

청정수소 생태계, 산업용 수소와 산업 간 협력 모델 주목

김영훈 수석연구원, 신성장연구실(golyong@posri.re.kr)

목차

1. 청정수소 생태계 부상
2. 산업용 수소에 주목해야 하는 이유
3. 산업용 청정수소의 잠재 수요처
4. 수소 생태계 조성을 위한 제언

Executive Summary

- 글로벌 수소 공급망 구축과 함께 수소 수요처가 산업용에서 운송 및 발전용까지 확대되는 등 청정수소 생태계가 빠르게 조성될 전망
 - 글로벌 청정수소 프로젝트는 '20년까지 228개 발표되었는데 '21년에는 522개로 확대되고 있으며 프로젝트 규모도 대형화 추세
- 산업용 수소는 향후 10년 동안 발생될 청정수소 수요의 50% 이상을 차지하며 전략 및 정책적 측면에서도 중요하기 때문에 주목 필요
 - 첫째, 산업용 수소는 기존에 사용되던 그레이수소가 청정수소로 전환되는 수요를 포함하고 있어 신규수요 중심인 운송 및 발전용보다 시장성이 우수
 - 둘째, 산업용 수소는 수요 개발 과정에서 운송 및 발전용과 시너지가 가능하며 한국과 같이 제조업이 강한 국가에서는 전략적으로 활용 용이
 - 셋째, 산업용 수소는 생태계 조성을 위해 다양한 이해관계자 간 경쟁과 협력이 불가피하며 이를 조율하기 위한 효율적인 산업 정책이 필요
- 산업용 청정수소는 탄소 다배출 5대 산업(철강, 정유, 석유화학, 시멘트, 산업용 가열로)이 친환경 연원료를 도입하는 과정에서 활용 예상
 - [철강] 전통적인 고로 방식 제철 공정을 근본적으로 변화시키는 수소환원제철 공정을 도입하면서 탄소 96% 감축 및 수소 활용
 - [정유] 기존 탈황 공정에서 사용되던 수소를 청정수소로 전환하고 신사업으로 친환경 대체연료 개발을 추진하는 과정에서 수소 활용
 - [석유화학] 원유정제 납사 대신 바이오 납사 전환을 통해 탄소중립 화학제품 생산, 바이오 납사 분해 과정에서 발생하는 청정수소를 공정용으로 활용
 - [시멘트] 탄소 감축을 위해 석회석 소성로의 연료인 유연탄을 대체, 폐합성수지를 기저 연료로 하되 수소 및 암모니아를 보조 연료로 검토
 - [산업용 가열로] 1,000℃ 이상의 고온 가열로를 사용하는 뿌리산업에서 친환경 연료로 수소 또는 암모니아 활용
- 산업용 청정수소의 지속 가능한 생태계 조성을 위해 5대 산업별 수소 로드맵을 적극 반영하되 산업 간 협력모델을 적극 개발하여 추진 필요
 - 유럽에서는 재생 에너지, 청정수소, 이산화탄소, 합성 연료 등 청정수소 조배류체인에 속한 업체들이 각 사의 특화된 경쟁력을 바탕으로 청정수소 생태계를 조성하기 위해 다양한 협력 실증사업을 추진(WESTKÜSTE 100)
 - 밸류체인 통합을 통한 협력모델 외에 산업용 대체연료(수소 및 암모니아) 등 다수 산업(철강·시멘트·유리·발전 등)에서 공통으로 활용할 수 있는 분야를 공동으로 발굴하고 실증사업을 추진

1. 청정수소 생태계 부상

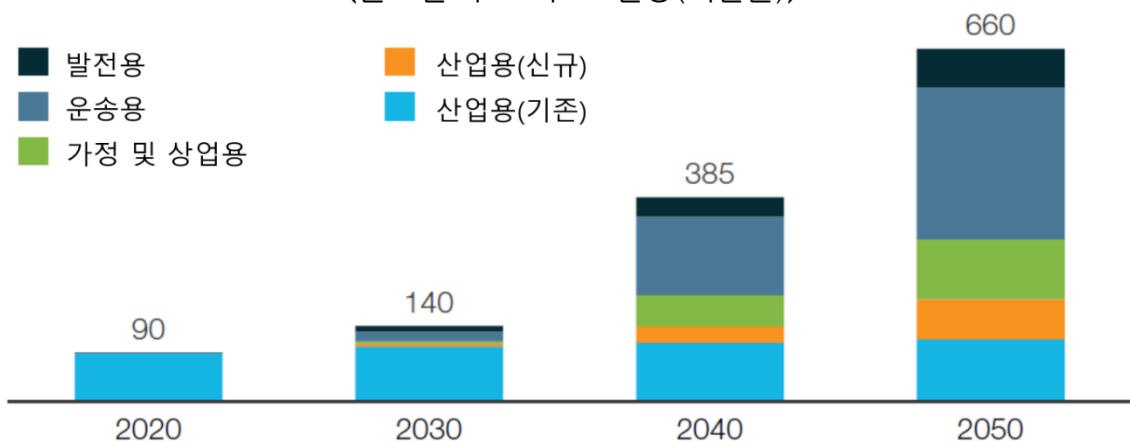
□ 글로벌 기업들이 탄소중립을 위한 청정수소 활용에 관심을 보이면서 생산-운송-활용 쉼밸류체인에 걸쳐 다양한 프로젝트 검토 중

- 청정수소는 화석연료를 개질하고 배출된 CO₂를 포집/저장한 저탄소 블루 수소와 재생 에너지로 물을 전기분해한 무탄소 그린수소로 구성
- 글로벌 청정수소 프로젝트는 '20년까지 228개 발표되었는데 '21년에는 522개로 확대되었으며 프로젝트 규모도 대형화
 - GW급 그린수소 생산 43건, 운송/저장 등 184건, 산업용 활용 221건 등

□ 글로벌 수소 공급망 구축과 함께 수소 수요처가 산업용에서 운송 및 발전용까지 확대되는 등 청정수소 생태계가 빠르게 조성될 전망

- 글로벌 공급망은 재생 에너지 환경이 우수한 중동·남미·호주 등을 중심으로 구축되고 있으며 정부의 적극적인 지원으로 다수의 대형 프로젝트가 추진되면서 수소 생산 및 운송 비용도 빠른 하락 추세
 - BNEF(2021)는 '30년 중동·남미·호주의 그린수소 생산원가가 U\$1.0/kg 이하로 현재 수준보다 1/5 이상 하락하고 '40년에는 해당 국가를 중심으로 LNG보다 경제적인 에너지원으로 부상한다고 예측

<글로벌 수소 수요 전망(백만톤)>



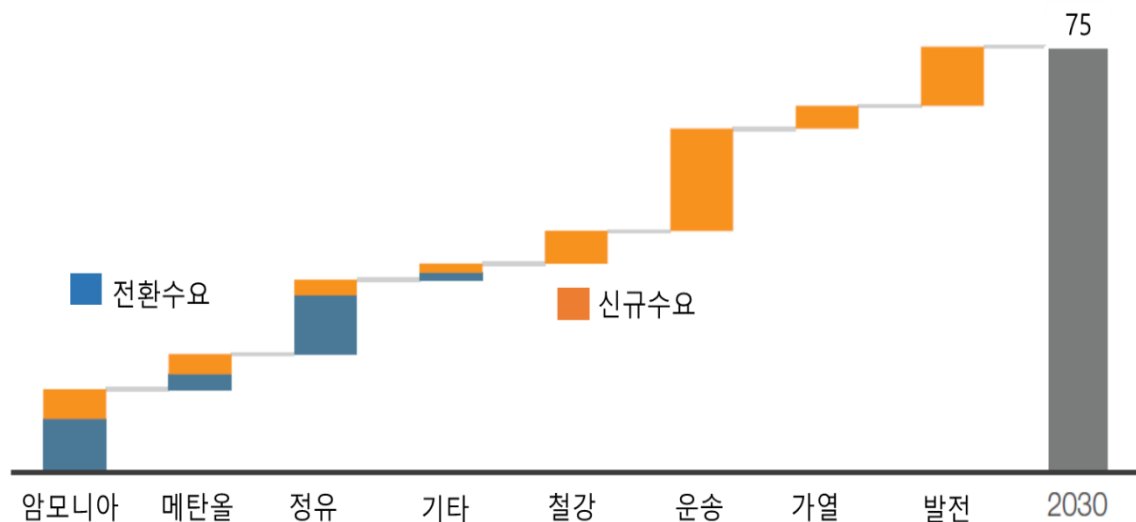
출처: Hydrogen Council(2021), 주: '50년 탄소중립 선언한 국가/기업이 목표 이행 가정

- '30년을 기점으로 청정수소 생태계가 본격적으로 조성되면서 글로벌 시장 규모는 '30년 1.4억톤, '50년 6.6억톤 예상
 - '50년 수소는 글로벌 에너지 소비량의 22%를 차지(Hydrogen Council, 2021)

2. 산업용 수소에 주목해야 하는 이유

- 첫째, 산업용 수소는 기존 그레이수소가 청정수소로 전환되는 수요를 포함하고 있어 신규수요 중심인 운송 및 발전용보다 시장성이 우수
 - 향후 10년 동안 발생될 청정수소 수요 7,500만톤 중 산업용이 50% 이상을 차지하는 등 가장 큰 수요처로 성장
 - 우선 기존 산업용으로 쓰이던 그레이수소의 약 30%인 2,500만톤이 탈탄소 전략 추진 과정에서 청정수소로 점진적으로 전환
 - 현재 글로벌 수소 수요는 9,000만톤이며 정유·석유화학 등 탄소 다배출 산업에서 고부가 화학물질 제조 및 탈황 공정 등으로 활용
 - 동시에 철강 수소환원제철, 시멘트 소성로 등 기존에 수소를 활용하지 않았던 산업에서 활용되면서 '30년 신규수요는 1,900만톤 발생
 - 같은 기간 운송용 수소는 1,800만톤, 발전용은 1,100만톤 예상

〈'30년 청정수소 수요 구성(백만톤)〉



출처: Hydrogen Council(2021)

- 둘째, 산업용 수소는 수요 개발 과정에서 운송 및 발전용과 시너지가 가능하며 한국과 같이 제조업이 강한 국가에서 전략적으로 활용 용이
 - 한국·일본 등 수소를 수입해야 하는 국가에서는 산업용 수소를 레버리지로 운송 및 발전용 수소 수입도 패키지로 수입하면서 강한 구매력 행사 가능

- IEA(2019)는 청정수소 생태계 확대를 위해 산업용 수소 수요 개발을 핵심 전략으로 권고
- 산업용 수소는 기존 인프라를 활용하기 때문에 도입 시 전환비용이 크지 않고 강한 구매력을 행사할 수 있어 상대적으로 경제적인 활용이 가능

□ 셋째, 산업용 수소 생태계에는 다양한 이해관계자가 존재하며 협력 및 경쟁구도를 조율하기 위해서는 효율적인 산업 정책이 필요

- 철강·정유·석유화학 등 탄소 다배출 산업을 중심으로 수소 협의체 등을 통해 산업용 수소 생태계 조성을 위해 노력 중
- 하지만 다수 참여 기업이 수소 활용 역할 외에 수소 공급을 신사업으로 추진하면서 미묘한 협력과 경쟁 관계가 형성
 - 철강의 포스코, 석유화학의 롯데케미칼 등 업종 대표기업들은 탈탄소 전략을 위해 수소를 생산하고 자체 활용하는 계획 뿐만 아니라 신사업으로 타사에 판매까지 포함한 수소 로드맵을 발표

3. 산업용 청정수소의 잠재 수요처

□ 산업용 수소의 주요 수요처는 5대 탄소 다배출 업종(철강, 정유, 석유화학, 시멘트, 산업용 가열로)으로 압축되며 청정수소는 화석 연원료를 친환경 연원료로 전환하는 과정에서 활용

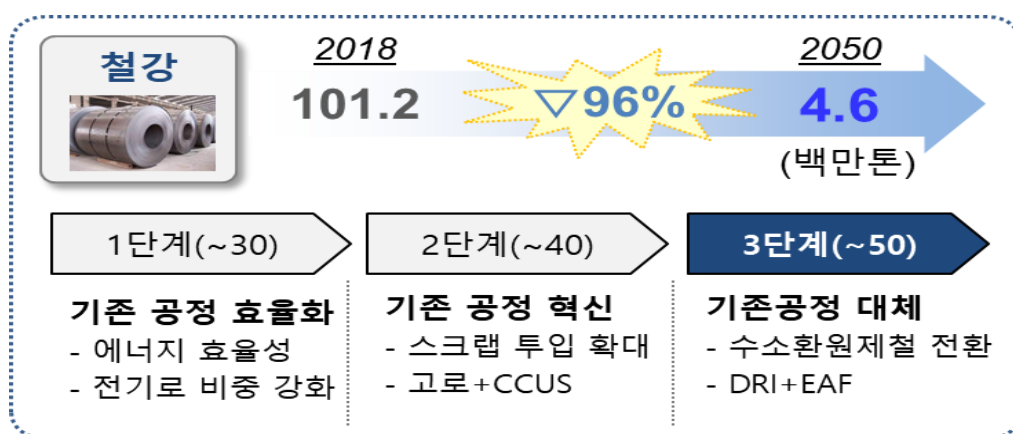
- 5대 업종은 탈탄소 전략으로 크게 공정 개선 및 효율화, 친환경 연원료 전환, 순환 자원 활용, 배출 탄소의 포집 및 저장을 추진
- 수소 활용은 주로 연원료 전환 과정에서 발생되며 본격적인 활용 시기는 실증사업으로 기술 검증이 완료된 '30년 이후 예상

□ [철강] 전통적인 고로 방식 제철 공정을 근본적으로 변화시키는 수소환원제철 공정을 도입하면서 탄소 96% 감축 및 수소 활용

- 고로에서 석탄 대신 수소를 활용하여 철광석을 환원시키고 탄소 감축
 - 기존에는 고로(용광로)에 철광석과 석탄을 넣어 1,500°C 이상 고온에서 녹임. 이 과정에서 일산화탄소(CO)가 발생해 철광석(Fe_2O_3)에서 산소가 분리($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$)되지만 CO_2 가 배출

- 수소환원제철에서는 철광석에서 산소를 분리시키는 환원제로 수소가 활용($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$)되고 물(H_2O)과 철(Fe)이 생산됨
- 수소환원제철은 기존 공정을 대체하는 혁신적인 변화인 만큼 실증단계는 '30년 이후에도 계속되고 본격적인 도입은 '40년 이후 예상
 - '40년까지 철강업계는 기존 공정 효율화 및 CCS(Carbon Capture and Storage) 등을 통한 기존 공정 혁신으로 탈탄소에 대응
 - '50년까지 수소환원제철 중심의 철강 생태계로 완전히 전환될 것으로 예상되며 이러한 시나리오에서 수소는 연간 400만~500만톤 필요

〈철강산업의 탈탄소 로드맵 및 수소 활용 경로〉



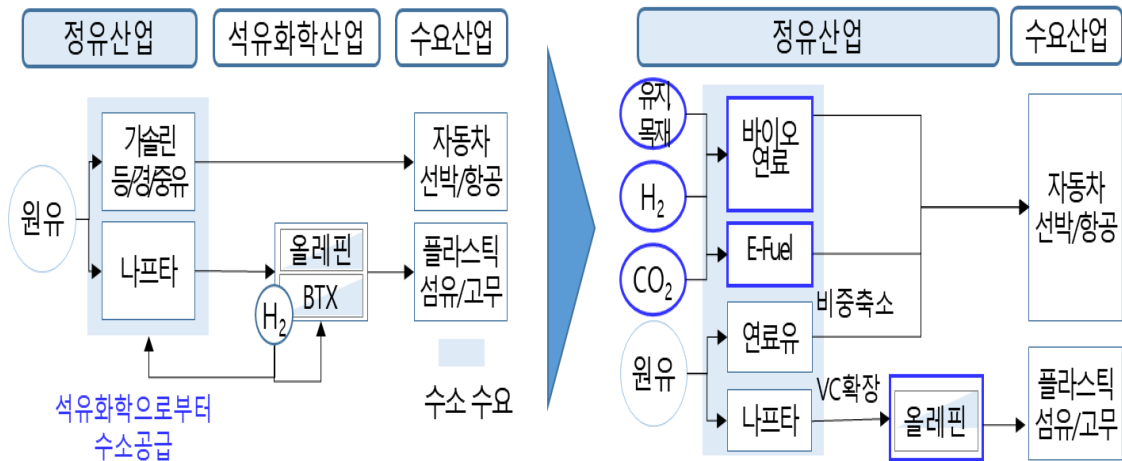
출처: 탄소중립 산업 전환 추진위원회(2021) 등 포스리 수정

□ [정유] 기존 탈황 공정에서 사용되던 수소를 청정수소로 전환, 친환경 대체연료 개발을 신사업으로 추진하는 과정에서 수소 활용

- 정유산업은 1990년대부터 LNG를 개질하여 수소를 생산하고 탈황 공정에 활용, '30년 이후 수소 생산설비를 교체해야 하기 때문에 그레이수소에서 청정수소 공급체계로 단계적 전환 예상
 - 정유산업은 수소 순소비 업종으로 부생 수소 활용(30%), LNG 개질 및 자체 생산(40%), 석유화학 업체로부터 잉여 수소 구매(30%)하여 필요수소를 조달
- 동시에 핵심 수요처인 모빌리티 산업의 화석연료 수요 감소에 대응하기 위해 수소가 첨가된 바이오 연료, 수소와 CO_2 를 합성한 E-Fuel 등 친환경 대체연료 개발을 신사업으로 추진
 - 수첨 바이오 연료(HVO; Hydrotreated Vegetable Oil)는 동식물성 유지에 수소를 첨가하여 저온 유동성이 개선된 연료로 친환경 항공유 또는 전동화 전환 前 디젤 트럭 연료로 활용

- E(Electro)-Fuel은 전동화가 어려운 항공 및 선박용 친환경 연료이면서 대량생산이 어려운 바이오 연료의 공급 한계를 극복할 대안으로 부상

〈정유 산업의 수소 활용 경로 변화〉

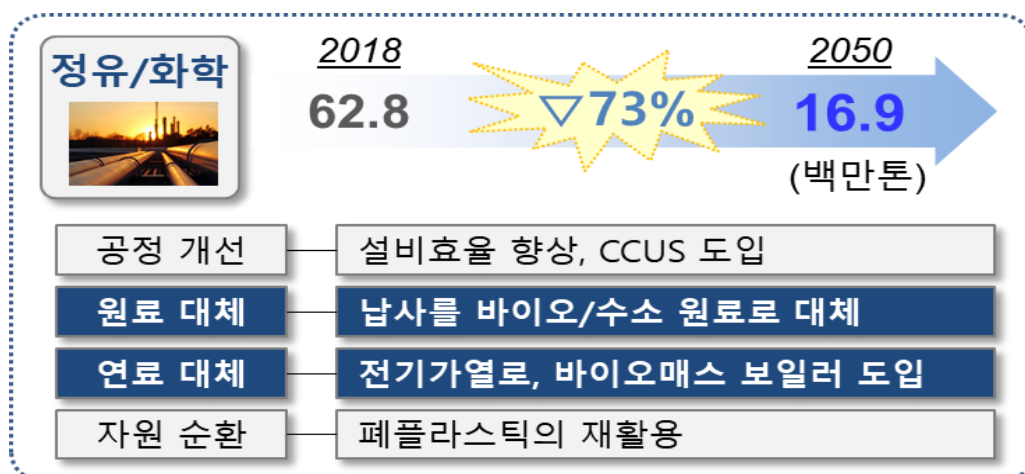


출처: 언론 자료 종합 및 포스리 수정

□ [석유화학] 원유정제 납사를 바이오 납사로 전환하고 친환경 화학제품 생산, 바이오 납사 분해 과정에서 발생하는 청정수소를 자체 재활용

- 석유화학 업체는 정유 업체로부터 공급받은 납사를 분해하여 다양한 화학제품을 생산
 - 납사 분해 과정에서 생산된 부생 수소를 BTX, 카프로락탐 등 일부 제품의 생산을 위해 첨가
 - 잉여수소는 수소가 필요한 인근 정유업체에 판매
- 탄소 감축 전략으로 바이오 납사를 도입할 가능성, 바이오 납사 분해 과정에서 생산된 부생 수소가 청정수소로 인정될 경우 산업용 청정수소 대형 공급 업체로 부상
 - 화학업체의 탄소는 납사 분해 과정에서 45%가 발생되기 때문에 바이오 납사 도입은 탈탄소를 위한 핵심 전략
 - 바이오 납사 분해 과정에서 발생하는 부생 수소는 탄소 배출이 없어 청정수소로 인정될 가능성이 존재(BNEF, 2021)

〈화학산업의 탈탄소 로드맵 및 수소 활용 경로〉

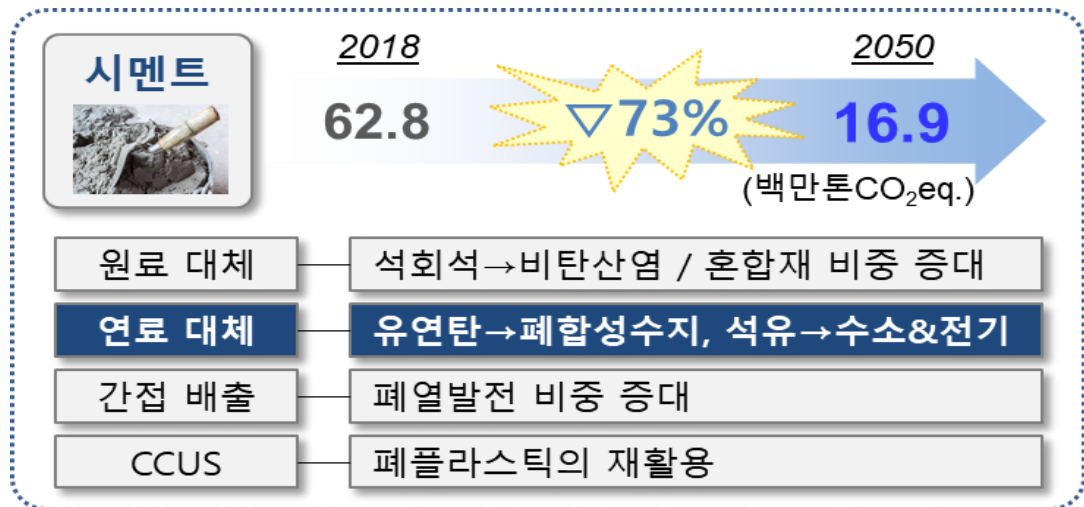


출처: 탄소중립 산업 전환 추진위원회(2021) 등 포스리 수정

□ [시멘트] 탄소 감축을 위해 석회석 소성로의 연료인 유연탄을 대체, 폐합성수지를 기저 연료로 하되 수소 및 암모니아가 보조 연료 가능

- 탄소 감축을 위해 석회석 전량 대체는 구조적 한계, 연료인 유연탄을 전량 대체하는 전략을 추진할 것으로 예상되며 수소는 연료 대체 과정에서 활용
 - 탄소는 석회석 분해 과정에서 60%, 소성로 유연탄 연소 시 30% 배출
 - 석회석 원료를 석탄 발전 석탄재, 제철 공정 슬래그 등으로 대체하고 혼합재 비중을 확대할 수 있지만 공급 제한 때문에 탄소중립 대안으로 추진하는 데는 한계가 있음
- 대체연료로 폐합성수지가 우선 검토되고 있으나 탄소중립 기여도가 높은 청정수소 및 청정암모니아도 보조연료 후보로 초기 검토 중
 - 폐합성수지는 활용 비중을 현재 20%대에서 유럽 수준인 70%까지 확대하는 것이 목표이나 연소 과정에서 일산화탄소 배출, 염소 증가에 따른 소성로 내구성 저하 등의 문제로 기존 연료를 완전히 대체하는 데 한계가 존재
 - 수소는 석회석 소성 반응 온도인 2,000°C 이상 상승이 가능하여 대체연료로 단독 사용이 가능하지만 경제성이 열악
 - 암모니아는 단독 연소 시 2,000°C 도달이 어렵고 악취 문제로 주민 수용성이 낮지만 상대적으로 경제성이 좋고 수소를 부분 개질하여 연소 온도를 상승시키는 등이 기술 개발이 추진되고 있어 대체연료 후보로 검토 가능

〈시멘트 산업의 탈탄소 로드맵 및 수소 활용 경로〉



출처: 탄소중립 산업 전환 추진위원회(2021) 등 포스리 수정

□ [산업용 가열로] 파편화된 시장이나 고온 가열로를 사용하는 뿌리 산업에서 친환경 연료로 수소 또는 암모니아 활용 가능

- 시멘트뿐만 아니라 유리, 금속 가공 등 많은 제조업에서 화염 온도 1,000℃ 이상의 고온 가열로가 사용되고 있으며 저탄소 대체연료로 LNG, 무탄소 대체연료로 수소 및 암모니아 활용 가능
- 일본을 중심으로 유리 용융로, 자동차 단조 공장 및 철강 열연 공장 등의 고온 가열로에서 수소 또는 암모니아의 전·혼소 실증사업이 추진 중

〈주요 공정 온도별 활용 가능한 친환경 연료 및 활용 사례〉

공정온도 (°C)	주요 활용처	주요연료 (최고화염온도)
1,000 이상	시멘트 소성로 유리 용융로 금속 압연로	수소 (2,120°C) LNG (1,970°C) 암모니아 (1,750°C)
500~1,000	AI 용해로 침탄로 정유 원유분리 석화 납사분해	수소/LNG/암모니아 vs 전기 경합
500 미만	Zn 용해로 건조로 증기보일러	태양열/지열/전기 바이오매스 등

유리 용융로 연료를 천연가스→수소 교체

- NSG(일본 2위 유리제조업체), 수소를 연료로 건축용 유리 제조 실증 실험 성공
- 용융로 천연가스 버너 대상 수소전소/혼소(20%) 실증

자동차 부품단조공장에 수소버너 도입

- 도요타, 수소전소버너를 탄소배출량이 많은 부품단조공장 적용(추가이로 공업 협력)
- 천연가스버너 1천대 순차적 교체

철강 열연공장 슬라브 가열로용 수소버너 개발

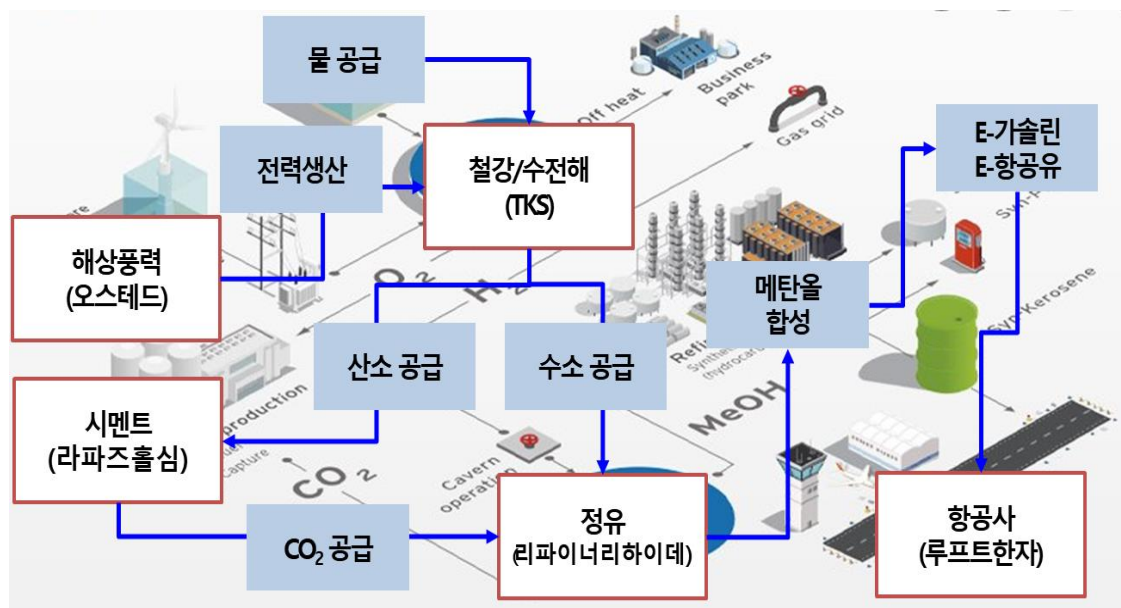
- 추가이로 공업 개발, 암모니아 버너도 개발 중

출처: 언론/연구 자료 종합 및 포스리 수정

4. 수소 생태계 조성을 위한 제언

- 5대 산업을 중심으로 탈탄소 대응 및 신사업 추진 전략으로 청정수소 활용이 검토 중이며 향후 10년 동안은 실증사업을 통해 기술 검증에 집중하고 '30년 이후 본격적으로 활용이 확대될 것으로 예상
- 실증사업은 5대 산업별로 수립한 탄소중립 로드맵을 종합하여 정부 지원 타당성이 높고 지속가능한 수소 생태계에 기여하는 산업 간 협력모델을 우선 발굴하여 추진
 - 유럽에서는 WESTKÜSTE 100과 같이 재생 에너지, 청정수소, 이산화탄소, 합성 연료 등 청정수소全产业链에 속한 업체들이 각 사의 특화된 경쟁력을 바탕으로 다양한 협력모델을 추진 중

〈WESTKÜSTE 100 프로젝트의 산업 간 협력 구조〉



출처: WESTKÜSTE 100 홈페이지(www.westkueste100.de)

- '24년 함부르크 공항에서 사용되는 연료 5%를 E-Fuel로 대체하기 위해 정유 업체(리파이너리 하이데)가 수소와 CO₂를 합성하여 E-Fuel인 E-메탄올 및 E-케로신을 생산하고 항공 업체(루프트한자)에 공급
- 수소는 철강 업체 티센크루프의 수전해 사업 자회사(우데 엔지니어링), CO₂는 글로벌 시멘트 업체(라파즈 홀심)가 공급

- 수전해를 통해 청정수소와 같이 생산된 산소는 소성로의 연소 조건 개선 및 질소 배출량 감소를 위해 시멘트 업체에 연소 보조제로 공급
 - 총예산 8,900만 유로 중에서 독일 정부가 3,000만 유로를 지원하고 '24년까지 추진될 예정
- **밸류체인 통합을 통한 협력모델 외에 산업용 대체연료 등 다수 산업에서 공통으로 활용할 수 있는 분야를 공동으로 발굴하고 실증사업을 추진하는 모델도 가능**
- 시멘트 소성로의 대체연료로 검토되는 수소·암모니아의 혼소 기술을 유리·철강 등 관련 업계까지 확대하고 공동 개발 및 실증 사업 추진
 - 발전분야에서 추진되고 있는 석탄-암모니아 또는 LNG-수소 혼소 실증 사업과도 연계하여 추진할 경우 수소 및 암모니아 혼소 기술은 산업·발전·운송 등에서 다양하게 활용될 수 있는 플랫폼화 가능

이 자료의 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고 자료]

[보고서/논문]

탄소중립 산업 전환 추진위원회, 2021, “탄소중립 산업-에너지 R&D 전략”

BNEF, 2021, “2H 2021 Hydrogen Levelized Cost Update”

BNEF, 2021, “Renewable Naphtha: From Byproduct to Premium”

Hydrogen Council, 2021.11., “Hydrogen for Net-Zero: A Critical Cost-Competitive Energy Vector”

IEA, 2019, “The Future of Hydrogen”

[홈페이지]

WESTKÜSTE 100 (www.westkueste100.de)