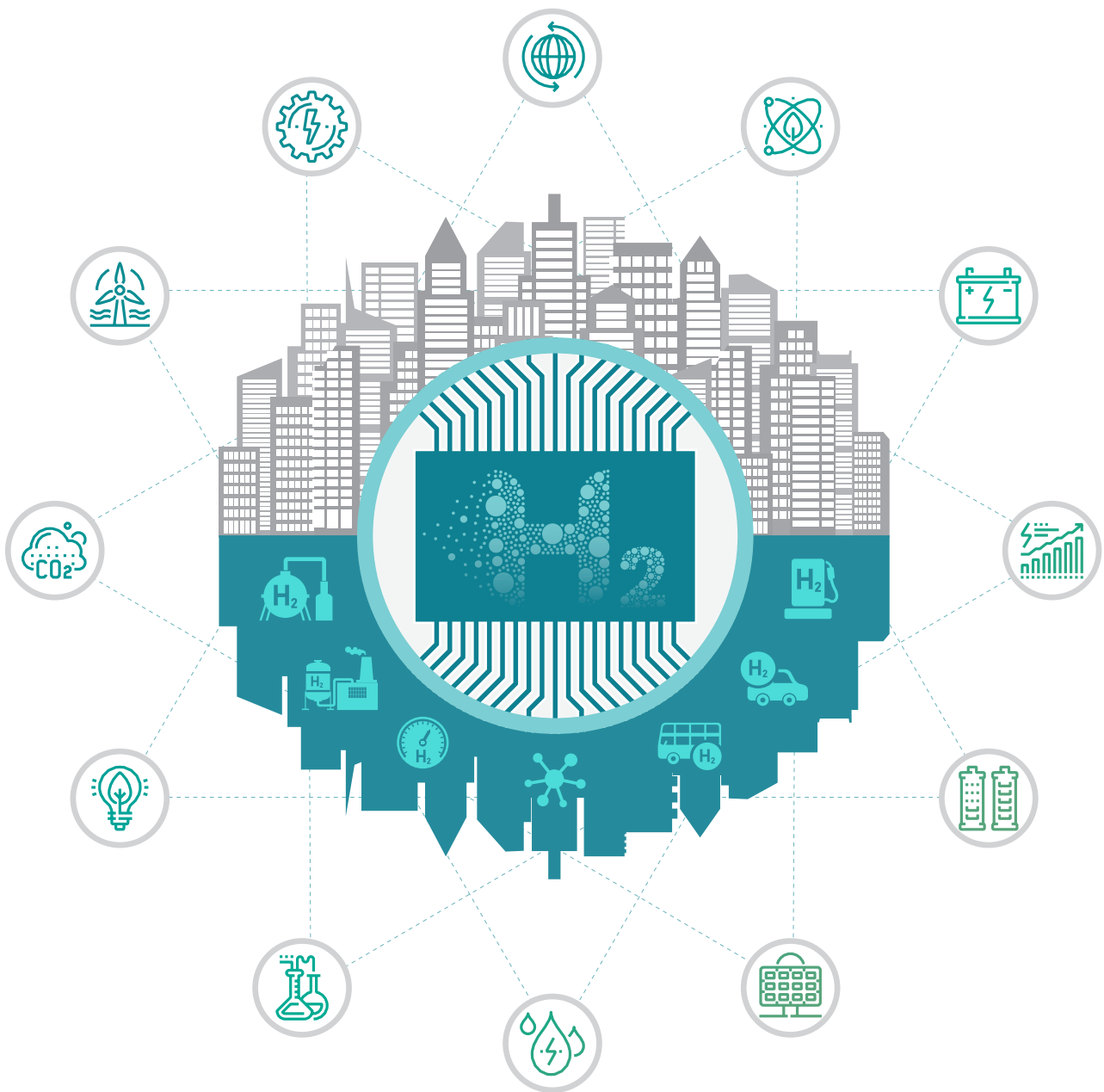


이슈페이퍼  
2022-01

# 수전해 그린수소와 나노기술



## CONTENTS

---

1. 개요	05
2. 수전해 그린수소 기술동향	17
3. 수전해 그린수소 산업동향	34
4. 정책동향	39
5. 시사점 및 정책 제언	45



## 01

## 개요



유성종 | KIST 수소·연료전지연구단 책임연구원

정남기 | 충남대학교 에너지과학기술대학원 교수

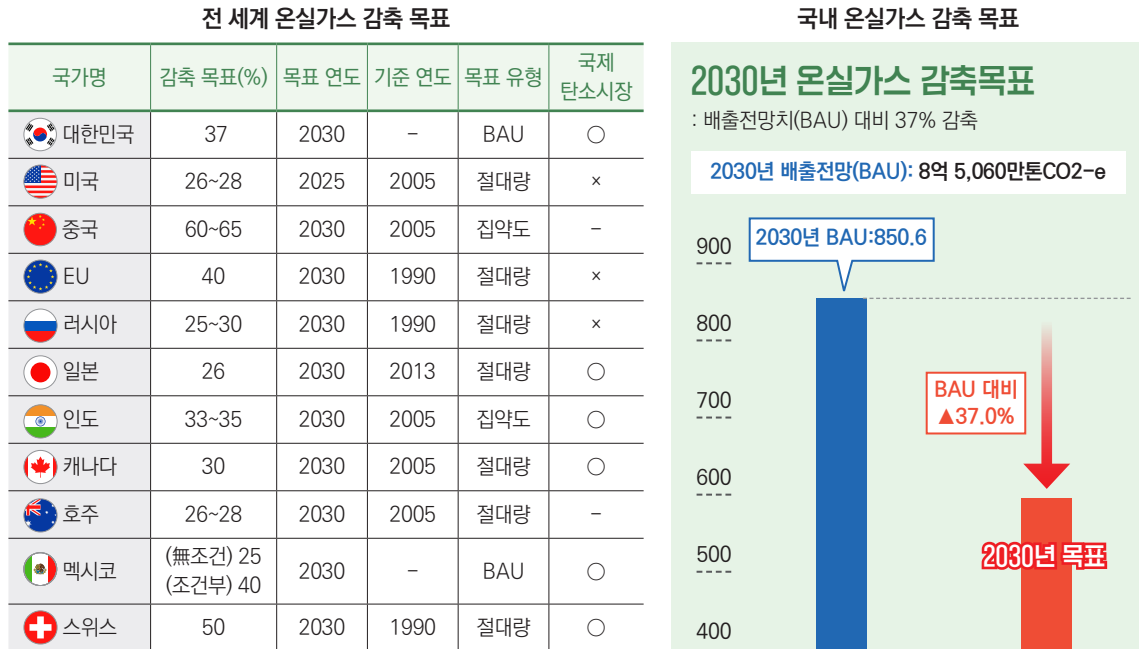
정동영 | GIST 화학과 교수

## 1 작성 배경

- 한국, 유럽연합, 중국, 일본, 미국 등은 기후변화에 대응하기 위하여 UN에 ‘2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)’와 ‘2050 장기저탄소발전전략(LEDs)’을 제출하고 탄소중립을 본격 추진

✦ 195개 당사국에게 온실가스 감축 의무가 부여되었으며, 우리나라도 2030년까지 온실가스 배출전망치(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축 의무 부여

그림1 주요 국가 온실가스 감축 목표

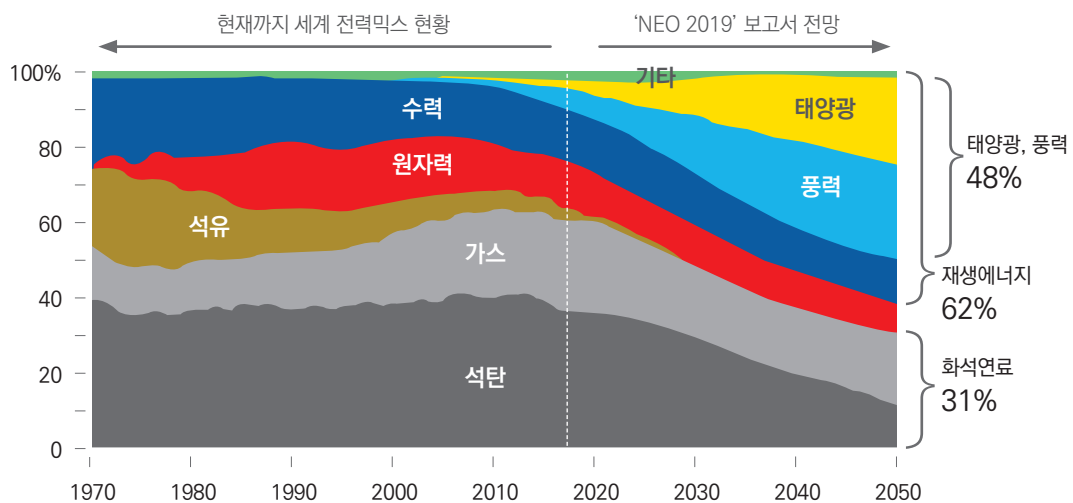


출처: 유엔기후변화협약(UNFCCC), 국가 온실가스 감축목표(INDC)

## ■ 전 세계는 현재 석유, 석탄 등 전통적 화석에너지 대신 태양광, 풍력 등 재생에너지를 이용한 전력생산 확대 방안 모색

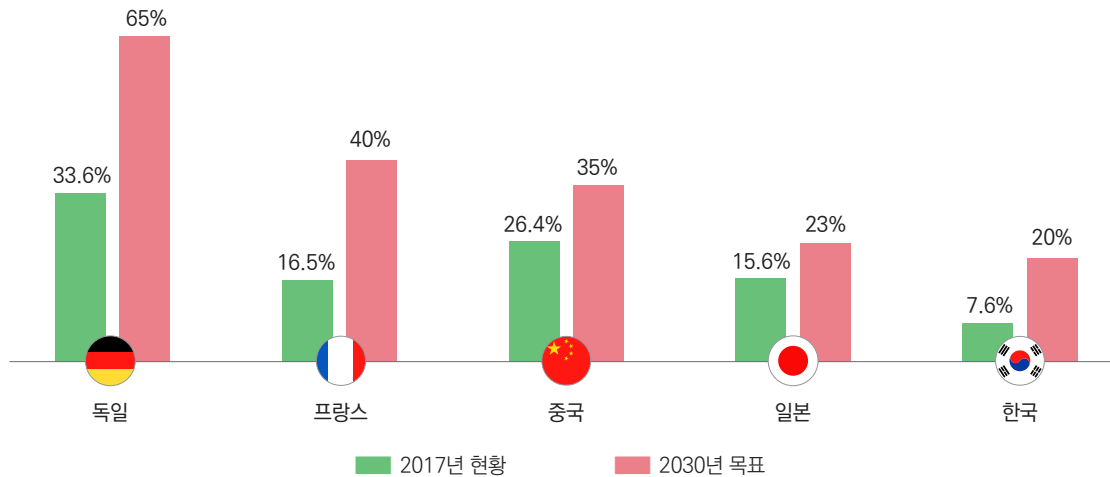
전 세계 재생에너지 발전량은 2050년까지 62%까지 빠르게 증가할 것으로 전망되며, 우리나라를 포함한 주요 선진국들은 재생에너지 발전량 비중 확대 중

그림2 전 세계 전력 생산 전망



출처: New Energy Outlook (NEO) (2019) 보고서

그림 3 국가별 재생에너지 발전량 목표

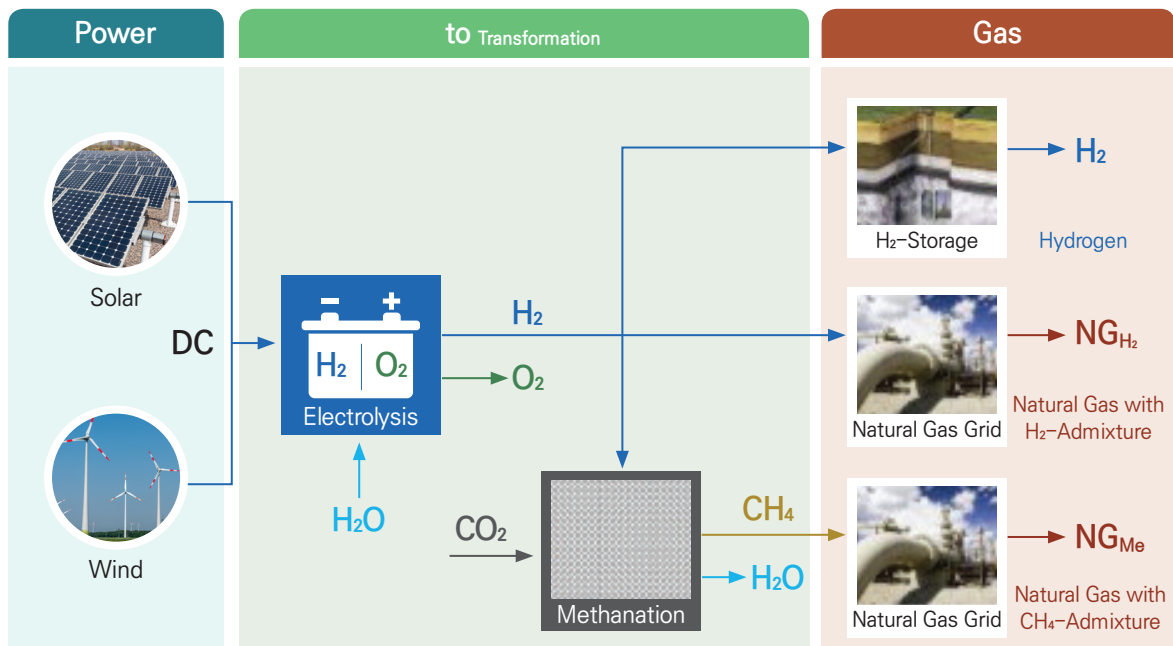


출처: 한국에너지공단 2019

☞ 태양광, 풍력 등 재생에너지는 친환경적이고 무한하다는 장점이 있지만, 발전의 간헐성 및 계통안정화 문제를 해소하기 위한 다양한 기술과의 접목 필요

- 스마트그리드, BESS(Battery Energy Storage System), P2G(Power to Gas)를 활용한 HESS(Hydrogen Energy Storage System) 등과의 접목 추진 중

그림 4 Power to Gas 모식도



출처: Int. J. Hydrog. Energy. 40(12) (2015) 4285

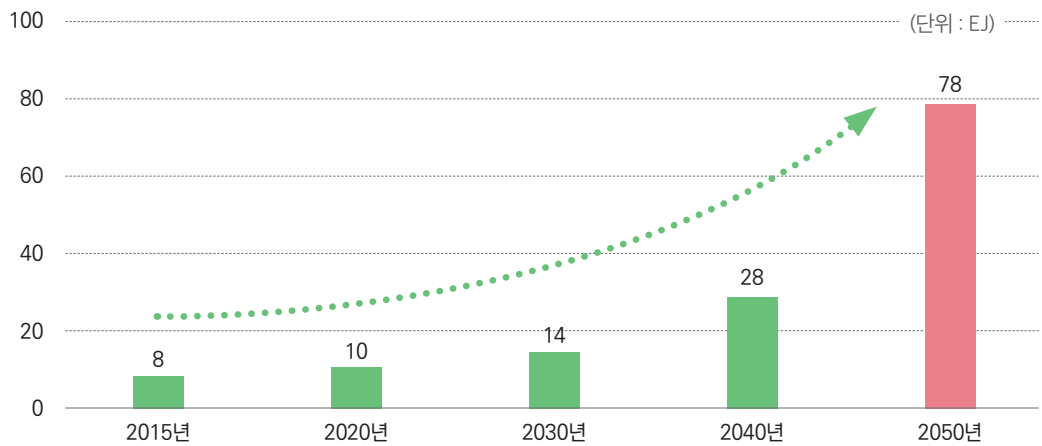
## ■ 재생에너지의 보완재로 수소가 주목받고 있으며, 주요국에서도 수소경제 확산을 위한 다양한 정책 수립

- ❖ 美 (H<sub>2</sub>@Scale('19.3)), EU (EU 수소전략('20.7)), 日 (수소기본전략('17.12)) 등 전 세계 수소 경제시장 선점을 위한 종합전략 발표

## ■ 전 세계 수소 수요도 증가하여 2020년 10EJ 수준에서 2050년 78EJ까지 성장하여, 전 세계 에너지수요의 18%를 차지할 것으로 전망

- ❖ 연료전지의 주요 활용처인 운송 및 전력 분야가 향후 수소 시장의 50% 이상을 차지할 것으로 전망

그림 5 글로벌 수소에너지 수요



출처: Hydrogen Council

## ■ 우리나라도 '수소경제 활성화 로드맵('19,1)'을 시작으로 수소경제 사회 실현을 위한 다양한 정책 발표

- ❖ '수소를 중요한 에너지원으로 사용하고, 수소가 국가경제, 사회전반, 국민생활 등에 근본적 변화를 초래하여, 경제성장과 친환경 에너지의 원천이 되는 경제'로 수소경제 정의
- ❖ 세계 최고 수준의 수소경제 선도국가 도약을 비전으로 하여, 2040년 수소차 및 연료전지 보급량, 수소공급량, 수소가격 목표(표 1)를 제시

표 1 수소경제 활성화 로드맵에 따른 수소 공급 및 가격

	2018년	2022년	2040년
공급량	13만톤/년	47만톤/년	526만톤/년
수소가격	-	6,000원/kg	3,000원/kg
공급방식	초기: 부생/추출수소 중심 → 성숙기: 수전해/해외 수입/그린수소 중심		

출처: 수소경제 활성화 로드맵 (2019)

## ■ 수소경제 활성화를 위해서는 생산, 저장, 활용 등 수소경제 전주기에 걸친 기술개발 노력이 필요하며, 그 첫 단계로 충분한 수소 확보 및 공급을 위한 수소생산 분야가 중요

- 주요국들도 충분한 수소 확보를 위해 다양한 수소 생산 기술개발 및 해외 공급망 발굴에 힘쓰고 있는 상황
- 우리나라는 수소 활용 분야에서는 글로벌 경쟁력을 확보하고 있으나, 수소 생산 및 저장·운송 분야 개발은 미흡한 상황

## ■ 수소생산은 그레이수소, 블루수소, 그린수소 등 3가지로 구분

- 수소는 원료와 생산방식에 따라 그레이·블루·그린수소로 구분되며, 재생에너지 생산 전력으로 수전해를 통해 생산되는 그린수소가 가장 친환경적
  - 그레이수소는 천연가스의 개질이나 석탄을 가스화하는 방식으로 생산되며, 블루수소는 그레이수소와 동일 방식으로 생산되지만 생산과정에서 발생하는 CO<sub>2</sub>를 포집 및 활용·저장(CCUS)해 온실가스 배출을 최소화하여 생산
  - 그린수소는 태양광·풍력 등 재생에너지로 생산한 전기를 이용해 물을 전기분해(수전해)로 생산하여 온실가스 배출이 없는 친환경적인 수소
- 현재 생산 중인 수소의 대부분은 생산비용이 가장 저렴한 그레이수소지만, 탄소중립을 위해 그린수소 생산량이 점차 증가할 전망
  - 재생에너지를 기반 수소생산은 이산화탄소를 발생시키지 않기 때문에, 친환경적으로 각광을 받고 있지만, 경제성 확보가 숙제

표 2 수소 생산방식에 따른 수소 분류

명칭	특징
그린수소	재생에너지 전력으로 수전해하여 생산한 수소를 지칭하며 재생에너지 발전전력을 이용하기 때문에 CO <sub>2</sub> 배출이 전무
블루수소	그레이 수소 생산과정에서 나오는 CO <sub>2</sub> 를 포집 및 저장(CCS)하여 온실가스 배출을 줄인 수소
그레이수소	천연가스를 개질해서 생산하는 개질수소와 정유공정의 나프타 분해과정에서 부산물로 생산되는 부생수소 등을 의미하며, 그레이 수소 1톤을 생산에서는 10톤의 CO <sub>2</sub> 가 배출

## ■ 수소 수요 증가에 대비하기 위해 초기에는 기존 활용되고 있는 그레이수소(부생수소) 및 이를 위한 천연 가스 개질기술 개발 등을 통해 수소의 생산 단가를 낮추는 생산기술 확보 필요

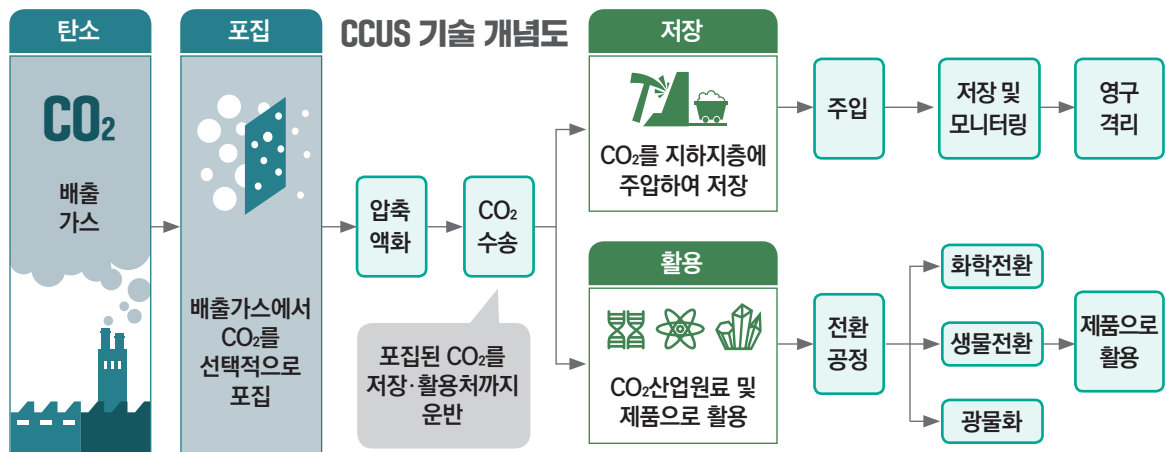
- 현재는 부생수소 방식이 단가가 가장 저렴하여 국내 수소 주요공급원으로 활용
  - 부생수소는 관련 공정에 따라 부수적으로 생산·재활용되고 있어 외부 공급 탄력성이 낮은 자원
  - 국내에서 생산되는 수소의 75%가 석유화학산업의 납사 개질 공정에서 생산되나, 석유화학공장 내부의 수소 첨가 탈황공정, 분해공정 등에 직접 사용되어 석유화학공장 외부로의 공급은 사실상 없는 상황



❖ 개질수소 방식은 원료인 천연가스의 가격이 비싸고, 생산과정에서 CO<sub>2</sub>가 발생한다는 단점이 있지만, CCUS(Carbon Capture Utilization and Storage) 등의 기술을 활용하면 부생 수소보다 친환경적인 수소 수소(블루수소) 생산 가능

- 개질수소 방식은 현재 목표 수요량에 대응할 수 있는 가장 현실적인 수소 생산 방식으로, 탄소 배출이 제로인 그린수소 생산이 양산화 될 때까지 확산될 전망
- 기존 CCUS 기술의 경우 사업성 부족 및 일관된 정책지원 부재로 인해 다양한 프로젝트 진행 지연
- 인센티브 또는 배출 위약금 등의 정책 지원 및 규제가 없을 경우, 사업자들의 CCUS 시스템 설치 유인 부족
- CCUS 기술이 자리 잡기 위해서는 높은 인프라 설치비용, 시스템 설치 및 확장과 관련된 기술적 이슈, 자금 및 경제성 확보, 지역주민 반대 등의 문제 해결 필요

그림 6 CCUS 개념 및 활용 도식화



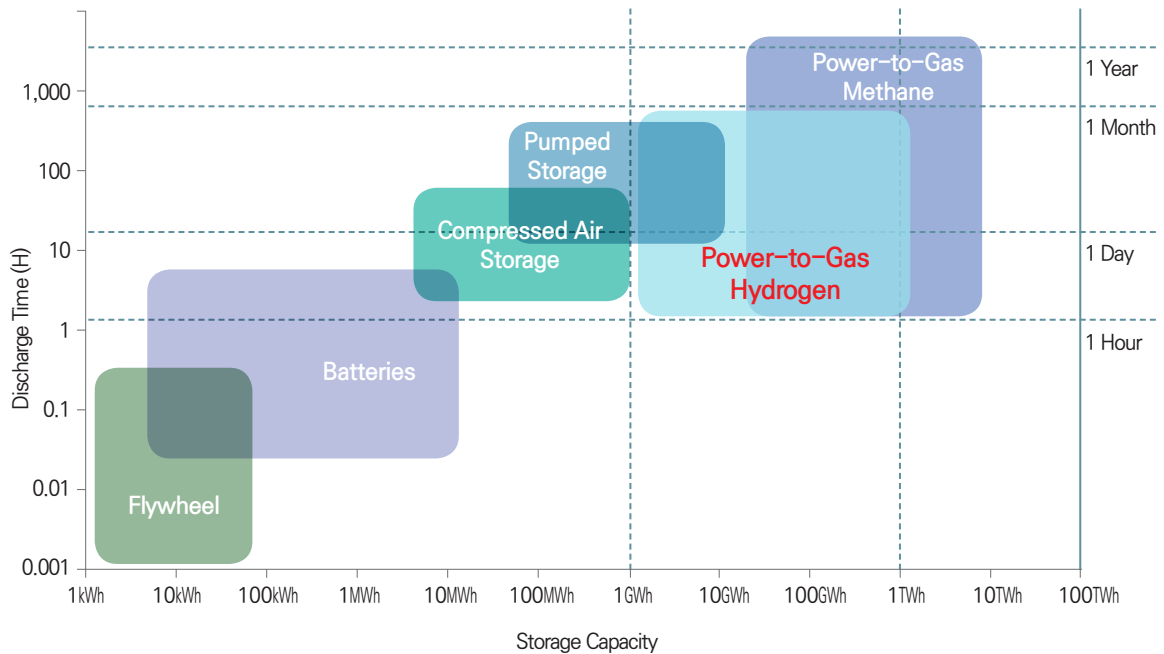
출처: 2021 CCU 기술혁신 로드맵

❖ 장기적으로는 기술개발을 통하여 생산 단가 절감 및 경제성이 확보된 P2G(Power to Gas) 방식의 그린수소 생산 필요

- P2G는 전력 계통에서 수용할 수 없는 풍력, 태양광 등의 출력을 활용하여 수소를 생산·활용하거나, 생산된 수소를 이산화탄소와 반응시켜 메탄 등의 연료 형태로 저장·이용하는 기술
- 풍력·태양광 등의 재생에너지의 경우 출력 변동성이 높아 전력 계통의 안정성 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 안정적 출력을 위해 BESS를 일반적으로 활용하고 있지만, BESS는 저장 용량 및 보관기간에 있어서 뚜렷한 한계 상존
- BESS 대비 HESS의 원가 경쟁력이 우위에 있으며, 저장시간이 증가할수록 HESS는 저장 기간에 따른 추가비용 증가가 크지 않은 반면 BESS는 비용이 기하급수적으로 증가

※ 일반적으로 잉여 전력저장 기간 8시간 이상에서 확실한 비용 경쟁우위 발생

그림 7 에너지 저장 장치 용량에 따른 저장 시간 비교



출처: 미래에셋대우 리서치 센터

- 본 이슈페이퍼에서는 수소경제 활성화를 위해, 수전해 중심의 그린수소 생산을 위한 주요 나노기술 동향을 살펴보고, 향후 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있는 전략수립의 시사점을 도출

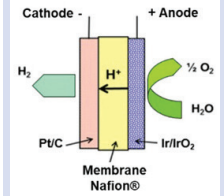
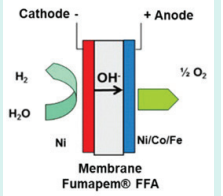
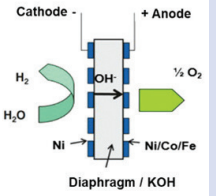
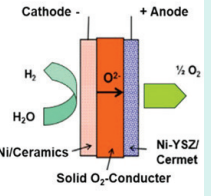
## 2 그린수소 생산을 위한 수전해 기술

- 재생에너지를 활용한 그린수소 생산을 위한 수전해 방식은 물의 이온화에 활용되는 전해질에 전력을 공급하여 물을 수소와 산소로 분해하는 기술

전해질 종류에 따라 알칼라인\*(AEC), 양이온 교환막\*\*(PEMEC), 음이온 교환막\*\*\*(AEMEC), 고체산화물\*\*\*\*(SOEC) 수전해로 구분되며, 기술개발 단계를 기준으로 상용기술(AEC, PEMEC)과 차세대 기술(SOEC, AEMEC)로 분류

\* AEC(Alkaline Electrolysis Cell), \*\*PEMEC(Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis Cell), \*\*\*AEMEC(Anion Exchange Membrane Electrolysis Cell), \*\*\*\*SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)

그림 8 수전해 기술 비교

구분	PEMEC	AEMEC	AEC	SOEC
전해질	양이온 교환막	음이온 교환막	알칼리용액	고체산화물
사용전극(촉매)	백금, 이리듐	비귀금속계 촉매	니켈/철	니켈 도핑 세라믹
작동온도(°C)	50~80	40~80	60~90	700~1000
작동압력(bar)	<70	<35	<30	<10
전류밀도(A/cm <sup>2</sup> )	1~2	0.2~2	0.2~0.8	0.3~1
설비효율(kWh/kg)	50~83	57~69	50~78	45~55
수명(h)	50,000~80,000	> 5,000	60,000	<20,000
스택 단위(kW)	1,000	2.5	1,000	5
기술개발 정도	상용기술	연구개발	상용기술	연구개발
	Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis	Anion Exchange Membrane Electrolysis	Alkaline Electrolysis	High-Temperature Electrolysis
Electrolyte	acidic	alkaline	alkaline	O <sup>2-</sup> -conducting solid (ceramic)
	solid (Polymer)	liquid	liquid	solid (ceramic)
				
Operating temperature	50 - 80 °C	40 - 80 °C	60 - 95 °C	700 - 1000 °C

출처: IRENA, *Chemie. Ingenieur. Technik*, 93 (2021) 706

❖ 수소생산 방식별 세부 반응은 전해질 종류에 따라 다르지만, 전극 표면에서 수소이온의 흡착과 결합 반응으로 수소가 생성되는 것은 동일

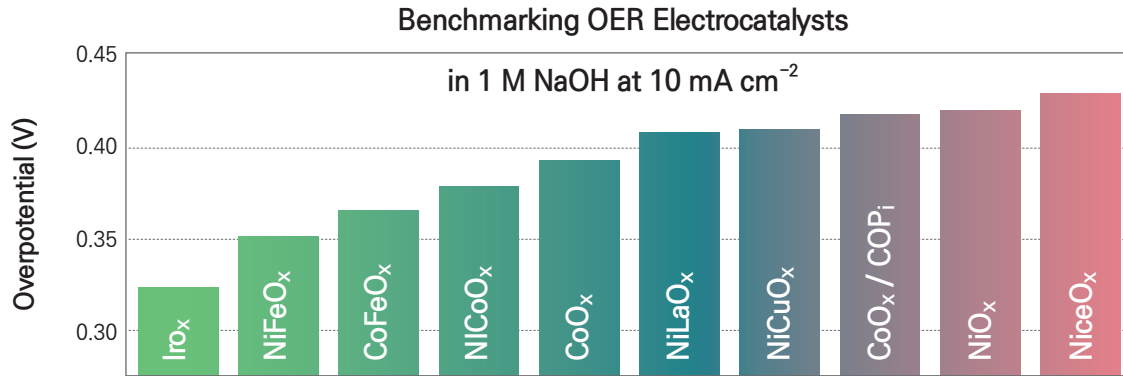
- 수소이온이 환원되면서 전극에 수소 원자 형태로 흡착하게 되고(Volmer), 그 다음 하나의 흡착된 원자와 용액의 수소이온이 반응(Heyrowsky)하거나, 두 흡착원자의 결합(Tafel)에 의해 수소 발생
- 전극 물질에 따라 수소 발생 속도가 다르며, 금속 활성도는 수소 발생 효율을 결정

■ 수전해는 양성자 환원에 따른 ‘수소발생(Hydrogen evolution reaction, HER)’과 물 산화반응에 따른 ‘산소발생(Oxygen evolution reaction, OER)’으로 구성

❖ 산소발생 반응이 수소발생 반응보다 매우 느리고 과전압을 많이 필요로 하여 전체 수전해 반응의 성능 및 내구성을 크게 결정



그림 10 알칼리 분위기 산소발생 반응 성능 경향



출처: J. Am. Chem. Soc. 46 (2021) 8156

- 수전해 촉매는 약 20년간 꾸준히 연구됐으며, 여러 가지 물질의 성능과 내구성이 보고된 상황
  - 특히 염기성 조건에서 이루어지는 알칼라인 수전해 촉매는 Fe, Ni과 같은 전이금속을 기반으로 하는 HER/OER 촉매가 개발되어 상용화된 상태

### ■ 알칼라인 수전해(AEC) 기술은 알칼리 전해액을 이용하여 물을 전기분해하는 기술로서 현재 수전해 기술 중 상용화가 가장 많이 진척되었으며, 국내에서도 일부 시판

- 장기간 기술개발이 이뤄져 가장 안정적인 수전해 기술이며, 귀금속 촉매를 사용하지 않아 비용이 저렴하고 높은 내구성으로 상업화 수준 발달
- 보통 알칼라인 수전해의 전해액으로 20~30wt%의 고농도 수산화칼륨(KOH)이 사용되며, 단극식 전극을 사용해 직렬로 구성하는 방법과 양극식 전극을 병렬로 연결해 사용하는 방법 존재
  - 단극식은 설계와 유지보수가 용이하고 낮은 온도에서 사용되어 효율이 낮으며, 양극식은 분리막과 전극을 적층으로 만들어 병렬로 연결하기 때문에 높은 전압과 전류밀도를 갖고, 고압 수소생산이 가능
- 니켈을 도금한 탄소강, 니켈 메쉬와 폼 형태인 전극을 사용하고, 테플론 계열의 고분자와 세라믹 입자로 구성된 분리막을 활용

### ■ 양이온 교환막 수전해(PEMEC)는 이온전도성 고분자 전해질막(PEM)을 전해질로 이용하는 수전해 방식으로, 단위전지는 막전극 집합체(MEA)의 형태로 구성되어 상용화 초기 단계

- PEM 방식은 시스템 소형화, 유지, 보수 측면에 있어서 세 가지 수전해 방식 중 가장 우수하나, 국내는 상용화 초기 단계
- 재생에너지 연계 관점에서 부하 변동 대응 및 고전류 대응에 용이한 PEM 수전해가 알칼라인 수전해 방식보다 활용 용이
- 최근 기술개발을 통해 가격 및 에너지 효율 관점에서 AEC와 유사한 수준에 도달하였으며, 추가적인 연구개발 진행으로 그린수소 확산에 PEM 수전해 방식이 활용될 전망

### ■ 산업용 수소 생산에 활용되고 있는 알칼라인과 PEM 수전해 기술은 재생에너지 설비와의 연계를 위해서는 기술적 진보가 필요

- 알칼라인 수전해 기술은 내구성이 좋고 설비 가격이 낮으나, 타기술 대비 부피가 크고 불규칙한 출력 특성의 재생에너지 전력 연계 시 생산 수소의 순도가 낮아져 내구성 및 효율이 저하되는 문제 발생
- PEM 수전해 기술은 사용하는 전력 부하 변동에 빠르게 대응하여 재생에너지 전력 연계에 적합하나, 귀금속 전극을 사용해 설비 가격이 높아진다는 단점 존재

## 3 차세대 그린수소 생산 기술

### ■ 고체산화물 수전해(SOEC) 또는 고온 수증기 수전해는 고체산화물 전해질을 이용해 800도 이상의 고온 수증기를 전기분해하여 수소를 생산하는 기술

- 세 가지 수전해 방식 중 전력 사용량이 가장 적어 에너지 효율 측면에서 가장 우수하며, 고온 확보가 핵심적인 요소이기 때문에 보통 원자력 에너지를 활용
- 고온 운전의 안정성을 위한 내열 소재 확보와 조립에서의 기술적 문제 해결 이슈가 상존
- SOEC 방식은 CO<sub>2</sub>를 분해하여 CO를 생성할 수도 있어, 탄화수소계 연료합성에도 사용 가능

### ■ 음이온 교환막 수전해(AEMEC)는 상용 수전해 기술과 재생에너지 설비 간 연계 시 발생하는 문제들을 개선하는 차세대 수전해 기술로서 상용화 기술개발 필요

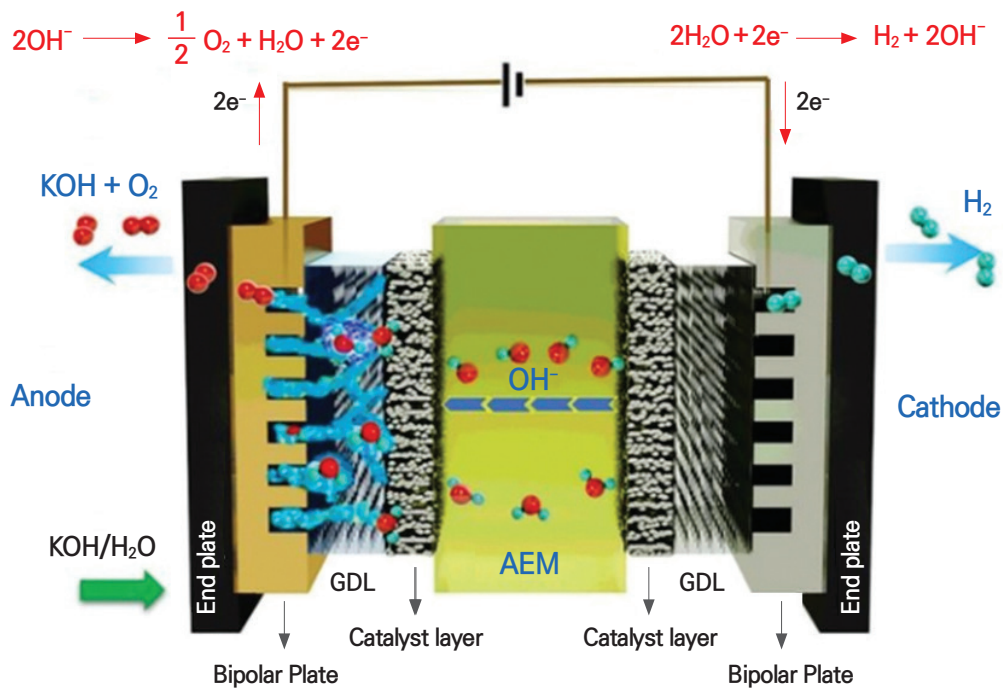
- 알칼라인 수전해 작동환경과 이온성 고분자 전해질막을 사용하는 PEM 수전해의 구조를 혼합한 기술로 기존 수전해 기술의 단점을 보완한 차세대 기술
  - 전극 소재로 귀금속 대신 저렴한 소재(전극, 분리판, 탄화수소계 전해질 고분자 소재 등) 사용 및 소형화가 가능해 경제적
  - 불규칙한 재생에너지 부하 변동 대응이 쉬워 기존 알칼라인 수전해 및 PEM 수전해를 대체할 차세대 그린수소 생산방식으로 주목 (그림 11)
- 수소발생반응(캐소드)과 산소발생반응(애노드)이 일어나는 두 전극과 음이온이 전달될 수 있는 음이온 교환막으로 구성되며, 고분자 전해질막 수전해 및 연료전지와 유사한 구조를 지니고 있어 기존 기술의 적용 용이 (그림 11)
  - 음이온 교환막은 고분자 전해질 막과 유사하게 고분자 주쇄와 양이온 교환종으로 이루어져 있으며 교환막 내에서 다양한 메커니즘 (Grotthuss hopping, vehicle) 통해 이온 전달

- $\text{OH}^-$  이온을 캐소드에서 애노드로 빠르게 전달하는 중요한 역할을 수행하고 높은 이온전도도, 낮은 연료 투과율을 보이며, 전기전도도가 없음

운전 조건 및 반응특성에 맞는 막전극 접합체의 구성이 소자의 성능 및 내구성을 결정

- 수전해 구동조건에서의 기계적 화학적 안정성이 요구되며, 양성자에 비해 낮은 음이온의 이온 전도성 및 알칼라인 환경에서의 안정성 문제, 촉매층 구성을 위한 적합한 이오노머 (ionomer)의 부재 등 해결 과제 존재

그림 11 음이온 교환막 수전해 구성



출처: 한국과학기술연구원 (KIST)

## 02

## 수전해 그린수소 기술동향



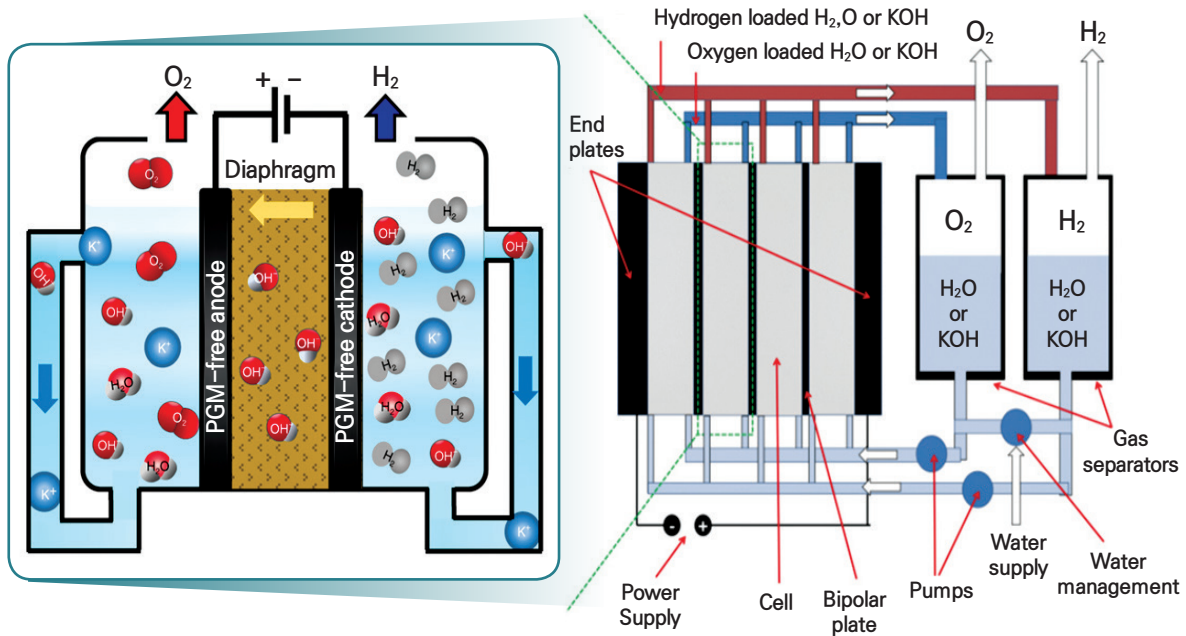
## 1 알칼라인 수전해(AEC) 기술

## 1) 현황

- 알칼라인 수전해는 캐소드와 애노드 사이에 다공성 격막(diaphragm)을 삽입하고, 전해질로서 알칼리 용액을 주입한 후, 두 전극 사이에 일정한 전압과 전류를 흐르게 하여 전기화학적으로 수소를 제조하는 시스템
- ❖ 애노드에서의 물 산화 반응 및 캐소드에서의 수소 환원 반응으로부터 생성된 산소 및 수소는 전해질 내에서 순수한 기체 형태로 포집 가능
- ❖ 단위 시간당 생성되는 수소의 양은 수전해 셀에 흐르는 전류값에 비례하며, 다공성 격막은 두 전극에서 발생하는 수소와 산소 기체의 혼합을 방지하고 이온이 전달되도록 설계



그림 12 알칼라인 수전해 셀 및 스택 구조

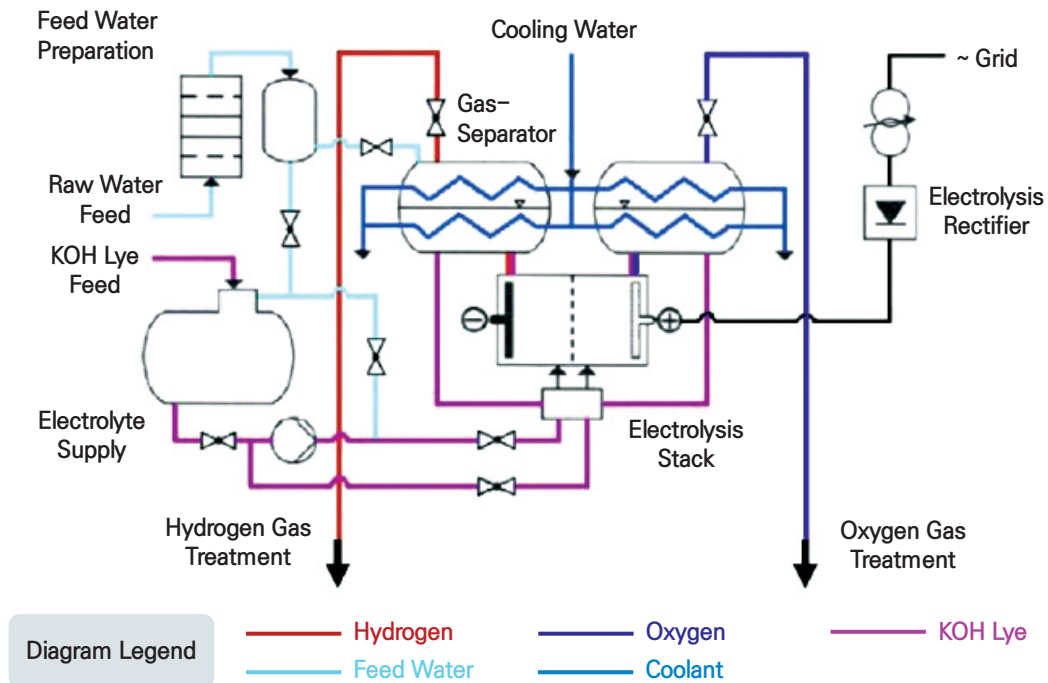


출처: Nat Energy 5 (2020) 378, Int. J. Electrochem. Sci. 13 (2018) 1173

### ■ 알칼라인 수전해 시스템은 전원공급 장치, 전해질 공급탱크, 수전해 스택, 수소/산소 저장계량 탱크 등으로 구성되며 핵심부품 간 유기적인 상호 연계 체계가 매우 중요

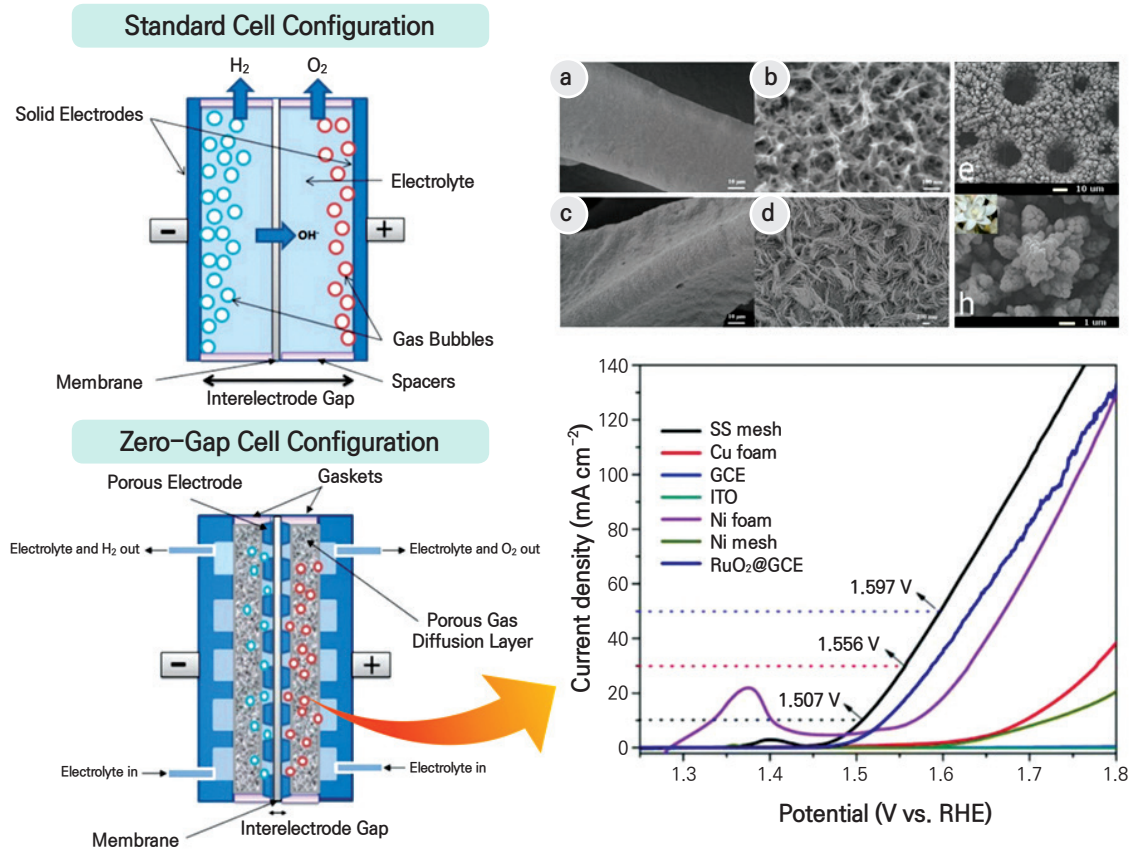
- 전원공급을 통해 알칼라인 수전해가 구동되고 스택에서 실질적인 수소의 생산이 이루어지며, 전극 전해질 내에서 기포 상태로 생산된 수소 기체가 수소와 산소 저장 탱크로 흘러 들어가는 시스템
- 공급 탱크는 수전해로 인하여 소모되는 물에 의한 알칼리 전해질 수용액의 농도변화를 방지하기 위해 지속적으로 증류수를 공급하는 역할
- 전극 소재의 열화를 방지하기 위해 빈번한 동적 작동(정지/시동 및 부하 변동)은 제한적이며 이는 수전해 시스템 효율성과 생산된 수소 기체의 순도에 부정적인 영향
- 이를 개선하기 위해 구동 전류 밀도 및 압력을 높이는 것뿐 아니라 동적 작동에 안정적으로 견딜 수 있는 전극 소재 및 수전해 시스템 최적 설계가 필요

그림 13 알칼라인 수전해 시스템 레이아웃

출처: *Renew. Sust. Energ. Rev.* 82 (2018) 2440

- ❖ 알칼라인 수전해 스택은 Ni, Co, Cu, Ag 등 비교적 가격이 저렴한 전이금속을 전극 촉매로 사용 가능
    - 다만 다공성 격막을 통한 생성 기체의 크로스오버로 인해 일반적으로 낮은 전류 밀도에서 구동되며 수소의 순도는 99.5~99.9% 정도로 다소 낮은 편
  - ❖ 일반적으로 알칼라인 수전해 스택에 사용되는 알칼리 전해질(KOH 또는 NaOH)의 농도는 25~30%이며 작동 온도는 60~80℃
    - 수전해 반응에 필수적인 전해액은 비전도율이 크고, 전극에 대한 부식성이 작으며, 대기 중의 CO<sub>2</sub> 흡수도가 낮고, 가격이 저렴한 KOH나 NaOH 수용액이 적합
    - KOH는 NaOH에 비해 도전율이 높고 탄산염의 용해도가 커서 시스템 효율은 높아질 수 있으나 가격이 비싸다는 단점 존재
    - 전해질 농도가 30% 이상이 되면 점도가 급격히 증가하여, 발생한 수소 기포에 의한 전극 표면 가림 현상으로 인해 전극으로의 전해질 공급이 어려워지고 수소 배출 속도가 저하되며 이온의 전달을 방해하여 수소 생산량이 감소
- 알칼라인 수전해 스택의 전극은 물리적·화학적 안정성, 전해액에 대한 낮은 저항 값, 수전해 시스템의 효율 향상을 위해 전기화학 촉매 반응 활성이 우수한 촉매 소재 특성 필요

그림 14 알칼라인 수전해 셀 전극 및 촉매 구조



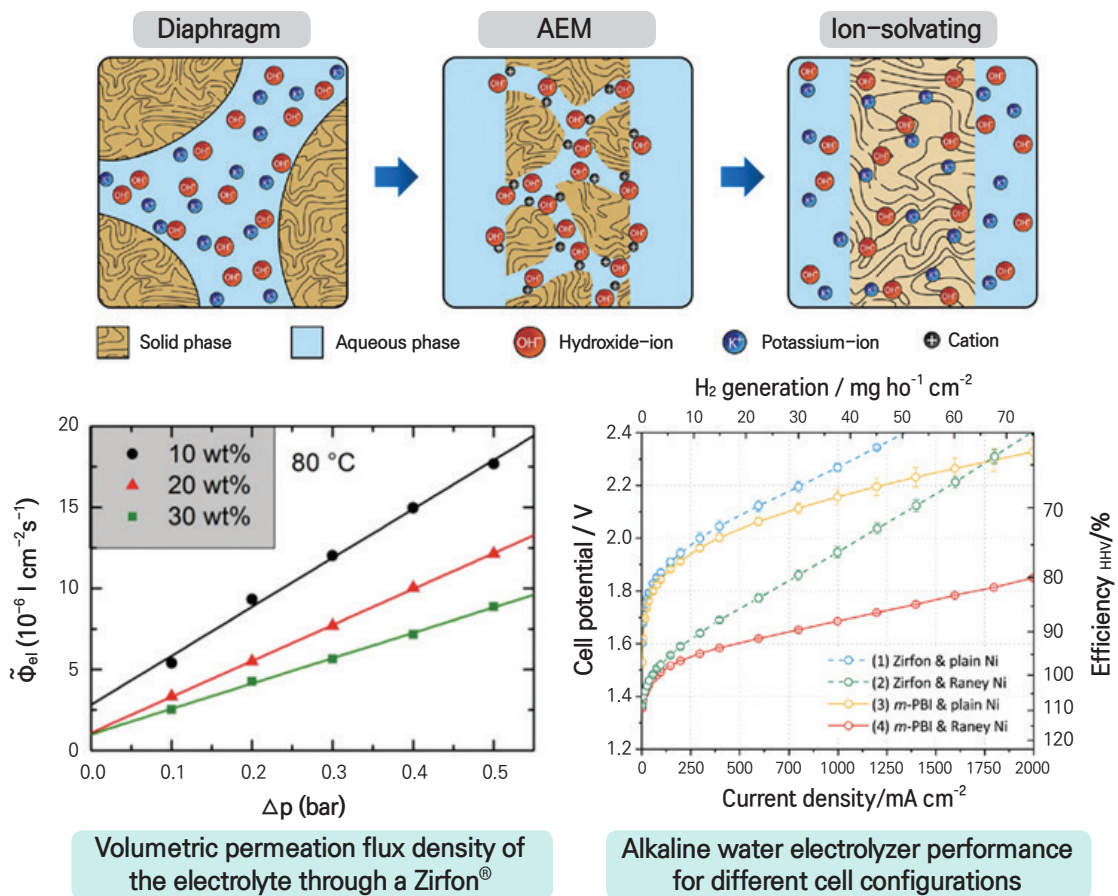
출처: RSC Adv. 6 (2016) 100643, Appl. Surf. Sci. 428 (2018) 370, Int. J. Hydrogen Energy 44 (2019) 1701, RSC Adv. 9 (2019) 31563

- 고전압에서 산소가 발생하는 애노드에서는 전극의 내부식성 향상이 중요하며, 전기화학적 물 산화 반응에 대한 과전압이 야기하는 효율 저하 방지기술이 필요
- 전기화학적 물 산화 반응 활성이 우수한 Ni, Co, Fe, Cu와 같은 금속 또는 합금이 촉매로 활용되고 있으나 전극 형상, 표면 구조, 전해액의 종류 및 작동 온도에 따라 수전해 효율이 달라지므로 다양한 전극면 처리 기술 개발이 요구
- 스택 내에서 전극 배치는 전극과 격막 사이에서의 이온저항을 줄이고, 대면적 전극 구현 시 생성 기체에 따른 물질전달 저항 증가를 줄이기 위해 전극과 다공성 격막 간 간격을 없앤 샌드위치 형태의 제로갭(zero-gap) 구조를 제작
  - 이러한 제로갭 구조 수전해 셀에서는 메쉬, 폼, 타공판 등의 다공성 구조체를 전극으로 사용하여 생성된 기체가 전극 외부로 원활하게 배출될 수 있도록 설계

## ■ 알칼라인 수전해 스택의 다공성 격막은 이온만을 선택적으로 통과시키고 양 전극에서 발생한 수소와 산소의 혼합을 방지하는 역할 수행

- 격막 소재는 60~80°C의 작동 온도 및 강염기(30% KOH) 환경에서 견딜 수 있는 화학적 내구성을 가져야 하며 높은 이온 전도도 요구
- 과거에는 내구성이 높은 석면과 테프론 등이 많이 사용되었으나, OH<sup>-</sup> 이온에 대한 낮은 선택성과 격막의 기공을 통한 양 전극 용액 내 기체 간 크로스오버 발생으로 수전해 시스템 효율을 저하시키는 문제점 발생
- 상용화 제품으로 polysulfone과 ZrO<sub>2</sub>로 구성된 Zirfon®이 있으나 장기 내구성이 취약하여, 최근에는 세라믹 입자를 고분자 바인더와 함께 분산시킨 다공성 복합체, 유리섬유 강화 폴리페닐렌 설파이드(polyphenylene sulfide, PPS), 이온 용매화 고분자막(ion-solvating membrane, KOH<sup>-</sup> doped polybenzimidazole) 등이 개발 중(*Membr. J.* 31 (2021) 133)

그림 15 격막 구조에 따른 이온 전달, Zirfon® 상용막의 구동압력에 따른 전해질액 투과도, 격막 및 촉매 종류에 따른 알칼리 수전해 셀 성능 변화



출처: *Energy Environ. Sci.* 12 (2019) 3313, *J. Electrochem. Soc.* 163 (2016) F1480

## 2) 해결해야 할 이슈

### ■ 고내구성 전극 소재 설계 기술 및 고성능화를 위한 표면 구조 제어

- 알칼라인 수전해 셀은 저렴한 비귀금속계 전극 소재를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있지만, 고전압에서 산소가 발생하는 애노드에서는 비귀금속 전극의 부식으로 인한 성능 저하가 심각하므로 고내구성 촉매 소재 설계 기술의 개발 필요
- 높은 활성을 갖는 촉매 소재라도 전극의 형상 및 표면 구조에 따라 수전해 효율이 달라지므로 다양한 전극 표면 구조 제어 기술 개발을 통해 성능 최적화 요구

### ■ 고내구성 및 크로스오버 저감 다공성 격막 개발

- 알칼라인 수전해 시스템의 격막은 높은 작동 온도 및 강염기 환경에서 견딜 수 있는 화학적 내구성 및 높은 이온 전도도가 요구되며 이를 동시에 만족시킬 수 있는 신소재 도입 및 구조 설계를 통해 고내구성 고성능 격막 개발 필요
- 기존의 다공성 지지체는 높은 내구성을 가지지만 격막 기공을 통한 양 전극 전해질의 크로스오버 현상이 심각하여 수전해 시스템 효율을 저하시키는 원인이 되므로, 높은 이온전도성 소재와 최적 구조를 갖는 지지체 간 소재 하이브리드 기술 개발 요구

### ■ 알칼라인 수전해 셀 및 스택 구조 최적화

- 알칼라인 수전해 스택에서 활용하고 있는 샌드위치 구조의 제로갭 셀 성능을 향상시키기 위해 다공성 격막 구조 최적화, 셀 내구성 향상을 위한 스택 구조 최적화 기술의 개발 필요
- 양 전극의 구조 및 기공도 최적화, 고압·고전류밀도 운전 조건에서 전극 간 밀접 구조로 인해 가속화될 수 있는 전해질 및 생성 기체의 크로스오버 저감 목표

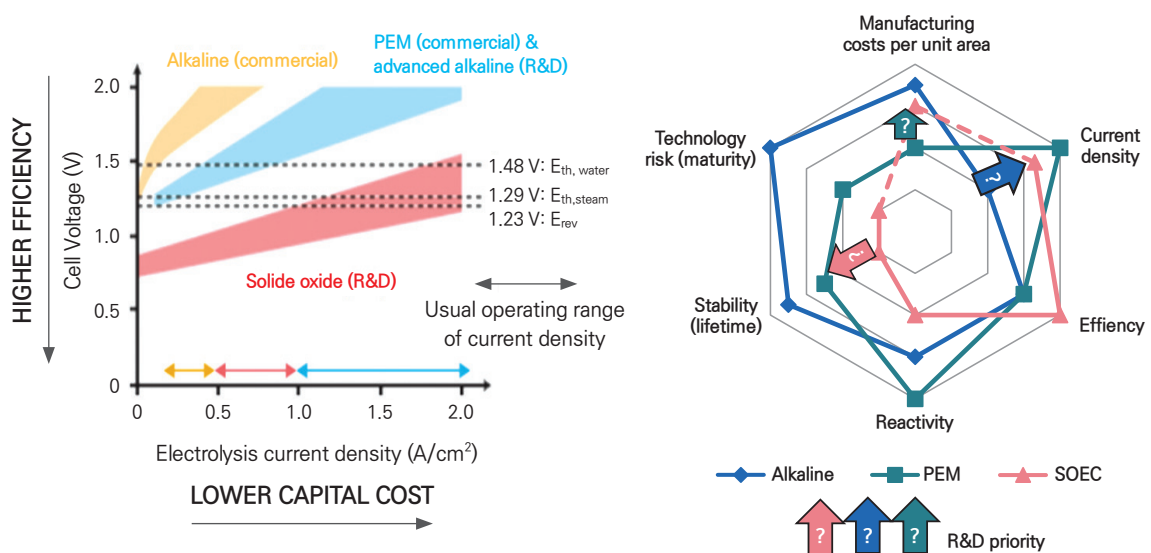
## 2 양이온 교환막(PEM) 수전해 기술

### 1) 현황

재생에너지 연계를 통해 탄소를 배출하지 않는 수소생산 방법 중에서 부하 변동 대응 및 고전류 밀도 대응에 유리한 PEM 수전해 방식이 빠르게 성장

- PEM 수전해 방식은 전류 변화를 추종하는 응답 속도가 빠르고(<10 s), 재생에너지의 출력 변화 변동성이 심하다는 점을 감안하면, PEM 방식은 재생에너지 전력을 이용한 그린수소에 더 적합
  - 대용량 스택 구성을 통해 MW급 수전해 장치의 상업화가 이루어지고 있어, 발전 가능성이 높은 기술로 신재생에너지 시대의 수소생산 장치에 가장 적합한 기술
- 앞으로 발전가능성이 높은 기술로서 이후 수소충전소 등의 시장선점을 위해서는 생산 단가를 낮추고 안정성을 높이는 연구가 필요
- 낮은 온도에서 순수한 물을 이용해 고순도의 수소를 고압으로 제조할 수 있고, 미량의 수분을 제거하면 별도의 정제과정 없이 최소 순도 99.99%이상의 수소를 얻을 수 있어 산업용 수소 중에서도 고순도 수소시장에 적합한 기술로 평가

그림 16 수전해 방식별 부하 변동 및 고전류 밀도 대응 비교와 특징 비교

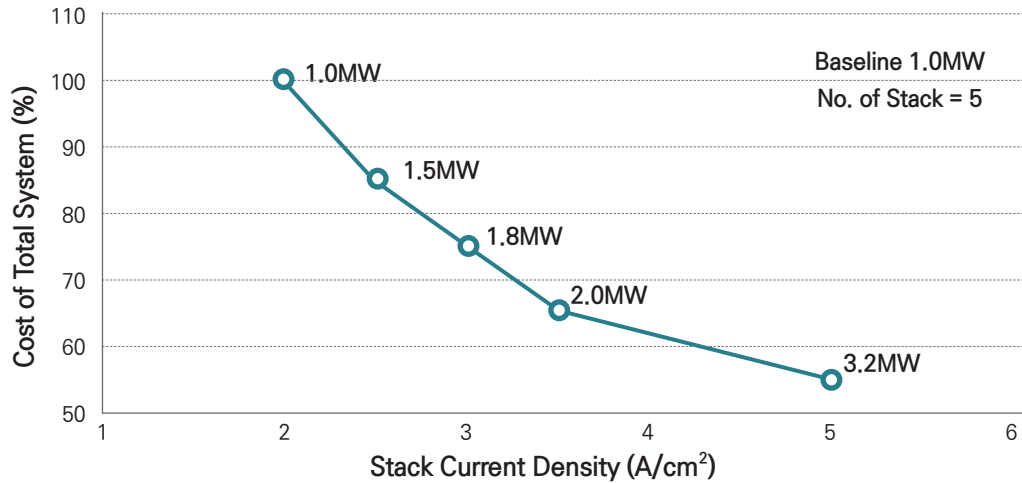


출처: SBC Energy Institute, "Hydrogen-based energy conversion"(2014).

- 독일 NOW의 시장 조사를 통한 PEMEC, AEC, SOEC의 에너지 소비량 전망과 셀의 밀도 전망에 따르면 PEMEC의 생산량이 늘어날 것으로 예측
  - 현재 AEC가 PEMEC보다 전력 소비량이 낮으나 2030년경에는 PEMEC 기술이 AEC을 따라잡을 수준의 경제적 효율을 발휘할 것으로 전망
- 알칼라인 수전해 및 고체산화물 수전해법에 비해 운전 전류밀도가 높고 높은 순도의 수소를 생산할 수 있어 상용화 수준에 가장 근접해 있다고 평가
- 스택의 운전전류밀도가 증가함에 따라 전체 시스템 가격이 급격히 감소(2 A/cm²에서 5 A/cm² 증가 시 45% 감소)하기 때문에 고전류밀도에서 운전할 수 있는 고성능 MEA의 개발이 필수적



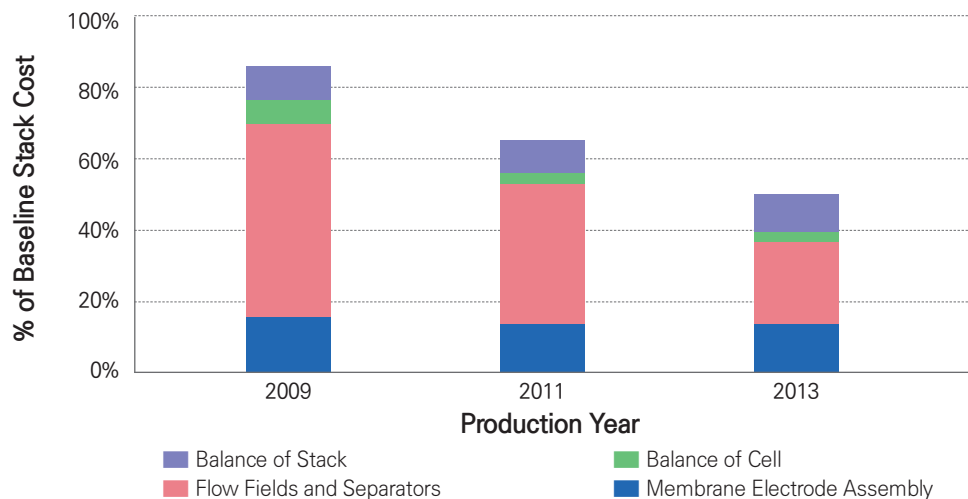
그림 17 전류밀도에 따른 Stack 비용의 변화



출처: Proton Onsite, IEA-AFC ANNEX 30 - MEGAPEM Workshop

■ PEM 수전해 스택은 지속적인 개발을 통해 제조원가의 약 60%를 차지한 유로(Flow field)의 비중을 반 이하로 줄이는 등, 전체 가격 저감을 실현했음에도 불구하고 MEA의 가격은 유지

그림 18 스택 제조가격 및 구성요소별 비율



출처: Proton Onsite, IEA-AFC ANNEX 30 - MEGAPEM Workshop

■ MEA 가격변화가 거의 없는 것은 전극 소재로 Ir(애노드) 및 Pt(캐소드) 등 고가의 귀금속을 다량으로 사용하기 때문이며, 이로 인해 PEM 수전해 전극 촉매에는 생산과 공급 측면에 있어 원천적으로 한계가 존재

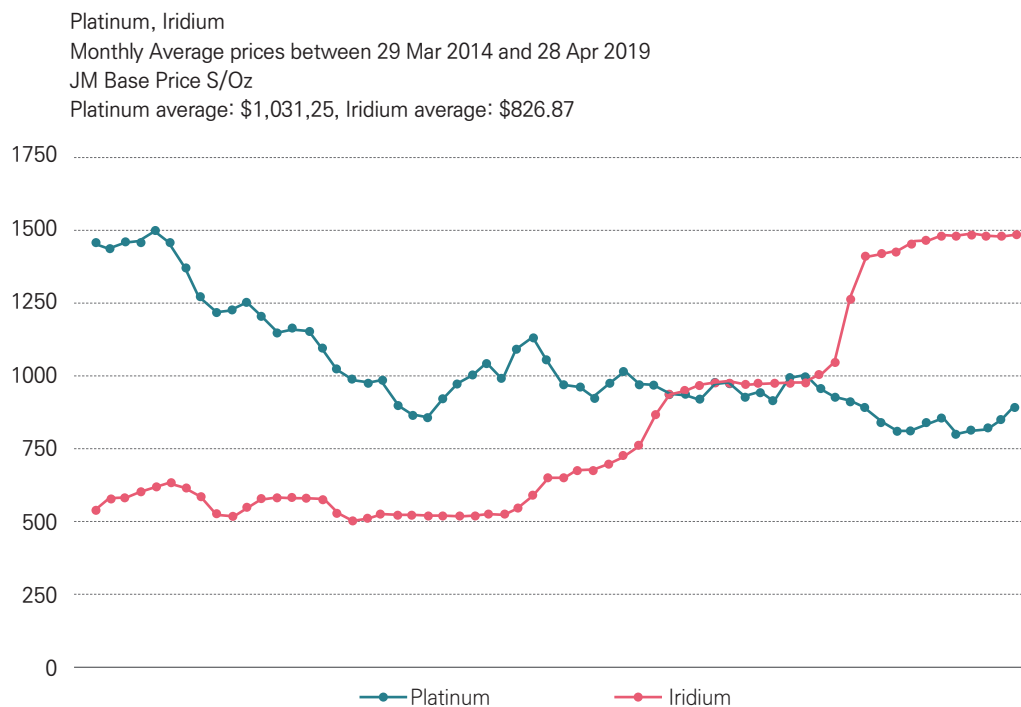
- Pt은 연료전지 자동차를 비롯한 다양한 산업에 필수적으로 사용되는 촉매로, 수전해 시스템에 대량으로 활용될 경우 그린수소 생산과 가격에 치명적(최근 20년간 Pt가격은 £10.58/g에서 £28.23/g까지 상승(LBMA, Precious metals prices. 2019))

- Ir은 Pt 생산 시 부산물로 얻어지기 때문에 2019년 기준 연간 생산량은 7.5톤에 불과하며 현재 Ir 가격은 지속 상승(최근 20년간 Ir가격은 £11.11/g에서 £58.22/g까지 상승(J. Matthey, Precious metal prices, 2019))

※ 1톤의 Ir 촉매는 대략 100 MW급 수전해 장치 20대를 만들 수 있는 양

- Ir 촉매가 사용되는 애노드는 높은 과전압으로 인해, 담지체를 사용하지 못하여 고가의 Ir 촉매가 단독으로 사용되며, Ir 촉매의 이용률이 급감하고 반응물과 생성물 간 높은 물질전달 저항 발생

그림 19 Pt, Ir 가격 변화 동향

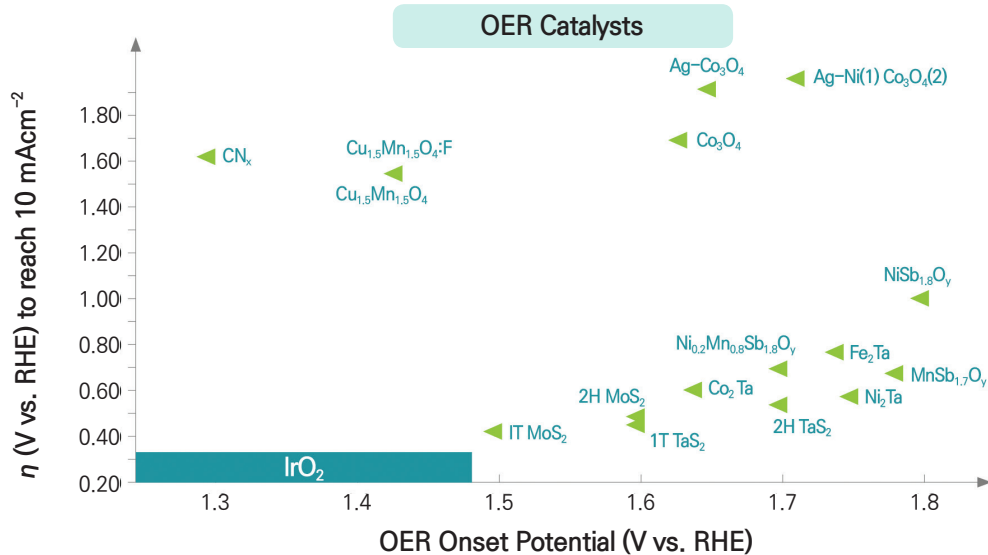


## ■ 저가의 PEM 수전해 스택을 개발하기 위해서는 Ir 사용량을 저감 하면서도 높은 성능을 가지는 MEA의 개발이 필수적

- ❖ 고순도 수소를 합리적인 가격으로 생산하기 위해서는 전극 촉매의 성능 및 내구성 감소 없이 고가의 희귀 귀금속 촉매를 저가의 비귀금속 촉매로 대체하는 것이 필수
- ❖ 더불어 촉매의 비표면적을 유지하고 물질저항 전달을 최소화할 수 있는 전기화학적 내부식성을 갖는 담지체를 개발하는 것이 필요



그림 20 산소발생촉매들의 성능 비교

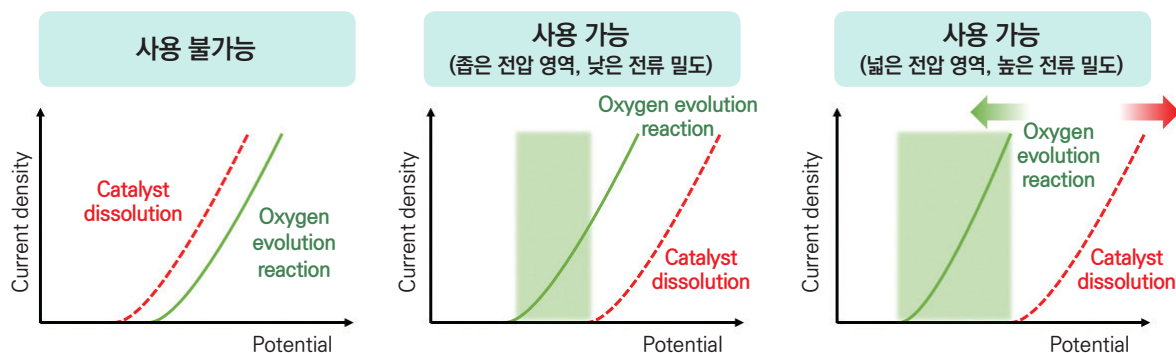


출처: Renew. Sust. Energ. Rev. 139 (2021) 110709

### ■ 그러나 PEM 수전해 구동 조건에서 전이금속 촉매 기반 애노드의 내구성 확보는 현재 기술 수준으로는 달성이 어려움

- ❖ Ir 등 귀금속의 경우 산화 경향성이 낮거나 그 속도가 느려 수만 시간의 작동을 목표로 할 수 있으나, 동일량의 전이금속의 경우 그 산화 속도를 늦추기가 어려워 전극 내구성 확보 난항
- ❖ Ir 산화물 촉매는 물 산화반응의 반응물 및 중간물질인 수산화기, 산소이온을 흡착하는 흡착력이 적절하여 높은 물 산화반응 활성을 지니고 있으나, 이와 비슷한 수준의 안정적인 금속표면은 현재까지 미보고 상태
- ❖ 촉매 활성이 증가할수록 촉매의 용해로부터 자유로운 전압 영역이 넓어질 수 있기 때문에 더 높은 전류 밀도를 확보할 수 있으나, 기존의 전이금속 촉매 기반 전극의 경우는 큰 과전압 발생

그림 21 전이금속 촉매 기반 전극의 OER 내구성(반쪽 전지) 모식도

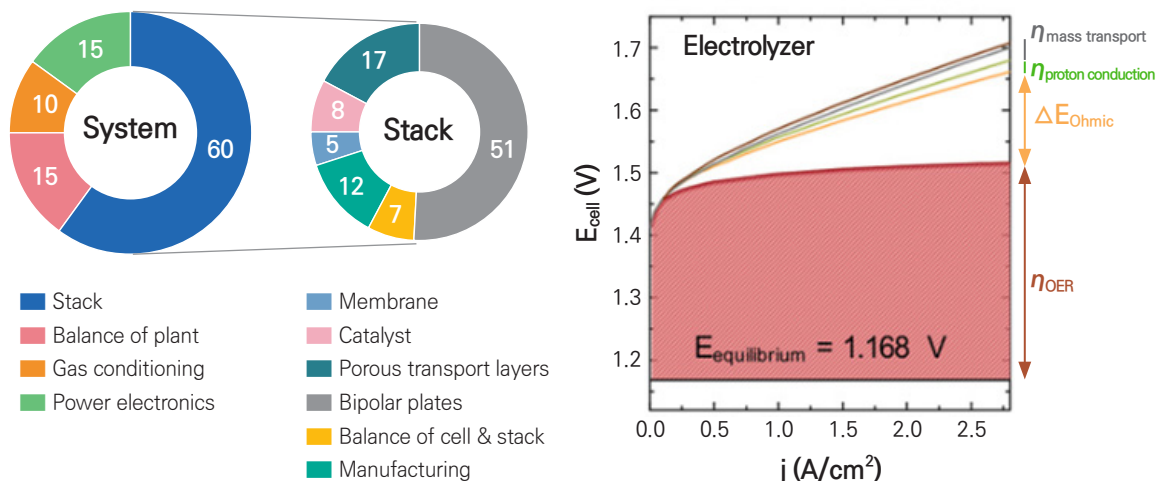


## 2) 해결해야할 이슈

### ■ 귀금속 촉매 기반 PEM 수전해 대비 성능·내구성이 떨어지지 않는 비귀금속 수전해 촉매 및 전극 개발

- 향후 신재생 에너지 연계 수전해 수소생산을 위해 수십-수백 MW급 이상의 대형 수전해 장치 개발 요구
- 그러나 Ir의 가격 및 생산량 문제로 인해 수백 MW급 양이온 고분자 교환막 수전해 장치에 현재의 Ir 산화물 전극을 적용하여 대량으로 보급하는 것은 물리적으로 불가능
- 수전해 산소발생 반응으로 인한 높은 열화학적 과전압으로 인해 가격이 비싼 귀금속 촉매를 과량 사용하는 문제 해결 필요

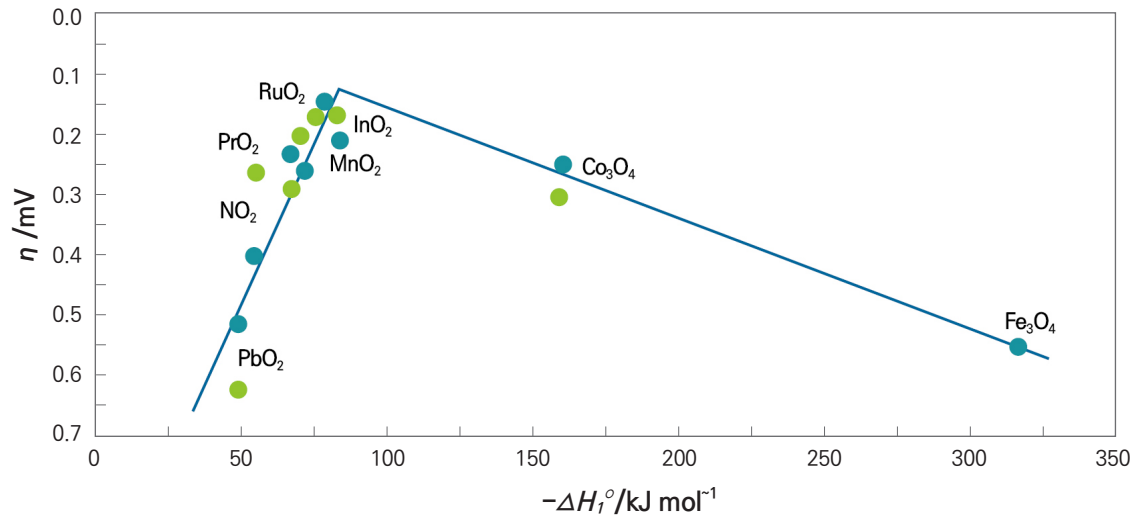
그림 22 PEM 수전해 구성품의 가격 비율 및 다양한 전압 감소 요소들의 기여도



출처: J. Electrochem. Soc. 164 (2017) F387

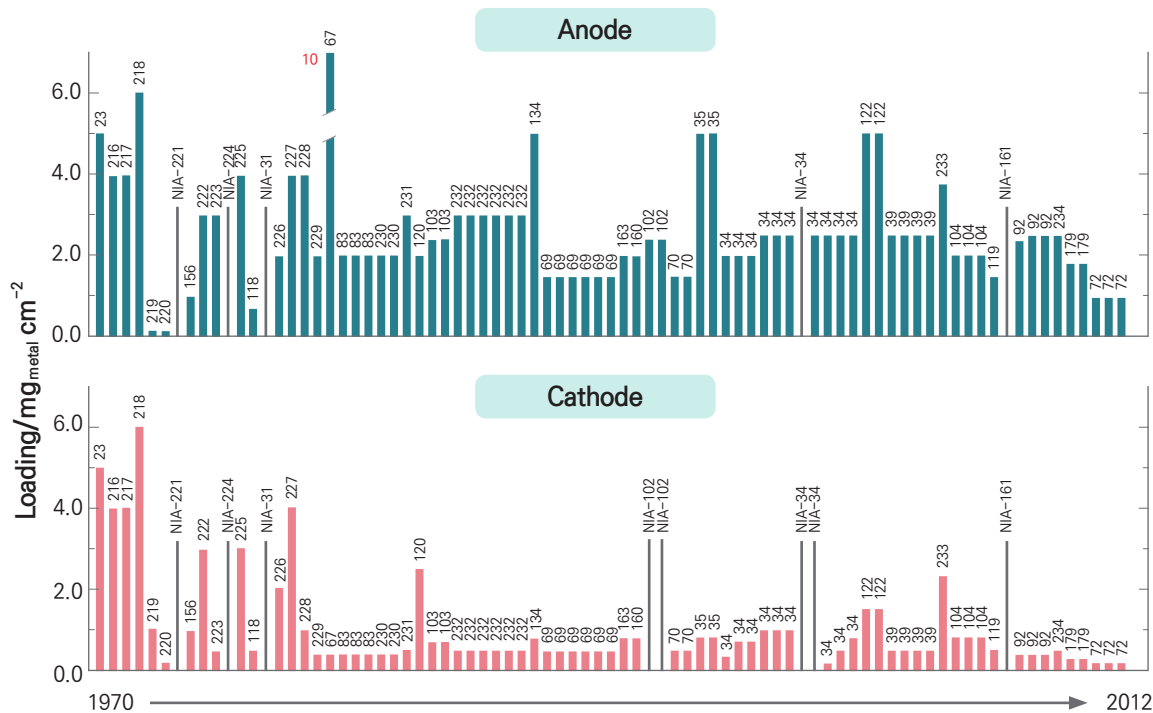
- 상기 언급한 성능 및 내구성의 한계로 PEM 수전해 촉매 및 전극 개발은 크게  $IrO_2$  및 Pt의 이용률을 높이고 그 사용량을 줄이는 방향으로 전개
- 이를 통해 지난 50년간  $IrO_2$ 의 사용량은  $5-6 mg/cm^2$  수준에서  $1 mg/cm^2$  수준으로 저감되었고, Pt 사용량 역시  $5-6 mg/cm^2$  수준에서 약  $0.5 mg/cm^2$  수준으로 감소
- PEM 수전해의 대량 보급(향후 20년간 전 세계적으로 수십 GW이상)을 위해서는 귀금속 촉매를 대체할 비귀금속 촉매 개발이 절대적으로 시급한 실정

그림 23 PEM 수전해 산소발생 촉매 성능 경향성



출처: Chem. Rev. 110 (2010) 6474

그림 24 PEM 수전해에 사용되는 촉매 사용량 저감 경향



출처: Inter. J. Hydrog. Energy 38 (2013) 4901

### 3 음이온 교환막(AEM) 수전해 기술

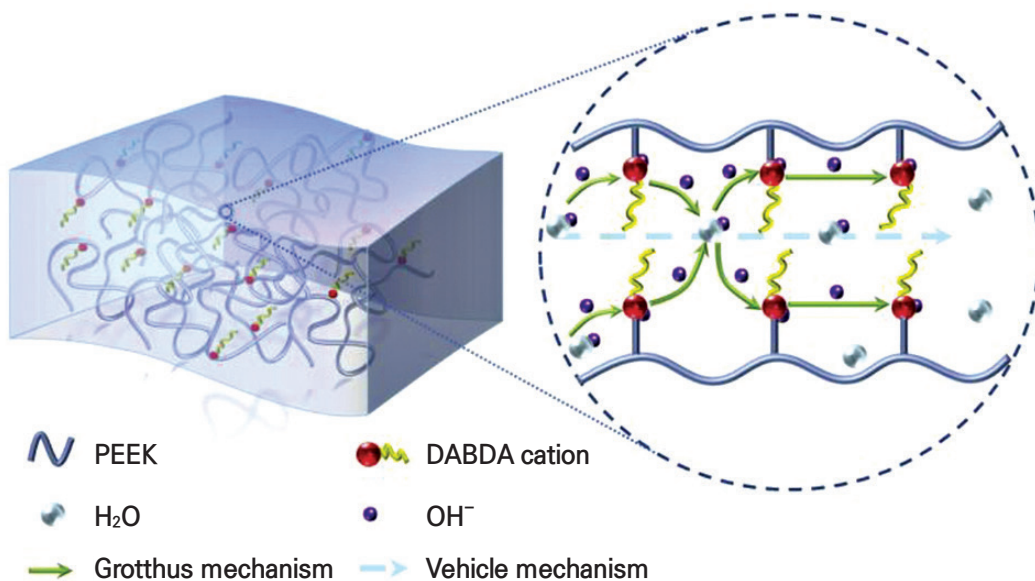
#### 1) 현황

■ 유향전력을 가장 효율적으로 저장할 수 있는 수소생산 기술로서 그린수소 생산 방식 중 가장 경제적이면서 효율적인 시스템

■ 2030년 재생에너지 발전 비중을 20%까지 확대하는 정부 정책(재생에너지 3020)에 대응해 재생에너지의 부하변동성과 간헐성 및 잉여 전력 발생 문제 해결 가능

■ AEM 수전해 기술로 생산된 그린수소는 현장의 수소생산 뿐만 아니라, 운송/저장을 통해 모빌리티 분야(수소승용차, 버스, 트럭, 지게차, 드론, 로봇 등), P2G 분야(메탄화 등), 발전 분야 등 그린수소 수요처 확대 개발로 보급 증대를 통한 수소경제 조기 정착 및 수소 선도국가 도약에 이바지할 수 있을 것으로 예상

그림 25 이온 교환막 및 음이온 전도 메커니즘 모식도



출처: Int. J. Hydrog. Energy. 46 (2021) 8156

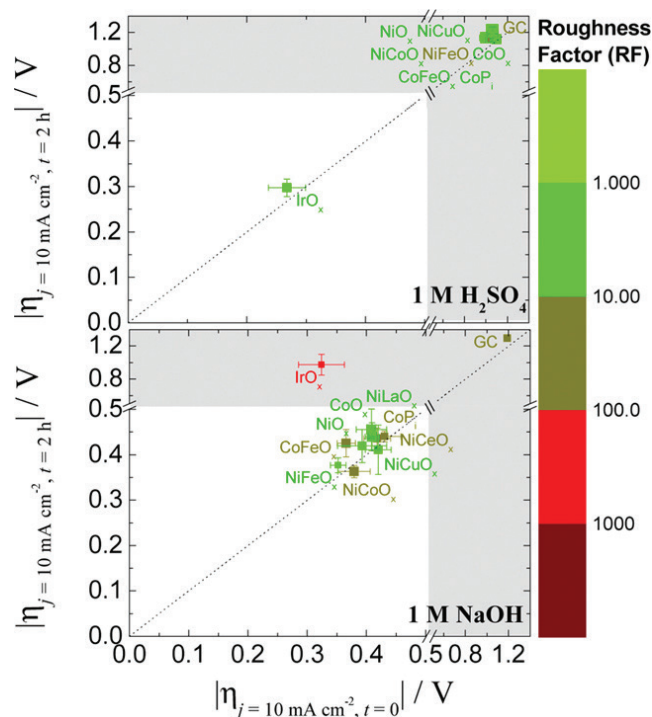
## ■ 전이금속 기반 합금, 다양한 산화물 및 황화물 등 비귀금속계 촉매를 활용한 전극 촉매의 가격 경쟁력 확보 가능

- ❖ 알칼리 환경에서 작동하는 음이온 교환막 수전해의 경우 다양한 전이금속 촉매의 안정성 보고
- ❖ 특히 애노드(산소발생) 촉매의 경우 니켈 기반의 철합금 산화물 또는 코발트 기반의 철 합금 산화물이 높은 활성을 나타냈으며, 단전지(half-cell) 환경에서 비교적 우수한 안정성을 보이며 다양한 소재의 응용 가능성 제시(그림 26)

## ■ 음이온 교환막의 안정성, 음이온 교환 전도도, 이산화탄소에서의 피독 등의 문제점 보유

- ❖ 양이온 교환막에 비해 음이온 교환막의 경우 효율적인 이오노머(ionomer) 부재
- ❖ 안정성 문제를 극복하기 위해 가교(crosslink) 방식을 활용하여 두 원자 또는 두 개의 고분자 사슬 사이를 연결하여 3차원 그물모양 구조를 접목함으로 안정성 향상 연구 중

그림 26 수전해 전기촉매의 활성 및 안정성 결과 (x축: 초기성능, y축: 2시간 구동 후 성능)

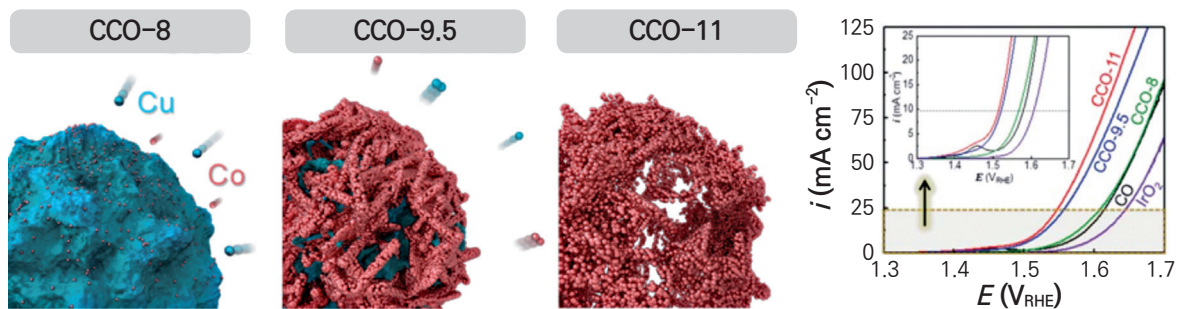


출처: J. Am. Chem. Soc. 46 (2021) 8156

■ 연료전지 막전극 접합체 및 양이온 교환막 수전해와 구성상 거의 동일하여 초기 진입장벽이 높지 않은 장점을 기반으로 다양한 전극구조 연구 진행

- 이온전달과 전자전달이 최적화된 다공성 전극구조 개발을 통한 고효율 전극 설계 연구 추진 중
- 전이금속 합금 산화물 촉매의 구조 제어를 통해 효율적인 음이온 교환막 수전해 산화반응의 전극활성 변화를 연구(그림 27)
- 니켈 폼 등 일체형 전극에 다공성 전극 구조체를 도입 및 전이금속 합금 촉매의 형상제어를 통해 촉매의 구조 변화에 따른 최적의 음이온 교환막 수전해 전극구조 연구

그림 27 전이금속 합금 기반 다공성 고효율 수전해 촉매 전극구조 개발

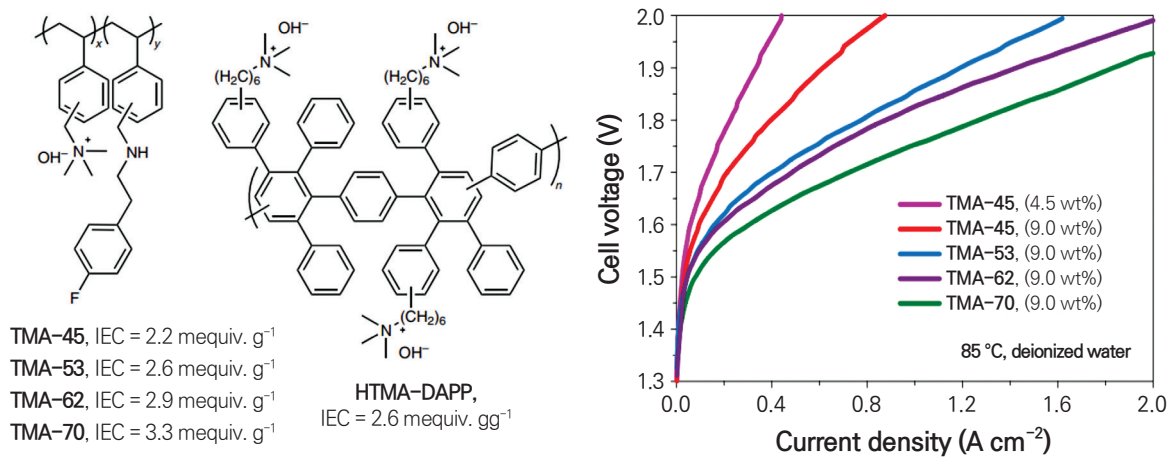


출처: J. Mater. Chem. A 8 (2020) 4290

■ 고분자 전해질과 촉매의 상관관계 연구는 매우 기초적인 수준으로 촉매와 전해질의 활성과 안정성을 위한 상호작용 및 설계 연구 진행

- 비귀금속계 산화반응 촉매와 이오노머의 상관관계 분석을 통한 새로운 계면구조의 제안, 다양한 환경에서의 음이온 교환막 수전해의 응용 가능성 검증(그림 28)
- 막과 이오노머에 포함된 유기구조체의 촉매 흡착 및 촉매와의 반응을 통해 촉매 성능 저하 및 내구성 저하에 대한 가능성 연구

그림 28 새로운 고분자 전해질 이오노머와 전극촉매의 상관관계 검증 및 계면 설계



출처: Nat. Energy 5 (2020) 378

■ 유럽과 일본 기업들을 중심으로 AEM 수전해 기술 상용화가 시도되고 있으나 아직 세계적으로 성공한 기업은 부재하며, 국내 기업이 선도적인 기술 확보 및 사업화 시, 세계 수전해 시장을 선점할 수 있을 것으로 기대

- 일본 Tokuyama Corporation, 독일 Fumatech, Solvay 등에서 음이온 교환막 상용 제품을 제작했으나 양이온 교환막 대비 내구성 등에서 취약해 수전해 설비에 적용되지 못하고 보완 기술을 개발 중
- 이탈리아 Acta SpA는 AEM Pilot 수전해 설비(0.09kg/h)를 개발했으며, Enapter의 경우 '22년에 MW급 AEM 설비를 출시할 예정
- 한화솔루션이 '23년 상용화를 목표로 AEM 연구개발을 진행하고 있으며, 대학 연구소에서 AEM 수전해에 관한 다양한 요소기술을 연구 중

## 2) 해결해야할 이슈

### ■ 낮은 안정성 문제를 극복하는 촉매 및 전극구조 설계

- 애노드(산소발생) 촉매의 경우 용출현상, 재증착 현상 등 원자단위에서의 불안정성과 낮은 전기전도도 문제로 인해 막전극접합체에 적용 시 낮은 성능 발생
- 장기 안정성을 고려한 촉매 설계 및 촉매의 신뢰도 있는 안정성 평가 방법 개발 필요

### ■ 촉매와 전해질의 상호작용 메커니즘 및 막전극 접합체 계면(interface) 연구

- 음이온 교환막에 주로 응용되는 제4 암모늄(quaternary ammonium)기, 페닐(phenyl)기 등 다양한 막(이오노머) 소재와 촉매의 상호작용이 음이온 교환막 수전해 성능에 결정적인 영향 요소이나, 계면 상호작용 연구는 매우 부족한 상황
- 촉매 및 막(이오노머)의 계면을 분석할 수 있는 신뢰도 있는 분석방법 개발 및 피독 현상을 검증할 수 있는 프로토콜 개발이 시급
- 이를 기반으로 촉매 표면의 개질, 표면 구조 제어, 표면의 물성 변화 등을 통해 피독 현상을 회피하는 촉매 표면 설계 기술 연구가 요구

### ■ 막전극 접합체 및 시스템의 특성 연구

- 현재 음이온 교환막 수전해 기술의 경우 기존의 연료전지와 양성자 교환막 수전해 기술을 적용하는 수준
- 기존 막전극 접합체의 기능요소와 음이온 교환막 수전해의 특성을 고려하여 체계적인 접근이 요구
- 음이온 교환막 산소발생 전극의 비귀금속계 산화물 기반 촉매의 경우 전기전도도가 매우 낮은 문제점이 있어, 이를 극복하기 위해 전극구조의 전기전도도를 향상시킬 수 있는 새로운 다차원 구조(코어-셸), 새로운 접합 형태의 시도가 요구



## 03

## 수전해 그린수소 산업동향



## 1 기술 개발 동향

■ 1920년대부터 1세대 알칼라인 수전해 기술 개발이 시작되어, 현재는 2세대 기술로서 재생에너지 연계를 위한 운전 범위 확대 및 전류 밀도 향상 기술을 개발 중

## ■ 해외 기술개발 동향

❖ 독일, 덴마크, 미국, 일본 등 해외의 기술 선진국은 수전해 기반 그린수소 생산 기술의 중요성을 인식하고 20년 전부터 기술개발을 진행하여 현재 약 80%의 수소 생산 효율을 확보한 MW급 수전해 스택 및 소재·부품 기술을 보유

- (독일) 2011년~2014년 독일항공우주센터, 덴마크공대, 벨기에의 Hydrogenics Europe NV로 구성된 REselyser 프로젝트 컨소시엄은 재생에너지 연계 알칼라인 수전해 기술 개발을 추진하여, 76% 효율을 가진 10 kW급 알칼라인 수전해 스택 개발

- (덴마크) Green Hydrogen社は Siemens, 덴마크공대, Aarhus 대학으로 구성된 HyProvide 프로젝트를 통해 85% 효율을 가진 저가 모듈형 250 kW급 알칼라인 수전해 스택 개발
- (미국) National Renewable Energy Laboratory(NREL)는 2003년 10 kW급 알칼라인 수전해 스택을 개발하고, 2017년 재생에너지 연계 250 kW급 수전해 시스템 개발

그림 29 RESelyser 프로젝트 개발 10 kW급 알칼라인 수전해용 스택 및  
Green Hydrogen 社 개발 250 kW급 알칼라인 수전해 시스템



출처: 좌) <http://www.reselyser.eu>, 우) <https://greenhydrogensystems.com>

## ■ 국내 기술개발 동향

- ❖ 한국에너지기술연구원은 정부 R&D 사업(수소에너지혁신기술개발(2019년~2023년))을 통해 재생에너지 연계형 알칼라인 수전해 기술 개발 중
  - 2020년 태양광, 풍력 등과 같이 간헐성과 변동성 재생에너지를 이용하여 안정적으로 그린수소를 생산할 수 있는 '부하변동 대응형 수전해 스택' 개발 완료
  - 이후 2021년 물을 전기분해하여 최대 84%(HHV 기준)의 효율로 2 Nm<sup>3</sup>/h의 그린수소를 생산할 수 있는 '10 kW급 알칼라인 수전해 스택' 자체 개발 성공
  - 개발된 알칼라인 수전해 스택으로 1,008시간을 운전하는 동안 82%의 수소 생산 효율을 유지함으로써 성능 및 내구성 검증 완료
- ❖ 한국재료연구원은 2021년, 그린수소 생산을 상용 수준으로 끌어올리는 음이온교환막수전해 촉매-전극-스택 전주기 통합 기술을 개발
  - 고효율의 수전해 시스템을 완성하기 위해서는 스택 맞춤형 고효율 촉매 개발이 필수적이며, 촉매 단위의 성능 검증을 넘은 상용 수준의 스택 성능 검증 필요

- 연구원은 기존의 저렴한 니켈, 코발트 촉매 나노입자에 산화도를 부분적으로 제어해 수소 발생 활성을 감소시키는 OH<sup>-</sup>의 흡착 반응을 산화물에 집중
- 활성금속촉매 성능 향상, 금속이온입자 용출 억제로 수소 발생 시 생기는 활성도 및 내구성을 동시에 확보하고 이를 수소발생 시스템에서 확인하여 상용 수준의 대면적 스택에 적용 · 구현할 수 있다는 점을 국내 최초 확인

그림 30 한국에너지기술연구원 개발 알칼라인 수전해 시스템 및 스택



출처: 월간수소경제

## 2 산업 동향

### ■ 해외 산업 동향

- ❖ 세계 그린수소 시장은 2020년 84억 달러에서 2024년 176억 달러로 연평균 20% 성장할 것으로 기대

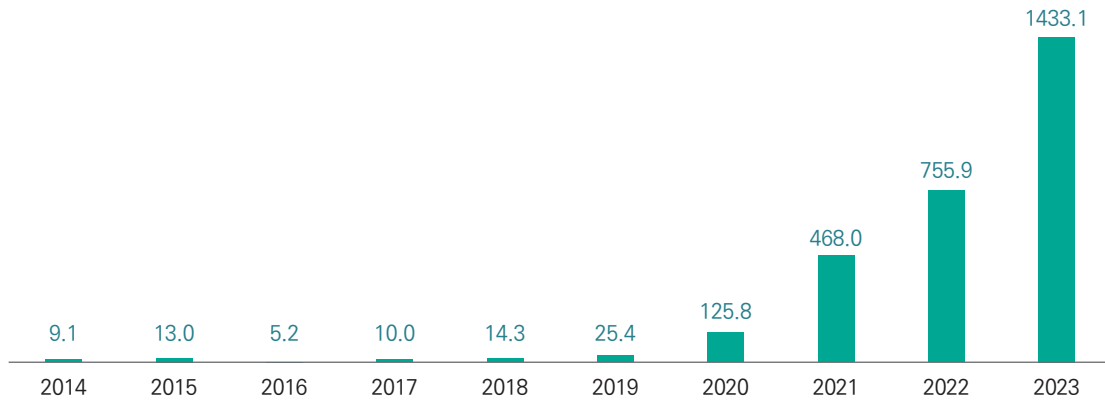
출처: Konzept Analytics (2020), Global Hydrogen Market

- ❖ 2018년 이전 세계 신규 수전해 설비 설치 현황은 연평균 10 MW 규모였으나 2019년 25.4 MW로 급격히 증가했으며, 2023년에는 알칼리 및 고분자전해질 수전해 시스템에 기반해 1,433 MW 규모 확대 전망

출처: [www.iea.org/reports/hydrogen#tracking-progress](http://www.iea.org/reports/hydrogen#tracking-progress)

그림 31 세계 수전해 설비 신규 설치 현황 및 계획

(단위: MW)



출처: KISTEP 기술동향브리프 2021-02호

- ❖ (독일) 재생전력원의 이용률을 높이기 위한 P2G 설비 용량을 2025년까지 5 GW, 2050년까지 40 GW 수준으로 확대할 계획

  - Audi社は Audi e-gas 프로젝트를 통해 2 MW급 알칼라인 수전해 설비 3개 가동
  - E.ON社は 2 MW급의 풍력발전 연계 수전해 시스템(360 Nm<sup>3</sup>/h) 운전 중
- ❖ (프랑스) 기업을 중심으로 알칼리 및 고분자전해질 수전해 설비를 개발·운영 중

  - Air Liquide社は 2019년 세계 최대 규모인 20 MW급 PEM 수전해 시스템 설치·운영
  - McPhy社は 20MW급 알칼라인 수전해 프로젝트(연 3,000톤 수소 생산 목표)를 진행 중이며, Nouryon社 및 Gasunie社와 함께 네덜란드에 수전해 설비 설치
- ❖ (노르웨이) NEL社は 대표적인 노르웨이의 알칼라인 수전해 기업으로 2017년 미국의 Proton Onsite社(PEM 수전해 대표기업)를 인수하여 그린수소 생산 사업 선도

  - 2016년 미국 Southern California Gas社와 함께 10 Nm<sup>3</sup>/h 생산 가능한 알칼라인 수전해 기술 실증사업을 수행
  - 2017년 150 Nm<sup>3</sup>/h 생산 가능한 수소 충전소용 알칼라인 수전해 시스템 설치·운영
- ❖ (일본) Asahi-Kase社は 2020년 1,200 Nm<sup>3</sup>/h로 수소 생산 가능한 10 MW급 알칼라인 수전해 시스템 개발(연간 최대 900톤 수소 제조 가능)
- ❖ (미국) 재생전력원 연계 P2G 기술로서 태양광-수전해-연료전지를 연계한 United Regenerative Fuel cells(URFCs)가 개발 중

  - 1970년대 초 인공위성 적용을 목표로 PEM 기반의 URFC의 개념을 제안하며 지난 수십 년 간 다양한 실증사업을 추진 중

- 2005년 NASA에서는 15 kW급 PEM 수전해 시스템과 5 kW급 PEM 연료전지를 연계한 약 40 kWh URFC 시스템 실증

## ■ 국내 산업 동향

- ❖ 국내 수전해 산업은 재생에너지 전력 보급 미흡 및 투자 저조로 인해 아직까지 초기 개발단계의 기술력을 보유하고 있으며 시장 형성에 난항
  - 국내 수전해 업체는 그동안 외국 부품 수입 및 단순 조립·운전 수준에 그쳤으나, 정부 R&D 사업 수행 또는 자체 연구개발을 통해 기술력을 축적하고 있는 상황
- ❖ 2017년부터 P2G 기술에 대한 정부의 적극적인 투자와 함께 현재 해외 수전해 업체 기술을 추격하기 위한 기반기술을 개발 중
  - 국내에서는 2017년 제주 상명풍력단지에서 250kW급 수전해 기술개발 및 실증사업을 시작으로 1 MW급(울산), 2 MW급(동해), 3 MW급(제주행원) 등 소규모 수전해 실증사업들이 단계적으로 추진
  - 엘캠텍은 2003년부터 PEM 수전해 기술을 개발하여 막전극접합체 등 원천 기술을 보유하고 있고, 국내 수전해 시스템 실증 연구를 다수 진행하고 있으며, 2022년 1 MW급 PEM 수전해 장치의 실증 계획
  - 수소에너지젠은 현재 400 kW급 수전해 실증사업을 진행하고 있으며 2022년 1 MW급 알칼라인 수전해 장치를 실증할 예정
- ❖ 향후 국내에서 진행될 대규모 수전해 실증사업에 국내 수전해 설비가 적용될 수 있도록 정부 주도 하의 기술력 향상 도모 중
  - 산업통상자원부는 2021년 11월 발표된 '제1차 수소경제 이행 기본계획' 상의 30년 국내 그린수소 25만톤 생산·공급 목표 달성을 위한 후속 조치로 10 MW급 수전해 실증을 시작할 계획
  - 2026년에는 연간 약 1,000톤 규모의 그린수소 생산(수소 승용차 약 4,300대분) 능력 확보와 함께 수소 모빌리티 등 다양한 분야에의 실증 설비 활용 기대
  - 또한, 공모를 통해 수전해 기반의 수소생산 기지 3곳을 신규로 지정하여 1개 소당 54.3억원의 설치비용을 지원 예정

## 04

## 정책동향



## 1 국내 정책동향

## ■ 수소 경제 활성화 로드맵 (2019)을 통한 수소경제 활성화 방안 제시

- 재생에너지를 활용한 그린 수소생산 기반을 구축하고, 이를 통해 생산된 수소를 연료전지, 다양한 모빌리티 등에 활용하여 기존 탄소 중심의 에너지 패러다임을 친환경 수소로 전환
- 수소차 부분, 에너지 부분, 수소생산 부분 활성화 전략으로 나뉘며 특히 수소생산의 경우 그린수소 확대를 연간 526만톤 및 가격 kg당 3000원 목표 설정(그림 33)
- 2022년 MW급 재생에너지 연계 수전해 기술을 확보하고, 대규모 태양광 풍력 발전과 연계하여 수소의 대량생산을 추진

그림 32 수소경제 활성화 로드맵 요약

구분		2018년	2022년		2040년
활용	수소차	1.8천대 (0.9천대)	8.1만대 (6.7만대)	〈2030〉 수소차 생산라인 구축	620만대 (290만대)
	승용차	1.8천대 (0.9천대)	7.9만대 (6.5만대)	〈2023〉 전기차 가격수준	590만대 (275만대)
	버스	2대	2천대	〈2025〉 상업적 양산 (수 10만대 생산) 내연차 가격수준	6만대 (4만대)
	택시	-	-	전국 확대	12만대 (8만대)
	트럭	-	10톤 트럭	핵심부품 100% 국산화	12만대 (3만대)
	수소충전소	14개소 (1,000만원/kg)	310개소	300만원/kg 핵심부품 100% 국산화	1,200개소
	선박, 열차, 드론, 기계 등	-	-	30년까지 상용화 및 수출	-
	연료전지	-	-	-	-
	발전용	307MW	1.5GW (1GW)	〈2025〉 중소형 가스터빈 발전단가 수준	15GW (8GW)
	가정·건물용	7MW	50MW	〈2040〉 설치비 35%, 발전단가 50% 2015	2.1GW
수소 공급	수소공급량	13만톤/년	47만톤/년	-	526만톤/년
	생산방식	화석연료 기반 부생수소 추출수소	수전해 활용	수전해 수소의 대용량 장기 저장 기술개발	그린 수소 활용 (수전해+해외생산)
수소가격		-	6,000원/kg (現 휘발유의 50%)	4,000원/kg	3,000원/kg

출처: 산업통산자원부 (2019.1), 수소경제 활성화 로드맵

## ■ 2050 탄소 중립 시나리오 발표에서 2018년 대비 2030년 35% 감축 하한선을 자발적 목표로 제시했으며 이를 통해 수소의 활용성이 높아질 것으로 예상

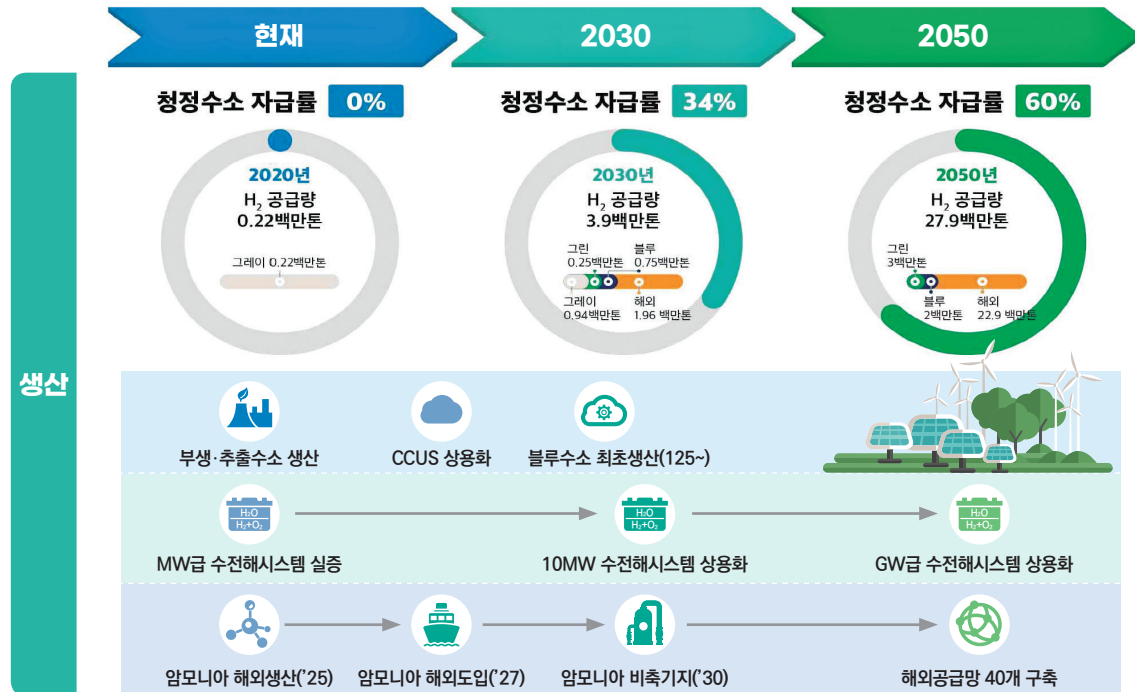
- 2015년 파리기후변화 협약에 따라 각 국가들은 온실가스 감축 목표를 자발적으로 설정
- 태양광 풍력을 기반으로 한 재생에너지 중심의 전력공급 체계 전환을 목표로 하며 특히 전력 외 부문의 탄소중립을 위해 수소 역할 강화 예상
- 그린수소를 활용한 연료전지, 에너지 저장 시스템, 양수 발전 등은 잉여 재생에너지 생산량을 저장할 수 있는 좋은 기술적·환경적 기회를 제공하며, 향후 수소생산 및 수소 기반의 신재생에너지 비율이 급격하게 상승할 것으로 기대

## ■ 제1차 수소경제 이행 기본계획 발표(2021.11)로 수소 선도국가 비전을 위한 국내외 청정수소 생산 주도, 빈틈없는 인프라 구축, 일상에서의 수소 활용 등 추진전략을 제안(그림 33)

- 2050년 연간 2790만 톤의 수소를 100% 청정수소(그린/블루수소)로 공급하고, 국내 생산 및 우리 기술 자원으로 생산한 해외 청정수소 도입을 통해 청정수소 자급비율 60%로 확대
- 재생에너지와 연계한 수전해 실증을 통해 그린수소의 대규모 생산 기반을 구축하고 생산 단가 감축



그림 33 수소경제 이행 기본계획 중 수소 생산 비전 및 목표



출처: 산업통상자원부 (2021.11), 제 1차 수소경제 이행 기본계획

## 2 국외 정책동향

### 1) 미국

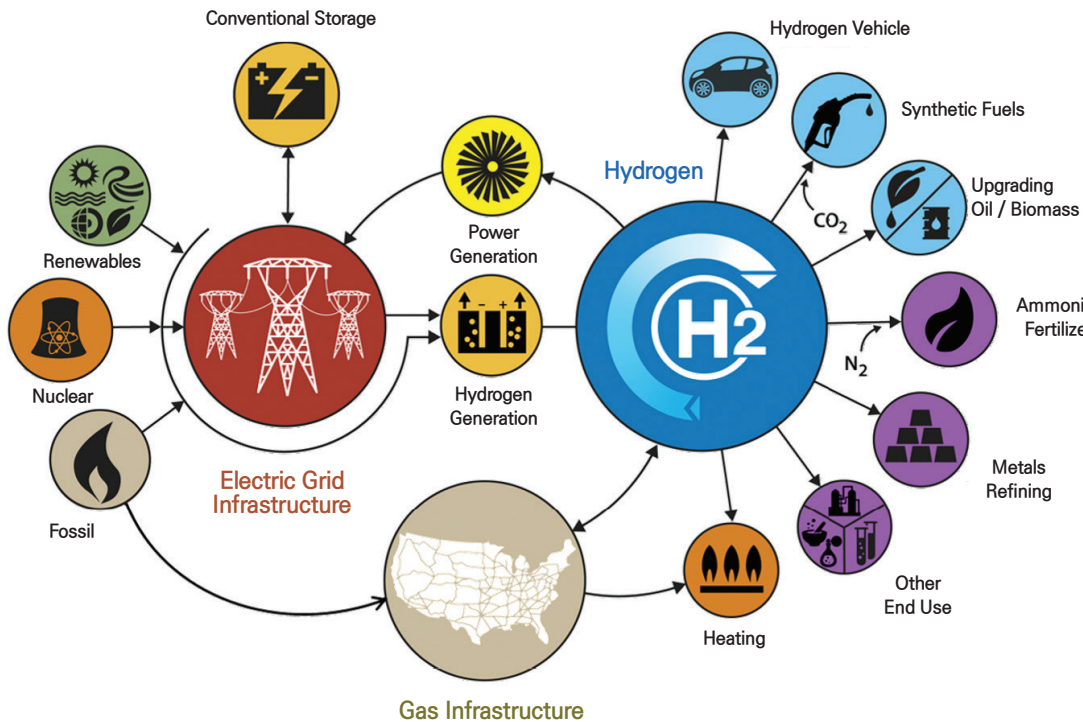
■ 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)는 수소경제로의 이행을 위해 H<sub>2</sub>@scale 프로젝트를 발표 (2019.3)

■ 합리적인 가격으로 대규모 수소를 생산, 운송, 저장 및 활용할 수 있도록 지원하고 산업 전반에서 수소 에너지의 잠재 가치를 극대화하기 위한 지원(그림 34).

■ 다양한 에너지원(풍력, 태양광, 천연가스 등)으로 수소를 생산하고, 활용하는 것을 목표



그림 34 미국에너지부의 수소생산 및 활용계획 모식도



출처: 미국 에너지부 (Department of Energy)

## ■ 바이든 대통령은 기후변화에 대응하고 신재생에너지 기반 전환을 위한 정책 수립 및 추진 중

- ❖ 다양한 재생에너지와 함께 수소를 활용한 기후변화 대응과 신재생에너지 목표 달성 및 향후 수소의 미래 수요에 주목하고 값싼 수소생산을 추진 중(그림 35)
- ❖ 청정에너지 계획 발표로 친환경, 신재생에너지 기반 투자를 통한 청정에너지를 생산하고 양질의 일자리 창출 및 경제성장을 촉진(2020.7)
- ❖ 취임 직후 파리 협정에 복귀하는 행정 명령에 서명하며 적극적인 기후변화 대응 의지를 천명(2021.1)
- ❖ 미국 에너지부는 '수소 프로그램 연례 평가회의'에서 10년 내로 청정수소 가격을 1kg당 1달러로 만들겠다는 '111 프로젝트' 수립(2021.6)
  - 미국 전역에 4개 이상의 수소산업 허브를 조성할 계획이며, 수전해 장치 기술향상과 상용화, 청정수소 생산과 운송, 저장 등에 투자
  - 목표는 그린수소와 블루 수소를 포함한 청정 수소 가격을 2020년 1 kg 당 5 달러에서 2026년 2달러 수준으로 낮추는 계획 추진 중
- ❖ DOE는 보다 풍부하고 저렴하며 신뢰할 수 있는 청정에너지 솔루션 개발 가속을 위해 '에너지 어스샷(Energy Earthshots) 이니셔티브' 시작(2021.7)
  - 10년내 청정 수소 생산 비용을 kg 당 1달러로 저감하는 것을 목표로 설정

- 미국 에너지부의 에너지 효율 및 재생에너지국(Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE) 2022년 예산이 전년 대비 31.7% 대폭 증액되었으며 수소 연료전지 분야 프로그램에서의 청정수소의 경제성 확보에 집중
  - 특히 시스템 개발 및 통합(System development and integration)에 대한 대규모 투자가 두드러지며 메가와트 규모의 수전해에 집중

그림 35 수소에 대한 현재 증가 수요 및 미래 증가 수요

	Transportation Applications	Chemicals and Industrial Applications	Stationary and Power Generation Applications	Integrated/Hybrid Energy Systems
Existing Growing Demands	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material Handling Equipment</li> <li>• Buses</li> <li>• Light-Duty Vehicles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oil Refining</li> <li>• Ammonia</li> <li>• Methanol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distributed Generation: Primary and Backup Power</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renewable Grid Integration (with storage and other ancillary services)</li> </ul>
Existing Growing Demands	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medium- and Heavy-Duty Vehicles</li> <li>• Rail</li> <li>• Maritime</li> <li>• Aviation</li> <li>• Construction Equipment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steel and Cement Manufacturing</li> <li>• Industrial Heat</li> <li>• Bio/Synthetic Fuels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reversible Fuel Cells</li> <li>• Hydrogen Combustion</li> <li>• Long Duration Energy Storage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclear/Hydrogen Hybrids</li> <li>• Gas/Coal/Hydrogen Hybrids with CCUS</li> <li>• Hydrogen Blending</li> </ul>

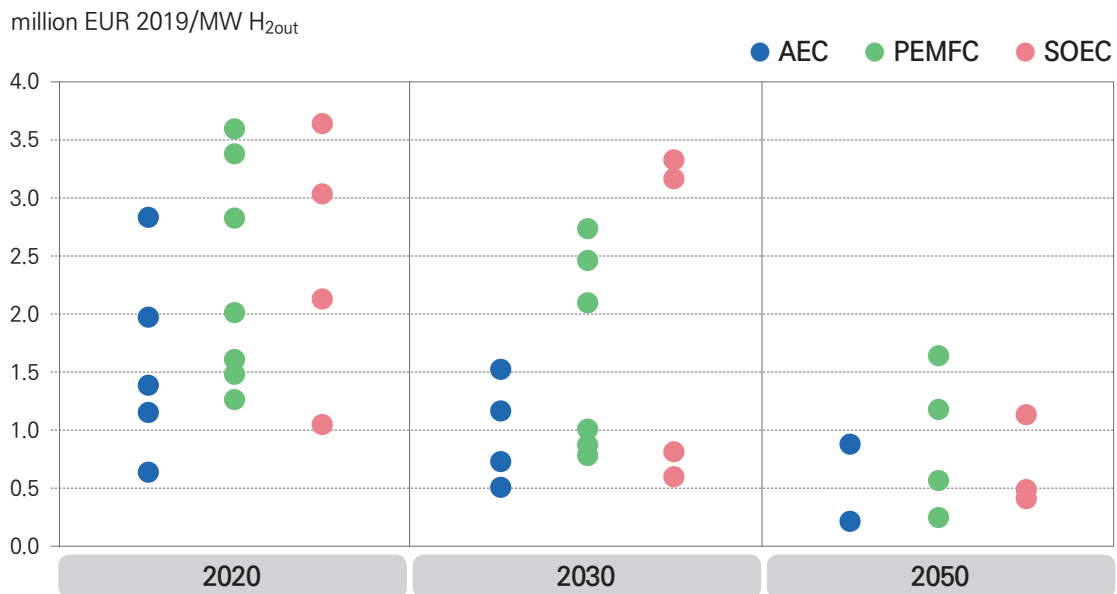
출처: 미국 에너지부 (Department of Energy)

## 2) 유럽연합(EU)

- 유럽연합의 2030년 재생에너지 비중 목표는 32%이며, 2023년까지 재생량 가능성 검토 중으로 지속적인 확대 기조 유지
- EU 수소전략(2020.7)을 통해 지속가능한 산업 가치사슬을 형성하여 재생수소에 대한 산업 수요의 확대와 이동기술 개발로 재생수소 생산 및 활용, 현실화 목표 설정
- 수전해 방식에 쓰이는 전력 공급원이 재생에너지일 경우 이를 그린수소 또는 재생에너지 수소로 규정
  - 수소 에너지를 생산하는 방식 중 현재 가장 광범위하게 활용되는 메탄스팀 개질방식의 경우, 다량의 탄소가 방출
- 2024년 최소 6GW에서 시작해서 2030년 최소 40GW를 목표로 하는 세계 최대 규모의 수전해 생산시설 구축 진행 중

- ❖ 현재 약 5% 정도의 수소 에너지만이 수전해 방식을 통해 생산되고 있으나 장기적으로 그린수소 시장을 구축하고 활성화하는 것을 목표로 알칼라인 수전해, 고분자 전해질 수전해, 고체 산화물 수전해 등 다양한 수전해 방식을 검토 중
- ❖ 현재 수소 에너지가 에너지 믹스에서 차지하는 비중은 2% 미만이지만, 2050년까지 13~14%까지 성장할 것으로 예상
- ❖ 2050년에는 재생에너지 발전량의 25%를 수소생산에 활용하는 목표 설정
- ❖ 그린수소 생산비용은 현재 높지만 장기적인 기술진보에 따라 경쟁력이 향상될 것으로 기대하며 자본 비용, 운영비용, 교체비용, 생산 용량 및 에너지 효율 등의 다양한 변동요인에 따라서 총 투자 비용이 결정될 것으로 예상(그림 36).

그림 36 생산방식별 그린수소 투자비용 전망



출처: European commission(2020), Hydrogen generation in europe

## 05

## 시사점 및 정책 제언



## 1 시사점

■ 재생에너지를 연계한 그린수소의 생산비용 저감은 그린수소 수요를 크게 증가시킬 것이며, 각 국가와 기업은 이러한 추세에 시의적절한 대응이 필요

- 2030년까지 수소 수요는 산업, 운송, 에너지 및 건물 부문의 다양한 니치마켓을 통해 완만하고 꾸준한 속도로 증가할 것이며 수소 생산비용은 2030년까지 약 50% 감소해 이후 2050년까지 완만한 속도로 지속 하락 예상
- 수소의 수출 및 수입 허브는 현재의 석유 및 가스 허브와 유사하게 발전할 것이지만, 재생에너지 강국에서 새로운 플레이어 등장 가능
- 대규모 재생에너지 발전 단지에서 생산된 미활용 전력 해소 및 계통안정성 유지를 위한 방안 중 하나가 수전해 기술이며, 이를 구현하려면 발전 사업자, 전력계통 사업자, 수전해 기업, 수소 활용 기업 등 각 참여주체들이 서로 상생할 수 있는 밸류체인 완성 필요

- ❖ 수전해 기술은 수소 생산을 위해 전력이 필요하고, 미활용 재생에너지를 사용할 경우에만 경제성이 확보되므로, 재생에너지 공급 정책과 연계한 수전해 기술개발 전략 마련 필요
- ❖ 재생에너지 전력의 송배전 전략, 재생에너지 전력 가격, 수전해 기술의 보조서비스 인정 여부 등 정책적 지원도 함께 고려 필요

### ■ 수소 생산기술의 경제성과 친환경성을 동시에 확보하기 위해 현재 기술 수준을 상회하는 혁신적인 소재/부품 개발에 대한 투자 필요

- ❖ 수소 생산분야의 혁신적인 성과 창출을 위해 기초연구 성과가 실증·상용화 기술로 이어질 수 있도록 관련 기업이 참여하는 연계 프로그램 지원이 필요
- ❖ 해외 수소 생산분야 기술성숙도가 높으므로, 국외 선진 산학연과의 적극적인 협력을 통하여 기술수준 추격 필요

### ■ 향후 수소경제 전주기(생산-저장·운송-활용)를 고려한 수소 생산기술 전략 마련 및 기술개발 투자 필요

- ❖ 국내 수소 수요를 확보하기 위해서는 향후 국내 자체 수소 생산뿐만 아니라, 해외에서의 수소 생산·수입 등 복수의 방안 고려 필요
- ❖ 향후 국내 여건에 맞는 수소 운송 방법(트레일러 or 파이프라인 운송)과 연계한 수소 생산 기술 전략 마련 필요

## 2 정책 제언

### ■ 정부 주도 하의 국제표준 선점을 위한 수소기술 관련 핵심기술 표준화 필요

- ❖ 산학연은 수소 품질 제고, 활용 등과 관련한 제조 기술을 개발하고, 정부는 표준화 작업에 필요한 지원을 통해 국내 기술의 국제 표준화를 선점하는 활동 필요
- ❖ 수소생산 분야의 기술 표준화는 연료용 수소를 제조하는 모든 설비를 대상으로 하며, 다양한 방식의 수소생산 방법을 포함
- ❖ 정부는 국내 기업의 의견 반영 및 적극적 지원을 통해 기술적 우위 확보로 '수소경제 표준화 전략 로드맵' 목표 달성 필요

### ■ 정부와 함께 국내 기업들은 국가 수소 생산 생태계 활성화 및 경쟁력 확보를 위해 오픈 이노베이션 등의 전략적 제휴 필요

- ❖ 정부가 스타트업 및 중소기업 생태계 활성화를 위해 규제 완화 방침을 2020년 7월 발표한 바 있지만, 대기업과 전략적 기술 제휴 등을 통해 수소산업 경쟁력을 높이고 세계를 선도할 수 있는 정책 필요

- ❖ 국내 기업들은 국가 수소 생산 생태계 활성화 및 경쟁력 확보를 위해 오픈 이노베이션 등의 전략적 제휴 추진
- ❖ 수소산업의 높은 투자비용에 대한 리스크 분담을 위해 정부 기업 간의 협업을 통한 초기 투자 리스크 분담

### ■ 그린 수소생산 단가를 낮추기 위하여 비귀금속계 전극 및 대면적 다공성 격막 소재 개발 및 알칼리 수전해시스템 상용화·보급에 대한 정책 지원 필요

- ❖ 알칼리 수전해 시스템은 그린 수소생산 기술 중 가장 상용화에 가까운 기술로서 핵심 소재 및 부품 국산화로 빠른 글로벌 시장 진입 가능
- ❖ 상용화된 해외 브랜드와 경쟁할 수 있는 수준의 고용량·고내구성 알칼리 수전해 시스템 개발 및 구축 지원 활성화를 통한 글로벌 기술 경쟁력 확보 시급
- ❖ 대용량 알칼리 수전해 시스템 개발과 더불어 핵심기술을 확보한 발전용·수송용 연료전지 시스템 사업군과의 전략적 제휴를 통해, 그린수소 생산-저장-활용의 밸류체인 설계가 가능한 실증단지 구축의 중장기적 정책 지원 필요
- ❖ 보다 성숙된 알칼리 수전해 시스템 및 소재 기술과 중단기적 실증 데이터를 기반으로, 미래 기술인 양이온/음이온 교환막 수전해 시스템 개발을 선제적으로 지원하여 그린수소 생산 기술을 선도할 수 있는 정책 일관성이 중요

### ■ 저가 고성능 촉매 및 전극 소재를 위한 정부 주도 기초원천기술개발 필요

- ❖ PEM 수전해의 보급과 이를 통한 대규모 그린수소 생산은 풍력에너지 등 재생에너지의 대량 보급을 위한 필요조건이며, 이를 위해 2030년 이후 Ir 없이 전이금속 OER 촉매로 구성된 PEM 수전해 스택을 개발하는 것이 반드시 필요하나 현재 관련된 연구는 전무한 상황
- ❖ 저가의 전이금속 기반의 고성능/고내구 PEM 수전해 촉매 소재에 대한 정부 주도 기초원천기술개발 선행에 따른 새로운 개념의 PEM 수전해 전극 구조, MEA 및 스택 제조법 개발이 이루어질 경우, 재생에너지 보급 활성화 기대

### ■ 글로벌 수소생산의 국제적 주도권(initiative) 획득을 위한 양이온, 음이온 기반 수전해 및 이의 융합기술 개발에 적극적 투자와 정책적 장려 필요

- ❖ 음이온 교환막 수전해의 경우 아직 기술적으로 진입단계로 공격적인 R&D 투자가 필요
- ❖ 기존 저온 고분자 연료전지기술의 접목 및 수소생산과 전기 생산이 가능한 일체형 재생 연료전지 (Unitized Regenerative fuelcell, URFC) 등과 같은 수소 생산 및 에너지 변환 하이브리드 융합기술 연구 장려
- ❖ 음이온 교환막과 양이온 교환막의 장점을 융합한 양극성 (bipolar) 교환막 수전해 기술 등 신기술 개발의 적극 투자와 경제성 평가 필요

기획·편집

정연진 대외협력팀 선임연구원

문희성 정책기획팀장

# 나노기술 이슈페이퍼

2022-01

발행일	2022년 3월
발행처	한국재료연구원 국가나노기술정책센터
주소	서울특별시 서초구 강남대로41길 8 태연빌딩 4층
ISSN	2733-6387
대표전화	02-584-4007
홈페이지	<a href="http://www.nnpc.re.kr">www.nnpc.re.kr</a>
디자인·인쇄	(주)디자인여백플러스(02-2672-1535)

본 보고서의 무단전재나 복제를 금하며, 가공·인용할 때는 반드시 출처를 밝혀주시기 바랍니다.  
본 보고서에 대한 문의는 한국재료연구원 국가나노기술정책센터로 하시기 바랍니다. 본  
보고서의 내용은 과학기술정보통신부의 공식 견해와 다를 수 있습니다. 본 보고서는 2022년도  
정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노·소재기술개발사업의 지원을 받아  
수행된 연구(No. NRF-2017M3A7A705711323)입니다.

## 수전해 그린수소와 나노기술

