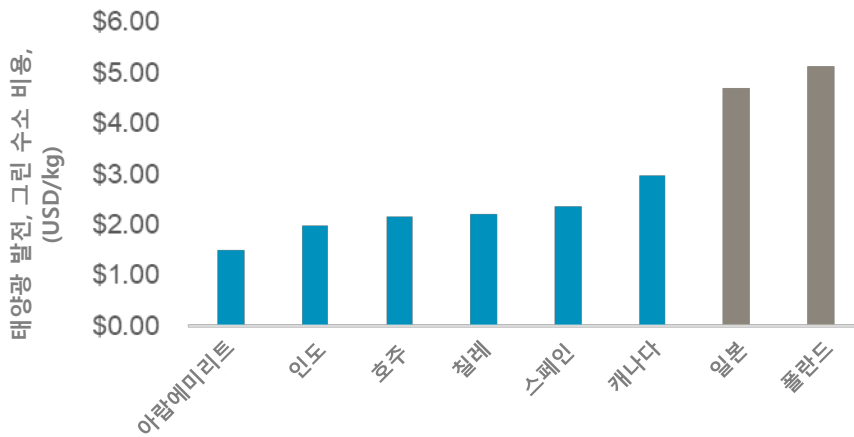
직접환원철(DRI)은 고로에서 철광석을 녹이지 않고 전기와 녹색 수소를 환원제로 사용하여 철광석에서 산소를 제거하는 공정이다. 철광석은 원소 철과 물만 생산하는 고로에서 저탄소 수소를 사용하여 환원된다. 그 후에 철은 (재생 에너지원으로 구동 가능한) 전기 아크로에서 가공되어 전통적인 방식에 비해 탄소 발자국이 줄어든 철강이 생산된다.

플랜트를 가동시키는 재생 에너지와 전해조를 통해 생산된 녹색 수소를 결합시킴으로써 철강 제조업체는 사실상 탄소 중립 기업이 될 수 있다. 스웨덴 최대 철강 생산업체인 LKAB에서는 2050년까지 탄소 중립 달성을 의무화했다.

그린 철강의 가격 경쟁력

현재 친환경 녹색 철강은 고로(용광로) 기반 철강에 비해 가격 경쟁력이 떨어진다. 그러나 탄소세와 수소 가격 하락이 결합되면 역학 관계가 바뀔 것이다. 맥킨지앤드컴퍼니(McKinsey and Company)에 따르면 철강은 다양한 시나리오 하에서 경제성을 확보할 수 있다. 탄소배출권 가격이 60 유로/ton 일 경우, 수소의 가격은 1.2 유로/kg 여야 하고, 반대로 더 높은 가격인 90 유로/ton 가 되면 수소 가격은 가격 경쟁력을 갖추기 위해 2.0 유로/kg 까지 높아질 수 있다. (현재 유럽에서 탄소는 61 유로/ton 에 거래되고 있으며 사상 최고가는 82 유로/ton 까지 기록했다.) 현재 비용 측면에서 경쟁력이 있는 지역에서는 '생산 시점의' 수소를 2.0 달러(USD)(약 1.85 유로)/kg 미만으로 생산할 수 있다 (도표 32). 물론 이것은 (압축, 액화, 운송 등의) 미드스트림 비용과 자본 공급자의 투자 자본 회수 요건을 무시한 것이다. WPIC 는 2022 년 국내 미드스트림 비용이 약 3.00 달러(USD)/kg 였다고 추정하며, 2030년까지는 보조금과 수소 비용 절감을 통해 그린 철강을 사용할 수 있게 될 것이다. 스웨덴의 하이브리트(HYBRIT) 그린 철강 공장은 2026년까지 화석연료를 사용하지 않는 상업용 철강을 생산할 계획이다.

도표 32 생산지별 태양광 발전을 통한 수소의 생산 비용을 고려한 수소의 균등화 비용.



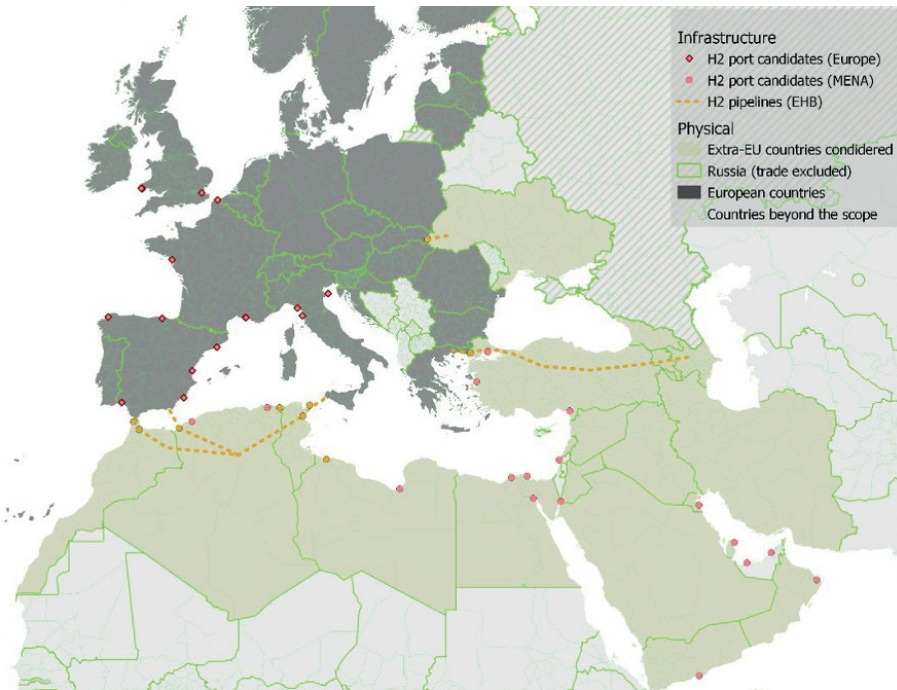
출처: 국제재생에너지기구(IRENA), WPIC 리서치

수소 운송 및 지원 인프라

오늘날 대부분의 수소는 생산된 그 화학 공장을 떠나지 않고, 대신 화학 및 석유화학 공정에서 생산되고 활용된다. 하지만 수소를 에너지 운반체로 활용하려면 수소 경제의 다양한 부문에서 운송이 필요해진다. 현재 수소는 소량으로 짧은 거리로만 운송된다. 이는 수소를 냉각하거나 압축하여 트럭에 싣는 방식이다. 하지만 산업이 확장됨에 따라 보다 효율적인 운송 방법이 필요해질 것이다.

에너지는 재생 가능한 수소 생산에서 가장 큰 비용을 차지하는 요소이다. 재생 가능한 전기는 일반적으로 재생 에너지가 풍부한 지역에서 더 저렴하다. 업스트림 수소는 육상과 해상을 통해 다운스트림 시장으로 운송해야 한다. 가능한 옵션은 파이프라인, 선박 운송 또는 이 두 가지의 조합이다. Hydrogen4EU 에서 제공한 아래 도표 33 은 이 시스템이 어떻게 수소의 '백본'(backbone, 척추)을 형성할 수 있는지 한 예를 보여준다. 수소 '백본'이란 수소의 국제 무역을 가능하게 하기 위해 구축될 수 있는 항구와 파이프라인의 네트워크이다. 그 목표는 북아프리카와 중동의 저렴한 재생 에너지를 활용하여 유럽의 최종 시장으로 수출할 수소를 생산하는 것이다.

도표 33 수소 '백본'(backbone)은 수소의 국제 무역을 가능하게 하기 위해 구축 가능한 항구와 파이프라인 네트워크에 대한 제안이다. 북아프리카와 중동의 저렴한 재생 에너지를 활용하여 유럽으로 수출할 수소를 생산하는 것이 그 목적이다.



출처: Hydrogen4EU

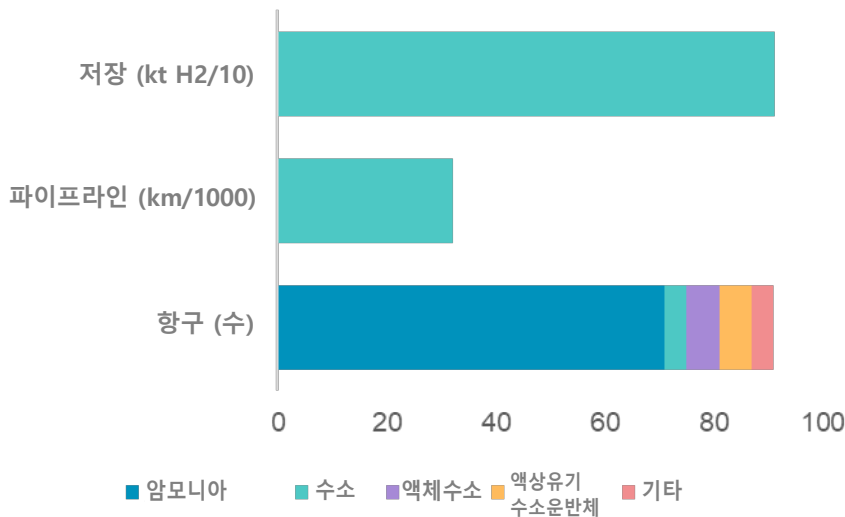
수소는 전기분해를 통해 기체 형태로 생산된다. 질량 대비 에너지가 매우 높은 반면, 밀도는 매우 낮은 물질이다. 즉, 차지하는 부피당 에너지는 낮다는 뜻이다. 선박은 부피에 제약이 있기 때문에 필연적으로 더 많은 이동과 더 높은 비용을 의미한다. 다행히도 수소는 다른 형태나 화합물로 전환 및 결합하여 경제성이 개선될 수 있다.

수소 파이프라인: 수소를 기체 상태로 유지하고 파이프라인을 활용하는 것이 가장 비용 효율적인 운송 방법이다. 30,000km 에 조금 못 미치는 수소 파이프라인이 건설될 것으로 발표되었다 (도표 34). 가스 수송 파이프라인에 상당한 자본 투자가 필요하기 때문에 수소 파이프라인 개발은 주로 기존 가스 인프라의 용도를 변경하고 새로 연결하여 보완하는 데 초점을 맞출 것이다. 장거리가 되면 비용이 상상할 수 없을 정도로 높아지기 때문에, (아프리카에서 유럽 같은) 대륙 간 운송은 제한되고, 지역 운송이 주를 이룰 것으로 예상된다.

수소 선박 운송: 수소 운송은 기존 항구를 연결하여 파이프라인의 한계를 극복한다. 기체 수소는 밀도가 낮기 때문에 효율적인 운송을 위해 다른 형태로 변환해야 한다. 압축, 액화, 유도체로의 전환 등의 옵션이 있다. 암모니아, 액체유기수소운반체, 메탄올, 합성연료가 기본 상태의 수소보다 기술적으로나 경제적으로 이점이 뛰어나다. 이 유도체들은 단위 부피당 에너지 밀도가 높기 때문에 압축적으로 에너지를 적재해 운송 효율을 향상시킨다. 또한 오랜 기간 시장에 나와 있었던 만큼 안전한 취급과 운송에 대한 기술 노하우와 인프라가 이미 상당 부분 구축되어 있다는 뜻이다. 국제에너지기구(IEA)에서는 2030년까지 암모니아가 가장 일반적으로 해상 운송되는 수소 형태가 될 것이며, 액화 수소 운송은 적은 비중을 차지할 것이라고 전망했다 (도표 34).

암모니아는 상온에서 적당한 압력을 가하면 액체 상태로 저장 및 운송이 가능한 반면, 수소는 일반적으로 액체 상태를 유지하기 위해서는 극저온 또는 고압 저장이 필요하다. 따라서 수소에 비해 암모니아가 저장과 취급면에서 더 실용적이고 덜 에너지 집약적이다. 마지막으로 암모니아와 같은 파생 제품은 특히 농업 및 화학 산업에서 생산, 저장 및 유통 인프라가 구축되어 있다. 이러한 기존 인프라로 인해 큰 추가 투자 없이도 에너지 저장이나 운송과 같은 다른 쓰임새로 용도 변경 및 활용이 가능하다.

도표 34 계획된 인프라에 대한 지원은 파이프라인과 암모니아 선박 운송이 운송수단으로 선호될 것임을 시사한다.



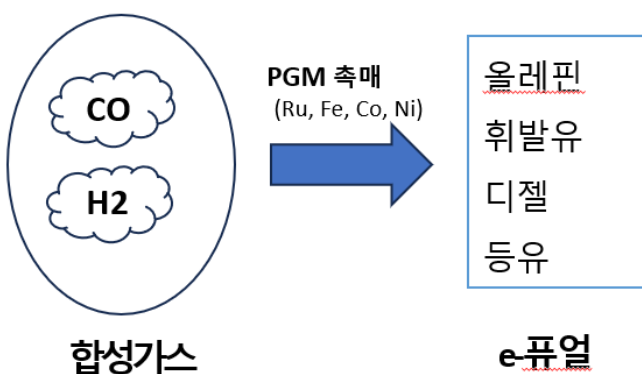
출처: IEA

합성 연료는 지속가능한 이산화탄소와 전기분해로 생산된 수소를 결합하여 생산되는 저탄소 또는 탄소중립 연료이다. 피셔-트롭시 공정(Fischer-Tropsch process)으로 PGM 촉매를 통해 탄소와 수소를 결합하여 합성 연료를 생산한다.

합성 등유와 합성 디젤 같은 합성 탄화수소는 자동차 및 항공 부문에서 기존 내연기관에 활용할 수 있다. 배터리와 연료전지의 질량 문제 때문에 이퓨얼(e-fuel, 전기연료)은 SAF(sustainable aviation fuel, 지속 가능한 항공연료)와 함께 항공 산업의 탈탄소화를 위한 주요 방법으로 여겨지고 있다. SAF는 바이오매스, 폐유, 농업 잔재물을 통해 생산된다는 점에서 이퓨얼과 다르다.

국제청정교통위원회(ICCT)에 의하면 EU에서 전자 등유(e-kerosene)는 제트 연료 생산 비용의 약 3배가 들지만 2050년까지는 약 1.5배로 감소할 것이다. 탄소 집약적 연료를 사용하는 항공 운영에 탄소세를 도입하면 비용 평준화가 이루어질 수 있다.

도표 35 이퓨얼(e-fuel)을 만드는 과정에 PGM 촉매가 사용된다.



출처: WPIC 리서치

결론

전 세계의 탈탄소화 필요성이 절실하다는 것은 탄소 배출량을 줄이기 위한 모든 옵션이 필요해질 것이며 그 옵션들이 서로 경쟁적이기보다 상호보완적인 관계에 있다는 것을 의미한다.

현재 전 세계적으로 수소 프로젝트에 3천억 달러 이상의 보조금이 지원되고 있는 상황에서, 수소 경제는 도약 여부의 문제가 아니라 이제 시점의 문제, 즉 더 정확하게는 수소 경제의 성장 속도와 수소 애플리케이션에서 발생하는 백금 수요 측면에서의 후속 효과의 문제이다.

현재 수소 경제를 실현할 수 있는 여러가지 기존 기술이 있지만, 비용을 낮추기 위해서는 혁신과 신기술, 규모의 경제가 필요하다. 수소의 빠른 도입을 위해서는 단독적으로든 탄소세와 연계해서든 경쟁력 있는 비용 절감이 필요하며, 이는 백금 함유 전해조와 연료 전지에도 해당된다.

본 협회는 수소 관련 백금 수요를 다루는 정기 간행물을 통해 업계 변화에 따른 추정치를 제시할 예정이지만, 현재 상황에서는 전해조와 대형 수소연료전지차가 초기 수요의 주요 동력이 될 것으로 예상하고 있으며, 2020년대 후반과 2030년대에는 더 광범위한 연료전지 애플리케이션이 수요의 가장 큰 원동력이 될 것으로 예측한다.

WPIC는 백금 투자 시장의 발전을 위해 설립되었습니다.

세계백금투자협회(World Platinum Investment Council, WPIC)는 백금에 대한 투자 소유권을 늘리기 위해 2014년 남아프리카공화국의 주요 백금족 금속(PGM) 광산업체들이 설립한 단체입니다. 본 협회는 실행 가능한 통찰과 목표 지향적인 개발에 기반하고 있습니다. 이에 [플래티넘 쿼털리](#), [플래티넘 퍼스펙티브](#) (월간), [플래티넘 에센셜](#) (현재 월간) 등을 통해 투자자들이 충분한 정보에 근거한 결정을 내릴 수 있도록 정보를 제공합니다. 또한 투자자, 상품, 투자 경로, 지역적 특성에 따라 백금 투자 가치사슬을 분석할 뿐만 아니라 시장 효율성을 강화하며 모든 다양한 조건 하에 있는 투자자들에게 비용 효율이 높은 더 다양한 상품을 제공하기 위하여 파트너 업체들과 협력하고 있습니다.

WPIC은 투자 자문 제공 관련 규제를 받는 기관이 아닙니다. 자세한 사항은 [고지 및 면책조항](#)을 참조하세요.

용어집

배터리 전기 자동차(Battery Electric Vehicle, BEV) - 전기 전원에 연결하여 충전할 수 있는 대형 배터리가 장착된 플러그인 차량.

알칼리성 전기분해(Alkaline Electrolysis, AEL) - 알칼리성 전해질 용액을 사용하여 물을 수소와 산소 기체로 분리하는 전해조.

암모니아(Ammonia) - 질소와 수소로 구성된 화합물로, 비료 및 다양한 산업 공정에서 자주 사용됨.

탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS) - 산업 공정에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 지하에 저장함으로써 기후 변화를 완화시키는 기술.

차액 결제 거래(Contract for Difference, CfD) - 재생 에너지 프로젝트에서 전기 가격 변동 위험을 관리하는 데 사용되는 금융 상품.

직접 환원철(Direct Reduced Iron, DRI) - 천연가스 또는 수소를 환원제로 사용하여 철광석에서 철을 생산하는 데 사용되는 공정.

전기 분해(Electrolysis) - 전기를 사용하여 화합물을 본래의 구성 요소로 분리하는 화학적 과정.

수소 연료 전지 자동차(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) - (백금 촉매에 수소와 산소를 통과시킴으로써) 연료 전지를 사용해 전기를 발생시키는 전기 자동차이며, 따라서 이 자동차는 수소 연료를 소비하는 전기 모터를 구동.

온실 가스(Greenhouse Gas, GHG) - (이산화탄소처럼) 지구 대기에 열을 가두어 온실 효과와 기후 변화에 영향을 주는 기체.

하이브리드 전기 자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV) - 소형 연소 기관과 소형 배터리가 결합된 차량으로, 주기적으로 엔진 시동이 걸렸다가 꺼졌다가 하기 때문에 전기 전용 주행거리는 미미함. 배터리는 엔진으로 충전됨.

균등화 발전 원가(Levelised Cost of Energy, LCOE) - 대체 에너지 생산 방법 간의 비용을 평가하고 비교하는 방법론.

균등화 수소 원가(Levelised Cost of Hydrogen, LCOH) - Standardised methodology which accounts for operating and capital costs to produce hydrogen allowing comparability across production pathways. 수소 생산을 위한 운영 및 자본 비용을 설명하는 표준화된 방법론으로, 수소 생산 경로 간의 비교가 가능함.

액상 유기 수소 운반체(Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) - 수소를 액체 형태로 저장하고 운반하는 데 사용되는 물질.

순 현재 가치(Net Present Value, NVP) – 미래의 현금 흐름을 현재 가치로 환산하여 합한 값. 이 계산을 통해 미래 현금 흐름을 현재의 실질 가치로 반영하여 다양한 투자 기회 비교가 가능.

백금족 금속(Platinum Group Metals, PGMs) – 백금 함유 광석에 일반적으로 백금과 함께 존재하는 금속 그룹으로, 백금(platinum), 팔라듐(palladium), 로듐(rhodium), 이리듐(iridium), 루테튬(ruthenium), 오스뮴(osmium)의 일부 또는 전부를 지칭.

플러그인 하이브리드 전기 자동차(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) – 내연기관 엔진과 중형 배터리를 결합한 차량으로, 플러그를 꽂아 충전하면 제한된 거리를 BEV로 주행할 수 있고, 가솔린이나 디젤만으로도 주행할 수 있음.

양성자 교환막 물 전기분해(Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, PEM) – 전기분해장치(전해조)는 물 분자(H₂O)의 결합을 끊어서 그 구성 요소인 산소와 수소 원소들로 분리함. PEM 기술은 기밀성 고체 폴리머 기반 막을 전해질로 사용하며, PEM은 백금과 이리듐을 막의 일부로써 코팅된 촉매로 사용.

전력 구매 계약(Power Purchase Agreement, PPA) – 발전사업자와 구매자 간의 계약으로, 지정된 기간 동안의 전력 판매 조건을 규정.

증기 메탄 개질(Steam Methane Reforming, SMR) – 천연 가스를 증기와 반응시켜 수소를 생산하는 데 사용되는 공정.

합성 연료(Synthetic Fuel, Synfuel) – 재생 가능한 자원 또는 피셔-트롭시(Fischer-Tropsch) 합성과 같은 공정을 통해 생산되는 연료로, 화석 연료의 대안으로 자주 사용됨.

총 소유 비용(Total Cost of Ownership, TCO) – 구매 가격과 운용 비용을 모두 포함하는 자산의 수명 주기 동안의 비용 계산 결과로, 다양한 자산의 수익률 예측을 비교하는 데 사용됨.

중요 고지 및 면책 조항: 본 문서는 교육을 목적으로 한 일반 간행물입니다. 발행처인 WPIC은 세계 유수의 백금 생산업체들이 백금 투자 수요에 걸맞은 시장을 형성하기 위해 설립한 단체입니다. WPIC의 사명은 실행 가능한 통찰과 타겟화된 개발을 통해 투자자들의 백금 현물 수요를 자극하는 것과 투자자들이 사실에 근거한 결정을 내릴 수 있도록 백금에 대한 정보를 제공하는 것, 그리고 금융기관과 시장 참여자들과 협력해 투자자들이 필요로 하는 상품과 투자 경로를 개발하는 것입니다.

본 간행물은 증권 판매를 제안하거나 매수를 권유하는 것이 아니며 그렇게 해석되어서도 안 됩니다. 발행처는 이 간행물에 언급된 증권 혹은 상품과 연관된 그 어떤 종류의 거래도 권유 혹은 주선할 의도가 없으며, 그에 관련된 충고를 제시하거나 거래를 대리하지도, 유도하지도 않습니다. 이 간행물은 세금이나 법률, 또는 투자에 관련된 조언을 제공하기 위한 것이 아니고 투자 혹은 증권의 매도와 매수, 또는 보유를 추천하거나 투자 전략 혹은 거래에 나서기를 권고하는 것으로 해석해서는 안 됩니다. 발행처는 증권 중개인이나 독립투자자문업자(RIA)가 아니며 미국법이나 영국 금융서비스 시장법(Financial Services and Markets Act 2000), 고위 경영진 인증제도(SMCR, Senior Managers and Certifications Regime), 또는 영국 금융감독원(FCA, Financial Conduct Authority)에 등록되어 있지 않습니다.

이 간행물은 특정 투자자를 대상으로 하거나 투자자 개인에게 맞춰진 투자 조언이 아니며 그렇게 받아들여져서도 안 됩니다. 투자 결정을 내리기 전에는 반드시 적절한 전문가의 조언을 받으셔야 합니다. 투자나 투자 전략, 증권, 또는 관련 거래가 투자 목적과 재정상태, 그리고 투자위험감수도에 적절한지에 대한 판단의 책임은 본인에게 있습니다. 특정 사업이나 법적 상황, 그리고 세금과 관련된 사정에 대해서는 투자와 법률, 세무, 또는 회계 전문가와 상담하셔야 합니다.

이 간행물은 신뢰할 수 있는 것으로 간주되는 정보에 기반해 작성되었습니다. 하지만 발행처와 콘텐츠 제공자가 정보의 정확도나 완전성을 보장할 수 있는 것은 아닙니다. 이 간행물에는 지속적인 산업 성장 예상을 포함한 미래 상황 예측이 포함되어 있습니다. 발행처와 메탈 포커스는 이 간행물에 과거의 사실이 아닌 미래 예측성 발언이 포함되어 있고, 실제 결과에 영향을 미칠 수 있는 위험 요인과 불확실성이 포함되어 있다는 사실을 인지하고 있으며, 발행처와 콘텐츠 제공자는 이 간행물이 제공하는 정보에 기반해 발생한 손해 혹은 손실에 그 어떠한 책임도 지지 않습니다. WPIC의 로고와 서비스 마크, 소유권은 전적으로 WPIC에 있습니다. 그 이외의 상표의 소유권은 각각의 상표권자에게 있습니다. 특별한 언급이 있는 경우를 제외하고 발행처는 각각의 상표권자에 소속 혹은 연계되거나 관련되어 있지 않으며 후원 또는 승인을 받거나 기반을 두지 않습니다. WPIC은 제3자의 상표에 대한 어떤 권리도 주장하지 않습니다.

WPIC Research MiFID II Status

세계백금투자협회(The World Platinum Investment Council, WPIC)는 제 2차 금융상품투자지침(MiFID II) 규정에 따라 콘텐츠와 서비스에 대한 내외부의 검토를 거쳤습니다. 그 결과에 따라 WPIC 리서치 서비스 이용자와 해당 회계감사/법무부서에 다음과 같은 사항을 강조하고자 합니다.:

WPIC의 리서치는 명백히 소규모 비금전적 혜택 범주(Minor Non-Monetary Benefit Category)에 포함되며 모든 자산운용자들은 이를 무료로 활용할 수 있습니다. 투자기관들은 WPIC 리서치를 자유롭게 공유할 수 있습니다.

1. WPIC은 금융상품 관련 사업을 운영하지 않습니다. 시장 조성이나 세일즈 트레이드, 트레이딩, 혹은 주식 거래에도 참여하지 않습니다. (어떠한 종류의 유인책이나 권유도 제공하지 않습니다).
2. WPIC의 콘텐츠는 다양한 경로를 통해 모든 이해관계자들에게 보급되며, MiFID II (ESMA/FCA/AMF) 규정에 따라 “소규모 비금전적 혜택 범주”로 분류될 조건을 만족합니다. WPIC의 리서치 결과는 WPIC 홈페이지를 통해 무료로 제공됩니다. WPIC은 리서치 통합 플랫폼에 그 어떤 허가요건도 요구하지 않습니다.
3. WPIC은 소비자들에게 리서치 서비스에 대한 대가를 요구하지 않으며 앞으로도 요구하지 않을 것입니다. WPIC은 기관 투자자들에게 무료로 자유롭게 이용 가능한 콘텐츠에 대한 대가를 요구하지 않는다는 점을 명백히 밝힙니다.

보다 자세한 정보는 WPIC 홈페이지에서 확인할 수 있습니다:

<http://www.platinuminvestment.com/investment-research/mifid-ii>