

수소경제의 경제적·기술적 이슈

- Value Chain 5단계 중심 -

정기대 수석연구원, 철강연구센터 (kdchung@posri.re.kr)

목차

1. 수소경제 Value Chain
2. 수소경제 공급 측면
3. 수소경제 수요 측면
4. 종합

Executive Summary

- 수소경제에 대한 총론에서 한 단계 들어가 수소경제를 구체적으로 이해하기 위해 우선 수소경제 Value Chain 검토 필요
 - 수소경제의 Value Chain은 수소의 생산, 저장, 운송, 충전, 이용 단계로 구분
 - 각 단계에 활용되는 기술은 매우 다양하고 경제적·환경적 특성이 상이함
 - 많은 기술이 이미 개발·활용 중이지만 수소경제의 확산을 위해 성능과 경제성을 개선하거나 새롭게 개발해야 하는 Bottleneck 기술도 다수
- 수소 공급은 수소를 생산하는 것과 저장, 운반하고 충전설비나 파이프라인을 통해 소비자에게 수소를 제공하는 것을 포함하는 범위로 안전성과 경제성이 충족되어야 함
 - 수소 생산 방법은 화석연료 개질(Reforming), 화학·철강 등 공업 프로세스 부산물(부생가스), 물의 전기분해, 미생물 이용 등 다양하지만 현재 90% 이상은 화석연료로 생산 중
 - 일반적으로 수소는 기체압축방식으로 저장하며 파이프라인, 수소 튜브 트레일러 등을 활용하여 운반, 충전소는 고정형과 이동형이 있으며 외부에서 생산된 수소를 제공하거나 충전소에서 직접 수소를 생산하는 방식이 있음
 - 공급측면 이슈는 높은 화석연료 의존도, 부생수소 공급 제약, 수전해 저효율, 기체압축기술 한계, 액체수소 저장운송기술 난관, 파이프운송 수소취성, 고비용 저장·운송 및 충전소 설치·운영 등
- 수소는 화학산업, 정유산업 등에서 제조공정 중 사용하거나 연료전지의 에너지원으로 활용
 - 수소(H₂) 용도는 암모니아 생산, 원유 정제, 메탄올 생산, 에너지 저장 등 다양
 - 수소를 내연기관 연료로 활용하려는 시도는 상업화되지 못했으나 최근 연료전지를 통해 수소를 전기와 열로 변환시켜 자동차, 가정, 건물, 발전 등 사용
 - 수요측면 이슈는 인프라 부족, 수소 가격 및 안전성 우려, 연료전지 성능(효율성, 내구성) 미흡, 높은 촉매 비용, 보조금 지원 등
- 수소경제를 뛰어넘어 수소사회로 진화할 것인가 혹은 2000년대 초 전철을 답습할 것인가에 대한 의견이 갈림
 - 낙관론과 비관론이 모두 있지만 수소경제의 확산에는 청정수소생산량 확대와 생산비용 감축, 수소 유통 인프라 확충, 수소전기차 가격 인하 등이 선결과제

1. 수소경제¹ Value Chain

- 수소(H)²는 색, 냄새, 맛이 없는 가장 가벼운 원소로 우주의 75% 차지, 물에는 11%가 존재
- 수소(H₂)³는 전기와 같이 자연 상태에서 직접 얻을 수 없는 전환된 에너지 형태이며 에너지 운반체
 - 수소의 용도는 질소와 반응시켜 암모니아 생산, 일산화탄소와 반응시켜 메틸알코올 생산, 중질유 분해, 원유 탈황, 금속 산화물 환원, 에너지 저장 등인데 수소경제 관련 에너지 저장 기능이 중요해짐
- 에너지에 관한 여러 가지 용어들이 혼재되어 쓰이고 있지만 크게 에너지 자원과 에너지 형태로 구분
 - 에너지 자원: 화석연료(석유, 천연가스, 석탄), 신재생/대체에너지(태양열, 태양광, 풍력, 조력, 지열, 수력, 바이오매스, 핵에너지 등)
 - 에너지 형태: 전기에너지, 운동에너지, 위치에너지, 원자력에너지, 빛에너지, 열에너지, 화학에너지 등
- 대표적인 에너지 운반체가 전기⁴이며 수소도 에너지 운반체임
 - 다양한 에너지 형태가 전기로 전환되며 최종 소비단계에서 전기도 다양한 에너지로 전환되어 활용됨
 - 수소(H₂)는 자연 상태에 거의 존재하지 않고 다른 에너지를 사용하여야만 얻을 수 있는 형태이며, 전환과정에서 에너지가 소모되어 수소를 얻기 위해 투입한 에너지보다 수소에 저장된 화학적 에너지가 낮은 수준
 - 전기와 수소는 양방향으로 전환 가능⁵

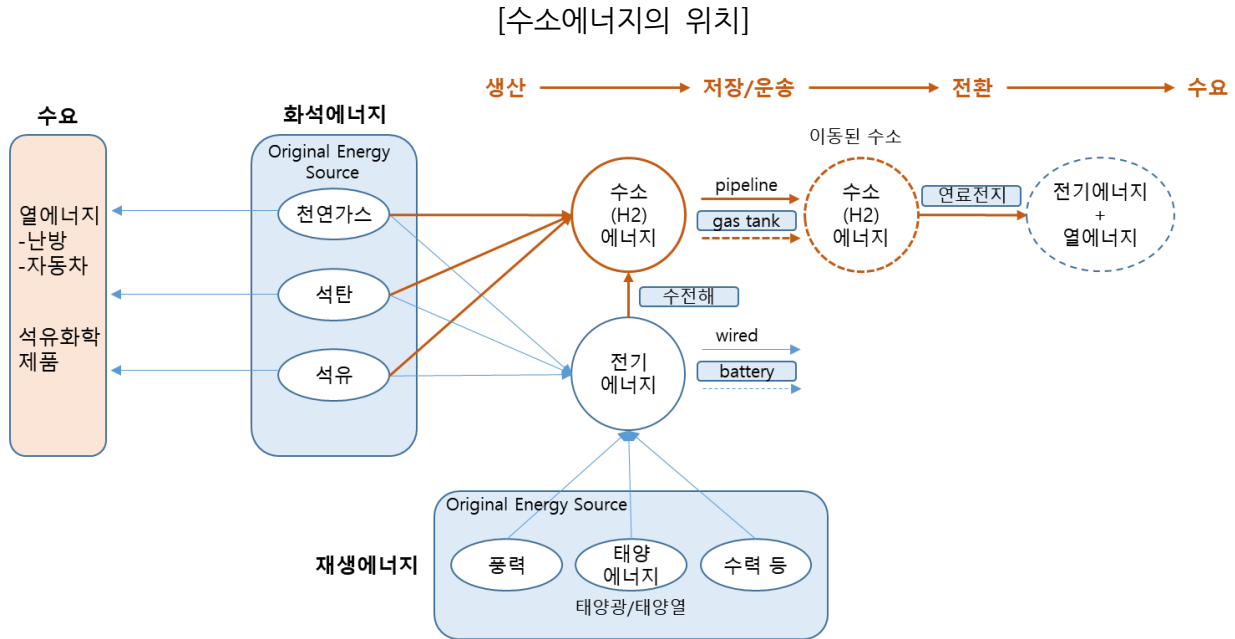
¹ 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin)은 2002년 발표한 저서 『수소경제』에서 지구상에서 가장 풍부하게 얻을 수 있는 자원인 수소를 환경문제를 유발하는 화석연료를 대체할 대안으로 선언하고, 수소경제 실현을 위한 새로운 에너지공동체 개념을 제시함

² 수소(H) 원소 자체 에너지를 직접 활용하는 것은 수소 핵융합/핵분열로, 이때 수소는 원자력에너지에서 우라늄과 유사. 태양의 에너지원이 수소의 핵융합 반응

³ 여기서 다루는 수소는 이수소(H₂)로 수소원소(H)는 지구상에 풍부하지만 에너지가 저장된 이수소는 지구 자연계에는 극미량 존재, 이수소 보유 에너지는 두 수소 원자의 화학적 결합 에너지임

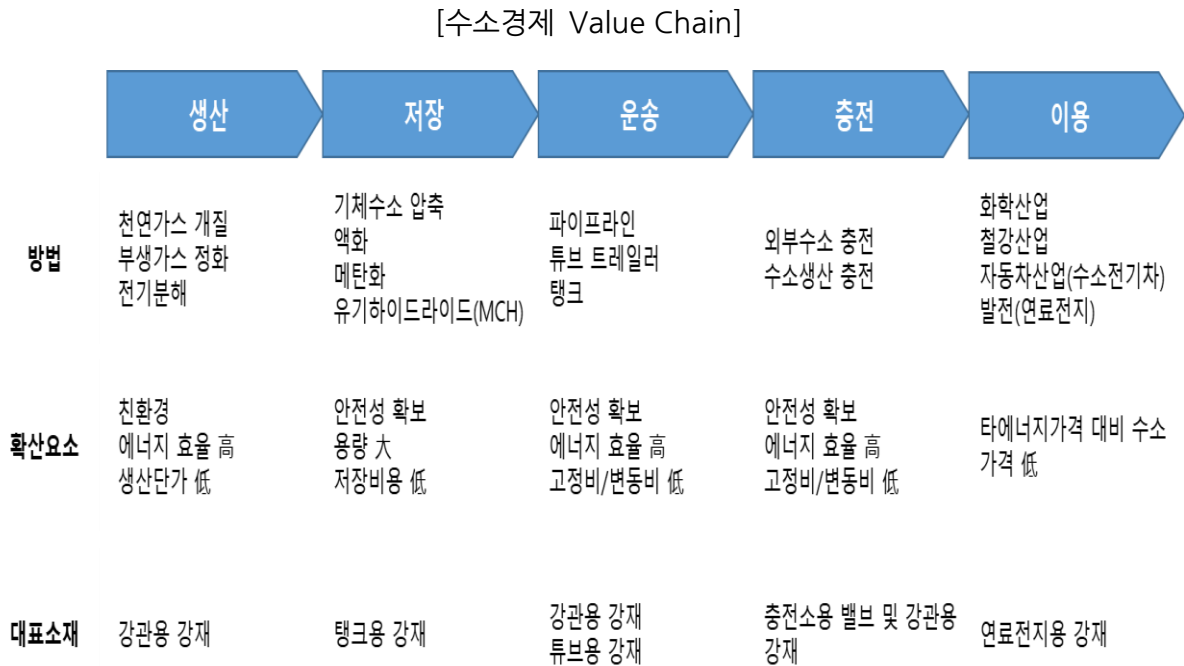
⁴ 전기는 에너지의 원초적인 형태로 전자의 흐름

⁵ 전기를 이용 수전해하여 수소 생산, 생산된 수소를 연료전지에 투입하여 전기 생산



□ 수소경제 Value Chain은 수소의 생산에서 이용까지 5단계

- 수소차 고객이 수소를 충전하기 위해서는 Value Chain상 사전에 수소가 생산되어야 하고, 생산된 수소를 저장한 상태에서 충전소로 운송하여 충전소 수소탱크에 저장하였다가 제공받아 마지막으로 소비함
 - 수소의 생산, 저장, 운송, 충전, 이용 각 단계별 다양한 기술과 핵심고려요인



2. 수소경제 공급 측면

□ 글로벌 수소 생산의 약 96%(천연가스:49%, LPG:29%, 석탄:18%)
가 화석연료를 사용하는 열화학적 생산 방식

○ 생산단계: 국내에서 수소는 대부분 천연가스 개질과 부생수소
정화방법으로 생산되며 수전해는 효율이 낮아 생산 비중 낮음

- 현재 상업용 수소 생산의 90% 이상은 천연가스, 석탄, 석유 등 탄화수소계
화석연료를 촉매 반응으로 생산
- 잉여재생에너지를 활용하여 수소를 생산할 수도 있지만 친환경적인
신재생에너지의 낮은 보급과 효율⁶ 문제로 비중은 매우 낮음

[수소 생산 방법]

생산방법	에너지 원	장점	단점
수증기 개질, 가스화	화석 연료 (천연가스, 석탄)	대량생산 가능 저렴한 생산단가 안정된 기술	CO ₂ 발생 多 에너지 안보 취약
전기분해	신재생에너지 (태양력, 풍력, 조력, 파력)	친환경성 다양한 에너지원 활용 가능	높은 생산단가 지역적 제한 낮은 에너지 효율 대량생산 곤란
	원자력	대량 생산 가능 CO ₂ 미발생	원자력 거부감 일부 기술개발 중
부생수소(화학·철강 공정 부산물)	주로 화석 연료	폐가스 활용	정제 필요, 생산량 확대 곤란

○ 저장단계: 일반적으로는 수소를 기체상태에서 압축하여 저장하지만
저장효율 향상을 위해 액화하거나 MCH 방법 채택

- 수소는 상온에서 기체상태로 에너지 밀도가 낮아 액체연료에 비해 저장과 운반이
불편하고, 잘 새어나가 생산/저장/운송 단계에서 약 10~20% 누출
- 액화수소기술은 방위산업, 우주산업 등에 활용되는 기술로 선진국 보유기술의

⁶ 재생에너지에서 수소를 생산하려면 우선 전기를 생산하고 생산된 전기를 수전해로 수소에너지로
전환(현재 에너지 효율 55% 수준에서 2022년까지 70% 향상 목표), 저장과 수송 과정(에너지 효율
80~90%)을 거쳐 최종 사용처에서 연료전지를 통해 전환된 수소를 다시 전기에너지로 변환(전기에
너지 40%, 열에너지 40%)하는데, 전 과정에서 에너지의 60% 이상이 손실될 수 있음

이전이 원활하지 않음. 국내 연구와 상업화는 초기단계

[수소 저장 방법]

저장방법	장점	단점
압축	이용 편리 작은 부피 소량 이용에 적합	압축과정 에너지 소모 저장용기 엄격한 특성 요구 감압 시 위험
액화	대량 저장 가능(체적 1/800) 압축방식 대비 12배 효율	-253도 이하 액화과정 에너지 소모 밸브 및 이음매 가스 유출
메탄화(P2G)	대량 주입 운송, 기존 가스 인프라	메탄화에 필요한 에너지 손실
메틸시클로 헥산(MCH)	압축방식 대비 8배 운송 효율 상온상압에서 운송 가능	수소 분리용 촉매와 MCH용 촉매 성능 및 경제성 미흡

○ 운반단계: 수소운반을 위해 산업용/가정용은 파이프라인·튜브 트레일러, 자동차용은 수소탱크를 활용 중

- 수소탱크⁷는 내고압, 경량화, 저비용 등 요구특성 때문에 금속부터 탄소섬유까지 다양한 소재 각축
- 수소 튜브 트레일러로 수소공장에서 수요처(충전소)까지 배송
- 부생가스가 생산되는 울산의 경우 실제 사용장소까지 파이프를 연결하는데 수소공장에서 수요지역까지 파이프라인 연결에는 높은 비용 발생

○ 충전단계: 수소충전소는 수급방식과 이동성 여부에 따라 구분

- 국가별로 다양한 여건을 고려하여 수소충전소 구축 중(민간기업 SPC는 독일 H₂Mobility, 일본 JHyM(수소 인프라 컨소시엄))
- 우리나라는 부생수소의 외부수급을 활용한 고정형 충전소 중심으로 수소충전소 보급 추진
- 2018년 모든 차량용 에너지를 취급(휘발유, 경유, 액화석유가스(LPG), 전기, 수소)하는 복합에너지스테이션 설치(울산 현대오일뱅크)

⁷ Type 1: 금속재 용기(철, 알루미늄), Type 2: 금속재 용기 + 유리섬유 부분 보강, Type 3: 알루미늄 라이너 + 탄소섬유 외피, Type 4: 플라스틱 라이너 + 탄소섬유 외피

[수소충전소의 종류 및 충전방식]

구분	수소공급방식		비고
고정형 충전소	직접생산	수증기 개질	천연가스/메탄/LPG
		물 전기분해	일반전력/풍력/태양력
	외부수급	액화수소	액화수소 직접 충전, 압축기체수소로 변환 후 충전
		기체수소	실린더, 트레일러, 파이프라인
이동형 충전소	직접생산	수증기 개질	천연가스
	외부수급	액화수소	액화수소 직접 충전, 압축기체수소로 변환 후 충전
		기체수소	실린더 수급

□ 수소 공급 관련 주요 이슈는 경제적이고 친환경적인 수소에너지의 대량 생산, 저장, 운송 및 충전 인프라 구축과 관련되어 있음

○ 재생에너지를 활용한 수소 생산은 매우 낮은 수준

- 현재 국내 수소 생산은 90% 이상이 석탄의 가스화(gasification), 천연가스의 수증기 개질(vapor reforming) 등을 통해 생산. 이 과정에서 화석연료는 CO₂와 수소로 분리
- 탈탄소화 생산 Route는 재생에너지 전력으로 수전해하거나 천연가스 개질에서 발생하는 CO₂를 CCS(Carbon Capture & Storage)로 제거
- 청정수소는 생산비용⁸이 높으며, 청정수소 공급을 위한 재생에너지도 부족

○ 700-800Bar에서 기체압축기술 한계 직면

- 압력탱크에 기체수소를 넣을 수 있는 압축기술의 한계치에 도달(700-800Bar)

○ 대량 수소액화 저장 및 해상운송 기술 초보 단계

- -253도 이하가 필요한 수소의 액화기술과 액화수소의 해상수송은 현재 Pilot 추진 중으로 경제적·기술적인 성과는 미지수
- 기술발전 트렌드를 고려하면 기술적으로는 가능해지겠지만 액화저장수송 비용은 상당할 것으로 예상

⁸ 전기분해수소 U\$18~22/kg, 천연가스 개질 U\$3~8/kg(Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015, IEA)

○ 파이프운송 중 수소취성⁹ 발생

- 수소 운송 중 수소가 파이프라인에 침투하여 강재의 물성이 변화되고 파이프라인 내구성에 문제 발생
- 따라서 수소 공급을 위해 기존 천연가스(LNG) 파이프라인을 그대로 사용하기 곤란한 문제 발생

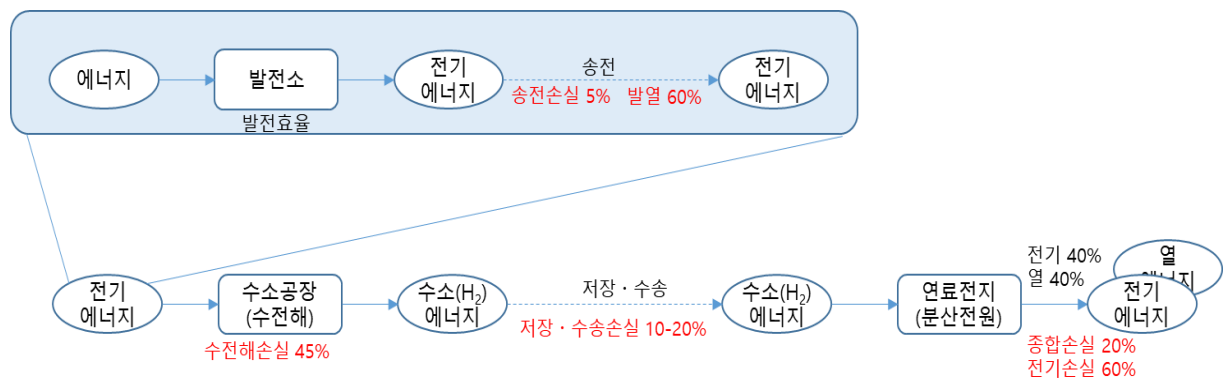
○ 저장·운송 및 충전소 고비용(월간수소경제, 2018.7)

- 수소연료가격(시판가격 7,200~8,000원/kg)으로 환산한 전기차용 전기가격은 1,350원/kg, 디젤가격 8,000원/kg
- 수소원가구조(수소 1kg)는 제조 3,000원, 저장운송 7,000원, 충전 44,000원 등 5만원 이상(수소 인프라 확충과 수요 증대 시 8,000원대까지 하락)

○ 전기→수소 및 수소→전기 에너지전환 과정에서 에너지 효율 하락

- 에너지 형태가 전환되는 발전소(다양한 에너지원 → 전기), 수전해 수소공장(전기 → 수소), 연료전지(수소 → 전기)에서 에너지 손실 발생

[에너지전환 과정]



⁹ 강(鋼) 속에 흡수된 수소에 의해 강재(鋼材)의 연성(延性) 또는 인성(靱性)이 저하되는 현상으로 수소의 흡수에 의해 금속재료가 취화하는 현상. 금속에 잘 흡수되는 성질은 수소의 정제와 저장에 유용하게 이용되지만, 수소가 흡수된 금속은 부서지기 쉬워져 수소기체용 배관이나 저장탱크 제작이 어려워짐

3. 수소경제 수요 측면

□ 수소는 수소경제 핵심에너지 운반체로 수요량¹⁰ 과 수요분야가 확대
중으로, 신수요의 대표적 사례는 수소를 전기로 전환하는 연료전지

○ 수소연료전지¹¹는 수소와 산소의 화학반응을 통해 전기에너지 발생

- 수소연료전지는 그 자체가 작은 발전소이기 때문에 발전원을 최종 소비자
가까이에 배치하는 분산전원(分散電源) 형태
- 움직이는 부품 없이 화학반응이 이루어져 소음이 없고 NOx 및 SOx 등
공해물질을 배출하지 않으며 전기에너지 효율 40% 이상
- 설치와 증설이 용이하고 다양한 용량으로 제조할 수 있으며 연료로 수소,
석탄가스, 천연가스, 매립지가스, 바이오가스, 메탄올, 석유 사용 가능

□ 이용단계: 연료전지 용도별 구분은 가정용, 발전용, 운송용

○ 우리나라는 발전용 연료전지, 일본은 가정용 연료전지 중심으로 발전.
수소경제 로드맵상 가정용 연료전지 수소 수요는 2030년까지 15만 톤

- 신재생에너지 의무사용비중 요구 정책이 연료전지 보급에 영향
- 2030년까지 약 2만 가구분의 건물용 연료전지가 보급되어 연간 약 15만 톤
수소 소비 예상, 2050년 약 350만 톤

○ 연료전지발전소 수소 수요는 2030년 약 120만 톤, 2050년 약 260만 톤

- 2017년 기준 연료전지 발전소는 현장에서 천연가스를 개질한 수소를 활용하고
있으며 설비용량 약 300MW

○ 운송용 연료전지 수소 수요는 2030년 약 70만 톤, 2050년 약 540만 톤

- 소형운송차량은 배터리-모터 조합이, 대형운송차량은 수소/연료전지-모터가 유리
- 수소 연료전지 파워트레인인 트럭, 버스, 상업용 차량 등 에너지 소비가 많고
이용률 높은 장거리 고하중 차량, 드론, 경량 비행체, 철도, 선박에 적용

¹⁰ "한국수소산업로드맵"에서 한국 수소 총수요는 2015년 240만 톤, 2020년 290만 톤, 2030년 490만
톤, 2040년 880만 톤, 2050년 1,690만 톤으로 전망

¹¹ 공급하는 연료물질에 따라 수소연료전지, 메탄올연료전지 등이 있음

□ 수소 수요 관련 주요 이슈는 수요 확대를 위해 소비자에게 제공하는 가치와 관련되어 발생

○ 경쟁 에너지원 대비 가격경쟁력 열세로 보조금 없이는 수요 확보 곤란

- 경쟁력 있는 수소가격 유지, 수소차와 관련 인프라 확산 위해 보조금 지급
- 향후 보조금 지원 없이 운영되는 수소경제의 빠른 실현이 중요

○ 소비자가 직면하는 인프라 부족

- 소비자가 인식하는 인프라는 수소전기차 관련 충전소(거리, 충전시간)
- 수소 파이프라인도 울산지역 외에는 거의 부재
- 가정용 연료전지는 거의 보급되어 있지 않은 상황이며 신재생에너지 공급의무화 제도¹² 도입으로 연료전지발전 시장 확대 예상

○ 연료전지 성능(효율성, 내구성, 경제성) 미흡

- 촉매 백금 가격이 1kg당 1억원 이상이며 연료전지는 사용할수록 성능이 급격히 저하되어 연료전지 내구성 장수명화 기술 개발 필요¹³
- 연료전지와 수소자동차의 상용화를 위해 가격과 성능 문제를 모두 해결할 수 있는 비(非)귀금속 촉매 개발 중¹⁴

○ 연료전지 발전소는 친환경 분산전원으로 도심 좁은 부지에 설치 가능하지만 경제성은 낮음

- 높은 발전단가(1kwh)¹⁵ 연료전지 250원, 태양광 120원, 풍력 90원(2018년)
- 높은 발전소건설비용 30MW 연료전지발전소 건설에 5,250억 원 투자가 필요한데 이 투자액으로 약 450MW 규모 복합 화력 발전소 건설 가능
- 높은 유지관리비, 짧은 Stack 수명

¹² 공공건물 신재생에너지 공급 의무 비율 확대 2015년 15%, 2030년 30%

¹³ 현대차 넥소는 내연기관 자동차와 유사한 수준인 10년, 16만km 보증

¹⁴ 국내 연구진이 백금 0.0015원어치로 수소 연료전지 성능을 21배 높일 수 있는 기술개발(국제 학술지 '네이처 나노테크놀로지' 2019년 2월 18일자 온라인판 게재, 3월호 표지로 선정)

¹⁵ 발전단가를 낮추기 위해 원가 50% 이상을 차지하는 LNG 가격에 연료전지 전용 LNG 요금제를 적용하는 방안과 LNG 대신 부생수소를 연료로 하는 발전소 건설 등 다양하게 노력 중

4. 종합

□ 수소경제를 뛰어넘어 수소사회로 진화할 것인가 혹은 2000년대 초 전철을 답습할 것인가에 대한 의견이 분분

- 수소경제는 2000년대 초 한 차례 전 세계적으로 반향을 얻었으나 이후 기술력 부족과 경제성 확보 등의 문제로 열기가 식었다가 최근 재점화
 - 낙관론의 근거는 화석연료 고갈, 환경문제 대두, 기술(해결)의 발전, 대용량 장기 저장이 가능해짐에 따라 에너지 공급 안정성 문제 해결(수소에너지와 재생에너지 간 협업)
 - 회의론의 근거는 에너지 변환에 따른 손실(열역학에 기반), 안전성 위협, 인프라 확충을 위한 대규모 투자(지원에 대한 사회적 합의 필요) 필요
- 수소경제의 확산에는 청정수소 생산량 확대와 생산비용 감축, 수소 공급에 활용할 재생에너지 확대, 유통 인프라 확충, 수소전기차 가격 인하 등이 선결조건
 - 특히 우리나라는 Downstream 중심으로 발전하여 부족한 Upstream 부분(생산, 저장, 운송, 충전) 강화 필요

이 자료에 나타난 내용은 포스코경영연구원의 공식 견해와는 다를 수 있습니다.

[참고자료]

[보고서/논문]

수소경제 활성화를 위한 전략 토론회, 2019.2.19

에너지경제연구원, “수소연료전지 자동차(FCEV) 충전용 수소 시장조성을 위한 정책연구”, 2018.3

수소융합얼라이언스추진단, 『한국수소산업로드맵: 한국의 미래 수소경제 비전과 이를 달성하기 위한 로드맵 및 제언』, 2018.12.12

IEA, “Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells”, 2015

IEA, “World Energy Outlook 2018(Executive Summary)”, 2018

POSRI, “수소경제 시대에 대비한 선진국과 글로벌 철강사의 대응 방향”, 2018.4

STEPI, “수소경제의 이슈화 배경과 의미”, 과학기술정책, 15권, 4호, pp.75-90, 2005

[홈페이지]

대한석유협회(www.petroleum.or.kr)

산업통상자원부(www.motie.go.kr)

수소융합얼라이언스추진단(www.h2korea.or.kr)

월간수소경제(www.h2news.kr)

에너지경제연구원(www.keei.re.kr)

International Energy Agency(www.iea.org)

[언론]

월간수소경제, “수소전기차 보급 확산, 결국 ‘수소 가격’이 좌우”, 2018.7

월간수소경제, “수소경제 본격화되나……물꼬 틀 사업 줄줄이 ‘예약’”, 2019.3