

## 에너지의 흐름 : 수소 전주기 밸류체인 디자인

### Abstract

다음 글에서는 수소 경제의 필요성과 수소 전주기 밸류 체인을 설명한다. 그리고 수소의 생산, 저장 및 운송, 활용까지의 기술과 수소 밸류 체인의 실제 사례를 소개한다. 마지막으로 소개된 기술과 추가적인 조사를 바탕으로, 학생들은 가상의 두 국가 간에 하나의 수소 밸류 체인을 설계한다.

수소 전주기 밸류 체인을 개발함으로써, 학생들은 수소 경제에 대한 숲을 살펴본 다음 밸류 체인의 각 기술에 대한 나무를 볼 수 있다. 그리고 수소 에너지에 대한 전체적인(holistic) 시각을 가지고 관심을 높일 수 있다. 이 글을 읽고 학생들은 수소 밸류 체인의 다양한 기술을 살펴보며 그 중 관심 있는 기술을 탐구할 수 있다. 이를 통해 학생들은 흥미 있는 수소 에너지 기술을 연구하기 위한 지식과 학문을 파악하여, 앞으로의 진로를 설계하고 심화된 학문을 공부할 수 있다.

## 도입

### 수소 에너지

수소는 탄소 중립 목표를 달성하기 위한 친환경 에너지원이다. 수소는 휘발유의 3배, 배터리의 100배 수준의 높은 질량 에너지 밀도를 가지면서도 에너지 변환 과정에서 온실가스와 오염물질을 배출하지 않는다. 수소는 그 자체로 에너지원으로 쓰이기도 하고, 변동성이 큰 신재생 에너지를 저장하는 매개체의 역할도 한다. 수소 기술은 새로운 시장을 창출하고, 국가의 에너지 안보에 이바지한다. (Züttel et al., 2010)

### 수소 밸류 체인

수소 전주기 밸류 체인은 수소의 생산, 저장 및 운송, 활용까지의 산업이다. 완전한 수소 경제를 위해서 생산부터 활용까지의 모든 기술을 상용화하여야 한다. 이때 수소의 사용 목적과 기술의 성숙도 등을 고려하여 밸류 체인을 설계한다. 수소 전주기 밸류 체인은, 단순히 우리가 사용하는 에너지원을 바꾸는 것을 넘어 산업 전반을 바꾼다. 머지않아 세계는 지금까지의 탄소 경제에서 벗어나 수소 경제로 나아갈 것이다. (Quarton and Samsatli, 2020)

## 전주기 수소 기술 소개

### 생산

수소 원자는 우주에서 가장 풍부하게 퍼져있다. 수소는 물 또는, 탄화수소의 형태로 결합한 화합물로 존재한다. 따라서 수소를 추출하기 위해서는 에너지원이 필요하다. (Züttel et al., 2010)

수소의 생산을 위해 사용하는 에너지원에는 석탄, 화석연료, 또는 태양광 에너지와 풍력 에너지와 같은 친환경 에너지가 있다.

수소는 에너지원과 온실가스의 배출 여부에 따라 그레이 수소, 블루 수소, 그린 수소 등으로 분류한다.

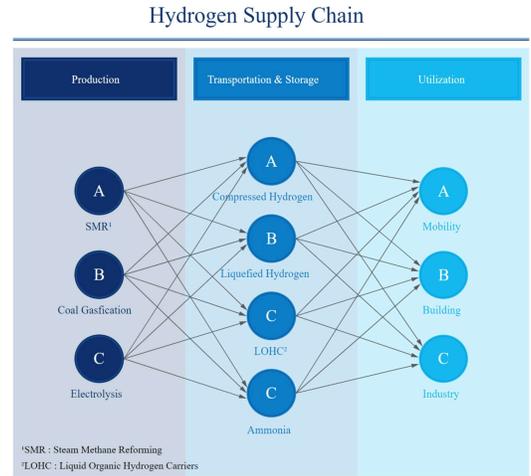


Figure 1. 수소 에너지 밸류체인

브라운 수소와 그레이 수소는 화석 연료를 활용해 생산한 수소이다. 블루 수소는 천연가스로 수소를 생산할 때 배출되는 이산화탄소를 포집하는 수소이다. 그린 수소는 신재생에너지로 물을 전기분해 하여 얻는 수소이다.

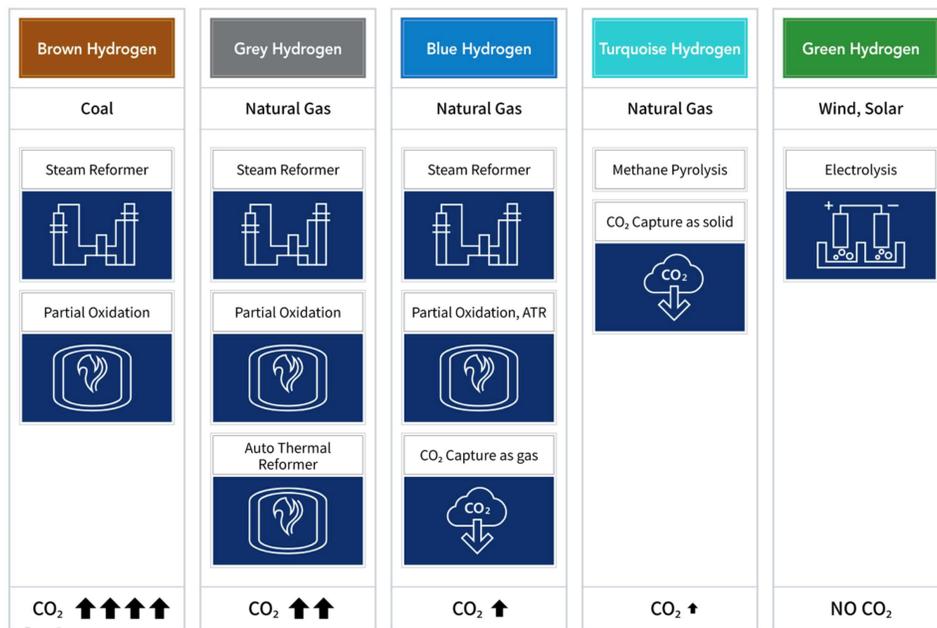


Figure 2. 수소 생산법에 따른 수소 종류

위의 자료는 탄소의 배출량이 많은 순으로 왼쪽부터 각 수소의 종류를 나열한다. 생산 기술의 상용화가 어려운 순으로 나타나 있기도 하다. 현재는 화석 연료로 브라운수소와 그레이수소를 생산한다. 생산한 수소는 항공 우주 분야, 연구 분야 등에서 사용된다. 수소는 특수한 분야에서 사용될 목적으로 소규모로 생산된다. (Yu et al., 2021)

앞으로 탄소 저감의 중요성이 증가함에 따라, 수소의 사용량이 증가할 것이다. 정부가 2023년 4월에 발표한 탄소중립 및 녹색성장 국가전략의 홍보자료에서는, 수소 산업을 탄소중립 사회를 위한 핵심 산업으로 선정하였다. 정부는 청정수소의 공급을 확대하고, 수소 활용 생태계를 강화할 것이라고 밝혔다. 수송 부문에서도 전기차와 함께 수소차의 공급을 장려할 계획이다. 따라서 우리는 기존의 탄화수소 소비 중심의 에너지를 수소로 대체함과 동시에, 수소의 생산 또한 친환경적으로 대규모 생산이 가능한 기술을 사용하여야 한다.

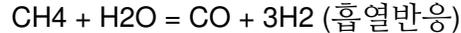
## 1. 블루 수소 (Blue Hydrogen)

블루 수소는 수소 생산을 위한 다양한 방식 중 하나이다. 기존의 그레이 수소처럼 천연가스를 원료로 수소를 생산한다. 그레이 수소와 다른 점은 이산화탄소 포집 장치를 생산 공정에 추가하여, 대기에 방출하는 이산화탄소의 양을 줄이는 데 있다.

현재 블루 수소의 생산 방식 중에서 SMR, POx, 그리고 ATR이 주목받고 있다. 이는 모두 천연가스에서 수소를 추출하는 방법이다. 탈황 공정, 개질 공정, 수성가스 전이 공정, CO 제거 공정이 필요하다. 일반적으로 개질 공정을 바탕으로 생산 방식을 분류한다. 여기서 천연가스 개질이란 열이나 촉매와의 반응을 통해 탄화수소의 구조를 바꾸는 공정을 뜻한다. (Yang et al., 2019)

### a. SMR(Steam Methane Reforming)

SMR은 현재 블루 수소를 생산하는 방법 중 가장 상용화된 방법이다. 수증기 메탄 개질 반응이라고 한다.



700~1,100°C에서 증기를 메탄과 혼합하고, 촉매 반응기에서 3~25bar의 압력을 가한다. 전체 화학반응은 흡열반응이다.

신속하게 대량으로 수소를 생산할 수 있다. 건조 상태에서 약 76% 수준의 고농도 수소를 생산한다. 폐열의 회수를 통해 약 80%까지 공정의 효율을 높일 수 있다. 안정적이고 대중화된 개질 방식이다. 세계 총 수소 생산 비율의 절반 이상을 차지한다. 비용이 가장 저렴하다.

그러나 공정 예열 시간이 오래 걸려 신속한 공급과 동적 운전이 부적합하다. 공정에 매우 많은 에너지가 필요하다. (Yang et al., 2019)

### b. POx(Partial Oxidation)

POx는 부분 산화 반응이다. 탄화수소를 완전히 산화시키지 않고 부분적으로 산소를 덜 공급해서 화학 반응을 일으키는 방법이다.

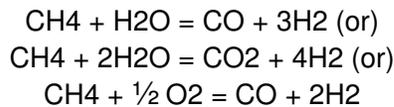


발열반응으로 열 공급이 필요 없으므로 에너지 소비가 적고, 공정 설비의 소형화가 가능하여 작은 반응기를 사용한다. 에너지 효율이 높고 수증기 개질에 비해 반응 속도가 빠르다. 공정 예열 시간이 짧고 반응 온도가 낮다. 비교적 낮은 온도에서 반응할 수 있어 에너지 사용량이 적다.

그러나 생산 방식 중 수소의 농도가 가장 낮다. 건조 상태에서 약 35%가량의 농도를 가진 수소를 생산할 수 있다. 그리고 공정을 진행할수록 개질기 내부에 탄소가 가라앉을 가능성이 높아, 일정 시간이 지나면 효율이 급격하게 감소한다. 또한 화학 반응 자체가 약한 발열반응으로, 화학 평형의 조절이 어렵다. 즉 공정 자체의 제어가 어렵다. 그리고 공기를 산소 공급원으로 사용하면, 질소산화물이 배출된다는 단점이 있다. (Freni et al., 2000)

### c. ATR(Auto Thermal Reforming)

ATR은 SMR과 POx를 혼합한 방법이다. 자연 개질 방법이라고도 한다. 수증기 개질 흡열반응에 필요한 열을 부분 산화 공정의 발열반응에서 자체적으로 공급한다.



열원이 필요 없으며, 반응 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다. 또한 경제적이기도 하다. 2세대 바이오 연료 생산에 유용하다. 그리고 전체적인 공정에서 효율이 높다.

그러나 ATR 기술 자체의 상용화 경험이 부족하다. 또한 온도 제어가 어렵고 장치의 구조가 매우 복잡하다는 단점이 있다. (Dybkjaer, 1995)

## 2. 그린 수소 (Green Hydrogen)

그린 수소는 수전해 기술을 이용하는 생산 방식이다. 전기 분해 시 결과물로 산소와 수소만 발생하기 때문에 매우 친환경적인 기술이다. 그러나 비싼 전기료로 인해 현재는 경제성이 낮다. 태양광, 풍력 등의 재생에너지로 물을 분해하면 경제성을 확보할 수 있다. 그리고 고순도(99.99%)의 수소를 추출하는 생산 방식이다.

순수한 물에 전해질을 더한 다음 전기 에너지를 가하면, (+)극에는 양이온을 띤 산소 원자가, (-)극에는 음이온을 띤 수소 원자가 달라붙으며 원자가 분리된다. 따라서 (-)극에서 고순도의 수소를 추출할 수 있다. 이러한 수전해 방식은, 어떤 전해질을 사용하는지와 어떤 이온이 이동하는지에 따라서 AEC, PEMEC, SOEC, AEMEC 등의 여러 방법으로 나뉜다. (Nikolaidis and Poullikkas, 2017)

### a. AEC(Alkaline Electrolysis Cell)

AEC, 알카라인 수전해는 알카라인 전해액으로 물을 전기분해 하여 수소를 생산한다. 수전해 기술 중 가장 먼저 상용화된 기술이다. 연구가 오래 진행된 만큼 운영이 안정적이고, 상용화가 진행되어 다른 기술들보다 초기 투자비가 비교적 저렴하다. 상업화가 완료되었다. 또한 귀금속이 아닌 촉매를 사용하여 단가가 저렴하다. 생산 구조가 단순하여 대용량으로 수소를 생산하는 데 적합하다. 설비의 운영 기간이 10 20년으로, 내구성이 높다.

그러나 공정의 생산성이 낮다. 35%에 이르는 알칼리 전해액의 농도를 유지하기 위해서 공정 중 계속해서 전해액을 보충해야 한다. 알칼리 성분으로 인한 공정 내 장비와 부품의 부식 문제가 발생할 수 있다. 또한 전류 밀도의 효율이 낮고, 고압으로 설비를 운전하기 어렵다. 무엇보다 전류 및 장비의 민감성과 재생 에너지의 계절성으로 인하여 전원 공급이 중단될 때(셋다운)에 공정 설비가 파손될 가능성이 매우 높아 재생에너지의 변동에 취약하다는 단점이 있다.

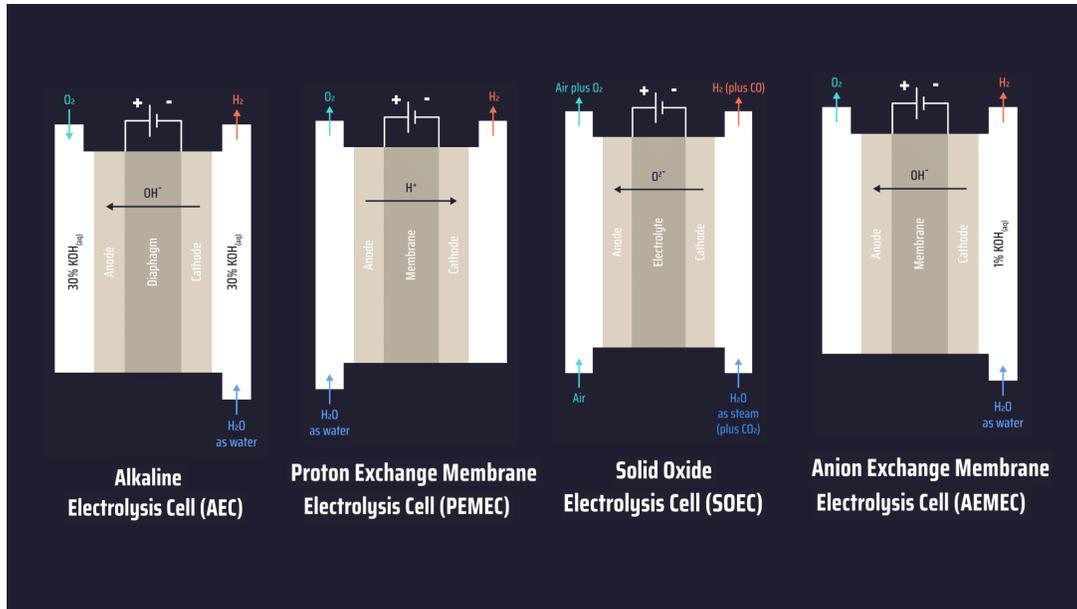


Figure 3. 그린 수소 생산법

b. PEMEC(Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell)

PEMEC, 고분자전해질 막 전해는 고분자 전해질막을 전해질로 이용한다. 수소 이온이 이동할 수 있는 나피온(Nafion) 등의 양이온교환막을 전해질로 사용한다.

PEM은 백금 촉매와 양이온 교환막을 사용해 높은 전류 밀도로 운전할 수 있다. 에너지 효율이 높아 장치의 소형화가 가능하다. 그린 수소 생산에 가장 적합한 수전해 방식으로 화합물 없이 물만을 연료로 사용하여, 생산한 수소의 순도가 매우 높다. 공정의 생산성이 높다. 현재 상업화가 완료되었다.

그러나 백금 촉매와 양이온 교환막의 가격이 비싸, 초기 투자비가 많이 든다. 그러나 기술의 개발을 통해 PEM의 가격이 낮아지는 추세이다. 또한 설비의 운영 기간이 25년가량으로, 내구성이 낮다.

c. SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)

SOEC, 고체산화물 전해는 고체산화물 전해질을 이용하여, 800°C 이상의 고온의 수증기를 전기 분해하여 수소를 생산한다.

고체산화물 전해질을 사용하기 때문에, 장비가 부식에 강하고 전해액을 보충할 필요가 없어 유지와 보수가 비교적 쉽다.

하지만 수증기를 가열하기 때문에 공정에 추가해야 하는 열에너지가 필요하다. 800°C 이상의 고온을 견딜 충분한 내구성을 지닌 고체 전해질에 관한 연구와 개발이 아직 미성숙하여 상용화가 어렵다는 단점이 있다.

d. AEMEC(Anion Exchange Membrane Electrolysis Cell)

AEMEC, 음이온 교환막 수전해는 AEC와 PEMEC 사이에 있는 유망한 기술이다. 알카라인 수전해

(AEC) 기술과 양성자교환막 수전해(PEMEC) 기술의 장점을 융합하여 낮은 비용과 높은 효율로, 대량의 수소를 생산할 수 있는 차세대 수전해 기술이다. 그러나 기술적으로 아직 R&D를 진행하고 있는 단계라, 개발이 완료되지 않았다. 실제 상업화까지 시간이 필요하다. 현재 음이온 교환막의 성능을 향상하고, 내구성을 개선하며, 완전한 양산화를 위한 연구가 진행 중이다.

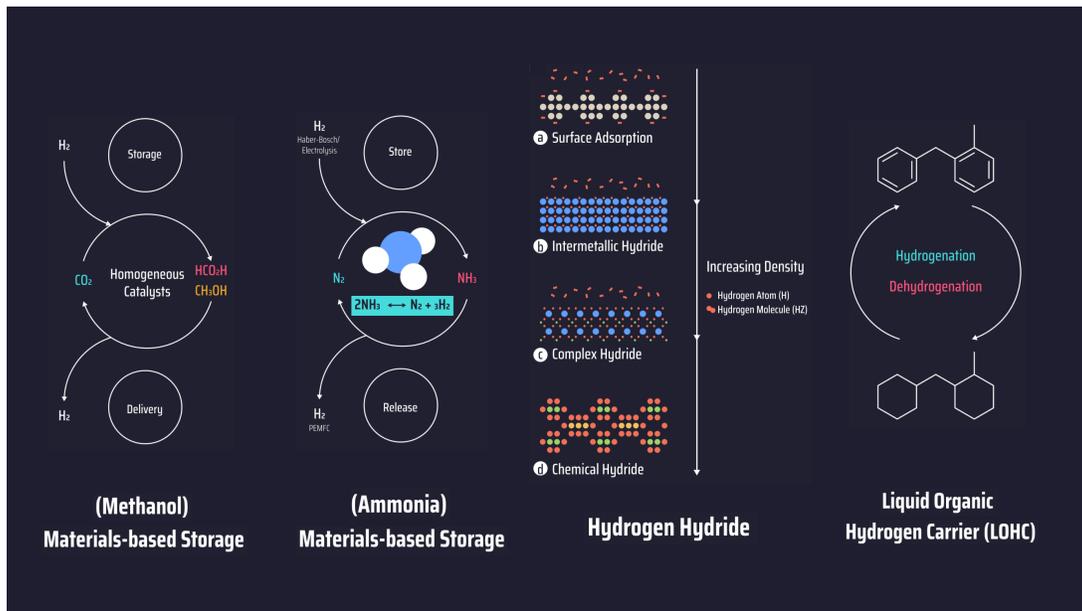
**저장 및 운송**

**1. 액화 수소 (Hydrogen Liquefaction)**

수소는 20K의 극저온에서 액체 상태로 존재할 수 있다. 액체 수소는 흔히 볼 수 있는 기체 수소에 비해 밀도가 높아 저장에 유리하다. 그러나 20K 이하의 극저온 상태로 만들기 위한 에너지가 필요하며 이를 유지해야 하므로 강화 단열 처리가 된 저장 탱크가 필요하다. 액화 수소 기술은 대용량 저장 및 장거리 운송에 가장 적합한 사회 수용성이 높은 친환경 기술이다. (Faye et al., 2022)

**2. 수소 압축 (Hydrogen Compression)**

기체 수소를 고압으로 압축하는 과정이 간단하기에 압축 수소는 수소를 저장하는 가장 쉬운 방법이다. 그러나 압축된 수소 기체는 넓은 공간을 차지하기 때문에 저장 용량이 낮고, 이를 위한 저장 탱크는 누출이 발생하지 않도록 정기적인 점검이 필수적이다. 따라서 이를 대용량 저장 및 운송에 적용하기 위한 혁신적인 기술 개발이 필요하다.



**Figure 4.** 수소 저장 및 운송

**3. 메탄올을 이용한 저장 (Methanol)**

메탄올은 평상시에 액체라는 물리적 특징이 있다. 따라서 기존 인프라를 활용한 저장 및 운송에 유리하다. 그러나 메탄올은 합성 과정에서 이산화탄소가 발생하기 때문에 환경 문제를 일으킨다.

**4. 암모니아를 이용한 저장 (Ammonia)**

암모니아는 저장된 수소를 추출하거나 연료로 직접 활용할 수 있다. 암모니아는 높은 수소 밀도로 저장할 수 있다. 또한, 암모니아의 인프라는 세계적으로 확립되어 있어 이를 활용할 수 있다. 그러나 암모니아에서 수소를 추출하는 과정에서 높은 에너지 소비가 필요하고, 고온에서 암모니아를 연소할 때 NOx(질소산화물)가 발생할 가능성이 있다. 또한 암모니아는 매우 위험한 독성 물질로 사회 수용성 관점에서 매우 불리하다.

#### 5. 수소 저장을 위한 수소화물 (Hydrogen Hydride)

수소화물은 물질의 표면이나 내부에 수소를 저장하는 기술이다. 순수 금속 혹은 화학 복합 금속 물질이 수소 저장을 위한 수소화물로 사용된다. 고압의 환경에서 가역적으로 물질의 표면에 높은 밀도로 수소를 흡착시키고, 이를 방출할 수 있다. 그러나 해당 기술의 가격이 높고, 안전성이 낮다.

#### 6. 액체 유기 수소 운반체 (LOHC, Liquid Organic Hydrogen Carriers)

LOHC는 수소화(hydrogenation)와 탈수소화(dehydrogenation) 과정을 통해 수소를 가역적으로 저장 및 방출하는 액체를 말한다. 이때, 수소화는 불포화 유기화합물에 수소를 첨가하여 포화 유기화합물로 합성시키는 방법이고, 탈수소화는 수소화의 역반응이다. LOHC는 높은 수소 밀도를 가지기에 저장 및 운송에 유리하고, 기존 기반 시설을 활용할 수 있다. 그러나 탈수소화 과정에서 높은 에너지 소비가 발생한다.

#### 7. 선박 (Ship)

선박을 활용하는 것은 운송량에 비해 배기가스 배출량이 적고, 화물의 부피와 무게의 제한이 크기 때문에 장거리 운송에 적합하다. 그러나 바다를 통해 운송하는 방법이기 때문에 기후의 영향을 크게 받고, 추가적인 육상 운송이 필요하고, 배기가스 배출로 인한 환경 문제가 야기된다.

#### 8. 철도 (Rail)

운송 안정성이 높고, 환경문제가 발생하지 않고, 적재 중량이 크고, 기후의 영향을 받지 않기 때문에 중장거리 운송에 적합하다. 그러나 완전성이 부족하기 때문에 이를 보충하기 위한 연계 이동 수단이 필요하다.

#### 9. 트럭 (Truck)

중거리 운송에 적합한 운송 방법이다. 운송 시에만 가동하기 때문에 낭비되는 에너지가 없다. 그러나 배기가스 배출량이 많아 환경문제가 발생하고, 적재 중량이 적고, 교통사고 등의 요인으로 화물 안전성이 높지 않다.

#### 10. 파이프라인 (Pipeline)

장거리 운송에 적합하다. 지속적인 대량 운송이 가능하고, 배기가스 배출이 없는 친환경 운송수단이다. 그러나 초기 건설 과정이 쉽지 않고, 비용이 많이 발생한다.

## 활용

### 1. 양성자 교환막 연료 전지 (PEMFC)

양성자 교환막 연료 전지는 전기화학반응을 통해 전자의 흐름을 생성하여 전류를 생산한다. 막 전극 집합체(MEA, Membrane Electrode Assembly) 연료극, 공기극, 도선 등으로 구성되며 MEA에서 발생하는 산성 전기화학 반응을 통해 전력을 생산하는데 MEA는 전극, 전해질, 촉매, 가스 확산층으로 구성되며 양성자 교환막을 전해질로 사용한다. (Yuan et al., 2022)

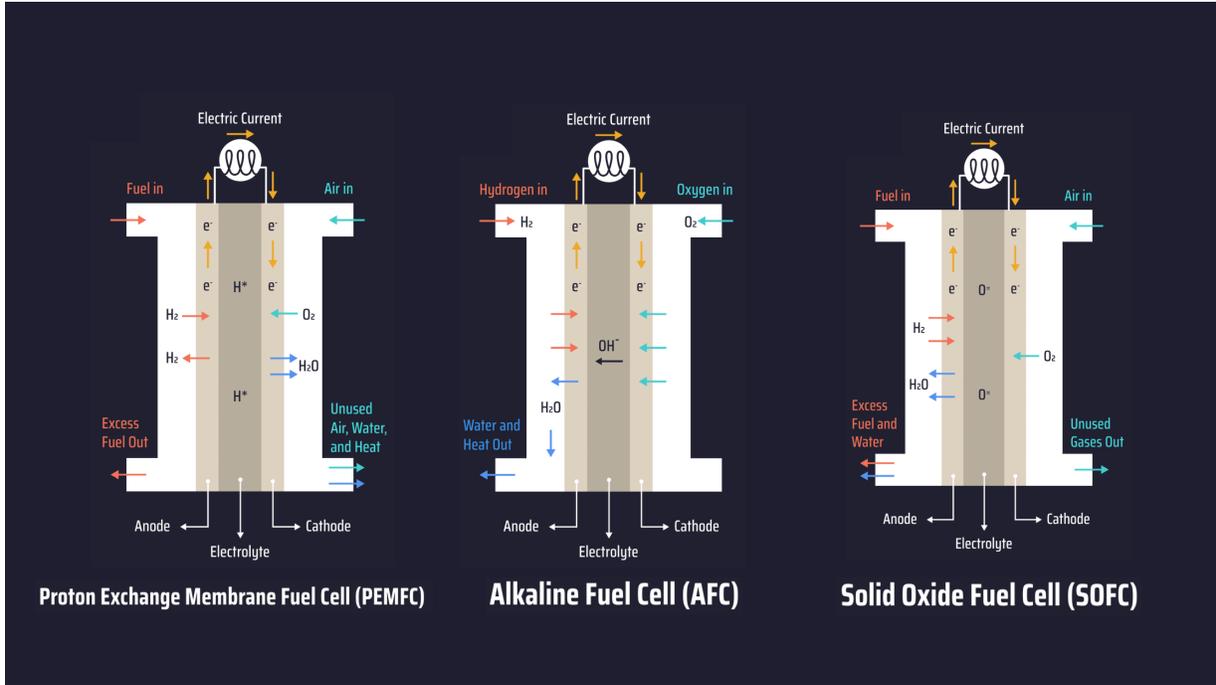


Figure 5. 수소 활용

PEMFC는 작동 온도(50-100℃)와 압력이 낮기에 운영이 비교적 쉽고 빠르게 가동할 수 있다. 따라서 휴대용 전원, 자동차, 비상 전원 시스템 등으로 다양하게 응용할 수 있다. 또한 기기를 소형화할 수 있어 가정용 및 상업용 전력 공급 시스템에 이용할 수 있다. 최대 허용 전력은 500kW이다.

그러나 고가의 백금 촉매를 사용하여 초기 투자 비용이 비교적 많이 든다. 또한 연료전지 특성상 순도가 높은 수소만을 공급하여야 한다.

2. 알칼리 연료 전지 (AFC)

알칼리 연료 전지는 알칼리 전기화학 반응을 통해 전력을 생산한다. 연료전지의 두 전극은 수산화칼륨(KOH)과 같은 수용성 알칼리 용액으로 채워진 다공성 매트릭스로 분리된다. 작동 온도 범위 (25-50℃)가 낮으며 백금 또는 은/철 프탈로시아닌을 촉매로 사용한다는 특징을 가지고 있다.

그러나 상온에서 알칼리 용액(KOH 등)이 전환된 탄산염으로 인하여 전극 막히거나 전해질의 이온 농도가 감소하는 등 연료전지의 성능이 저하될 수 있다. 따라서 알칼리 연료전지는 순수한 O<sub>2</sub> 또는 정화된 공기로 작동한다. 이러한 기술의 특징으로 인해 AFC는 CO<sub>2</sub> 제거 시스템이 이미 설치되어 있는 우주선 및 잠수함과 같은 폐쇄된 환경에서 이용하기 좋다.

3. 고체 산화물 연료 전지 (SOFC)

SOFC는 고체 산화물 재료를 전해질로 사용하며 연료를 직접 산화시켜 전력을 생산하는 연료전지이다. 높은 작동 압력과 온도(500-1000℃)를 요구하며 최대 허용 전력은 100MW이다. 시작 소요

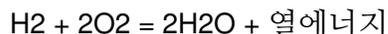
시간이 비교적 많이 걸린다는 특징이 있다.

SOFC는 그 높은 효율성과 연료의 다양성 때문에 대형 발전소, 분산형 전력 공급 시스템, 상업 및 산업용 전력 시스템에 적합하다. 높은 작동 온도는 열 및 전기의 동시 발생(co-generation)을 가능하게 하여, 전체 시스템 효율을 높일 수 있다.

하지만 높은 작동 온도로 인해 재료의 내구성에 한 요구 사항이 높으므로 정교한 관리가 필요하다. 장비의 복잡성과 높은 초기 투자 비용이 있다는 단점도 존재한다.

#### 4. 수소 가스 터빈 (Hydrogen Gas Turbine)

수소 가스를 태운 증기로 전력을 생산한다.



이때 순수한 O<sub>2</sub>를 사용하면 CO<sub>2</sub> 배출이 없다. 현재 완전히 수소만으로 터빈을 돌리는 기술은 상용화되지 않았다. 순수한 수소 발전의 상용화를 위해서는 다음과 같은 문제를 해결해야 한다:

수소는 연소할 때 화염의 속도가 매우 빨라 백파이어가 발생할 수 있다. 백파이어란, 수소와 공기의 혼합 기체가 고온의 터빈 부품에 닿으면 스스로 불이 붙어버리는(self-ignition) 현상이다. 그리고 안정적인 연소를 위해서 수소와 공기의 적절한 배합을 연구하여야 한다. 또한, 수소를 태울 때 발생하는 높은 화염 온도로 인하여 질소산화물이 발생한다.

#### 5. 수소 및 LNG 혼합 연료 터빈 (Hydrogen & LNG Mixed Fuel Turbine)

현재 수소 가스 터빈 기술을 상용화하는 데 많은 기술 장벽이 존재한다. 따라서 신속한 탄소 감축을 위해 수소와 LNG 가스 혼합물을 연소하여 전력을 생산하는 기술이 개발되고 있다. 이를 수소 혼소(혼합 연소) 발전이라고 한다.

수소 혼소 발전은 기존 화석연료 발전에 비해 CO<sub>2</sub>를 적게 배출한다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이고자 하는 산업 및 발전소에서 혼소 발전 터빈을 사용할 수 있다. 이 때 수소와 LNG의 혼합 비율이 중요하다. 수소 혼소 발전도 역시 수소 가스 터빈처럼 백파이어가 발생할 수 있다. 그리고 질소산화물이 발생하여 저감 장치가 필요하다. (Chiesa et al., 2005)

#### 6. 수소 엔진 (Hydrogen Engine)

기존의 가솔린이나 디젤 대신, 수소를 연료로 사용하는 내연 기관이다. 가솔린 기반의 내연기관과 유사한 방식으로 작동한다. 수소 엔진, 즉 수소 내연 기관은 수소 인젝터(수소 연료 공급 장치), 스파크 플러그(수소 점화 시스템), 실린더, 피스톤 등으로 구성된다.

수소 연료는 연소 시 CO<sub>2</sub>를 배출하지 않는다. 친환경적이므로 수송 수단에 활용하기 좋다. 연료전지와 비교했을 때, 순도가 낮은 수소를 사용할 수 있다. 연료전지는 중소규모 발전에 유리하지만, 수소 터빈 발전은 대규모의 발전에서 가격과 효율 측면에서 유리하다.

하지만 고온의 연소 과정에서 대기의 질소와 반응하여 NO<sub>x</sub>가 발생한다. 또한 가솔린에 비해 수소는 부피 에너지 밀도가 낮다. 따라서 연료를 자주 보충해야 한다는 단점이 있다.

#### 7. 화학 연료 (Chemical Fuel)

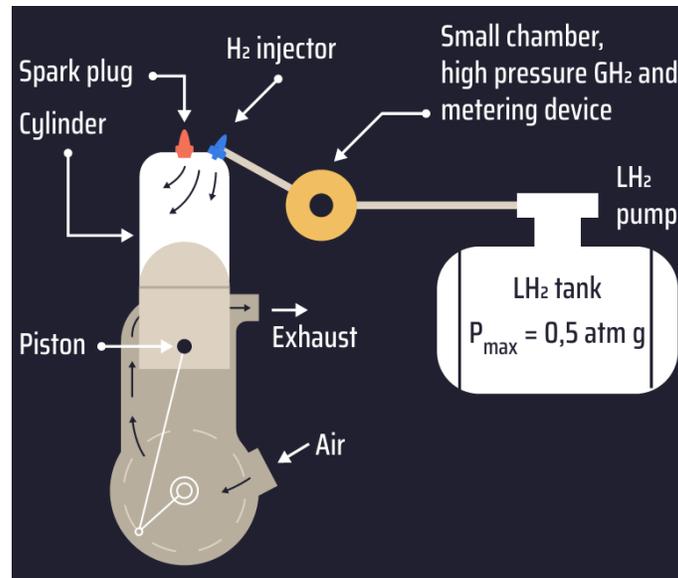


Figure 6. 수소 활용

수소는 다양한 화합물과 반응하여 상업용 화학 물질을 만든다. 많은 산업에서 화학 반응제로 수소를 사용한다. 수소가 화학 반응에 참여할 수 있도록, 촉매로 수소 기체의 공유 결합을 깨뜨린다. 이렇게 생성된 수소 원자는 유기물 또는 무기물과 반응하여 다양한 화학 물질을 생성한다. 제약 또는 플라스틱, 고무 등의 화학물질 제조 등 다양한 화학 산업 분야에서 수소를 사용한다.

하지만 수소는 가연성이 높아, 수소를 다루거나 저장할 때 안전을 엄격하게 관리하여야 한다. 또한 화학 반응에 사용하는 수소의 순도와 안정적 공급이 중요하다.

#### 8. 수소 제철 (Hydrogen Ironmaking)

수소 제철은 철광석에서 철을 추출하는 과정에서 수소를 환원제로 사용한다. 기존의 제철 과정에서는 환원제로 코크스(C)를 사용하여 이산화탄소를 배출한다. 그러나 수소는 철광석의 산화철( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )과 반응하여 철(Fe)과 물( $\text{H}_2\text{O}$ )을 생성한다. 따라서 현재의 제철 공정에 수소 제철 기술을 도입하면 탄소를 저감할 수 있다. 수소 제철은 친환경적이고 지속 가능하다. 이 반응은 열을 필요로 하는 반응이다.

그러나 수소의 산화는 열을 필요로 하는 흡열반응이라, 수소 제철은 기존의 제철 공정보다 더 많은 열이 필요하다. 비교적 초기 투자 비용이 많이 들어 효율적인, 에너지의 사용과 열의 관리가 중요하다. 또한 수소를 안정적으로 공급하여야 한다. (Patisson and Mirgaux, 2020)

## 하이스트라(Hystra) 사례 소개

일본은 가와사키 중공업의 주도로 호주와 협력하여 수소를 생산하고 활용하는 ‘하이스트라(Hystra)’ 프로젝트를 진행한다. 해당 사업은 품질이 낮아 산업에서 사용하지 않는 갈탄(수분과 불순물을 다량 함유한 석탄)으로 수소 가스를 만든다. 그리고 수소 가스를 액화하여 호주 빅토리아주에서 일본 고베시까지 약 9000km에 걸쳐 대량 수송한다. 이를 위해 일본 가와사키중공업은 2019년 12월 세계 최초의 액화수소 운반선인 8000t급 ‘수소 프린티어’를 건조했으며, 2021년 6월에 일본 고베시에 액화수소 수입기지가 완성되었다.

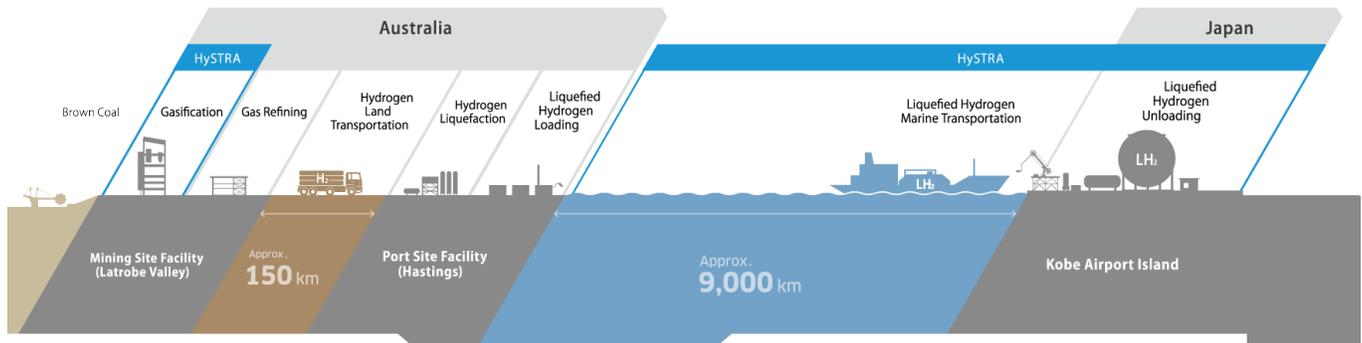


Figure 7. HyStra 설명

하이스트라 사업은 탄소 포집·저장(CCS) 기술을 활용해 해외의 미이용 에너지(갈탄)에서 수소 연료를 생산하고 유통한다. 해당 사업은 블루 수소 밸류체인이 가능성을 실증한 것으로 평가받는다. 탄소 포집이란 온실가스 실질 배출량 제로를 달성하기 위해 배출 가스에서 이산화탄소를 분리 및 회수하고 지하에 저장하는 기술이다.

일본 NEDO는 더 나아가 브루나이에서는 수소 공급망의 상용화 실증 사업도 추진한다. 브루나이 액화천연가스(LNG) 플랜트에서 발생하는 가스에서 수소를 추출해 액화 수소 연료로 전환하는 사업이다. 일본 미쓰비시그룹, 미쓰이물산, 닛폰유센, 지요다화학건설 등이 구성한 '차세대 수소에너지 체인 기술 연구 조합(AHEAD)'이 진행 중이다.

AHEAD는 브루나이 다루살람과 일본 가와사키현에 각각 수소화 공장과 탈수소화 설비 플랜트를 완공했고, 2019년 12월부터 시운전에 착수했다. 다루살람 공장에선 액화 상태로 수소를 운반하기 위해 수증기 가스에서 수소를 추출해 톨루엔을 혼합한 메틸사이클로헥산 (MCH) 형태의 혼합 액체로 가공하고, 가와사키 공장은 이를 받아 순수한 수소만 분리해 화력발전의 연료로 활용한다. 여기서 MCH는 1세대 LOHC 물질이다. 즉 AHEAD는 LOHC로 수소를 운송하고 수소 혼소 터빈으로 전기를 생산하는 밸류체인이다. 이는 세계 최초로 수소 공급망을 통한 수소 연료 수입 과정을 실증한 것이다. 향후 수소 공급망 상용화에 박차를 가할 것으로 보인다. 이와 함께 일본 정부는 연료전지 자동차(FCV) 보급을 앞당기고 일본 전역에 수소 인프라를 구축해 수소 공급망을 마무리하겠다는 계획을 밝혔다.

2020년 12월 그린 리커버리 계획에서, 일본 경제산업성은 2030년대 중반부터 휘발유·디젤 차량의 신차 판매를 중단하는 방안을 검토한다고 밝혔다. 도쿄도는 자체적으로 정부 계획보다 빠른 2030년부터 휘발유의 신차 판매 중지 방침을 적용할 예정이다. 일본 정부는 2030년까지 휘발유·디젤차의 판매 비중을 30 50%로 끌어내리고, 친환경차 80만대 보급과 일본 전역에 수소 충전소 900개 이상 설치를 목표로 하고 있다.

이렇게 일본과 호주의 하이스트라 프로젝트에서는 국경을 넘어 수소의 생산부터 활용까지를 상용화하고 있다. 호주는 자국의 에너지 자원을 통하여 수소를 생산하고 이를 일본에 판매한다. 일본은 수입한 수소를 바탕으로 자국의 탄소 배출량을 줄이기 위해 이를 활용한다. 일본과 호주는 각국의 자원과 기술의 교류를 통해 하나의 수소 밸류체인을 구성한다.

### Main Questions

다음 두 국가간 수소 활용 에너지를 교류시킬 때, 위에서 제시한 수소의 생산, 운반, 저장, 활용 기술을 고려하여 벨류체인을 구성해보자. (HySTRA 사례를 참고하여도 좋다.)

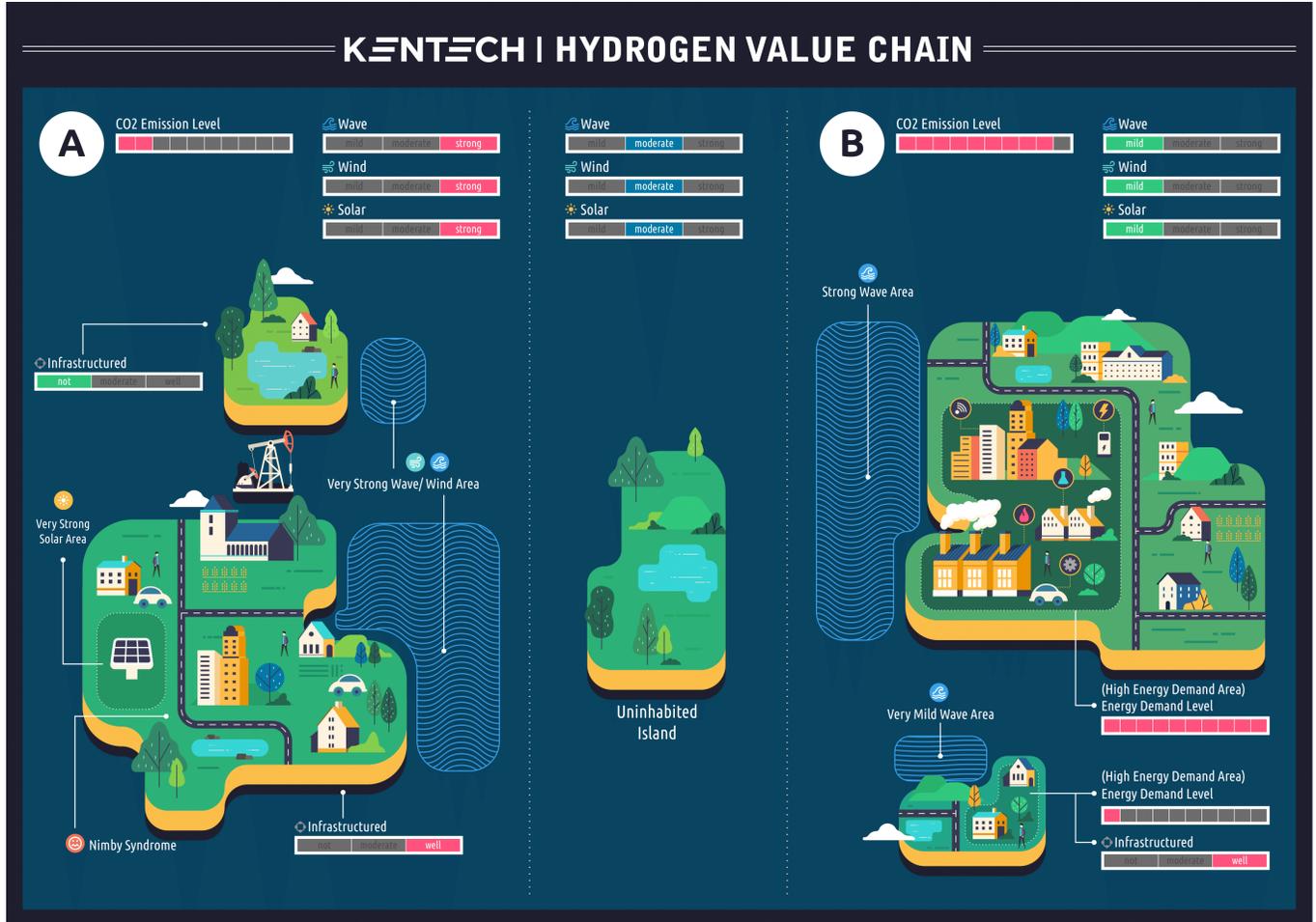


Figure 8. 수소 에너지 벨류체인 맵

A국가는 탄소배출량이 적으며 파력, 풍력, 태양광 자원이 풍부하게 공급되는 국가이다. 작은 섬 지역은 인프라 구축이 잘 되어있지 않아 발전을 시작하기 어려운 상황이지만 큰 섬에는 비교적 잘 구축되어 있어 다양한 에너지 발전소를 구축할 수 있는 환경이다. 반대로, B국가는 탄소배출량이 많으며, 파력, 풍력, 태양광 자원이 부족하고, 작은 섬에 인프라 구축이 잘 되어 있어 에너지 요구량이 적다. 하지만 큰섬은 인프라 구축이 잘 되어있지 않아 발전이 힘든 상황이다. 따라서, A국가에서 생산된 신재생 에너지를 수소 에너지로 생산, 저장 및 운송, 그리고 B국가에서 활용하는 수소 에너지 전주지 벨류 체인 개발이 필요하다.

아래는 각 단계 별 고려할 사항이다.

#### - 수소 생산 단계

지역의 기후 조건을 최대한으로 이용하여 효율적으로 수소를 생산하고, 이때 발생된 CO2를 포집, 이송,

활용하는 블루 수소 생산 방법과, 수전해를 통해 수소를 생산하는 그린 수소 생산 방법 중 더욱 효과적인 방법을 고려한다.

- 수소 저장 및 운송 단계

A국가에서 생산된 수소를 B국가로 운송 시킬 때 용량과 안전성, 경제성 그리고 사회 수용성을 고려하여 어떤 운송방법을 사용해야할 지 결정해야한다. 이를 위하여 물리적 저장방법과 화학적 저장 방법의 장단점을 파악하고 안전하고 경제성 있는 운송 기술을 선별해야한다. 또한 초과하여 발생하는 신재생 에너지를 임시적으로 저장하기 위한 기술들을 고려한다.

- 수소 활용 단계

수소 활용 분야 기술들에 대한 연구 및 개별 활용 기술들을 어떻게 산업 분야에 현실성 있게 적용시킬 수 있을지에 대한 연구를 진행하게 된다. 생산, 저장 및 운송된 수소를 B국가의 어떤 산업 영역에 적용시킴으로써 현재 심각한 CO2 배출 정도를 낮출 수 있을지 고려한다.

## References

- Chiesa, P., G. Lozza, and L. Mazzocchi. 2005. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel . *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* **127**:73–80.
- Dybkaer, I. 1995. Tubular reforming and autothermal reforming of natural gas — an overview of available processes. *Fuel Processing Technology* **42**:85–107.
- Faye, O., J. Szpunar, and U. Eduok. 2022. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* **47**:13771–13802.
- Freni, S., G. Calogero, and S. Cavallaro. 2000. Hydrogen production from methane through catalytic partial oxidation reactions. *Journal of Power Sources* **87**:28–38.
- Nikolaidis, P., and A. Poullikkas. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **67**:597–611.
- Patisson, F., and O. Mirgaux. 2020. Hydrogen Ironmaking: How It Works. *Metals* **10**:922.
- Quarton, C. J., and S. Samsatli. 2020. The value of hydrogen and carbon capture, storage and utilisation in decarbonising energy: Insights from integrated value chain optimisation. *Applied Energy* **257**:113936.
- Yang, J.-H., Y. Yoon, M. Ryu, S.-K. An, J. Shin, and C.-J. Lee. 2019. Integrated hydrogen liquefaction process with steam methane reforming by using liquefied natural gas cooling system. *Applied Energy* **255**:113840.
- Yu, M., K. Wang, and H. Vredenburg. 2021. Insights into low-carbon hydrogen production methods: Green, blue and aqua hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* **46**:21261–21273.
- Yuan, X.-Z., Z. Shi, C. Song, Z. Xie, L. Zhang, N. Zhao, and F. Girard. 2022. MEA—Membrane Electrode Assembly. Elsevier.
- Züttel, A., A. Remhof, A. Borgschulte, and O. Friedrichs. 2010. Hydrogen: the future energy carrier. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **368**:3329–3342.

# CONTRIBUTORS



**Yeowon Kim**

Presently an undergraduate engineer at KENTECH, my focus lies in the realms of Hydrogen technology and Grid modernization. My ongoing research delve deeply into the entire lifecycle chain of hydrogen, encompassing its liquefaction processes and diverse applications.



**Seokjae Kang**

Undergraduate student studying energy engineering especially study microscopic energy such as nuclear fusion and particle accelerators. Long-term goal is to build a particle-in-cell simulation be used for not only fusion but basic physics research or materials research.



**Hyein Kim**

Currently an undergraduate engineer @KENTECH, with a background of Grid and Education. My broad interests design circuit and learning science, with a strong interest in grid modernization and education.



**Jihyun Hwang**

Dr. Hwang specializes in hydrogen energy, focusing on Hydrogen Liquefaction and Value Chain Optimization Technologies. Their work advances key areas such as precooling, liquefier technologies, modularization, and synthesis for hydrogen

systems, notably enhancing efficiency in ammonia and methanol production. They have significantly contributed to the field with publications on process design, economic analysis, and optimization techniques, positioning them as a leading figure in hydrogen energy research and development.



**Jaeyeon Yang**

Editor of AWAKEN. Currently an undergraduate engineer @KENTECH, with a background of chemistry and material science. My broad interests span energy transformation and storage. Additional interest on expansive implications of energy storage within a larger grid system.



**Seonwoo Choi**

Deputy editor of AWAKEN. Major in secondary battery and new material engineering. The wide range of knowledge and occasional creativity surprise people sometimes.