

수소경제가 온다

- 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망 -

Korea Energy Economics Institute

에너지경제연구원 편저



에너지경제연구원

수소경제가 온다

- 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망 -

K o r e a E n e r g y E c o n o m i c s I n s t i t u t e



에너지경제연구원 편저



에너지경제연구원

발 간 사

우리나라 수소경제 추진에 일익을 담당하고 있다고 자부하는 저희 에너지경제연구원에서 이번에 수소경제 입문서라고 할 수 있는 『수소경제가 온다』를 펴내게 된 것을 매우 기쁘게 생각합니다.

반기문 전 UN사무총장께서 역설하셨던 바와 같이 기후변화가 지금 인류가 마주한 최대의 도전이라는 데에 대부분의 사람들이 동의하고 있습니다. 기후변화가 기후위기로 불릴 만큼 악화되는 것을 목격하면서 지금까지의 삶의 방식을 바꾸어 우리와 우리의 후손을 위한 지속가능한 사회를 만들어야 한다는 목소리가 날로 커지고 있습니다. 화석연료에 대한 의존을 줄이고 친환경에너지로 우리가 쌓아올린 문명을 유지해야 하는 미래에는 우리의 에너지시스템도 지금과는 다른 모습으로 진화해 있을 것이고 그 한 축을 맡는 것이 청정에너지로 생산된 수소일 것이라는 점에는 이견이 없다고 생각합니다.

과거에도 수소가 각광을 받았다가 경제적, 기술적 이유로 조용히 묻힌 적이 있기 때문에 수소경제의 실현 가능성에 대해 다소 회의적인 시각도 여전히 존재하는 것으로 알고 있습니다. 그러나 우리나라를 비롯한 세계 주요국이 이전에 비해 훨씬 큰 규모로 수소경제 추진 정책을 발표하였고, 최근에는 코로나 확산으로 위축된 경제를 활성화하기 위하여 수소경제 관련 분야에 재정을 적극 투입할 예정입니다. 민간 투자도 이에 보조를 맞추고 있는데 대표적으로 현대, 토요타, 혼다, BMW 등 국내외 주요 완성차 업체들은 막대한 투자를 통해 이미 수소전기차를 양산하고 있거나 개발 중에 있습니다. 이러한 움직임은 기후변화 대응에 있어 수소의

역할이 필요하다는 인식과 더불어 수소 활용의 비용경쟁력과 편의성을 크게 높인 기술 발전이 있었기에 가능한 것입니다. 정부와 민간의 투자가 시너지를 내기 시작하면서 수소경제는 이제 거스를 수 없는 대세가 되고 있습니다.

우리나라는 작년 1월에 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표한 이후 올해 초의 이른바 ‘수소경제법’ 제정에 이르기까지 수소경제 실현을 위한 지원책과 제도적 기반을 착실히 준비해 오고 있습니다. 실생활에서는 올해 6월말 기준으로 이미 7천대가 넘는 수소전기차가 도로를 누비고 있고, 국회를 포함, 40여곳에 설치된 수소 충전소가 수소경제의 도래를 알리고 있습니다. 이처럼 우리나라가 세계적인 수소경제 선도국으로 부상하고 있는 시점에서 수소경제의 진면목과 다른 나라들의 움직임을 에너지 업계를 넘어 일반 대중에게도 바로 알리는 것이 수소경제의 모멘텀 확보에 있어 중요하다고 하겠습니다.

이 책에서는 수소경제의 기본이 되는 내용을 가급적 알기 쉽게 풀어 쓰고 주요국의 수소경제 추진 관련 최신 동향을 담기 위해 노력하였습니다. 그에 더하여 저희 연구원에서 수행한 연구에서 국내외 현황 파악에 도움이 되는 내용도 분야별로 발췌하여 실었습니다. 모쪼록 이번 『수소경제가 온다』의 발간이 우리 수소경제가 올바른 방향으로 가속해 가는 데에 작으나마 추진력을 보태기를 고대합니다.

2020년 8월

에너지경제연구원장 **조용성**

추천사

안녕하십니까.

수소융합얼라이언스(H2KOREA) 문재도 회장입니다.

국가 에너지정책 연구기관으로서 에너지 싱크탱크의 역할을 다하고 계시는 에너지경제연구원에서 우리나라 수소경제 발전(發展)을 위하여 『수소경제가 온다』 책자를 발간해 주심에 먼저 축하와 함께 감사의 말씀을 드립니다.

전 세계는 최근 기후변화, 미세먼지 등 환경문제와 에너지 고갈 문제 해결을 위하여 탈탄소경제로의 전환을 준비하며, 미래 청정에너지인 수소에 큰 관심을 갖기 시작했습니다. 미국, 일본, 중국, 유럽, 호주 등 수소 주요국은 앞 다투어 수소 로드맵을 발표하고 수소 관련 비전과 정책을 수립해 이행하고 있으며, 우리 정부도 글로벌 시장 선도를 위하여 2019년 1월 수소경제 활성화 로드맵을 발표하고 올해 초 수소경제법 제정 등 후속 조치를 체계적으로 추진해 오고 있습니다.

특히 2050년 2조5,000억 달러 규모로 성장할 것이 예상되는 세계 수소 시장 선점을 위하여 해외 주요국들은 기술개발과 기업 육성 등 정책 지원에 적극적으로 나서고 있습니다. 또, 자국이 보유한 기술 및 자원의 강점은 살리고 부족한 부분은 보완하기 위한 국제 협력에도 집중하고 있습니다.

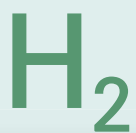
지금만 세계 주요국이 수소경제 이행을 위하여 치열한 협력과 경쟁을 동시에 벌이고 있는 중요한 시기입니다. 이 시점에서 수소 주요국의 정책

현황과 추진 방향을 판단할 수 있는 『수소경제가 온다』라는, 우리에게
유익한 참고 자료의 발간은 매우 반가운 소식이라 생각합니다. 이 책은
우리가 국제사회를 향하여 수소산업 진출 및 확대 전략을 만들고, 정책
방향을 수립하면서, 대상 국가들과 맞춤형 국제협력 방안을 도출하는데 큰
도움이 될 것으로 기대합니다. 또한, 국내 수소경제의 현황과 과제를
제시했다는 점에서, 향후 우리가 나아갈 수소경제 이행의 기초 자료로
활용될 것입니다.

다시 한번 『수소경제가 온다』 발간을 축하드리며, H2KOREA는
에너지경제연구원과 수소경제 발전을 위해 협력을 더욱 강화해 나갈
것입니다. 앞으로도 에너지경제연구원이 대한민국 수소경제 발전을 위해 큰
역할을 해주시길 바랍니다.

감사합니다.

H2KOREA 회장 **문재도**



h₂

수소경제가 온다 : 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망



Contents

수소경제의 시대 1

- 수소에너지의 기초 3
- 수소경제와 에너지 전환 19
- 수소경제 활성화 로드맵 33

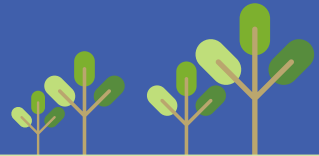
주요국의 수소경제 현황 49

- 미국: 깨어나는 거대한 잠재력 52
- 일본: 기민한 선두주자 61
- 중국: 수소굴기를 위한 전방위적 노력 67
- 유럽(EU): 수소 = 환경 + 경제 73
- 독일: 그린수소로의 도약 79
- 호주: 화석에너지 수출에서 수소에너지 수출로 87
- 국제 협의체 동향 93

국내 수소경제의 현주소와 과제 101

- 수소 생산 103
- 국내 유통 및 수송 115
- 수소 모빌리티 127
- 연료전지 137
- 수소 관련 국제협력 147

- 주석 160
- 표·그림 출처 169
- 사진 출처 171
- 용어집 173
- 약어집 176



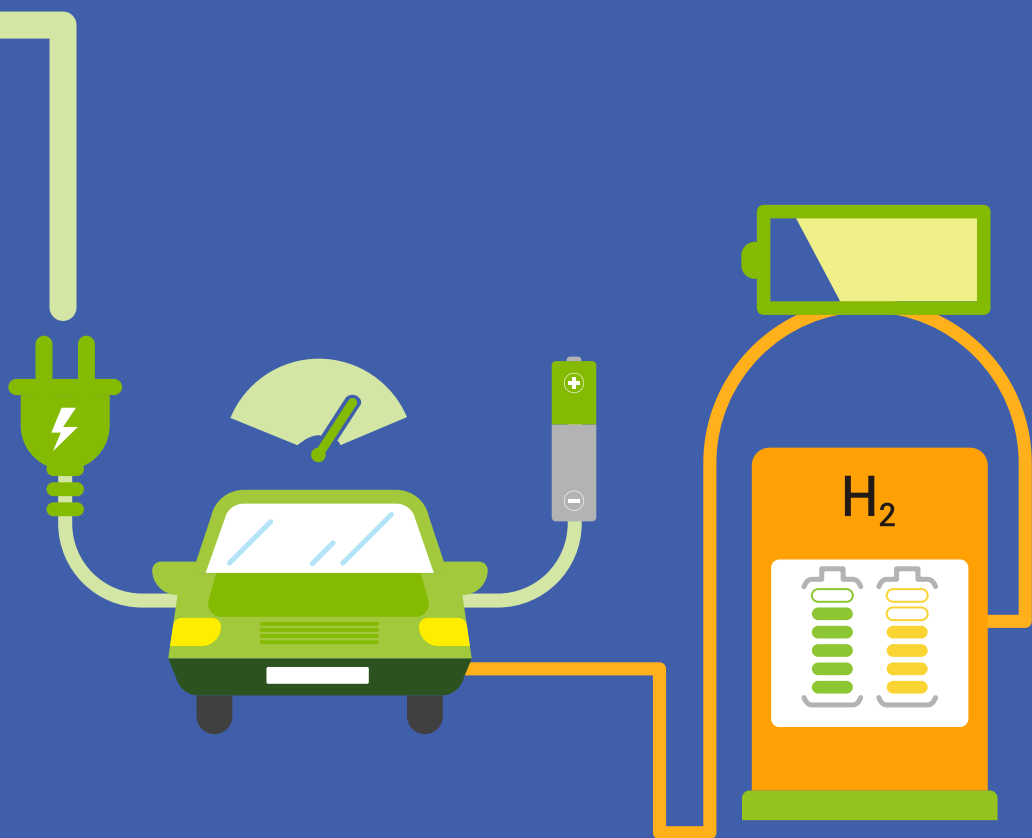
수소경제가 온다

: 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망

- ① 수소에너지의 기초
- ② 수소경제와 에너지 전환
- ③ 수소경제 활성화 로드맵

I

수소경제의 시대



수소에너지의 기초

■ 수소의 특성

• 수소의 물성

수소(hydrogen)는 주기율표에서 원자 번호가 1인 첫 번째 원소이며 원소 기호는 H이다. 우주에서는 질량 기준으로 약 75%, 원자 개수로 는 90%를 차지하는 가장 풍부한 원소이기도 하다. 수소는 가장 가벼운 원소여서 지구 대기권에는 극소량이 존재하고, 지각권에서는 대부분 물 분자나 석유, 가스 등 탄화수소, 생명체의 구성 물질 등과 같은 유기화합물 상태로 존재하며, 지구 표면에서는 산소와 규소에 이어 세 번째로 많은 원소이다.

수소의 주요 동위원소로는 지구에서 발견되는 수소의 99.98%를 차지하는 프로튬(protium, ^1H) 외에, 중수소(deuterium, ^2H 또는 D)와 삼중수소(tritium, ^3H 또는 T)가 있다. 프로튬의 핵은 양성자 1개로 이루어져 있고 중수소의 핵은 양성자 1개와 중성자 1개, 삼중수소의 핵은 양성자 1개와 중성자 2개로 구성되어 있다. 중수소가 많이 포함된 물을 중수(D_2O : Deuterium Oxide)라고 부르며 핵 반응로에서 중성자 감속재와 냉각재로 사용된다. 프로튬과 중수소는 안정된 동위원소이나 삼중수소는 불안정한 핵 구조를 가지는 방사성 동위원소이다. 삼중수소는

중수소와 높은 온도와 압력 하에서 핵융합을 일으켜 중성자와 헬륨으로 변하며, 이 과정에서 발생하는 질량손실이 에너지로 변환되는데, 이때 발생하는 에너지 양이 매우 커서 미래의 에너지원으로 주목받고 있기도 하다.

우리가 말하는 이른바 “수소에너지”의 수소는 원자가 아닌 수소 분자를 일컫는다. 수소 분자(이하에서 “수소”는 수소 분자를 지칭)는 수소 원자 2개가 결합하여 이루어진 물질로서 통상적인 환경에서 무색·무미·무취의 기체로 존재한다. 수소의 끓는점은 영하 253°C로 매우 낮으며 이때의 액체수소는 극저온 유체로서 부피 기준으로 기체 수소의 1/800 수준이기 때문에 수송 효율성이 높다. 액체 상태의 수소가 피부에 직접 접촉하면 동상에 걸릴 수 있으나 일반인이 직접 접촉하게 되는

연료가스의 물리적·화학적 특성

특성	LPG	천연가스	수소
분자식	C_3H_8/C_4H_{10}	CH_4	H_2
분자량(g/mol)	44g/58g	16g	2g
상대비중(공기=1)	1.5~2	0.55	0.0689
폭발(연소) 범위	1.8~9.5%	5~15%	4~75%
끓는점	-42.1°C/-0.5°C	-162°C	-252.6°C
누출 시 특성	체류	위로 확산	위로 확산(大)
폭발 위험도	높음	조금 낮음	낮음

자료: 수소융합얼라이언스추진단(2020)

경우는 매우 드물다. 또한 수소는 공기와 혼합되었을 때 폭발과 함께 화재를 동반할 수 있다. 그러나 수소는 공기보다 14배 가벼운 기체이기 때문에 공기 중에 누출 시 매우 빠르게 확산되며, 점화 온도(약 500°C)가 높아 자연 발화 사례가 극히 드물다.

• 에너지 운반체로서의 특성

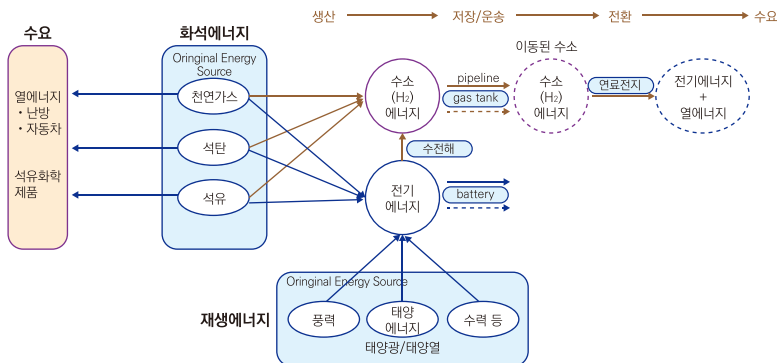
비록 수소가 우주에서 가장 풍부한 원소이나 우리가 자연에서 직접 추출하여 에너지원으로 활용하기에 용이한 형태로 부존되어 있지는 않다. 대신에 다양한 에너지원(화석연료, 재생에너지)과 기술(열화학적 변환, 전기화학적 변환, 생물학적 변환)을 적용하여 생산할 수 있고 수송용, 가정용, 발전용, 산업용 등 여러 용도에 활용할 수 있기 때문에 에너지 운반체(energy carrier)¹로서 저장, 운반이 가능한 수소의 활용성은 결코 작지 않다. 특히 저장하기 쉽다는 것은 우리가 가장 흔히 사용하는 에너지 운반체인 전기와 비교하였을 때 수소가 갖는 매우 큰 장점이다. 게다가 수소의 원료인 물은 지구상에 풍부하게 존재하고 수소를 연소시키거나 산소와 반응시켜도 극소량의 질소와 물만 생성되어 환경오염을 일으키지 않는다. 이러한 장점 때문에 수소에너지는 기존의 화석연료를 대체하는 미래의 청정 에너지 중 하나로 주목받고 있다.

수소에너지는 직접 연소, 수소저장합금에 의한 2차 전지, 수소화

반응에 의한 히트펌프 등을 통하여 이용될 수 있으나 현재 가장 일반적인 것은 수소전기차(FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle), 발전설비 등에 탑재되는 연료전지(fuel cell)이다. 수소 연료전지는 수소 연료와 산화제인 산소를 전기화학적으로 반응시켜 전기 에너지를 생산하는 장치로, 물을 전기분해하여 수소와 산소를 만드는 과정의 역반응을 통해 전기와 열을 생산한다. 연료가 공급되는 한 재충전 없이 계속해서 전기를 생산할 수 있고 소음이 적으며, 발전 과정에서 발생하는 열은 급탕 및 난방용으로 이용한다. 연료전지는 열에너지를 전기 에너지로 변환하는 보통의 발전 방식에 비해 간단하며 효율적이지만 활용에 있어 연료인 수소의 제어가 상대적으로 어렵고 다른 발전연료에 비해 보관비용이 높다.

연료전지와 달리 수소를 직접 태워서 에너지를 얻는 것도 당연히 가능하다. 멀게는 1956년에 로켓 연료로 액체 수소를 사용하기 위한 연구가 이미 시작되어 아폴로 우주선의 로켓 연료로 실용화되었다. 자동차에서도 현재 생산되는 수소전기차와 달리 직접 수소를 내연기관에서 직접 연소시키는 방식이 시도된 적이 있다. 2005년부터 100대만 한정 생산된 BMW의 'Hydrogen' 7이 바로 그것인데 실제 출시되지는 못했다. 현재 수소 연소 기술은 발전, 산업용 연료 측면에서 주로 연구되고 있다.

수소에너지의 위치



자료: 정기대(2019)

■ 생산, 저장·운송, 이용

• 수소의 생산

대표적인 수소 생산방식으로는 ‘화석연료 개질(reforming)’, ‘부생 수소(공정수소) 활용’, ‘수전해(water electrolysis)’ 등이 있다.² 화석연료 개질은 석탄이나 천연가스를 고온·고압에서 수증기와 반응시켜 수소(추출수소)를 생산하는 방식이다. 현재 전 세계 수소의 절반 이상이 이렇게 생산되고 있는데 생산비가 저렴하고 대량생산이 가능하나 생산 과정에서 이산화탄소가 다량 발생하는 단점이 있다.³ 우리나라는 적은 온실가스 발생량⁴, 입지 선정의 용이성 등을 고려하여 추출수소 원료로

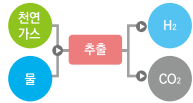
사실 상 천연가스만을 상정하고 있다.

‘부생수소 활용’ 방식은 석유화학, 제철 공정, 가성소다 생산 공정 등에서 나오는 수소 혼합가스에서 수소를 분리해 활용하는 방식으로 우리나라에서 활용되는 수소의 대부분은 부생수소이다. 부생수소는 공정의 부산물로서 생산비가 저렴하나 화석연료에서 유래한 원료로 생산되는 경우가 많다는 점과 이미 발생된 수소 대부분이 다른 공정에 원료로 투입되고 있어 다른 용도로 판매될 수 있는 양이 적다는 한계를 지닌다.

‘수전해’는 전기를 이용해 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 방

식으로, 재생에너지로 만든 전기를 쓴다면 생산단계에서 온실가스가 전혀 배출되지 않는 장점이 있으나 아직은 높은 생산비용 때문에 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 이용하는 전기를 생산함에 있어 화석연료의 비중이 높다면 수소 생산의 간접적 온실가스 배출도 그만큼 높게 나타난다.

수소 생산방식별 원리 및 특징

구분	추출(개질)	부생수소	수전해
원리			
특징	- 기존 에너지 활용 가능 - CO₂ 발생	- 현재 가장 저렴한 방법 - 분리·정제로 생산	- 탄소 제로 수소 생산 방법 - 현재는 고비용

자료: 수소융합얼라이언스추진단(2020)

국내에서는 수소 생산 기술 연구가 최근 들어 활발해지고 있으나 핵심 원천기술 확보와 상용화 실증에 있어 여전히 세계 최고 수준과 격차가 있다. 천연가스 추출수소 생산의 국내 기술력은 초기 단계의 소형 추출기 생산 정도의 수준이며 생산과정에서 발생하는 이산화탄소를 포집·저장(CCS: Carbon Capture and Storage)하는 기술에 대한 연구도 아직 실증단계에 머무르고 있다. 수전해 기술의 경우 재생에너지 발전

설비와 수전해 설비를 직접 결합하는 방식은 국내 연구가 아직 상용화 단계에 이르지 못하고 있다. 장기적으로 이러한 재생에너지 연계 대규모 수전해 방식(P2G: Power to Gas)이 중요해질 것으로 보이나 국내 기업의 기술경쟁력은 선진국의 60~70% 수준에 불과한 것으로 알려져 있다.⁵

최근에 수소가 각광받는 이유가 화석연료 대체를 통한 온실가스 배출 감소 효과 때문이므로 생산 과정에서의 온실가스 배출 수준에 따라 수소를 구분하는 경우가 늘고 있다. 만약 화석연료 등을 원료로 사용함으로써 수소 생산 시 다량 발생하는 온실가스를 지금과 같이 그대로 대기중에 배출한다면 그레이(gray) 수소라고 불린다. 그레이 수소의 대척점에는 재생에너지 위주의 전기⁶로 물을 전기분해하여 생산되는 그린(green) 수소가 존재한다. 그린 수소 중심의 수소경제가 우리가 추구하는 궁극적인 목표이나 이를 위해 화석에너지를 전력 생산에서 완전히 퇴출시키기까지는 상당한 시간이 소요될 것이다. 따라서 당분간은 수소 수요의 대부분을 화석연료나 바이오매스로 생산한 추출수소로 충당하되 배출되는 CCS 설비를 갖추는 방식이 대안으로 제시되고 있다. 이렇게 생산된 수소는 블루(blue) 수소라고 불리며 그린 수소로 이행해 가는 과정에서 중요한 역할을 하게 될 것이다.

• 수소의 저장 및 운송⁷⁾

수소의 운송은 크게 기체 운송과 액체 운송으로 나눌 수 있고, 기체 운송에는 튜브트레일러 운송과 배관 운송이 있으며, 액체 운송은 다시 액화 운송과 액상 운송으로 나누어진다. 아직은 대량의 수소를 필요로 하지 않는 국내에서의 수소 운송은 근거리에는 저압배관 방식, 중·장거리에는 고압 튜브트레일러로 운송하는 방법이 주로 이용되고 있다.

수소 운송 방식

운송 상태	운송 방식	적합한 운송 조건
기체 운송	배관	• 소규모, 단거리 수요처에 연속 공급할 경우 • 대규모, 장거리 수요처에 연속 공급할 경우
	튜브 트레일러	• 중·소 규모, 중·장거리 수요처에 간헐적으로 공급할 경우
액체 운송	액화 탱크로리	• 액화 제조 및 저장 시설과 연계될 경우 • 중·대 규모, 중·장거리 수요처에 공급할 경우 • 액화 시 소요되는 전력에 의한 온실가스 배출량 증가에 대한 고려 필요
	액상 탱크로리	• 액상물질(암모니아, 액상유기화합물 등) 제조시설과 연계될 경우 • 중·대 규모, 중·장거리 수요처에 공급할 경우

자료: 유영돈(2019)

수소는 고압 기체 수소, 액체 수소, 화학적 저장, 수소저장합금 등 다양한 방식으로 저장이 가능한데 이는 운송 방법과 밀접하게 연관되어 있다. 현재 가장 보편적인 저장 방법은 고압의 기체 상태로 저장하는

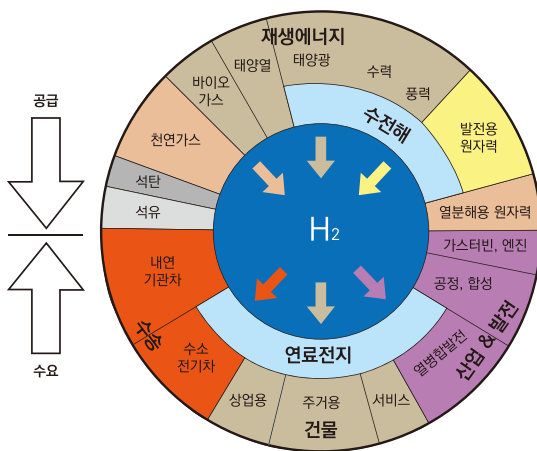
것으로서 높은 압력을 견딜 수 있는 저장용기에 보관된다. 그러나 이러한 방식은 원거리 대량 운송, 특히 해외 생산 수소를 선박을 통해 운송하는 경우 적절치 않으므로 다른 저장 방식들이 시도되고 있다.

액화수소는 수소를 극저온(대기압 기준 영하 253℃ 이하)에서 액체로 만들어 부피를 기체 수소의 약 1/800까지 줄인 것이다. 이렇게 되면 동일 압력에서 기체 수소 대비 800배의 체적에너지 밀도를 갖게 되므로 저장과 운송에 매우 유리하다. 또한 액화 수소는 대기압에서 저장이 가능하고 고압 기체 수소에 비해 폭발 위험성이 낮으며, 다른 공정이 필요 없이 단순 기화만으로 즉시 활용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 액화 과정에서 다량의 에너지가 소비된다는 문제점도 고려되어야 한다.

한편 재료를 기반으로 하는 화학적 수소저장도 실용적 대안으로 떠오르고 있다. 액상저장·운송의 경우 화합물을 사용하여 수소를 저장하고, 상온·상압에서 운송 후, 필요시 저장된 수소를 추출하여 사용하는 방식이다. 대표적인 액상 수소저장 관련 화합물은 암모니아⁸, 메틸사이클로헥세인(MCH: Methylcyclohexane)⁹으로 대표되는 액상 유기 수소 운반체(LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier)¹⁰가 있다. 이 방식에서는 운반된 수소를 사용하기 위해 화합물에서 분리할 때의 화학 반응에 있어 많은 에너지를 필요로 한다.

수소저장합금은 수소를 잘 흡수하는 금속에 냉각과 가압으로 수소를 흡수시켜 만든 금속수소화합물을 말하며, 가열과 감압을 하면 수소를 방출하여 원래의 상태로 복원하는 성질을 갖고 있다. 수소저장합금을 사용하면 가스 상태 저장보다 부피가 1/3~1/5로 줄어들고 폭발의 위험 없이 고순도 높은 수소를 얻을 수 있다. 그러나 합금 자체가 비싸고 합금이 열화되어 저장 횟수에 제한도 있다.

수소의 생산방식과 이용 분야



자료: 유석현(2019)

• 수소의 이용¹¹

수소의 용도는 매우 다양하다. 수소는 암모니아, 염산, 메탄올 등의 합성에 대량으로 사용되며, 정유공장의 증질유 분해시설 및 탈황시설에도 투입된다. 그 외에도 기름(지방)의 경화, 액체연료의 제조, 금속의 절단 및 용접, 백금, 석영의 세공 등 다양한 용도가 있다. 또한 액체 수소는 끓는점이 아주 낮기 때문에 냉각재로 사용되기도 한다.

그러나 최근에 논의되고 있는 수소의 이용 분야는 수송, 발전, 산업 등 훨씬 넓은 범위에서 다양한 방식을 포괄하고 있다. 수송 부문은 수소의 활용 잠재력이 가장 큰 분야로서 수소경제의 성공 여부는 수소 차에 달려 있다고 해도 과언이 아니다. 주택이나 상업용 건물에 필요한 열과 전기는 가정용·건물용 연료전지를 통해 공급 가능하지만, 부생수소 생산 인근지역이나 천연가스 공급망이 있는 지역에서는 기존 인프라 활용 시 그레이 수소의 경제성이 높기 때문에 천연가스 개질 수소와 부생수소 등 그레이 수소가 주로 사용된다. 발전부문에서 수소는 산업이나 가정에 필요한 전기와 열을 동시에 생산할 수 있다는 점이 주목되고 있다.

수소는 연료전지를 통한 분산형 발전과 열병합 발전, 기존의 천연가스 연료를 수소로 대체한 수소 가스터빈 및 수소엔진 발전, 재생에너지의 잉여전력을 장기간 보존하여 재생에너지의 간헐성과 경직성을 보

완하는 에너지 저장장치(ESS: Energy Storage System)의 일종으로 활용된다.

■ 수소의 안전성¹²

• 수소의 폭발 가능성

2019년 5월 강릉에서 일어난 수소탱크 폭발 사고와 6월 노르웨이에서 발생한 수소 충전소 화재 사고로 인해 수소의 안전성에 대한 우려가 커졌고, 대표적인 수소 인프라인 수소 충전소, 연료전지 발전소 건설을 둘러싼 주민 여론에도 부정적인 영향을 미쳤다. 이와 같이 수소의 안전성에 대한 우려와 주민 수용성의 문제는 수소에너지의 미래에 커다란 제약요인으로 작용하고 있다.

과학적으로 ‘폭발(explosion)’은 물리적 폭발과 화학적 폭발로 구분된다. 물리적 폭발은 고압에 의한 저장용기 균열 등에서 발생하는데, 수소차의 수소저장용기는 철보다 10배 강한 탄소섬유 강화 플라스틱으로 제조되어 파열, 화염, 충격, 낙하 등 17개 안전성 시험에서 안전성이 입증되었다.

화학적 폭발은 연소 반응에 의한 폭발로 누출·가스 구름·발화원의 3요소가 충족되었을 경우 발생하는데, 수소는 가장 가벼운 기체로 누출 시

빠르게 확산되어 가스 구름이 생성되기 어렵고, 공기 중에 쉽게 희석되어 폭발 조건을 충족시키기가 어렵다.

한국산업안전공단의 물질안전보건자료(MSDS: Material Safety Data Sheet)와 미국화학공학회 물성 데이터베이스 자료(DIPPR: Design Institute for Physical PROPERTIES)에 따르면 자연발화온도, 연료 독성, 불꽃 온도, 연소 속도 등을 종합한 수소의 상대적 위험도를 1.00로 볼 때 도시가스는 1.03, LPG는 1.22, 가솔린은 1.44로 수소를 보다 안전한 에너지로 평가하고 있다.

연료별 상대적 위험도

주요 평가요소	가솔린	LPG (프로판)	도시가스 (메탄)	수소
자연 발화온도	4	3	2	1
연료 독성	4	3	2	1
불꽃 온도	4	2	1	3
연소 속도	1	2	3	4
상대적 위험도(수소=1)	1.44	1.22	1.03	1.00

자료: 관계부처 합동(2019a)

한편 수소가 수소폭탄처럼 폭발할지 모른다고 우려하는 경우도 있는데, 수소의 핵융합반응은 수소의 동위원소인 중수소와 삼중수소를 필요로 하며 또한 기폭을 위해서는 1억℃의 온도와 수천 기압의 압력이

필요하므로 전혀 우려의 대상이 아니다.

• 수소차 및 수소 충전소의 안전성

모든 내연기관 자동차에 연료탱크가 탑재되어 있듯이 수소차에도 고압의 수소를 실은 수소탱크가 탑재된다. 차량용 수소탱크는 고온, 고압 등 극한환경과 실제 사고 충격에도 안전성을 유지하도록 제작된다. 그럼에도 만의 하나 있을 수 있는 폭발 가능성을 없애기 위하여 긴급 시 수소 공급차단 및 대기방출 장치 등 다양한 안전장치가 설치되어 있으며, 수소차는 각국 국가 공인 인증기관의 안전성 평가를 거쳐 출시된다.

수소 충전소는 2020년 5월 기준 국내에만 39개소, 해외에는 수백 개소가 설치·운영 중인데 현재까지 폭발 사고는 일어나지 않았다.¹³ 우리나라도 수소 충전소의 안전을 위해, 선진국과 동일하게 국제표준기구 (ISO: International Organization for Standardization) 국제기준을 충족하고 안전검사를 통과한 부품의 사용, 충전소 건설 전·후에 한국가스안전공사의 안전검사 실시, 방폭 및 안전 구조물 설치, 안전관리자 상주 등의 안전 조치가 마련되어 있다. 아울러 수소 충전소에는 압력 이상 발생 시 긴급차단장치, 가스 누출 감지 센서·경보장치 등 이중·삼중의 안전장치를 설치하여 안전을 확보하고 있다.

H₂ 수소경제와 에너지 전환

■ 수소경제의 의미

‘수소경제(Hydrogen Economy)’란, 수소를 중요한 에너지원으로 사용하고, 수소가 국가 경제·사회 전반 및 국민생활에 근본적인 변화를 초래하여 경제성장과 친환경 에너지의 원천이 되는 경제 시스템을 말한다. 수소경제가 실현된다면, 새로운 성장동력으로서 미래 경제의 핵심이자 친환경 에너지 혁명의 주역으로 자리매김할 것이다.¹⁴

‘수소경제’라는 용어는 텍사스A&M대학 존 보크리스(John Bockris) 교수가 1970년 처음 사용하였는데, 그는 ‘수소가 석유를 대체하여 에너지 수요를 충족시키는 에너지시스템 및 경제’로서의 수소경제의 도래를 예언하였다. 이후 미래학자이자 펜실베이니아대학교 교수인 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin)이 2002년 그의 저서 “The Hydrogen Economy”에서 석유 중심 경제체제(탄소경제)가 수소를 중심으로 한 경제체제(수소경제)로 전환된다는 의미로 ‘수소경제(사회)’를 주창하면서 수소경제가 널리 알려지기 시작하였다. 그는 수소경제로의 전환을 의미하는 ‘수소혁명’으로 수소가 인간 문명을 재구성하고 세계경제와 권력구조를 재편하는 새로운 에너지 체계로 부상하게 될 것이라고 예견하였다.

미국 공학한림원(The US National Academy of Engineering)은 2004년 “수소경제란 석탄, 천연가스, 원자력, 신재생에너지를 이용하여 수소를 생산하고, 생산된 수소를 운반·저장하는 인프라를 구축하며, 수소를 직접 연소하거나 연료전지를 이용하여 전력을 생산하여 최종적으로 소비하는 에너지수급시스템에 기반한 경제”라고 좀 더 구체적으로 정의하였다.¹⁵⁾

한 국가의 에너지정책으로 수소경제가 처음 채택된 것은 2003년 1월 미국 부시 대통령이 연두교서에서 발표한 수소연료 이니셔티브(Hydrogen Fuel Initiative)였다. 이에 따르면 자동차 산업의 경쟁력 회복, 에너지 자립도 제고, 지구온난화 대응을 위해 5년간 수소 연료전지 및 수소차 개발과 수소 인프라 구축을 위해 12억 달러를 투자할 계획이었다. 그러나 수소에너지 활용 기술력 부족과 경제성 확보의 어려움과 함께 전기자동차의 발전, 타이트오일, 셰일가스 등 비전통 석유·가스 자원 개발 등의 외적 요인으로 인하여 수소경제의 열기는 점차 식었고, 2009년 오바마 행정부에서 사실상 폐기되었다. 오바마 정부의 에너지 부장관이던 스티븐 추(Steven Chu)는 수소의 대량 생산은 천연가스의 개질에 의해서만 가능하기 때문에 친환경적이지 않고, 수소의 운송 효율이 떨어지며, 수소연료전지의 경제성이 아직 충분하지 않다는 점 등을 들어 수소 사회와 수소자동차는 가까운 미래에 실현 불가능하다고도 언급하였다.

이처럼 잠시 주목을 받았다가 이내 잊혀진 듯했던 수소경제 개념은 10여년 만에 다시 세계적으로 주목받고 있다. 전자동차의 시장 점유율이 해마다 높아지고 비전통 석유·가스의 생산이 날로 늘어나고 있음에도 수소경제가 다시 주목받게 된 이유는 온실가스를 줄여 기후변화를 늦춰야 한다는 요구가 2015년 파리협정 이후 국제 에너지 시장의 가장 중요한 화두로 떠올랐기 때문이다. 온실가스 감축의 가장 중요한 수단인 재생 에너지, 특히 풍력과 태양광의 활용에 있어 이들의 간헐성(intermittency)을 잘 관리해야 에너지 생산 비용이 낮아져 화석연료를 빠르게 대체할 수 있다. 여기서 수소는 간헐적 재생에너지의 저장·운송 방식이자 탈탄소화된 전기가 대체하기 어려운 산업, 수송 분야에서 화석연료를 대체할 수 있다는 두 가지 매력으로 화려하게 컴백하고 있는 것이다.

■ 왜 수소경제인가?

수소경제는 온실가스가 지구 환경 변화에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 탄소경제에서 저탄소경제로, 궁극적으로는 탄소 배출이 없는(CO_2 -free) 경제를 지향한다. 수소경제의 핵심은 우리가 사용하는 탄소 기반 화석 연료를 수소에너지로 전환하는 것이므로 수소 중심의 경제 시스템이 되면 환경, 에너지, 사회·경제 분야 등에서 나타나는 여러 가지 문제를 해결할 수 있을 것이다.

탄소경제와 수소경제 비교

구분	탄소경제	수소경제
에너지 패러다임	- 탄소자원(석유, 석탄, 천연가스 등) 중심 - 높은 수입의존도(99%)	- 탈탄소화 수소 중심 - 국내 생산으로 에너지 자립에 기여
에너지 공급	- 대규모 투자가 필요한 중앙집중형 에너지 공급 - 입지 제약이 크고 주민 수용성이 낮음.	- 소규모 투자가 가능한 분산형 에너지 공급 - 입지 제약이 적고 주민 수용성이 높음.
경쟁 양상	자원개발 및 에너지 확보 경쟁	기술경쟁력 확보 및 규모의 경제 경쟁
환경성	온실가스, 대기오염물질 배출(CO₂, NOx, SOx 등)	온실가스 배출이 적어 친환경적 (부산물: 물)

자료: 관계부처 합동(2019a)

수소에너지는 전·후방 파급효과가 큰 미래 성장동력 아이টেماً로서 차량을 중심으로 한 수송 분야에서부터 전기, 열 등 에너지 부문 전반에 걸쳐 다양한 미래 산업을 창출할 수 있다. 승용차부터 상용차, 열차, 선박, 드론, 건설기계 등 모든 수송 분야에 수소가 활용되어 새로운 산업 생태계를 창출할 수 있고, 친환경·고효율 방식으로 전기와 열을 생산하는 연료전지가 분산형 전원의 대표적 기술로 부상할 것이다.

또한 수소 관련 산업은 협력 부품업체가 많고 수소 생산·저장·운송·활용 등의 가치사슬(value chain) 전반에 걸쳐 다양한 산업과 연계되어 있어 후방산업 파급효과가 큰 산업이다. 수소차 및 연료전지의 협력부품업체는 대부분 중소·중견기업으로서 수소 활용 확대에 따라 협력기업의 성장과 고용 창출로 이어지고, 생산 설비, 운송·저장 설비, 충전소 등의 인프라 구축은 금속·화학·기계 설비 등 관련 산업의 투자와 고용 확대를 유발한다.

수소는 산소와 반응하여 열과 전기를 생산한 후 물만을 부산물로 남기는 친환경에너지로서 깨끗하고 안전한 청정사회 진입을 촉진할 수 있다. 수송·발전 등 다양한 분야에서 온실가스와 미세먼지 저감으로 사회적 비용을 줄여주고, 태양광·풍력 등 재생에너지의 근본적 한계(간헐성, 경직성, 지역 간 편차 등)를 극복하고 재생에너지 활용도를 높일 수 있다.

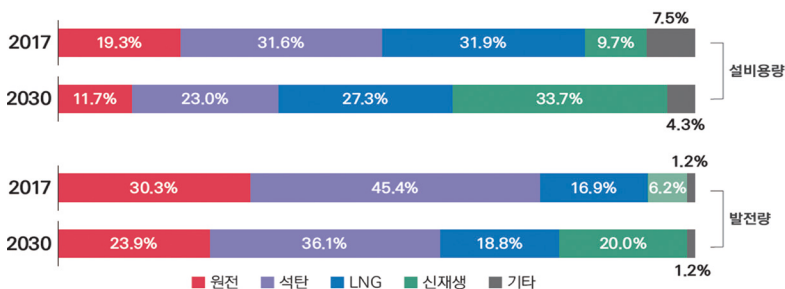
뿐만 아니라 수소 이용 확대로 에너지를 다각화하고 해외 에너지 의존도를 줄이게 되면 에너지 안보도 강화할 수 있다. 화석에너지 중 석유, 천연가스는 특정 국가 또는 지역에 집중적으로 부존되어 있어 국지적 분쟁에 시장이 충격을 받는 등 지정학적 리스크에 취약하다. 그러나 그린수소는 국내 생산도 가능하고 해외에서 수소를 수입한다면 화석에너지에 비해서는 특정 국가·지역 의존도가 낮을 것으로 예상된다. 장래 수소 수출에 나서려는 의향을 보이고 있는 국가에는 호주, 사우디아라비아 등 전통적 에너지 수출국 외에도 모로코, 뉴질랜드 등 지금은 에너지를 수입하는 나라들도 있다.

■ 에너지 전환과 수소의 역할

우리나라 정부는 에너지 전환을 발전 믹스의 변화를 넘어 전체 에너지믹스 최적화와 저효율 에너지 소비구조 개선, 저탄소 에너지산업 육성 등을 포괄하는 에너지 전반의 혁신을 의미하는 개념으로 보고 있다. 여기에는 전력 생산 과정에서 시민의 참여와 이익을 권장하는 ‘에너지의 민주화’도 포함된다.¹⁶ 우리나라는 기후변화 대응, 미세먼지 저감, 원전 안전성 강화 등에 대한 국민적 요구에 따라 재생에너지 확대와 에너지효율 향상을 중심으로 에너지 전환정책을 추진하고 있다.

정부가 2017년 8월 에너지전환 정책을 국정과제¹⁷로 확정하고, 같은 해 10월 「에너지전환(탈원전) 로드맵」을 수립함으로써, 에너지 전환 정책이 본격적으로 추진되기 시작되었다. 「에너지전환(탈원전) 로드맵」은 ‘안전하고 깨끗한 에너지로의 전환’을 추진하기 위하여 ① 원전의 단계적 감축(신규 원전 건설계획 백지화 및 노후 원전 수명연장 금지), ② 재생에너지 확대(재생에너지 발전량 비중을 2030년 20%로 확대), ③ 지역·산업 보완대책(에너지전환에 따라 영향을 받게 되는 지역과 산업이 연착륙할 수 있는 대책 수립) 등의 계획을 담고 있다.

전원별 설비용량/발전량 비중



자료: 산업통상자원부(2017)

2019년 6월에 발표된 「제3차 에너지기본계획」에서는 ‘에너지 전환을 통한 지속가능한 성장과 국민 삶의 질 제고’를 비전으로 내세워 에너지전환을 에너지 정책의 기본 방향으로 설정하였다. 이의 실현을

위해 ① 에너지 소비구조 혁신, ② 깨끗하고 안전한 에너지믹스로 전환, ③ 분산형·참여형 에너지시스템 확대, ④ 에너지산업의 글로벌 경쟁력 강화, ⑤ 에너지전환을 위한 기반 확충을 5개 중점 추진과제로 제시하였다.

우리나라도 에너지 전환의 추진에 있어 태양광, 풍력 등 가변성 재생에너지(variable renewable energy)의 이용 확대를 선결 과제로 꼽고 있다. 앞서 언급된 바와 같이 저장과 운반이 편리하여 가변성 재생에너지의 단점을 보완해 주고 오염물질 배출이 없다는 수소에너지의 특성으로 인하여 우리나라의 에너지 전환 과정에서도 수소의 활용도가 적지 않을 것이다. 따라서 에너지 전환은 수소가 에너지 시스템의 일익을 담당하는 수소경제로의 이행과 함께 이루어질 것으로 보는 것이 타당하다.

수소 생산에 있어 필연적인 에너지 손실, 생산비용 저감과 관련된 기술적 난제, 수소 이용을 위한 별도의 인프라 건설 필요성 등을 들어 에너지 전환에서 수소가 맡을 수 있는 역할에 대한 회의적인 시각도 존재한다. 그러나 에너지로서 수소가 가지는 장점인, 생산 방식에 따라 탄소 배출을 크게 줄일 수 있는 청정에너지라는 점, 에너지의 장기간 대용량 저장이 가능하다는 점 등을 감안할 때, 미래 에너지의 주역으로서 수소의 가능성은 매우 크다. 이런 점에서 수소는 에너지 전환을 통해 저탄

소 경제, 궁극적으로는 탄소배출 제로 경제로 이행하는 데 있어 중요한 퍼즐 조각이라 할 수 있다.

■ 수소경제의 미래

국제에너지기구(IEA: International Energy Agency)와 세계에너지협의회(WEC: World Energy Council)는 2019년에 수소의 미래를 다룬 보고서를 각각 발간하면서 수소 이용 확대를 위한 권고사항과 수소경제의 성공을 위한 조건을 제시하였다.

• 수소경제 확산을 위한 제언

IEA는 2019년 6월 발간한 보고서 “The Future of Hydrogen: Seizing Today’s Opportunities”에서, 깨끗하고 안전하며 저렴한 에너지의 이용 확대를 위해 미래에 핵심 역할을 수행할 수 있는 수소의 잠재력을 활용해야 한다고 강조하고, 수소 이용 확대를 위한 다음과 같은 일곱 가지 권고 사항을 제시하였다.

첫째, 장기 에너지 전략에서 수소의 역할을 정립해야 한다. 중앙정부와 지방 정부는 에너지부문의 미래 비전을 제시하고 기업은 명확한 장기 목표를 설정할 필요가 있다.

둘째, 청정 수소에 대한 상업적 수요를 증대시켜야 한다. 수소 이용 확대의 가장 큰 장애요인은 높은 가격이므로, 정책적 지원을 통해 투자를 촉진하고 수소 공급가격을 낮춰 안정적인 수소시장을 조성하는 정책이 필요하다.

셋째, 수소 기술 개발 및 인프라 투자의 높은 위험을 완화해 주어야 한다. 청정 수소 공급이나 인프라 구축, 새로운 수소 응용 분야는 투자 위험성이 매우 높으므로 정부는 민간기업의 투자 위험을 완화해 주기 위한 다양한 지원제도를 시행하여야 한다.

넷째, 연구·개발에 대한 지원을 통해 비용 절감을 유도하여야 한다. 규모의 경제에 따른 비용 절감과 함께 기술 개발은 수소 생산비용을 낮추고 성능을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다.

다섯째, 불필요한 규제를 폐지하고 산업 표준을 만들어야 한다. 프로젝트 개발자들은 모호하거나 현실 상황에 맞지 않는 규정, 일관성이 없는 기준 등으로 어려움을 겪는다.

여섯째, 국제적 공조를 강화하고 수소 관련 진행 상황을 공유하여야 한다. 특히 국제 기술표준 수립, 우수 사례 공유, 국가 간 인프라 구축 등에서 국제협력을 강화하고, 수소 생산 및 이용 상황을 정기적으로 모니터링해야 한다.

일곱째, 단기적으로 향후 10년간 수소경제 확산을 위해서는 다음의 네 가지 핵심 요소에 집중하여야 한다.

- 기존의 수소 관련 산업이 모여 있는 항구를 저비용·저탄소 수소 생산 허브로 활용
- 청정 수소 공급 촉진을 위해 기존의 가스 기반시설 활용
- 연료전지 차량의 경쟁력 향상을 위해 육상 운송수단 지원
- 국제 수소 거래 활성화를 위한 해상 운송로 개설

수소경제 확산을 위한 네 가지 핵심 요소



자료: IEA(2019)

• 수소경제의 성공 조건

WEC는 2019년 6월 발간한 보고서(Hydrogen Economy - Hope or Hype?)에서, 그린 수소는 탄소배출 저감이 어려운 산업, 수송, 난방 부문에서 배출 감축 수단으로 활용할 수 있어 에너지 운반체로서 수소에 대한 관심이 높아지고 있다는 점을 언급하며, 수소경제로의 성공적인 이행을 위한 다섯 가지 조건을 제시하였다.

첫째, 수소를 에너지 전환의 해결책으로 인식하여야 한다. 기후변화 대응 수단으로 수소의 잠재력이 부각되고 있고, 잉여 재생에너지 전력으로 생산된 수소는 전력망의 간헐성과 불안정성 문제를 보완할 수 있다. 수소의 잠재력을 어느 정도 활용할 수 있는지는 장기 에너지전략의 내용과 부문 간 협력의 정도에 달려 있다.

둘째, 지속가능한 수소생산 방식을 개발해야 한다. 탄소배출이 없거나 적은 수소 생산을 위해서는 소요비용, 탄소 배출량, 규모 확장성 등을 고려한 단계별 중·장기 목표를 수립하여야 한다.

셋째, 국제 수소 거래 시장을 구축하여야 한다. 수소 교역을 통해 수출국은 수소 생산부문 투자로 수소산업 성장을 촉진할 수 있고, 수입국은 저비용으로 수소를 이용할 수 있다.

넷째, 가격경쟁력을 갖추어야 한다. 실질적인 가격경쟁력을 갖추

기 위해서는 초기에는 인센티브나 보조금 등 정부의 적극적인 지원책이 필요하며 실제 사업화 사례를 발굴하는 것이 중요하다.

다섯째, 수소 인프라를 적시에 구축하여야 한다. 수소 이용을 확대하기 위해서는 수소 생산설비, 운송, 저장, 충전소, 배관망 등 수소 밸류체인 전반의 인프라에 대규모 투자가 필요하므로 장기 에너지 전략 차원에서 논의되어야 하고 정부와 업계의 공조가 필수적이다.

H₂ 수소경제 활성화 로드맵

■ 수립 경과 및 의미

우리나라에서 수소경제 활성화와 관련한 종합 대책이 처음으로 구체화된 것은 2005년 9월 당시 산업자원부가 발표한 「“친환경 수소 경제” 구현을 위한 마스터플랜 - 연료전지산업 및 중장기 신재생에너지 개발비전」(이하 ‘2005 마스터플랜’)이다. ‘2005 마스터플랜’에서는 2020년 최종 에너지 중 수소 비중 3%, 수소차 보급대수는 200만 대로 전체 자동차 대수의 8%, 총 전력 수요 중 발전용 연료전지의 비중은 6.8%를 목표로 하고, 목표 달성을 위해 핵심기술 개발 및 보급 확대, 수소연료전지 산업화 지원, 수소경제 제도 및 인프라 구축 등을 추진하고자 하였다.

그러나 ‘2005 마스터플랜’ 상의 목표는 거의 실현되지 못하였다. 이처럼 당초 목표를 달성하지 못한 원인은 앞서 소개한 미국의 수소 이니셔티브가 추진력을 잃은 이유와 크게 다르지 않다. 즉, 수소 관련 기술의 미성숙으로 인한 기술 실용화 지연 및 인프라 미비와 같은 내적 요인, 국제 사회의 수소에 대한 관심 저하 등 외적 요인이 맞물리면서 자연스럽게 기술 로드맵 실현을 위한 정부의 R&D 투자 등 정부의 후속 조치가 취해지지 않았다.¹⁸⁾

그러나 10년 남짓 지난 이후 국내외적으로 수소경제 추진 여건이 성숙함에 따라 정부는 2018년 8월 발표한 「혁신성장 전략투자 방향」¹⁹에서 ‘수소경제’를 3대 전략투자²⁰분야 중 하나로 선정하였다. 뒤이어, 산업부는 2018년 9월 ‘수소경제 추진위원회’를 구성하여 의견수렴과 연구·분석 등을 통해 로드맵을 준비하고, 관계부처 협의를 거쳐 2019년 1월 「수소경제 활성화 로드맵(이하, ‘로드맵’)」을 발표하였다.

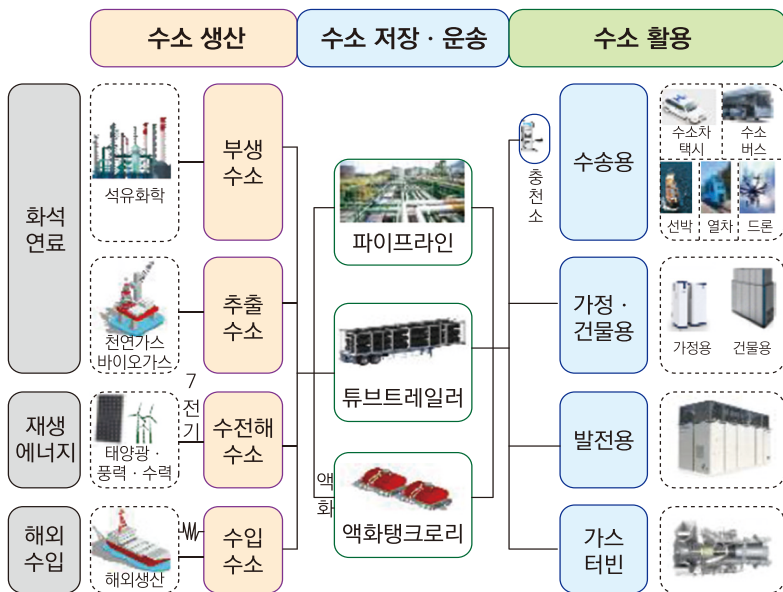
‘로드맵’은 일본, 미국, 호주 등 다른 나라의 정책 추진 현황을 참조하고, 우리의 경쟁여건, 시장환경 변화, 기술발전 추이 등을 면밀히 검토하여, ‘수소경제’를 혁신성장의 새로운 성장동력이자 친환경 에너지의 원동력으로 인식하면서 2040년까지 수소경제 활성화를 위한 정책 방향과 목표 및 추진전략 등을 제시하였다.

정부는 수소경제를 통해 수송, 에너지 등 다양한 분야에서 새로운 시장과 신산업 창출이 가능하고, 수소 생산, 운송·저장, 충전소 등의 인프라 구축은 연관산업 효과가 크므로 중소·중견기업의 투자와 고용창출이 가능한 미래 성장산업이 될 수 있다고 인식하였다. 또한 온실가스 감축, 미세먼지 저감, 재생에너지 이용 확대 등 친환경 에너지 확산과 에너지원 다각화, 해외 에너지 의존도 감소 등 에너지 자립에도 기여할 수 있다고 판단하였다.

현재 수소 분야에서 주요 선도국 간에 경쟁이 치열하나 아직 초기

단계이므로, ① 수소차, 연료전지 등 수소 활용분야의 세계적 기술력을 이미 확보하고 있고, ② 부생수소 등 수소 생산과 산업기반 경험을 보유

수소경제 개념도



새로운 성장동력

- 수소생산, 저장·운송 등 인프라 산업 시장 창출
- 수소차, 연료전지를 미래유망 품목으로 육성
- 소재·부품·시스템 등 기술개발 및 수요 촉진 등

에너지 자립

- 에너지원 다각화
- 해외 의존도 감소
- 재생에너지 이용 제고

친환경 에너지

- 높은 에너지효율
- 탈탄소화, 온실가스 감축
- 미세먼지 저감

자료: 관계부처 합동(2019a)

하고 있으며, ③ 완비된 도시가스 배관망 등을 활용한 원활한 수소 공급이 가능하다는 점 등 우리의 장점을 살린다면, 수소경제를 선도하여 새로운 성장동력으로 육성할 잠재력과 가능성이 충분한 것으로 판단된다.

■ 국가 비전 및 미래 모습

「수소경제 활성화 로드맵」의 비전은 우리나라가 강점이 있는 수소차와 연료전지를 양대 축으로 “세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약”하는 것이며, 이를 통해 “수소차 및 연료전지 세계시장 점유율 1위

를 달성”, “화석연료 자원 빈국에서 그린 수소 산유국으로의 진입”을 주요 목표로 한다.

• 세부 목표

로드맵에서는 목표 연도인 2040년까지의 목표치를 이용, 공급, 유통, 가격 등 부문별로 제시하고 있다. 수송 부문에서는 수소차 누적 생산량을 2018년 2천 대에서 2040년 620만 대(내수 290만 대, 수출 330만 대)로 확대하여 세계시장 점유율 1위를 달성한다. 대중교통 부문의 수소 차량 생산도 확대하여 2040년에 수소택시 8만 대, 수소버스 4만 대, 수소트럭 3만 대를 보급하고, 장기적으로는 수소 활용을 수소선박, 수소열차, 수소건설기계 등으로 확대하여 미래 유망품목으로 육성한다. 한편, 발전 부문에서는 친환경 분산형 전원인 발전용 연료전지를 재생에너지 활용 수소 생산과 연계하여 2040년까지 수출 7GW 포함, 15GW 이상으로 확대함으로써 수출산업화를 추진하고 가정·건물용 연료전지도 2040년까지 약 94만 가구에 해당하는 2.1GW를 보급한다.

수소 이용 확대에 맞추어 경제적이고 안정적인 수소 공급 및 유통시스템을 조성하고 수소 가격 하락을 유도하는 데에도 노력이 필요하다. 수전해 및 해외 생산·수입 등 그린 수소 공급 비중을 늘리면서 전체 공급량을 2018년 13만 톤에서 2022년 47만 톤, 2040년 526만 톤

이상으로 확대한다. 수소전기차 보급 확대에 필수적인 수소 충전소는 2018년 14개소에서 2022년 310개소, 2040년 1,200개소로 늘어난다. 또한, 수소 저장방식을 현재의 고압 기체 중심에서 고효율 액체, 액상, 고체 등으로 다양화하고 전국적인 파이프라인 수소 공급망도 구축한다. 수소경제 성패의 핵심요소인 수소 가격은 수소 이용 확대와 함께 원활하고 경제적인 수소 유통체계 구축을 통해 2022년 6,000원/kg, 2040년까지 3,000원/kg 이하로 낮아질 것으로 전망한다.

수소 로드맵의 부문별 목표

부문별		2018년	2022년	2040년
	수소차 (수출)	1.8천 대 (0.9천 대)	8.1만 대 (1.4만 대)	620만 대 (330만 대)
	(내수)	(0.9천 대)	(6.7만 대)	(290만 대)
연료 전지	발전용 (내수)	307MW (전체)	1.5GW (1GW)	1.5GW (8GW)
	가정·건물용	7MW	50MW	2.1GW
수소공급		13만 톤 / 年	47만 톤 / 年	526만 톤 / 年 이상
수소 충전소		14개소	310개소	1,200개소 이상
수소가격		(정책가격)	6,000원 / kg	3,000원 / kg

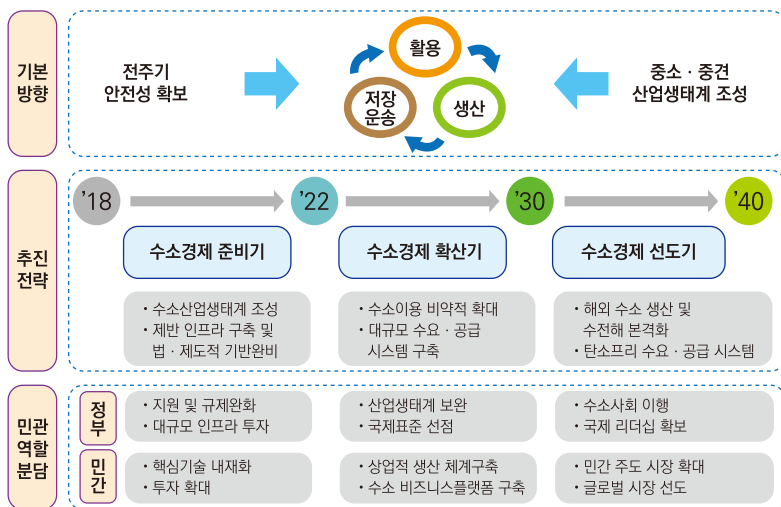
자료: 관계부처 합동(2019a)

• 기본방향 및 추진전략

이와 같은 로드맵의 목표 달성을 위한 기본 추진 방향은 생산, 저

장·운송, 활용의 모든 수소 가치사슬에서 전주기 안전성을 확보하고 중소·중견 수소산업 생태계를 조성하는 것이다. 추진전략은 수소산업 발전단계에 따라 수소경제 준비기(2018~2022), 확산기(2023~2030), 선도기(2031~2040)로 나누어 ① 수소산업 생태계가 조성되는 준비기에는 제반 인프라 구축 및 법·제도적 기반을 완비하고, ② 수소 이용이 비약적으로 확대되는 확산기에는 대규모 수요·공급 시스템을 구축하며, ③ 해외 수소 생산과 수전해 생산이 본격화되는 선도기에는 무탄소(CO_2 -free) 수요·공급 시스템을 확립하는 것이다. 이 과정에서 정부와

수소 로드맵의 기본 방향 및 추진 전략



자료: 수소융합얼라이언스추진단(2020)

민간의 역할을 명확히 하여 각 추진단계에서 민·관 역할분담이 제대로 이루어지도록 하는 것이 중요한 과제가 될 것으로 보인다.

• 수소경제의 미래 모습

「수소경제 활성화 로드맵」이 차질 없이 이행되면 우리나라는 명실상부한 수소경제 선도국가로 도약하고, 2040년에는 수소경제가 연간 43조 원의 부가가치와 42만 개의 새로운 일자리를 창출하는 혁신성장의 원동력이 될 것으로 기대된다.

수소 이용의 일상화

목표 연도인 2040년이 되면 수천 년간 의존해 온 화석연료에서 벗어나 수소를 주요한 에너지원으로 사용하게 된다.

2040년 수소 승용차는 275만 대로 2018년 전체 승용차 대수의 약 15%이며 서울시와 세종시의 승용차 대수를 합한 수준이다. 2040년 가정용 연료전지 설치용량은 600MW로 전체 94만 가구에 보급되며, 이는 2017년 서울시 총 가구 수의 25% 또는 대구시 전체 가구 수에 해당한다.

청정 교통 인프라 구축

기존의 탄소배출 대중교통 시스템은 무탄소 청정수소 시스템으로 패러다임이 전환될 것이다. 2040년 수소택시는 8만 대로 2018년 서울시 택시 대수와 비슷한 규모이면서 전국 택시 대수의 약 33% 수준이고, 수소버스는 4만 대로 2018년 국내 전체 노선버스 대수의 85% 이상이며, 수소트럭은 3만 대로 2018년 국내 전체 관용 화물차 수준이다. 2040년 수소 충전소 수는 1,200개로 2019년 LPG 충전소 수의 60% 수준이다.

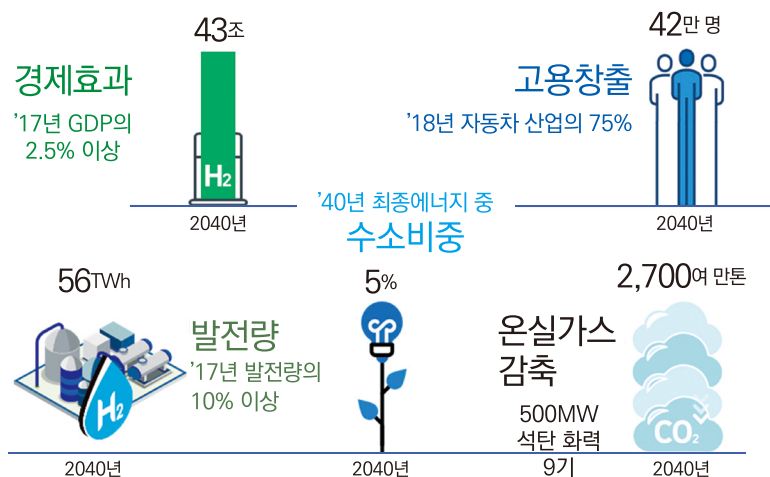
이와 같은 수소 차량의 보급 확대는 연간 2,373톤의 미세먼지 저감 효과를 가져오는데, 이는 2015년에 도로 교통에서 발생한 미세먼지의 6.1%에 해당한다.

친환경 성장동력

수소가 저소비형 친환경 에너지원이면서 부가가치 창출과 일자리 창출의 새로운 성장동력이 된다. 2040년 수소 관련 산업의 고용 창출 인원은 42만 명으로 2018년 자동차 산업 고용인원의 75%에 이르고, 경제효과는 43조 원으로 2018년 우리나라 GDP의 2.4% 정도에 해당한다.

2040년에 수소로 생산한 에너지는 1,040만 TOE으로 2040년 최종 소비에너지 중 약 5%에 해당하며, 이는 2018년 국내 도시가스 최종 소비의 40% 이상으로 가정용 도시가스 총 소비량과 비슷한 규모이다. 수소 발전량은 55,949GWh로 2018년 국내 총발전량의 9.4%에 해당하고, 온실가스 감축량은 2,728만 톤으로 500MW급 석탄발전소 9기의 온실가스 배출량에 해당한다.

수소경제 활성화 로드맵의 2040년 미래상



자료: 관계부처 합동(2019a)

■ 수소경제 활성화 정책 후속 조치²¹⁾

정부는 2019년 1월 「수소경제 활성화 로드맵」을 발표한 이후, 수소경제 표준화 전략 로드맵, 수소 인프라 및 충전소 구축방안, 수소 기술개발 로드맵 등 여섯 건의 범부처 분야별 후속 대책²²⁾을 수립하였고, 2020년 2월에는 세계 최초로 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」을 제정하며 수소경제 활성화 정책 추진을 뒷받침하고 있다. 또한 추경을 포함하여 수소 보급 확대 및 핵심기술 개발 등에 약 3,700억 원을 집중 지원함으로써 전 세계 수소경제 시장을 빠르게 선점하고 있다.

• 추진 성과 및 후속 대책

수소차 분야에서는 일본 등 경쟁국을 제치고 2019년 최초로 세계 시장에서 판매 1위를 달성하였고,²³⁾ 누적 수출 대수도 1,700대를 넘었으며 유럽, 대양주 중심으로 수출국도 크게 늘어났다. 특히 현대자동차는 2025년까지 10톤급 수소트럭 1,600여 대를 판매하는 계약을 스위스 수소에너지 기업 H2Energy(H2E)와 체결하여 이미 2020년 1월에 첫 트럭을 선적하였다. 국내 수소전기차 보급 대수도 2018년 893대에서 2020년 5월 기준 7,314대로 세계에서 가장 빠르게 증가하였다. 2019년 9월부터 수소택시 10대가 서울 시내에서 운행을 시작하였고, 2020년 5월 기준 15대가 보급된 수소버스는 노후 경찰버스를 순차적

으로 수소버스로 교체하는 등 공공분야를 중심으로 수요를 적극 창출하고 있다.

수소경제 확산을 위한 핵심 인프라인 수소 충전소 구축에도 속도를 내고 있다. 2019년에 세계에서 가장 많은 20기를 건설하여 2020년 5월 기준 총 39개소가 운영 중이며, 앞으로도 충전소가 지속적으로 건설됨에 따라 이용자의 편의성이 크게 향상될 것이다. 충전소 구축을 촉진하기 위해 2019년 3월 민간 주도의 특수목적법인 '수소에너지네트웍(HyNet)²⁴'가 출범하였고, 충전소 건설에 걸림돌이 되는 입지 규제 등 관련 규제를 10건 이상 개선하였으며, 2019년 9월에는 규제 샌드박스 1호 상징물로서 국회에 수소 충전소를 개소하였다.

2019년 말 기준 연료전지 발전용량은 408MW(발전용 397MW, 가정·건물용 11MW)로 전 세계 보급량의 40%를 점유하고 있다.²⁵ 우리나라의 수소 연료전지 발전·운영 경험은 세계적으로 인정받고 있으며, 미국 코네티컷주의 데이터센터에 세계 최대 규모(44MW)의 실내 연료전지를 공급하기로 결정하였다.

또한 드론에 기존 배터리 대신 연료전지를 활용하여 비행시간을 2시간 이상으로 대폭 증가시킨 두산모빌리티이노베이션의 '수소연료전지 드론'이 2020 국제전자박람회(CES: Consumer Electronic Show)에서 최고혁신상을 수상하였다.

2019년 12월에 공개된 『수소 안전관리 종합대책』을 통해 생산-운송-저장-활용 등 전주기 안전관리체계를 글로벌 수준으로 선진화하고, 수소 충전소, 생산기지, 연료전지 발전소 등 3대 핵심시설을 중점 관리한다. 그린수소 생산 및 수소차, 충전소, 연료전지의 핵심부품 국산화 기술 개발에 대한 투자를 대폭 확대하여 2019년에는 전년 대비 34% 늘어난 936억 원을 투자하였다.

도시 내 교통(수소차, 버스, 트럭 등), 주거(연료전지), 기술(통합 플랫폼) 등 수소 종합 생태계를 구현하기 위한 『수소 시범도시 추진전략』은 2019년 10월에 수립되었다. 이후 2019년 연말에 안산, 울산, 완주·전주를 시범도시로 선정하고, 2020년 상반기에 세부계획을 수립하고

수소 시범도시 모델(안)



자료: 관계부처 합동(2019b)

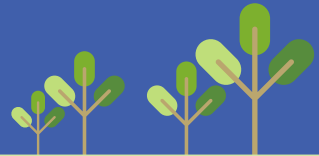
하반기부터 지역별 특성을 살린 계획에 따라 시범도시 구축을 본격화한다.

제도적으로는 세계 최초의 수소경제법인 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」이 2020년 1월 국회를 통과하여 2월에 제정되는 성과를 거두었다. 우리의 수소경제법은 수소 이용의 안전 확보를 위한 법적 근거를 마련하고 수소 산업 진흥을 위한 기반 확보를 가능케 함으로써 수소경제 실현에 중요한 촉매 역할을 할 것이 확실시된다. 이 법에 따라 ‘수소경제위원회’를 설치하고, 수소산업 진흥, 수소 유통, 수소 안전을 지원하는 전담기관을 지정할 수 있게 되었으며, 수소전문기업의 육성과 지원, 인력양성, 표준화 사업 지원 등 수소산업 기반 조성을 위한 제도의 초석이 놓였다.

• 향후 추진 방향

정부는 이러한 추진 성과를 토대로 수소경제가 미래 성장동력이자 친환경 에너지의 원천이 될 수 있도록 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 차질 없이 이행해 나갈 계획이다. 우선 민간 주도로 자생력 있는 수소 생태계를 구축하기까지 규모의 경제에 도달할 수 있도록 수소 시장을 지속적으로 창출하고, 수소차, 충전소, 연료전지 핵심 부품의 국산화율을 높여 비용을 절감한다. 수소 수요 증가에 대응하기 위해 다양한 생산방

식을 도입하고 거점형 수소 생산기지 건설 등을 통해 효율적이고 체계적으로 수소 공급망을 구축하며, 그린수소의 경제성을 확보하기 위해 대규모 수전해 기술 R&D를 본격 추진한다. 또한 호주, UAE 등 잠재적 수소 생산국과 수소 도입을 위한 협력을 가시화하고, 수소경제법에 명기된 수소경제위원회, 수소산업 진흥, 안전, 유통 전담기관 등의 조직을 통하여 안정적으로 산업을 지원함으로써 지속가능한 수소경제로 이행할 수 있도록 할 계획이다.



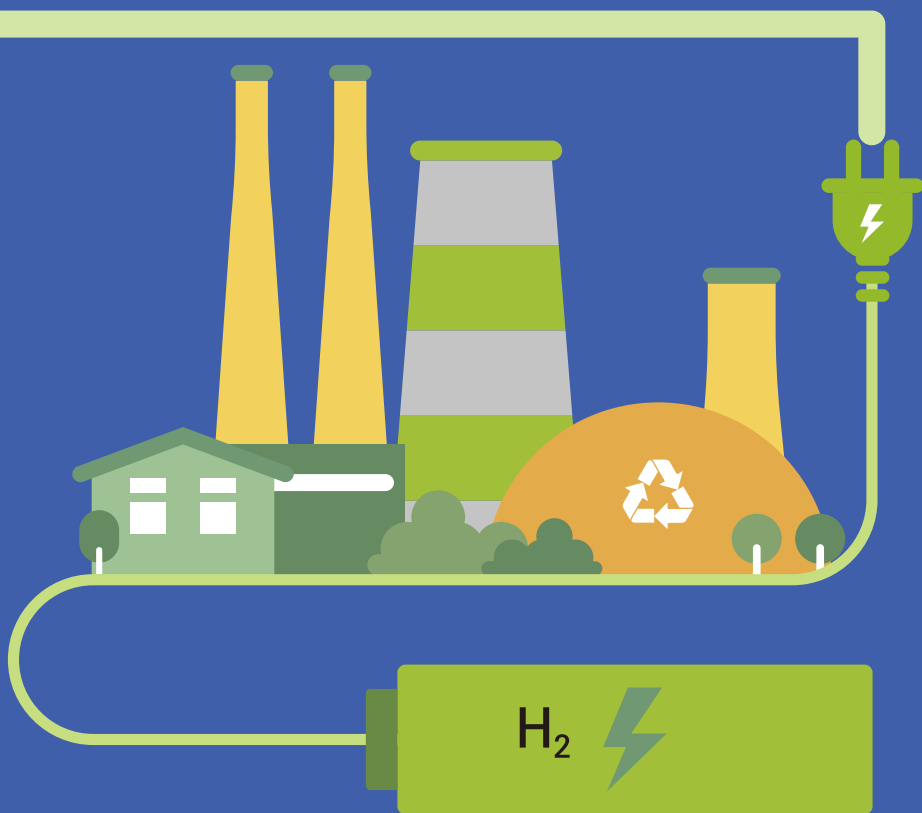
수소경제가 온다

: 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망

- 🇺🇸 **H₂ 미국: 깨어나는 거대한 잠재력**
- 🇯🇵 **H₂ 일본: 기민한 선두주자**
- 🇨🇳 **H₂ 중국: 수소굴기를 위한 전방위적 노력**
- 🇪🇺 **H₂ 유럽(EU): 수소 = 환경 + 경제**
- 🇩🇪 **H₂ 독일: 그린수소로의 도약**
- 🇦🇺 **H₂ 호주: 화석에너지 수출에서 수소에너지 수출로**
- 🌐 **H₂ 국제 협의체 동향**

II

주요국의 수소경제 현황



21세기에 들어서면서 미국, 독일, 일본 등과 같은 선진국을 중심으로 수소에너지를 대규모로 활용하는 경제·사회 구조, 즉 수소경제의 기반을 구축하기 위한 정책적 노력이 활발하게 진행되고 있다. 이는 그 동안에 수소의 생산, 저장, 운송, 활용 등 모든 측면에서 기술 진보가 꾸준히 이루어져 왔고, 최근 들어서는 한층 가속화되고 있다는 것을 시사한다. 개도국 중에서는 중국, 남아공, 모로코 등이 자국 내 수소경제 발전, 수소 수출 등을 위한 정책적 움직임을 보이고 있다.

세계적인 수소경제 추진 상황을 파악하기 위해서 우리는 미국, 일본, 중국, EU, 독일, 호주 등의 사례에 주목할 필요가 있다. 이들의 현황과 특징을 간단히 살펴보면, 미국은 2000년대 초반부터 수소경제에 대한 연구·개발 등의 정책적 지원을 활성화했던 선도국가이면서 막대한 잠재력을 보유한 나라이고, 독일은 적극적인 에너지 전환 정책을 추진한 결과 재생에너지를 활용하여 그린수소 생산을 강조하고 있는 대표적인 나라이다. 일본은 우수한 소재 산업의 경쟁력을 앞세워 수소 경제의 잠재력을 키워오고 있으며, 중국은 세계 최대 에너지소비국으로 에너지 자급률을 높이고 대기질 개선을 위하여 최근 들어 수소경제 구축을 위한 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 호주는 풍부한 석탄, 천연가스 등 화석연료와 재생에너지 발전을 병행하여 수소를 생산하고 아시아 시장에 수출하려는 정책을 추진하고 있다. 이처럼 다양한 특징을 가지는

국가를 대상으로 정부 정책 현황과 향후 추진 방향, 민간 부문의 수소 관련 사업 추진 상황을 살펴본다면 효율적인 국내 수소경제 추진에 도움이 될 것이다.

미국: 깨어나는 거대한 잠재력

연방정부

미국은 일찍이 수소경제와 연료전지에 대한 정책적 관심을 보인 나라이다. 1992년 제정된 미국의 '에너지 정책법(Energy Policy Act)'은 수소에 대한 정책을 명시한 최초의 국가 입법이였다. 2003년 부시 정부는 수송부문에서 수소 및 연료전지 기술 개발과 수소경제 기반을 구축하려는 정책 방향을 2003년 대통령 연두 교서에서 발표하였다. 그러나 앞 장에 설명된 바와 같이 오바마 정부에서 수소와 연료전지와 관련된 미국 에너지부의 예산을 2009년 이후 대폭 삭감하였는데,²⁶ 이는 연료전지와 수소차 기술 개발과 시장성에 대한 비관적인 견해 때문이었다.²⁷ 그러나 앞서 언급된 재생에너지 보급 확대와 수소 기술의 시장성 개선에 따라 수소경제에 대한 관심이 살아나고 있다.

연방정부 차원에서 수소, 연료전지와 관련된 정책과 연구·개발 및 보급 프로그램들은 미국의 에너지부(DOE: Department of Energy)가

주로 수행하고 있다. 또한, 수소와 연료전지 개발·보급을 촉진하기 위한 다양한 법제도들도 연방정부 차원에서 갖추어져 있으며,²⁸ 세금 공제와 융자 혜택과 같은 다양한 지원제도 등이 법적으로 마련되어 있는데 일부 수소 및 연료전지 지원과 관련된 법은 2017년 시효가 만료되기도 하였다.

미국 전역에 걸쳐 수소전기차 보급을 촉진하기 위하여 에너지부는 전국적인 민·관 협력조직으로 H2USA를 2013년 5월 결성하였다. H2USA는 미국 전역에 수소 충전 인프라를 확대하여 대규모 수소차 보급 기반을 구축하는 사업을 활성화하기 위하여 설립되었으며, 공간 배치계획, 수소 충전소 인프라 확대, 시장 지원 및 재원 조달 등과 관련된 사업을 수행하고 있다.²⁹ 이 조직의 운영사업비는 회원사로부터, 그리고 연구조사 사업비는 에너지부로부터 조달하고 있는데, 회원은 공공기관, 자동차업체, 가스회사, 수소 및 연료전지 업체 등으로 구성되어 있다.

수소와 연료전지 산업과 관련된 전국 단위의 민간단체로는 ‘연료전지 및 수소 에너지 협회(FCHEA: Fuel Cell and Hydrogen Energy Association)’가 있다. 이 협회는 ‘미국 연료전지 위원회(US Fuel Cell Council)’와 ‘전국수소협회(National Hydrogen Association)’를 합병하여 2010년 11월에 발족되었다. 회원은 자동차, 연료전지와 수소산업 관련 기업으로 구성되어 있으며, 우리나라의 현대자동차와 두산중공업도 회원으로 가입되어 있다.

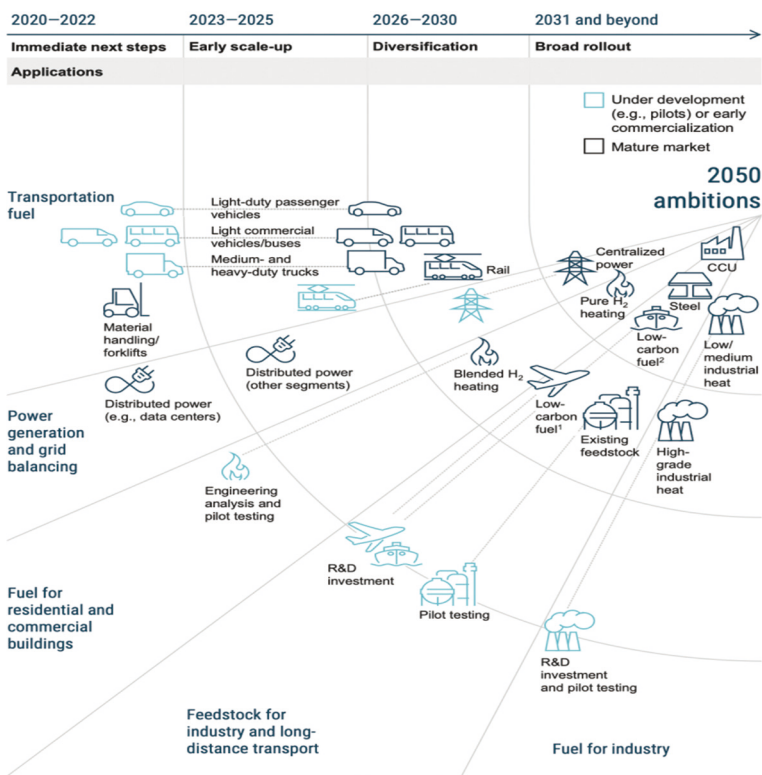
최근 FCHEA는 ‘미국 수소경제로의 로드맵(Road Map to a US Hydrogen Economy)’을 작성하여 2020년 3월에 발표하였다.³⁰ 이 로드맵은 FCHEA의 18개 회원사가 참여하여 작성하였으며, 2030년과 2050년 정책 시계(視界)에 대하여 기술 발전단계 및 시장 성숙도 등을 감안하여 향후 수소와 연료전지 산업의 장기 비전과 이를 달성하기 위한 정책제안을 밝히고 있다. 이 로드맵에 의하면 미국이 가지고 있는 수소의 잠재량으로 볼 때 이를 의욕적으로 개발하고 적절한 조치를 취해 나아가면, 2030년까지 연간 1,400억 달러 규모의 수익과 70만개의 일자리를, 2050년까지는 연간 7,500억 달러의 수익과 340만개의 일자리를 창출할 뿐만 아니라, 수소가 미국 최종에너지 수요의 14%까지 점유할 수 있다고 전망하고 있다. 이 비전과 로드맵을 실현하기 위해서는 다음과 같은 9개의 조치가 이루어져야 한다고 보고서는 결론 맺는다.

- 신뢰할 수 있는 기술 중립적인 탈탄소화 목표 설정
- 초기 시장 조성에 대한 장벽 해소를 위한 인센티브 제공
- 인프라 개발 지원
- 분야별로 수소 사용의 확대와 규모의 경제 실현
- 정부 조달 시 수소기반 옵션 포함
- 연구·개발·시범·전개 지원
- 기술 코드 및 안전 기준의 조화

- 지원 홍보 및 인력 양성
- 수소를 반영한 에너지부문 규제 개정

미국의 수소 이용 로드맵

Hydrogen applications road map



¹ Carbon capture and utilization (for chemicals production)
² Biofuel, synfuel, ammonia

자료: FCHEA(2020)

■ 주정부

수소와 연료전지 보급을 위한 정책과 지원제도 등은 주(州)마다 다르거나, 또는 동일한 정책을 공통적으로 추진하기도 한다. 몇몇 주에서는 수소 보급기반 개발을 촉진하기 위한 목적으로 세금감면·면제와 법인 소득세 공제 등을 규정하는 지방 에너지법을 독자적으로 제정해서 시행하기도 하고, 수소 발전에서 생산하는 발전량을 기준으로 법인세를 공제해 주기도 한다. 수소전기차에 대한 지원제도나 정책 프로그램도 주 단위로 차별화된 경우가 많다. 캘리포니아, 코네티컷, 미네소타,

텍사스, 하와이 같은 주는 수소와 관련된 별도의 법과 제도를 가지고 있으나, 다른 주는 대체에너지(alternative energy)와 관련된 사항을 수소에 대하여 동일하게 적용하고 있다.³¹

미국 ZEV credit 제도의 주요 내용

구분	내용
시행 지역	캘리포니아, 코네티컷, 메인, 매릴랜드, 메사추세츠, 뉴저지, 뉴욕, 오레곤, 로드 아일랜드, 버몬트, 워싱턴 D.C
의무대상업체	- 기준: 이전년도 CA州 3년 평균 차량 판매량 기준(2018년부터 기준 강화) - 대형업체: (기준) 60,000대 초과 → (2018년~) 20,000대 초과 - 중형업체: (기준) 4,501~60,000대 → (2018년~) 4,501~20,000대 4,500대 이하의 소형업체로 분류되어 ZEV 의무대상에서 제외 - 이에 따라 현대자동차는 2018년부터 대형업체로 분류
ZEV 종류	- ZEV(Zero Emission Vehicle): BEV, FCEV 등 순수 전기차 - 주행가능 거리에 따라 근거리용 전기차는 NEV (Neighborhood Electric Vehicle)로 별도 표현 - TZEV(Transitional ZEV): PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, 플러그인하이브리드차) - AT PZEV(Advanced Technology Partial ZEV) : HEV(Hybrid Electric Vehicle, 하이브리드차) - PZEV(Partial ZEV) : SULEV(Super Ultra-Low Emission Vehicle, 고효율 내연기관차)
ZEV 의무판매비율	(2017년) 14% → (2018년) 4.5% → (2025년) 22% - cf) 2018년 의무판매비율이 갑자기 감소된 것은 규정강화를 감안한 조치
2018년 ZEV 규정강화	- ZEV 크레딧 부여 차종 제한 (기준) 하이브리드차(AT PZEV), 고효율 내연기관차(PZEV) 판매시에도 부여 (2018년) 오로지 순수 전기차(ZEV), 플러그인하이브리드차(TZEV) 판매시에만 ZEV 크레딧 부여 ⇒ 자동차사의 전기차, 수소차 판매 확대 전망 - ZEV 크레딧 최대 부여점수 축소: (기준) 최대 9점 → (2018년) 최대 4점

자료: 에너지경제연구원, 산업통상자원부(2019)

동일한 정책을 여러 주에서 공통적으로 추진하는 사례로 캘리포니아를 포함한 11개 주에서 시행하고 있는 ‘ZEV(Zero Emission Vehicle) credit’ 제도를 들 수 있다. 이 제도는 자동차의 환경오염, 배출량, 주행거리 등을 고려하여 크레딧을 제조사에게 부여하며, 기준 크레딧에 미달할 경우 벌금을 부과하는 제도로 벌금은 크레딧 한 단위당 5,000달러에 달한다.³²

주 단위에서는 캘리포니아가 수소와 연료전지 보급에 있어 가장 적극적이고 독자적인 정책을 펴고 있다. 캘리포니아 주정부는 대기오염을 줄이는 근본적인 대안인 수소연료전지의 상용화와 보급을 촉진하기 위하여 민·관 협력체인 CaFCP(California Fuel Cell Partnership)를 1999년에 결성하여 운영하고 있다. CaFCP는 캘리포니아 에너지위원회 산하 조직으로 수소 충전 인프라의 지리적 배치, 자원 조달, 지역사회의 수용성 확보 등과 같은 지역 특화된 사업에 중점을 두고 있다. 사업비 조달과 예산 집행에 있어 수소 충전소 건설의 초기 예산은 주정부 지원과 민간 투자를 결합하여 확보하지만, CaFCP의 조직 운영비는 회원 구성원이 부담하고 있다.³³

수소 충전소 보급을 활성화하는 사업으로 캘리포니아는 ‘Hydrogen Highway’를 추진하고 있다. 이 사업은 2004년 4월에 아놀드 슈워제네거 당시 주지사의 행정 명령에 의해 시작되었다. 2006년 9월, 캘리

포니아 주 상원은 수소의 33%를 재생 가능한 에너지원으로부터 확보할 것을 법제화하였다. 그럼에도 실제 수소에너지 활용은 지지부진했는데 단적인 예로 2007년에는 25곳이었던 수소 충전소가 2012년에는 23곳으로 줄었고 그 중 8곳만이 일반인들이 이용할 수 있었다. 이후 수소경제가 다시 탄력을 받으면서 캘리포니아에서 일반인이 이용할 수 있는 수소 충전소는 2017년 9월 기준 36개로 증가하였다.³⁴

북미지역의 수소 충전소 현황 (2019년 말)



자료: H2Stations.org(2020)

2019년 말 현재 북미 지역에는 총 74개의 수소 충전소가 있는데, 이 중 대다수인 48개의 충전소가 캘리포니아에 있으며, 2019년에 4개가 새로 설치되었고 앞으로 21개가 더 세워질 예정이다.³⁵ 수소버스는 현재 약 30여 대의 수소버스가 실증사업에 활용되고 있다. 실증사업을 위하여 약 225백만 달러(약 2,500억 원)가 투입되었고, 2018년 775대, 2019년 1,019대, 2030년 12,000대의 무배출 버스(ZEB: Zero Emission Bus)를 도입할 예정이다.³⁶

일본³⁷: 기민한 선두주자

일본 정부는 2014년 4월에 발표한 제4차 에너지기본계획에서 ‘수소사회’ 추진을 선언하였다. 그 이후, 산·학·연·관 전문가로 구성된 ‘수소·연료전지전략협의회’에서 수소사회 실현을 위한 ‘수소·연료전지 전략로드맵’을 작성하였고,³⁸ 2017년 12월에 일본정부는 ‘수소기본전략’을 수립하여 공표하였다. 이 기본전략은 2050년까지 민관이 공유해야 할 정책목표, 정책방향, 비전을 제시하고, 이의 실현을 위한 행동계획을 수록하고 있다.

일본의 수소기본전략은 ① 수소 생산 및 공급비용의 감축과 이를

달성하기 위한 국제 수소생산·공급망의 개발, ② 수소 운반·저장 기술 개발, ③ 재생에너지원 전력의 수소화(Power-to-Gas) 기술 개발, ④ 발전부문 수소 이용 확대, ⑤ 모빌리티 수소 이용 확대, ⑥ 산업부문의 무탄소 연료 비중 확대, ⑦ 연료전지 기술 개발 촉진 및 비용 감축 추진, ⑧ 혁신적 기술 개발, ⑨ 국제표준화 활동 및 미래 해외진출 구상 등을 포함하고 있다. 이 중에서 특기할 만한 계획의 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다.

저비용 수소 공급체계 구축: 안정적인 수소 공급망 구축을 위해서는 수소 생산에 투입될 저렴한 해외 에너지를 확보하여 활용하고, 수소 수입을 위한 인프라 정비도 추진할 계획이다. 2030년 경에 상용 수소 공급망을 구축하여 연간 30만 톤 규모의 수소를 공급하며 30엔/ Nm^3 수준의 수소 공급비용³⁹ 실현을 목표로 하고, 2030년 이후에는 20엔/ Nm^3 수준까지 공급비용을 낮추어, 기존 에너지원과 비용 경쟁력을 가지는 것을 목표로 하고 있다.

수소 운송·저장을 위한 기술 개발: 수소의 운송·저장 기술로 액화수소, LOHC, 암모니아, 메탄화⁴⁰ 등의 기술 개발을 포함하고 있다. 일본은 호주-일본 간 액화수소 공급망 구축 실증 사업을 통해 2020년까지 기반 기술을 확립하고 2030년에 상용화를 목표로 하고 있다.⁴¹ 일본 정부는 2020년까지의 일본-브루나이 간 MCH 공급망 구축 실증사업을

통해 기반 기술을 확립하여 상용화를 추진할 계획이다.

일본은 2020년대 중반까지 무탄소 암모니아 공급·이용을 목표로 제시하고 있다. 대량 수소 운송수단으로 파이프라인 확충이 비용·환경 면에서 유력한 대안으로 인식되고 있는데, 일본 정부는 2030년 이후 국제 수소 공급망 상용화에 따른 임해지역에서의 지역적 수소 네트워크 형성 및 메탄화 기술 등을 이용한 기존 도시가스 파이프라인의 활용 가능성도 점검할 예정이다.

재생에너지원 전력의 수소화 기술 개발: 일본 정부는 재생에너지원

전력을 수소로 저장하는 P2G 기술개발을 수소기본계획에 포함하고 있다. 일본은 수전해 장치 설비비용을 감축하기 위해 기술개발을 통하여 2020년까지 5만 엔/kW 수준으로 비용을 낮춘다는 목표를 설정하고 있다. 후쿠시마 사태 이후의 지역사회 복구 노력의 일환으로서 2020년 이후 후쿠시마현에서 진행되고 있는 선진적인 실증 프로젝트 등의 성과에 기반을 두는 P2G 기술의 상용화를 추진할 계획이다. 일본은 2030년 경에 그린수소 수요가 전체 수요의 17%에 달할 것으로 전망하고 있다.

수송 부문의 수소 이용 확대: 일본 정부는 2020년까지 수소차 4만 대, 2025년까지 20만 대, 2030년까지 80만 대의 보급을 목표로 설정하고 있다. 또한, 수소자동차 보급·확대를 위한 인프라 구축의 일환으로 수소 충전소를 2020년까지 160개소, 2025년까지 320개소로 확충할 방침이다. 이를 위하여 관련 제도를 정비하고, 기술개발 지원, 충전기기 관련 표준을 정립해 나갈 계획도 밝힌 바 있다. 해당 계획 추진을 위해 2018년 3월에 설립된 ‘일본 수소 충전소 네트워크(JHyM: Japan H2 Mobility)’를 중심으로 수소 충전소 최적 배치 방안과 수소 공급비용 절감 노력이 이루어지고 있다.

수송부문의 청정연료화 촉진을 위해 연료전지를 활용한 대중 교통수단 보급을 확대하여, 수소버스를 2020년까지 100대, 2030년까지 1,200대 도입하는 목표를 설정하였다. 또한, 산업용 지게차의 수소연

료화 기술개발을 통해 수소 지게차 보급을 2020년까지 500대, 2030년까지 1만대 규모로 확대할 계획이며, 편의점 배송차량 등을 대상으로 수소 상용트럭 기술 개발·적용을 통해 화물수송 부문에서 연료청정화를 추진할 계획이다. 해상수송 부문의 연료청정화를 통한 온실가스 감축을 위해서 해상수송수단 연료전환의 일환으로 수소선박도 개발하여 도입할 예정이다.

수소사회 실현을 위한 정부 재정투입: 일본정부의 세부 재정투입 사업명은 청정에너지 자동차 도입 사업비 보조금, 연료전지 이용 확대를 위한 '에네팜(ENE·FARM)' 등 도입지원 사업비 보조금, 차세대 연료전지의 실용화, 저비용화·내구성 향상 등을 위한 연구·개발 사업비 등을 망라하고 있다.

H 중국: 수소굴기를 위한 전방위적 노력

석탄 의존도가 높고 미세먼지로 대기질 악화가 사회문제가 된 중국은 중앙정부 차원에서 수소에 대한 정책적 관심을 보여 왔으며,⁴² 최근 들어서는 강도 높은 수소산업 육성 정책을 추진하기 시작하였다. 중국이 수소경제에 관심을 갖게 된 배경으로는 에너지 자립도를 높일 필요성과 함께 전기차 기술이 한계가 있는 버스, 트럭 등 대형 상용차의 청정연료를 확보해야 하며, 신재생에너지와 원자력 발전의 확대로 수소 생산비용이 저렴해지고 있다는 것이다.⁴³ 중국 정부가 추진하고 있는 수소경제 정책의 핵심은 수소차 및 수소충전소의 보급 확대, 부품의 국산화, 수소 생산 기반의 구축, 정부 보조·지원금의 확충 등으로 요약된다.

중국정부는 수소의 수요를 2018년 연간 1,900만 톤 수준에서 2050년 5,000만 톤까지 증가시켜 수소가 중국의 최종에너지에서 차지하는 비중을 2050년까지 10% 수준으로 늘릴 계획이다. 수소 제조기술 기반으로는 원자력과 신재생에너지로부터 생산되는 전력을 이용하는 전기분해, 그리고 석탄과 천연가스의 개질, 석유화학 공정 등에서의 부생수소 생산, 새로운 수소제조 기술 개발 등을 제시하고 있다.⁴⁴ 특히 중국은 그동안 태양광, 풍력 등 신재생에너지 발전에 막대한 투자를 하였기 때문에 잉여전력의 발생과 저렴한 발전단가 등 수소를 경제적으로

생산할 수 있는 시장 환경과 기술적 기반이 갖춰진 것으로 평가되고 있다.⁴⁵

중국의 수소차 시장은 당국의 적극적인 지원에 힘입어 급속히 성장하고 있다. 정부의 수소차 보급 목표에 따르면 2020년까지 5,000대, 2025년까지 5만대, 2030년까지 1,000만대의 수소차가 보급될 예정이다. 중국은 승용차보다는 수소버스와 트럭 등 상용차를 중심으로 수소차 보급을 추진하고 있는데, 이는 수소차가 전기차 대비 긴 주행거리, 짧은 충전시간, 우수한 내구성 등 상용차에 특히 유리한 특성이 있기 때문이다. 실제로 중국의 수소차 생산은 2019년 3,018대인데, 이 중 1,335대가 버스이고, 1,683대가 트럭 운송차량이다. 반면 수소 승용차의 보급은 2025년 이후에 본격적으로 활성화할 예정이다. 중국 정부는 수소차 지원 예산을 크게 늘리고 보조금을 제공하고 있다. 2015년 4월에 확정된 수소차 보조금 제도의 경우, 소형 승용차는 대당 20만 위안, 소형버스 및 화물차는 30만 위안, 중대형 버스 및 중형 화물차는 50만 위안의 보조금 정책을 실시하였다.⁴⁶ 중국은 전기차와 같은 다른 친환경차에 대한 보조금은 단계적으로 축소하고 수소차에 대한 보조금을 확대하고 있는데, 이는 이러한 대규모 투자를 통하여 수소차의 경제성을 높이고 신기술 개발을 촉진하기 위한 것이다.⁴⁷

중국 정부는 수소 충전소 건설을 확대하여 2019년 초 20개 수준

이던 수소 충전소를 2020년에는 100개, 2030년에는 1,000개로 늘리겠다는 목표를 설정하고 있다. 또한 수소 충전소 건립비용을 지원하고 있는데, 지원액은 충전소 1기당 최소 200만 위안에서 최대 400만 위안 규모이다.⁴⁸

중국은 2030년까지 수소차 기술을 선진국 수준으로 끌어올리겠다는 계획을 갖고 있다. 특히 수소 상용차 개발과 실용화를 진행 중인 중국 자동차 업체는 오는 2022년 베이징 동계 올림픽에 맞춰 수소 승용차의 시험 운행을 준비 중인 가운데, 수소차 개발과 출시계획을 밝힌 자동차 제조업체는 10여개에 이른다.⁴⁹ 이들은 우한이공대학, 칭화대학, 상하이통지대학 등 지역공과대학과 협업을 통해 전문 인력을 양성하고, 연구소를 설립해 수소차 핵심기술 개발에 노력을 기울이고 있다.

또한, 중국 기업들은 국내 기술 약점을 극복하기 위하여 외국 기업들과 기술협력을 추진하고 있다. 2019년 중국 최대 디젤엔진기업인 웨이차이가 연료전지기술을 보유한 영국의 세레스(Ceres Power)와 글로벌 수소연료전지 업체인 캐나다 발라드(Ballard Power Systems)의 지분을 인수하여 글로벌 수소 업체로 부상하였다. 중국은 캐나다 발라드사와 기술합작을 통해 연간 5,000대 규모의 수소버스용 연료전지 공장을 건설하였고, 현재 약 13개의 자동차 제조사가 수소버스를 비롯한 수소차 개발을 진행하고 있다.⁵⁰

중국은 수소산업의 육성에 기여하고 수소 산업발전 전략을 개발하기 위하여 수소 시범도시를 조성해서 운영하고 있다. 이 시범도시는 수소의 제조부터 이용까지 전체 수소 가치사슬을 한 도시에 배치하여 수소산업을 핵심 산업으로 발전시키는 도시이다. 중국 주요 수소경제 도시로는 루가오(如皋), 타이저우(台州), 윈푸(云浮)가 있다. 이 중에서 루가오는 중국 최초의 수소경제 도시이자, 2016년 유엔개발계획(UNDP)이 지정한 세계 유일의 수소경제 시범도시이다. 루가오는 산업 집중도가 가장 높은 수소 에너지 특색도시로서 총 계획 면적은 약 3.7㎢, 총 투자 규모는 78.5억 위안이다. 수소에너지와 연료전지 산업시설을 안정적으로 배치하는데 성공한 루가오는 수준 높은 수소차·연료전지 기술 및 시스템으로 중국의 수소산업 발전을 주도하고 있다.⁵¹ 이러한 비전이 성공적으로 실현되면 다른 곳에도 적용 가능한 수소 기반 도시의 모델을 가지게 될 뿐만 아니라 다양한 수소 기반 청정 기술 적응에 대한 지식을 얻고 관련 정책과 수소 충전소 등과 같은 사업 모델 개발에 대한 좋은 참고 자료를 제공할 수 있을 것이다.⁵²

또한 중국의 지방정부도 수소차 보급과 인프라 구축에 적극적으로 나서고 있다. 상하이시는 2020년 말까지 3,000대의 수소차를 보급하며 2025년까지 50개 수소 충전소를 건립할 계획이고, 베이징시는 2018년 7월부터 수소차 구입에 대한 정부 보조금 50%를 시에서 추가

로 지원하고 있다. 우한시는 2020년까지 충전소 20곳을 건설하여, 수소차 3,000여대를 보급할 계획이다. 우한시는 2025년까지 세계 수소 도시로 도약하기 위한 목표의 일환으로 3~5개의 세계적 수소 관련 기업을 유치하고 최대한 100개의 수소 충전소를 확보할 계획이다.⁵³

🇪🇺 유럽(EU): 수소 = 환경 + 경제

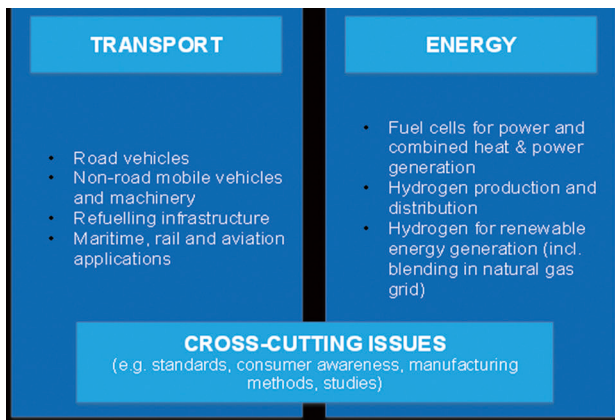
EU는 기술적 측면에서나, 재정, 제도, 인적 자원 및 기업의 자원 보유 등의 측면에서 수소경제 구축을 위한 기반이 다른 지역에 비해 월등히 잘 갖추어져 있다. 그러나 과거에 유럽 국가들의 수소와 관련된 정책과 연구개발 활동은 개별국가 내에서 또는 국가 간에 분산되어 있었다.⁵⁴ EU차원에서 수소경제에 대한 공동 노력은 2004년 EU집행위원회(EC: European Commission)가 발간한 ‘Hydrogen Energy and Fuel Cells, A Vision of Our Future’ 보고서에서 ‘수소경제 구축을 위한 중장기 로드맵’이 제시되면서 태동하기 시작하였다.⁵⁵

EU 차원에서 연료전지와 수소 관련기술의 연구·개발 및 보급 활동을 지원하고 주도하는 기구로 연료전지 및 수소 합동사업(FCH-JU: Fuel Cells and Hydrogen - Joint Undertaking)이 2008년에 설립되었다. FCH-JU는 유럽에서 유일한 공공·민간 협력기구로 공공부문을 대표하는 EC, 업계를 대표하는 ‘Hydrogen Europe’, 연구와 학계를 대표하는 ‘Hydrogen Europe Research’로 구성되어 있다.⁵⁶ EU 차원에서 수소에 대한 연구 및 혁신 프로젝트들은 EC의 지원 하에 대부분 FCH-JU를 통해서 추진되며 관리되고 있다.⁵⁷ FCH-JU가 수행·지원한 사업들은 ① 수송 및 충전 인프라, ② 발전 및 열병합, ③ 수소 생산 및 보급, ④ 초기

시장 조성, ⑤ 복합적(cross-cutting) 현안 등 5개 분야로 구분된다.

제1단계 사업기간인 2008~2013년 동안, FCH-JU 프로젝트의 사업비는 EC로부터 조달되었으며, 약 10억 유로 규모에 달했다. 제2 단계 사업기간인 2014~2020년 동안 수행한 FCH-JU의 사업은 에너지 (연료전지, 수소 생산 및 유통, 재생에너지 기반 수소, 천연가스와 수소 혼합), 수송(도로 차량, 수소 충전소, 해양·철도·항공 수송수단에 적용 등), 복합적 활동(기술표준, 소비자교육 및 홍보, 제조 기술연구 등)에 집중되었다.

EU FCH-JU의 사업 및 활동 분야



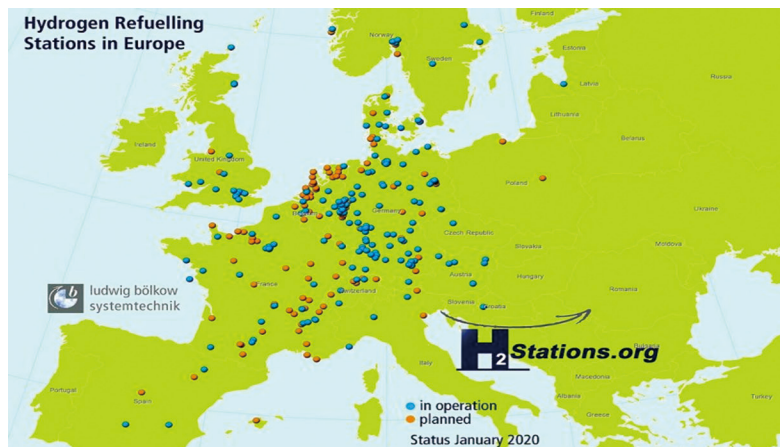
자료: FCH-JU

2014년 5월 EU 이사회는 EU Horizon 2020 프로그램에 따른 연료전지 및 수소 공동 기술 이니셔티브를 계속 추진하기로 공식 합의하였으며, 이 단계(2014~2020년)의 사업 예산으로 총 13.3억 유로를 책정하였다. FCH-JU 사업은 수소 생산비용의 절감과 제품 및 기술의 성능 향상, 대규모 프로젝트인 수송 부문의 수소차, 버스 및 공급 인프라 구축, 수소 생산·유통·저장 및 발전설비 기술의 시장 진입을 위한 상용화를 가속화한다는 사업 목표를 설정하였다.

FCH-JU가 수행한 대표적인 프로젝트로 Hydrogen Mobility Europe(H₂ME) 사업이 있다. 이 사업은 범유럽 차원의 수소 충전소 네트워크 제공을 위한 프로젝트로 독일, 프랑스, 영국, 덴마크, 스웨덴 등에서 추진 중에 있다. 총사업비는 1.7억 유로이며, EU Horizon 2020 프로그램에서 예산을 지원받았다.⁵⁸ 2019년 말 현재 177개의 수소 충전소가 유럽에서 운영 중에 있으며, 이 중 36개의 충전소가 2019년에 새로이 개설되었다. 177개의 수소 충전소 중 절반에 가까운 87개의 수소 충전소를 독일이 보유하고 있는데, 2019년에만 22개소를 새로 열었다. 독일 다음으로 많은 충전소가 있는 프랑스는 26개의 충전소를 운영하고 있으며, 신규로 34개의 충전소를 계획하고 있다. 프랑스는 승용차보다는 버스, 트럭 등 상용차용 수소 충전소 건설에 중점을 두고 있다. 2020년에 네덜란드는 21개 수소 충전소를 새로 개설할 예정이

며, 스위스는 이미 운영 중인 4개에 더하여 6개 충전소를 추가할 계획이다.⁵⁹

유럽의 수소 충전소 현황 (2019년 말)



자료: H2Stations.org(2020)

FCH-JU는 유럽 내에 대규모의 수소버스 도입을 지원해주는 ‘유럽 수소차 공동 이니셔티브(JIVE: Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe)’ 사업도 추진 중에 있다.⁶⁰ 이 사업은 2017년 1월 시작하여 6년간 3,200만 유로의 지원금으로 버스 사업자 및 각국 정부와 협력해 수소버스 보급과 상용화를 지원하고 있는데, 이를 통하여 2023년까지 유럽에서 300대의 수소버스가 신규로 도입될 예정이다.⁶¹

2018년 9월 오스트리아 린츠에서 열린 회의에서 EU 회원국 에너지장관들은 EU 수소 이니셔티브에 서명하였다. 동 이니셔티브는 재생 가능 에너지에 기반한 수소의 활용을 강조하면서 2030년까지 탄소 배출량을 40% 줄이려는 노력의 일환으로 수송과 발전 부문에서 수소 사용을 늘리기 위하여 협력하기로 합의하였다. 비록 법적 구속력은 없으나 이 이니셔티브는 각국 정부가 에너지 저장, 수송, 전력 및 난방에 있어 수소 사용 가능성에 대한 연구 협력을 강화할 것을 촉구하고, 대외 의존도가 높은 화석연료의 사용을 줄이는 데에 있어 재생가능 에너지의 활용을 돕는 수소의 역할에 주목하고 있다.⁶²

EC는 회원국의 에너지정책 담당 부처 대표들로 구성된 비공식 전문가 그룹인 '수소에너지 네트워크(HyENet: Hydrogen Energy Network)'를 2019년에 설립하였다. HyENet는 EU 내에서 수소와 관련된 정책에 대하여 정보 교류, 공동 작업, 모범 사례 및 경험 등을 공유하는 플랫폼 역할을 할 것이며, 제1차 회의는 2019년 6월 브뤼셀에서 개최하였다.

2020년 7월 8일에는 EU 차원의 수소전략이 발표되었다. 「EU 에너지시스템 통합 전략」과 함께 채택된 「EU 수소전략」은 코로나 사태로 침체된 경제를 살리기 위한 '그린딜'의 연장선에서 새로운 일자리 창출, 세계 수소 산업에서의 주도권 확보를 목적으로 하고 있다. 이 전략에서는

기존 연료를 전기로 대체하기 어렵거나 에너지 저장이 필요한 분야에
서 재생에너지 활용을 높이기 위한 수단으로서 수소의 가치를 인정하
고 수소의 활용을 촉진하기 위하여 공공과 민간이 협력하는 유럽 차원
의 조치가 필요함을 명시하고 있다. 이에 따르면 2020년부터 2024년까
지의 1단계에서는 재생에너지 기반 수전해 설비 6GW로 그린수소 100
만톤을 생산하고 이어지는 2025년부터 30년까지의 2단계에서는 수전
해 설비와 그린수소 생산량을 각각 40GW, 1,000만톤으로 늘린다. 그
리고 2050년까지의 3단계에서는 재생에너지 기반 수소 기술이 성숙단
계에 진입하면서 탈탄소화가 어려운 부분까지 대규모로 수소 보급이
이루어진다. 이러한 전략 이행을 위하여 정부, 산업계, 시민사회, 유럽투
자은행이 참여하는 '유럽 청정수소 연맹(European Clean Hydrogen
Alliance)'가 전략 발표와 함께 출범하였다. 한편, 수소 관련 시장의 조
성과 신속한 온실가스 감축을 위하여 그린수소만으로는 공급이 부족할
수 있으므로 다른 형태의 저탄소 수소의 활용도 제시되었다.

H₂ 독일: 그린수소로의 도약

독일은 유럽 국가 중에서 수소경제의 구현을 위하여 수소 인프라
확충을 가장 활발하게 추진하는 나라이다. 독일은 수소 인프라 구축을

위해 2006년에 연방정부 차원의 ‘수소 및 연료전지 기술 국가 혁신 프로그램(NIP: National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology)’을 수립하여 2007년부터 시행하고 있다. 이 프로그램에 따라 독일은 수소 관련 기술 연구개발에 있어 포괄적인 정책을 이행하고 있으며, 2007년부터 2016년까지 초기 10년 동안 수소 인프라 기반 마련에 5억 유로를 지원하였다. 2016년부터 2025년까지는 수소의 양산을 위한 기술 개발과 인프라 구축 등을 위한 제2단계 프로젝트를 추진 중에 있으며, 2016년부터 2026년까지 14억 유로 규모의 예산이 편성되어 있다.⁶³

NIP 사업 실행기관으로 독일정부는 ‘국립 수소·연료전지기술 기구(NOW GmbH: Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie)’를 2008년 2월에 설립하였다. 이 기구의 설립 목적은 수소 및 연료전지 기술 개발과 관련하여 독일이 국제경쟁력을 확보하는 것이며, 수소와 연료전지 기술 R&D, 기술의 상용화, 특히 인프라 및 공급시장 활성화, 비용절감, 신뢰성 향상 등과 관련된 사업을 지원하고 있다. 지원 대상은 산업계·학계의 수소 및 연료전지 개발 사업으로 수송 및 수소 인프라, 가정·상업부문에서 수소연료전지 이용 등을 포함하고 있다.⁶⁴

NIP 프로그램은 연방 교통부, 경제에너지부, 교육부, 환경부에서

운영되며, 사업 예산은 연방정부 차원에서 조달되고 있다. NIP 프로그램의 보조금 지원 분야는 다음과 같다.

- 수송수단(도로, 철도, 수상) 및 항공기 수소연료장치 장착과 그에 따른 연료 공급 및 유지에 필요한 인프라
- 특수 물류 수송차량 중 수소연료장치 장착, 그에 따른 연료 공급 및 유지에 필요한 인프라
- 선박, 차량, 항공기의 에너지 공급을 위한 고효율 열병합발전 투자 보조금
- 공공 수소연료 보급기반 시설 투자 보조금

독일은 재생가능 에너지로 생산된 전력을 수소로 변환하여 저장하였다가 다시 필요할 때 전기로 전환하여 사용하는 P2G 사업을 적극적으로 진행하고 있다.⁶⁵ 독일은 2011년 이래 독자적인 에너지 전환(Energiewende) 정책을 대대적으로 추진해 왔고 그 결과, 전체 발전 믹스에서 재생가능 에너지의 비중이 40% 수준에 이르고 있어 P2G 사업이 타당성을 가질 수 있다. 독일의 P2G 산업은 향후 5년 내에 괄목할 만한 성장세를 보일 것으로 예상되고 있다.⁶⁶ 독일의 P2G 산업 목표는 P2G 용량을 2025년까지 5GW, 2050년까지 40GW로 끌어올리는 것이다. 현재 독일은 40여 건의 소규모 P2G시범 사업을 진행하고 있으며, 가장 큰 P2G 프로젝트는 약 6MW 규모이다.

독일의 P2G 사업의 사례

사업명	마인츠 에너지 단지 (Energiepark Mainz)	엑시트론 무탄소 주거단지 프로젝트 (Exytron Zero-Emission-Wohnpark)
소재지	• 독일 Mainz-Hechtsheim 경제단지	• 독일 라인란트-팔츠주 알차이(Alzey)
개발 (조성) 배경	• 재생에너지를 활용한 물 전기분해로 수소생산 관련 혁신기술 개발	• 태양광 발전으로 P2G 기술을 상용화한 엑시트론사의 스마트 에너지 기술을 응용한 시범 프로젝트
프로젝트 세부정보	• 개발 기간: '13~'15년 • 총 투자 금액: 1,700만 유로 (이 중 정부지원금 50%) • 개발사: Stadtwerke Mainz AG, Hochschule RheinMain, Linde AG, Siemens AG (산학연 협업 프로젝트) • 발전량: 6 MWel, • 수소 생산: 1.000 Nm³/h • 기타 특기사항: 생산된 수소연료를 임시 저장한 후 산업용, 모빌리티, 재변환 (가스 → 전력) 등으로 활용	• 면적: 37채의 가정용 주택 • 개발 기간: '15년 11월 ~ '17년 (건설부지 내 환경 유해물질이 발견돼 현재 중단된 상황) • 총 투자 금액: 아직 미 투자 • 개발사: EXYTRON GmbH • 발전량: 62.5 kWel, 수소생산 10Nm³, SNG (합성 천연가스) 생산 2.5 Nm³/h
참고 사항	• 세계 최대의 친환경 전기 저장시설, 2,000대의 수소차 충전 가능	• 현재 P2G 공법이 투입된 독일 내 20개의 연구 및 시범 시설 운영 중

자료: KOTRA 해외시장뉴스(2018)

독일은 수소차 보급과 인프라 확충을 위하여 H₂모빌리티(H₂ Mobility Gmh & Co KG)를 2016년에 설립하였다. H₂모빌리티는 에 어리퀴드, 다임러, OMV, 쉘, 토탈, 린데(Linde) 그룹 등 6개의 민간기업에 의해 공동 설립되었으며, BMW, 폭스바겐, 혼다, 현대, 도요타, NOW가 자문 파트너로 참여하고 있다. H₂모빌리티는 정부 지원금과 NIP 지

원금을 받아서 독일 내 충전소를 2018년 말 57개에서 2020년에 100개, 2025년까지 400여 개로 확충할 계획이다.

EU 차원의 지원 사업인 수소버스 시범운행 사업으로 프랑크푸르트, 쾰른, 슈투트가르트, 마인츠, 비스바덴 등에서 수소버스 60여대가 시범적으로 운행되고 있다. 또한 독일은 2017년 세계 최초로 수소열차 시험운행도 성공하여, 현재 운행 중에 있다.

독일 정부는 가정용 수소연료전지 개발과 보급지원 사업을 꾸준히 추진하여 왔다. 2009년까지 가정용 연료전지 설비 시험 연구에 약 4천만 유로를 투자하여 800여 개 설비를 시범적으로 보급하였고, 2008~2015년 기간 중에는 약 500여 개의 소형 연료전지를 연방정부의 지원 하에 추진 중인 Callux 프로젝트⁶⁷ 차원에서 가정에 시범적으로 공급하였다. 현재에도 독일 정부는 수소 난방 도입을 확대하기 위하여 가정용 연료전지 난방기기의 시장 진출을 정부에서 지원하고 있다.⁶⁸ 지원 대상은 주거용 건물 내 0.25~5.0kW 용량의 연료전지 난방기기 구매비용과 10년간 정비비용 등을 포함하며, 지원규모는 7,050~28,200 유로이다.

한편 프라운호퍼 연구소⁶⁹는 2019년 10월 '독일의 수소 로드맵 (A Hydrogen Roadmap for Germany)'을 작성하여 정부에 제출하였다. 이 로드맵에서 제시된 주요 내용과 정책 제안은 수소 기술의 비용 절감

및 내구성 향상을 위한 연구개발 투자, 수소차 생산을 촉진하기 위한 규제 개선, 수소에너지 및 수소 운송에 대한 국제 표준 개발 등을 포함하고 있다.⁷⁰

상기 로드맵과 같은 성과와 경험을 바탕으로 독일 연방정부는 2020년 6월에 ‘국가 수소 전략’을 발표하였다.⁷¹ 개도국 수소 사업에 투자될 20억 유로를 포함하여 수소의 생산과 소비에 총 90억 유로 규모의 투자가 이루어질 것이라고 밝혔으며, 독일이 에너지 전환에서 선도적 위치를 다지고 수소를 경쟁력 있는 산업으로 육성할 것임을 천명하고 있다. 독일은 수소를 활용하여 재생에너지로 생산된 전기로 화석연료를 대체하기 어려운 산업, 수송, 난방 분야에서도 온실가스 감축을 실현하면서 미래 일자리 창출에도 도움이 되는 ‘더블 부스트’가 가능할 것으로 기대하고 있다.⁷²

수소를 통한 기후변화 대응을 강조하고 있는 EU 및 독일 정부의 입장에 맞게 동 전략에서는 장기적으로 그린수소만이 활용되어야 한다고 밝히는 한편, 과도기적으로는 CCS 기술로 온실가스 배출량을 대폭 낮춘 블루수소의 사용도 필요하다는 현실적 시각도 분명히 하였다. 한편 독일 국내 재생에너지 자원만으로는 그린수소 수요를 완전히 충족시키기 어려울 것으로 보임에 따라 해상풍력 발전 잠재량이 큰 북해, 발트해 연안의 인근 국가로부터의 전력 수입을 늘리기 위한 협력도 강화

할 방침이며, 태양광 발전 잠재량이 높은 남유럽, 모로코 등 북아프리카 지역도 주요 협력 대상이다.

독일 정부는 2030년의 국내 수소 수요를 90~110TWh 수준으로 추산하고 이를 충족시키기 위해 2030년까지 5GW 규모의 그린수소 생산시설을 건설하여 연간 14TWh의 수소를 공급하는 것으로 계획하고 있다. 이는 그린수소 생산설비가 지금의 200배로 증가하고 그린수소 생산에 2019년 재생에너지 전력 공급량 237TWh⁷³의 8.4%에 해당하는 20TWh의 재생에너지가 소요된다는 것을 의미한다. 독일은 2030년 이후 2040년까지 그린수소 생산시설 5GW를 추가하겠다는 방침도 언급하였다.

이번 전략 발표를 시발점으로 수소에 대한 독일의 투자는 대폭 증가할 것으로 보인다. 앞서 언급된 NIP 하의 투자 외에 2020년부터 2023년까지 에너지·기후기금을 통하여 그린수소 관련 기초연구에 신규로 3.1억 유로, 수소 기술 실증연구에 추가로 2억 유로, 같은 기간 동안 '에너지 전환을 위한 규제 샌드박스'를 통해 수소 기술 혁신에 1억 유로가 투입될 계획이다.

H 호주: 화석에너지 수출에서 수소에너지 수출로

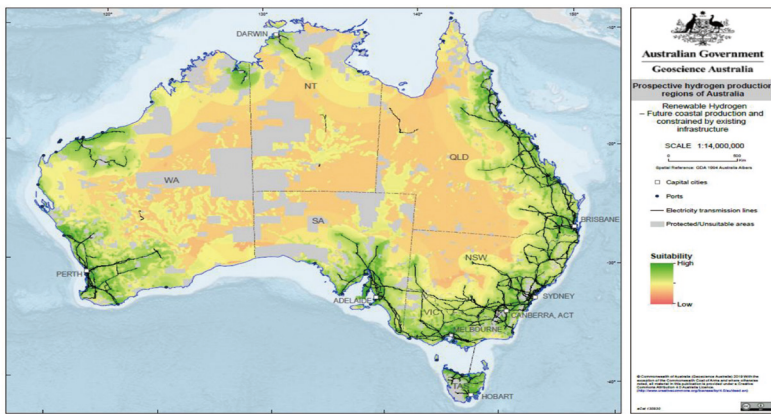
호주정부는 2018년 연구기관인 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)가 작성한 ‘국가 수소 로드맵(National Hydrogen Roadmap)’을 발표하였다. ‘경제적으로 지속가능한 수소산업으로 가는 길(Pathways to an Economically Sustainable Hydrogen Industry in Australia)’이라는 부제를 가진 이 보고서는 호주 수소 산업의 가치사슬 전 과정에 걸친 기술개발, 산업과 시장의 현황 및 전망, 그리고 산업계의 투자 분야 관련 정보를 제시하고 있다.⁷⁴ 이에 따르면 호주가 수소경제를 구현해야 될 이유는 다음과 같다.

- 온실가스 감축 목표 달성을 위한 탈탄소화에 추진에 수소의 역할이 매우 중요
- 전 세계적으로 기술 향상과 비용구조 개선이 수소산업 가치사슬 전반에 걸쳐 가속화
- 호주의 풍부한 천연 자원(태양광, 풍력, 갈탄 및 대규모 토지)과 전문 인력 등 매우 양호한 수소 생산 여건
- 수소의 높은 수출 상품화 잠재력
- 한국, 일본 등에서 수소의 상업적 수요 급성장 전망

위에서 보듯 호주는 수소의 국내 소비와 해외 수출을 동시에 추진하고 있기 때문에 국내 수소 생산 잠재력과 생산 비용에 대해서도 조사·연구가 활발하다. 수소 생산 비용 측면에서 빅토리아주의 Latrobe Valley의 갈탄을 활용하여 수소를 생산하는 프로젝트가 상업화 가능성이 가장 높은 것으로 알려져 있다. 이 프로젝트에는 호주와 일본 양국 정부의 지원 하에 카와사키중공업 등 일본 기업들도 참여하고 있는데 수소 생산비용 목표치를 2030년까지 kg당 약 2.14~2.74호주달러로 정하였다. Latrobe Valley 사업을 포함하여 갈탄을 원료로 수소를 생산하는 경우에는 CCS 설비를 함께 운영하게 함으로써 온실가스 배출을 최소화한 그레이 수소가 출시되도록 할 방침이다. 수전해 방식의 수소 생산과 관련해서는 국가 수소 로드맵에서 고분자 전해질 멤브레인(PEM: Polymer Electrolyte Membrane) 방식 기준으로 2025년까지 수소 생산비용을 kg당 약 2.29~2.79호주달러로 낮출 수 있을 것으로 예상하고 있다.

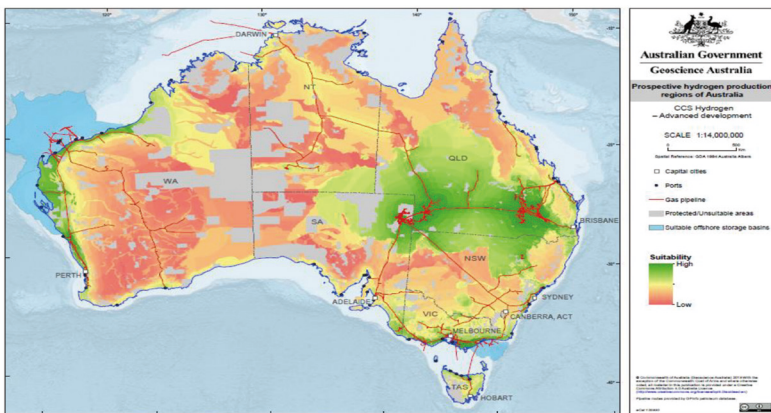
한편 지속가능성을 고려한 호주의 수소 생산 잠재력은 지역에 따라 많은 차이를 보이는 것으로 알려져 있다. 재생가능에너지를 이용한 수소 생산의 경우 높은 일조량으로 태양광 발전에 유리한 내륙의 건조 지역보다 물이 풍부한 해안 지역의 잠재력이 더 높은 것으로 조사되었다. 또한 화석연료에 CCS를 결합하여 수소를 생산하는 경우에는 탄소

지속가능 수소 생산 잠재력 지도 (재생가능에너지 이용)



자료: COAG Energy Council(2019)

지속가능 수소 생산 잠재력 지도 (화석연료-CCS 결합)

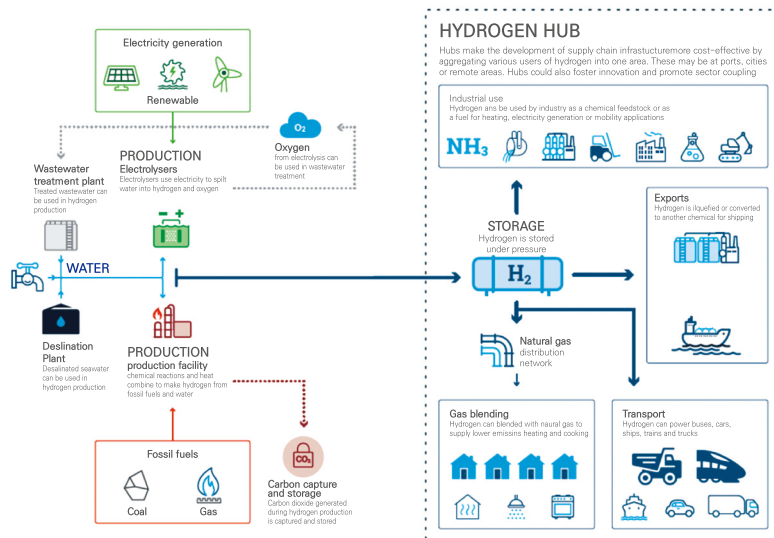


자료: COAG Energy Council(2019)

저장 공간이 확보되어 있는 퀴즐랜드 및 사우스오스트레일리아의 내륙 지역이 유리한 것으로 나타나고 있다.

호주 정부는 2018년의 로드맵 발표 이후 국가 차원의 전략 수립에 착수하여 2019년 11월에 ‘국가 수소 전략’을 발표하였다.⁷⁵ 호주의 국가 전략은 2025년 이전과 이후에 호주가 취해야 할 조치를 밝히면서 연방정부와 각 주정부의 우선순위, 아시아 시장에 대한 3대 수소 수출국 달성과 같은 목표 등을 포함하고 있다. 이러한 국가적 노력에 있어

수소 허브 개념도



자료: COAG Energy Council(2019)

호주는 국제 수소 시장 발달의 불확실성과 늦게 행동에 나설 경우의 리스크를 함께 고려하여 '탄력적(adaptive)' 접근 방식을 취할 것임을 표방한다.

호주 국가 전략의 핵심은 수소 허브의 조성이다. 수소 허브는 대규모 수소 유통 중심지로서 공간적 집약을 통하여 비용효과적인 인프라 개발, 규모의 경제 확보, 허브 내 기술혁신 촉진, 부문 간 융합을 통한 시너지 창출 등의 효과를 가져다 줄 것으로 기대된다. 이러한 허브는 항만, 도시뿐 아니라 수소 수요가 있는 오지에도 건설될 것이다.

국가 전략에서는 2025년 이전을 '기반 구축과 실증' 시기, 2025년 이후를 '대규모 시장 활성화' 시기로 구분하여 각각에 맞는 조치를 제시하고 있다. 2025년 이전에는 우선순위 실증사업 진행, 실증 규모의 수소 허브 구축, 공급 사슬 인프라 필요성 평가 등을 수행하고 이를 위해 규제 및 시장 환경 정비, 국제 수소 거래 촉진을 위한 협력 활동, 다른 나라와의 청정수소 인증제도 공동 개발 등을 추진한다. 2025년 이후에는 지속가능한 국내외 수소 공급사슬의 구축과 유지, 경쟁적인 국내 수소 시장 실현, 대규모 수소 수출 인프라 구축 등을 달성하며, 이를 산업 내 역량 강화, 수소의 안전성과 편익에 대한 신뢰 확보, 연구개발 활동에 대한 표적화된 지원 등을 통해 뒷받침한다.

호주 정부는 수소 국가 전략의 성공 지표로서 아시아 수소 시장에

서 3대 수출국 지위 확보, 탁월한 안전 실적, 수소를 통한 국내 경제적인 편익 및 일자리 제공, 국제적으로 인정받는 청정수소 인증제도 등 네 가지를 설정하였다. 아울러 수소경제 구축에 있어 수소 수출에 따른 편익이 불가결하므로 주요 수입국이 될 우리나라, 일본 등 아시아 주요국과의 협력 강화, 국제 수소시장 형성을 촉진하기 위한 다자간 협력체 활동 확대, 청정수소 인증이나 수소 안전 등에 관한 국제적 표준 제정 등 국제 협력에도 적극적으로 나설 태세를 보이고 있다.

H₂ 국제 협의체 동향⁷⁶

■ 수소위원회(Hydrogen Council)

‘수소위원회(HC: Hydrogen Council)’는 수소경제 관련 글로벌 최고경영자(CEO) 협의체로, 2017년 1월 스위스 다보스 세계경제포럼 개최 기간에 설립되었다. 회원으로는 우리나라의 현대자동차를 비롯한 에너지, 화학, 자동차 등의 산업 분야에 속한 81개 기업이 참여하고 있는데 회원사들의 전체 일자리 수는 6백만 개 이상, 매출은 18.7조 유로 이상이다(2020년 6월 현재). 수소위원회는 수소기술 개발과 상용화에 대한 투자를 촉진하기 위해 G20 에너지환경장관회의, 세계기후행동회의(GCAS: Global Climate Action Summit), 세계경제포럼(WEF:

World Economic Forum), 청정에너지장관회의(CEM: Clean Energy Ministerial), 국제에너지기구(IEA) 등 다자간 국제기구 활동과 연계하며 다양한 분야의 리더들과 수소산업 관련 협력을 활성화하고 있다.

다른 한편으로는 주요국과의 협력 사업에도 참여하고 있는데, 독일과 2023년까지 독일 대도시 지역에 수백 개의 수소 충전소를 건설·운영하기 위한 ‘H₂ Mobility’ 관련 협력을 추진하고 있으며, 일본과는 후쿠시마 수소 프로젝트⁷⁷ 협력과 일본-EU-미국 간 수소 및 연료전지 기술 및 표준, 안전기준 등에 관한 협력 강화를 위한 양해각서를 체결을 추진한 바 있다.

■ 국제 수소연료전지 파트너십(IPHE)

국제 수소연료전지 파트너십(IPHE: International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy)은 수소 및 연료전지 보급·확대를 위한 다자 국제협력기구의 필요성을 인식하여 2003년에 설립된 협력체로서, 수소 및 연료전지 이용을 촉진하기 위한 국제적인 연구 개발 및 시범 사업 등을 수행하고 있다. 설립 목적은 친환경 고효율 에너지 사회인 수소경제의 조기 구현을 위한 국가 간 효과적인 실행 방안을 마련하는 것이다. 주요 활동은 수소경제로의 이행을 위한 국제

공동연구 및 실증사업 추진, 수소기술의 상용화를 위한 협력체계 구축·운영, 수소경제 활성화를 위한 정책 개발, 수소에너지 시스템의 표준화 추진을 위한 국제 포럼 주관 등이다.

회원국으로는 우리나라를 비롯하여 미국, 일본, 중국, 호주, 캐나다, 코스타리카, 프랑스, 독일 등 19개국과 EU로 구성되어 있다. IPHE는 규제·표준 및 안전성 실무그룹(RCSS: Regulations, Codes, Standards & Safety Working Group)과 교육·지원 실무그룹(E&O WG: Education & Outreach Working Group)을 중심으로 활동을

전개하고 있다. 특히 2019년 10월에 서울에서 개최된 32차 운영위원회(Steering Committee)에서 IPHE 2.0 전략을 채택한 이래 청정수소 생산 분석 TF를 설치하여 청정수소의 기술적 정의에 대한 작업에 착수하는 등 수소 관련 국제협력에서 존재감을 높여가고 있다.

■ 청정에너지장관회의의 수소이니셔티브(CEM H2I)

청정에너지장관회의(CEM)는 청정에너지 기술개발 및 보급 확대를 위한 국가 간 협력 활성화와 민관 협력 제고를 위해 미국 주도로 2010년 발족한 회의체로서 회원국은 대부분의 G20 국가들을 포함하여 총 26개국이며, 뉴질랜드와 폴란드는 옵서버로 참여하고 있다.

2019년 캐나다 밴쿠버에서 개최된 제10차 청정에너지장관회의에서 발족한 수소이니셔티브(CEM H2I: CEM Hydrogen Initiative)는 아직 초기 단계로 향후 활동 방향을 정립하는 과정에 있다. 그러나 장관회의 하의 이니셔티브로서 각국의 수소 정책 공유, 정부간 협력 방안 제시, 수소위원회로 대표되는 민간과의 협업에서 중심적 역할을 할 수 있는 잠재력이 있다고 여겨진다. 향후 활동은 청정에너지로의 전환에서 수소와 연료전지 기술의 상업적 확산을 가속화하기 위한 정책, 프로그램, 프로젝트에 대한 국제적인 협력을 도모하는 것을 목표로 추진될

것이며 구체적으로 다음과 같은 활동이 강조되고 있다.

- (이니셔티브 핵심 분야) 수소에너지 안전과 저장에 관한 경험 공유, 일반 대중의 인지도 제고, 수소 공급 비용 절감 및 프로젝트 추진 경험 공유 등
- (산업부문) 산업부문에서의 수소에너지 및 연료전지 기술 보급 확대의 주요 도전과제를 파악하고, 현재의 산업 환경 하에서 수소 및 연료전지 기술의 보급 확대 방안 모색
- (수송부문) 경전철, 해양 수송 수단(marine applications), 대형 화물 차량 등을 중심으로 수소 및 연료전지 기술을 적용한 모범 사례와 경험 공유 활동(공동연구, 워크숍 등) 추진
- (수소 도시) 수소를 이용한 ‘모듈형’ 에너지 시스템 구축 정책, 프로그램 분석 및 수소 도시 구축 경험 공유
- (안전 규제) 수소에너지 안전 규제 관련 프레임워크 개발, 안전 규제 관련 정책 경험 공유

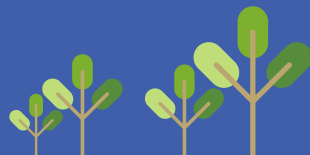
■ 수소장관회의(HEM)

수소장관회의(HEM: Hydrogen Energy Ministerial)는 일본이 주도하고 있으며, 수소만을 논의하는 유일한 장관급 국제 협의체로서

주목받고 있다. 2018년에 시작된 이 회의는 그 결과물이 수소 분야 국제협력에서 빈번하게 인용·공유되면서 일정한 영향력을 확보한 것으로 파악된다.

2018년 10월에 1차 회의가 일본 경제산업성과 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 주관으로 개최되었다. 1차 회의에서는 도쿄 선언(Tokyo Statement)을 채택하여 수소기술협력 및 표준개발, 수소안전 및 공급망 공동연구, 수소의 이산화탄소 등 감축 잠재력 연구, 수소관련 교류, 교육 및 홍보 등에서의 협력 방향을 제시하였다.⁷⁸

그리고 2019년의 2차 회의에서는 수소 모빌리티, 수소 공급 사슬, 부문 간 통합 3개 분야의 30여 개 항목을 열거한 ‘국제적 행동 계획(Global Action Agenda)’을 채택하였다.⁷⁹ 아울러 특히 수소 모빌리티와 관련해서는 세계적으로 10년 내에 1천만 대의 수소 기반 운송 수단을 보급하고, 1만개소의 수소 충전소를 세운다는 ‘10-10-10 목표’를 제시하였다.



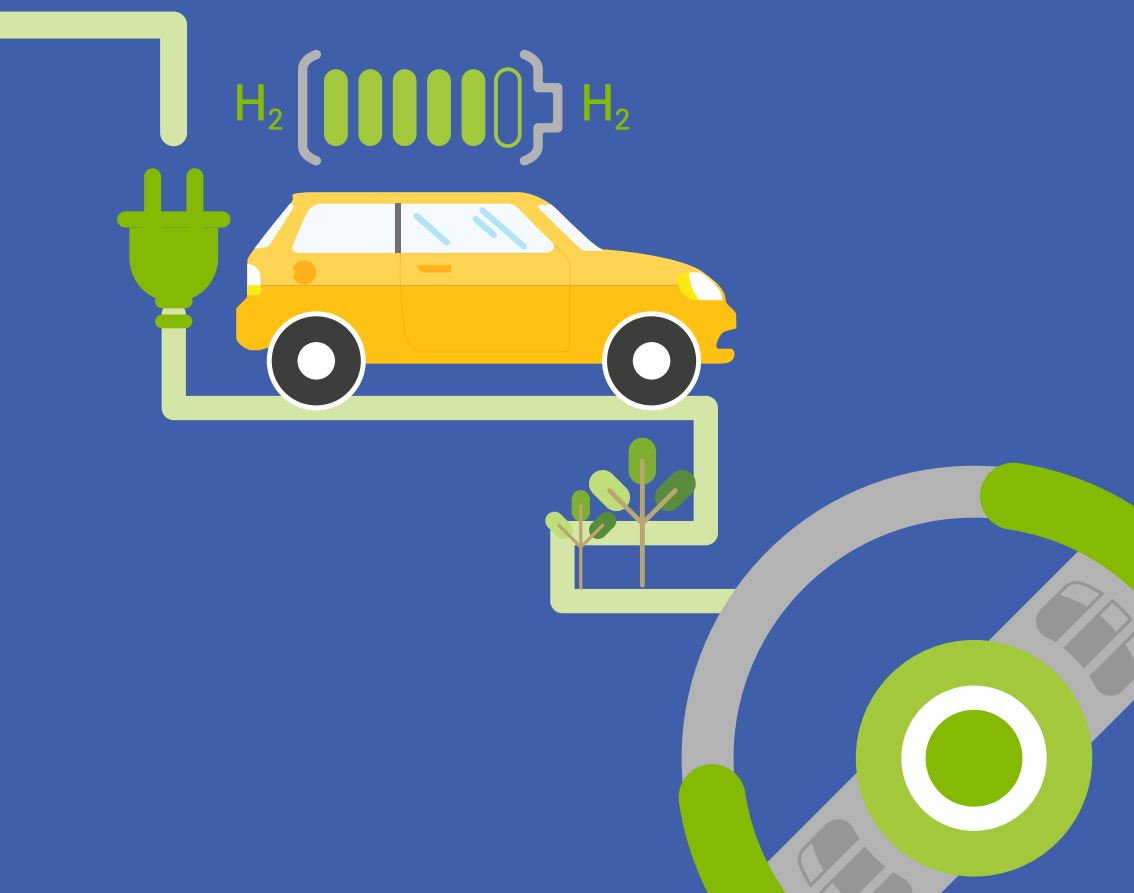
수소경제가 온다

: 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망

- ① 수소 생산
- ② 국내 유통 및 수송
- ③ 수소 모빌리티
- ④ 연료전지
- ⑤ 수소 관련 국제협력

III

국내 수소경제의 현주소와 과제



에너지경제연구원은 에너지 정책 관련 연구 수행에 있어 중추적 역할을 해 온 국책 연구기관으로서 「수소경제 활성화 로드맵」 수립 과정을 비롯한 국내 수소경제 추진 정책 전반에 있어서 다양한 각도로 정부를 지원하면서 업계 및 이해관계자들과의 협업도 강화하고 있다. 에너지경제연구원이 최근 들어 수행한 연구, 작성한 정책자료 등에서 수소의 생산, 수송, 소비라고 하는 가치사슬 전반을 다루고 있다. 수소의 소비 측면에 있어서는 현재 국내에서 가장 주목받고 있는 수소차, 연료전지에 대한 정책 연구가 진행된 바 있으며, 우리나라가 수소경제 선도 국가로 나서기 위해 필요한 국제협력 추진에 관하여도 정부, 유관 단체 등과 협력하고 있다.

본 장에서는 에너지경제연구원이 최근 수행한 수소경제 관련 연구 결과물 또는 조사한 내용을 발췌·요약하였다. 세부적으로는 생산, 수송, 수소차, 연료전지, 국제협력 등 주요 분야에서 현안이 되고 있는 부분을 조망함으로써 국내 수소경제 추진 현황과 함께 향후 과제, 정책적 시사점 등도 본 장을 통해 독자들이 이해할 수 있도록 구성되어 있다.

수소 생산

수소경제 추진은 정부의 혁신성장 정책의 일환인 첨단산업 육성

정책에 무게 중심이 있으며, 그만큼 수소경제의 경제적 가치가 중요하게 고려되었다고 평가된다. 그러나 에너지 정책적인 측면에서는 수소차나 발전용 및 가정·상업용 연료전지 등 수소를 최종에너지로 전환하는 장치인 연료전지 산업의 육성보다는 향후 연료전지에 이용되는 수소가 어떠한 방식으로 얼마나 생산·공급되는지가 더 큰 의미를 지닐 수 있다. 그런데 현재까지 제시된 수소 생산 및 공급전략을 실행하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 과제가 존재한다.

먼저 수소를 활용하는 부문별로 수소 조달계획, 특히 수소 생산방식별 포트폴리오가 구체화될 필요가 있다. 수소 활용 산업인 수소차와 발전용 및 가정·상업용 연료전지 각 부문별 수소 조달계획은 더 구체화되어야 할 부분이 여전히 존재한다. 특히 수송용 연료로서의 충전용 수소와 발전용 연료로서의 수소는 조달하는 방식이 다를 수 있으며, 이에 따라 조달 받을 수소의 생산방식 포트폴리오에도 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 부문별 특성을 반영한 수소의 생산방식 포트폴리오에 대한 구체적인 목표나 계획이 수립되어야 한다.

다음으로 전체 수소 생산방식의 포트폴리오가 구체화될 필요가 있다. 「수소경제 활성화 로드맵」에서는 수소의 주요 생산방식을 부생수소, 추출수소, 수전해, 해외생산 등 4가지 방식으로 구분하여 제시하고 있다. 그러나 수소 수요에 대응하기 위해 각 방식별 공급비중 목표

는 추출수소 비중만 2030년 50%, 2040년에는 30%로 제시하고 있으며, 나머지 생산방식은 ‘그린수소’라는 명칭으로 통합하여 2030년 50%, 2040년 70%로 설정하고 있다. 더욱이 2022년의 경우에는 추출수소 비중마저도 설정되어 있지 않아, 2022년까지 약 5만 톤의 부생수소를 제외한 42만 톤의 수소가 어떤 방식으로 공급될지 현재로서는 추정하기 어렵다. 또한 소위 ‘그린수소’로 분류된 수전해 방식과 해외수입 간 공급 비중도 설정되어 있지 않다는 점도 문제로 지적될 수 있다. 다시 말해 2040년 경에는 전체 공급의 약 70%인 368만 톤 이상의 수소를 이산화탄소가 배출되지 않는 그린수소로 공급하겠다는 의지를 표명하고 있지만, 구체적으로 어떤 방식으로 생산된 그린수소를 얼마나 공급할지에 대한 목표나 계획이 분명하지 않은 것으로 보인다. 그러므로 2020년에는 수소의 활용 부문별로 수소 조달계획을 수립하여 전체적인 수소 생산방식 포트폴리오의 구체화를 추진해야 한다.

■ 수소 생산방식의 포트폴리오 결정을 위한 정책목표

수소 생산방식 포트폴리오를 결정하기 위해서는 이를 통해 추구하고자 하는 정책적인 목표를 우선적으로 결정하고, 아울러 달성할 수 있는 사회적 가치를 구체화·정량화하는 과정이 필요하다. 이러한 정책 목표로서 수소 생산의 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 최소화

하는 “수소 생산의 탈탄소화”와 수소 충전소 기준으로 수소 공급가격을 최소화하는 “경쟁 가능한 수소가격”을 고려할 필요가 있다.

먼저 정부는 수소경제 이행 추진의 정당성을 경제적 가치뿐만 아니라 수소에너지 활용을 통한 온실가스 감축 및 미세먼지 저감 등의 환경적 가치에도 두고 있다고 설명하였다. 이러한 관점에서 보면, 현재와 같이 천연가스 추출방식의 수소 생산을 확대할 경우 온실가스 배출문제를 해결해야 한다는 점이 문제로 지적된다. 천연가스에서 수소를 추출하는 방식은 수증기 메탄 개질(SMR: Steam Methane Reforming)로

메탄(천연가스)과 700℃ 이상의 수증기를 촉매 반응을 통해 수소와 함께 이산화탄소가 생산된다. SMR 방식으로 수소 1kg을 생산하는 경우 이산화탄소는 8.6~9.8kg이 배출되는 것으로 추정된다. 물론, 천연가스 추출방식의 이산화탄소 배출량은 석탄을 이용하는 추출 방식에 비해서 온실가스 및 미세먼지 배출 문제는 상대적으로 심각하지 않다고 평가된다. 그럼에도 수소 생산방식 중 유독 천연가스를 이용한 수소 추출방식이 온실가스 배출 문제의 중심에 있는 이유는 천연가스 추출방식으로 수소 생산을 단기적으로 증가시키는 정책을 추진하기 때문이다.

그러므로 수소의 생산방식 포트폴리오를 ‘수소 생산의 탈탄소화’라는 목표에 부합하는 방향으로 구체화할 필요가 있다. 이때 수소 생산방식을 단순히 생산과정에서 배출되는 온실가스의 양만으로 평가하는 것으로는 부족할 수 있다. 대신 유럽연합(EU)에서 추진하고 있는 그린 수소 인증제도(CertifHy Guarantee of Origin), 보다 정확하게는 그린 수소 원산지 표시제도에서 활용하고 있는 “CertifHy 프리미엄 수소”의 획정방식을 참조하여 수소 생산방식별로 수소 원료의 생산과정까지 포함하는 수소 생산의 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 평가하는 것이 적합할 것으로 생각된다.

2018년 수행된 한 연구⁸⁰⁾는 우리나라 수소 생산방식별로 전 과정 온실가스 배출량 분석 결과를 보여주고 있는데, 수소 1kg 생산 시 발생

하는 온실가스가 매립지 가스 추출수소는 1.9kg, 납사 분해공정 부생수소는 2.3kg, 코크오븐가스(COG: Coke-Oven Gas) 추출수소는 4.2kg 등으로 나타나 온실가스 배출이 상대적으로 적은 저탄소 수소 생산 방식이라고 이야기한다. 반면 수소 1kg 생산 시 천연가스 추출수소는 11.3kg⁸¹, 전력 계통 전기를 활용한 수전해 수소는 26.6kg의 온실가스를 배출하여 상대적으로 배출량이 많은 생산방식이라고 보고하고 있다. 물론 재생에너지와 연계된 수전해 수소는 직접적 온실가스 배출량이 0kg으로 수소생산의 탈탄소화를 위해서는 천연가스 추출수소나 전력 계통 연계 수전해 수소 등의 생산 확대보다는 다양한 방식의 저탄소 수소와 재생에너지 연계 수전해 수소의 생산 확대를 추진해 나가야 한다.

다음으로 「수소경제 활성화 로드맵」은 “수소차 및 연료전지 세계 시장 점유율 1위 달성”을 목표로 수소차와 발전용 및 가정·산업용 수소 연료전지 등 수소의 활용산업에서의 시장창출과 육성에 중점을 두고 있다. 이를 위해서는 수소 연료전지 이용 어플리케이션의 국내 보급 확대가 필수적이다. 수소차 보급이 확대되기 위해서는 경제적인 측면에서 수소차와 대체 관계에 있는 자동차의 연료비용과 최소한 비슷한 수준의 수소 충전요금(수소 판매단가)이 설정되어야 한다. 다시 말해 휘발유, 경유, 수송용 전기 등과 같은 수송연료와 경쟁이 가능한 수준으로 수소 충전요금이 형성되는 것이 수소경제 활성화 로드맵의 이행에 필

수적인 조건인 것이다. 수소차 충전소의 민간 운영사업자 수익성까지 감안하여 경쟁력을 갖춘 수소 충전요금 달성을 위해서는 수소 생산 및 수송 단가를 낮춰야 한다. 이러한 견지에서 수소경제 활성화 로드맵은 수소 충전소 공급가격(도매가격)을 2022년에는 시장 초기 가격이라 할 수 있는 6,000원/kg, 2030년에는 4,000원/kg, 2040년에는 3,000원/kg 수준으로 낮추는 것을 목표로 한다. 이러한 점들을 감안하여 수소 충전소 충전요금이 다른 수송에너지와 경쟁 가능한 수소가격이 될 수 있도록 수소 생산방식 포트폴리오 목표를 수립하는 것이 바람직하다.

물론 ‘수소생산의 탈탄소화’와 ‘경쟁 가능한 수소가격’이란 두 가지 정책 목표를 달성할 수 있는 수소 생산방식 포트폴리오를 결정하는 것은 어려운 과제이지만, 성공적인 수소경제 안착을 위해서는 반드시 해결해야 하는 숙제이다.

■ 수소 생산방식의 적정 포트폴리오 검토

현재까지 계획된 수소 조달계획을 토대로 추정된 수소 생산방식 포트폴리오를 도출했을 경우 천연가스 추출방식의 비중이 2018년 99.9%, 2022년 90%, 2030년 84%이며, 2040년에는 85%로 감소하기는 하지만 여전히 절대적으로 높은 비중을 차지하는 것으로 나타난다.

수소 생산방식의 포트폴리오(BAU)

구 분	부생수소 (납사 분해)	추출수소 (천연가스 개질)	수전해		수입 수소	합계
			전력계통	재생 에너지		
2018	0.1%	99.9%	0%	0%	0%	100%
2022	10%	90%	0%	0%	0%	100%
2030	3%	84%	0%	2%	11%	100%
2040	2%	85%	0%	3%	10%	100%

자료: 에너지경제연구원 자체 작성 자료

만약 수소 생산의 적정 포트폴리오를 수립하고 이를 달성하기 위한 노력을 하지 않는다면, 2030년을 넘어 심지어 2040년에도 수소 공급은 절대적으로 천연가스 추출방식에 의존할 수밖에 없다. 그리고 이러한 상황이 나타나는 것은 수소 수요의 절대적 비중을 차지하는 발전용 연료전지 부문이 아직까지 천연가스 추출방식에 의존하고 있으며, 이러한 상황을 변화시킬 구체적인 계획을 제시하지 않고 있다는 데에 있다.⁸²

이를 감안하여 수소 생산방식별 공급 가용량 제약조건을 고려하면서, 앞에서 정책목표로 제안한 수소 생산 전 과정에서 온실가스 배출 최소화(수소생산의 탈탄소화)와 수소 공급가격 최소화(경쟁 가능한 수소가격)를 달성할 수 있는 적정 수소 생산방식 포트폴리오를 추정하여 제시할 수 있다.

적정 수소 생산방식의 포트폴리오(권고안)

구 분	부생수소 (납사 분해)	추출수소 (천연가스 개질)	수전해		수입 수소	합계
			전력계통	재생 에너지		
2018	0.1%	99.9%	0%	0%	0%	100%
2022	10%	90%	0%	0%	0%	100%
2030	16%	50%	14%	10%	10%	100%
2040	5%	30%	1%	7%	57%	100%

자료: 에너지경제연구원 자체 작성 자료

2022년에는 수소 생산 포트폴리오가 약 10%의 부생수소와 90%의 천연가스 추출수소로 구성되지만, 2030년까지는 천연가스 추출수소 비중을 50%로 낮추고 다양한 생산방식의 비중을 높여서 수소 생산 포트폴리오의 다각화를 달성해야 한다. 특히 상대적으로 저탄소 생산방식인 납사분해(Naphtha Cracking) 공정의 부생수소가 15.5%로 확대되며, 이산화탄소 발생이 없는 재생에너지 연계 수전해 수소의 비중을 9.6%까지 늘어난다. 다만, 부생수소와 재생에너지 연계 수전해 수소의 공급제약을 감안하여, 부족한 수소 공급 물량은 전력 계통 연계 수전해 수소가 일정 비중(13.7%)을 담당할 필요가 있다.

한편 2040년까지 수소 생산 포트폴리오에서 천연가스 추출수소 비중이 30%까지 감소하는 대신에 줄어드는 수소 공급 물량의 대부분(56.6%)은 해외로부터 수입되는 무탄소 수소가 차지하는 형태의 수소 생산 포트폴리오를 구성한다. 또한 해외로부터 수입되는 무탄소 수소의 비중 확대로 온실가스 배출에서 상대적 열위에 있는 저탄소 납사분해 공정의 부생수소 비중이 축소(5.3%)될 필요가 있다. 비록 해외에서 수입되는 수소로 인하여 재생에너지 연계 수전해 수소의 비중도 6.7%로 축소되지만, 시장규모 확대로 공급물량은 2030년보다 약 2배 규모로 증가할 것으로 예상된다.

결국 이처럼 2040년까지 천연가스 추출수소 의존도를 낮추기

위해서는 납사 분해공정 부생수소나 수전해 수소, 나아가 해외에서 수입하는 무탄소 수소로 전환이 가능하도록 수소를 직접 사용하는 발전용 연료전지 시설 구축을 확대할 필요가 있다. 이를 유도하기 위해서는 앞에서 언급했던 ‘친환경 CO₂-free 수소 인증제’ 도입과 함께 친환경 무탄소 수소를 이용하는 발전용 연료전지의 신재생에너지 공급인증서 (REC: Renewable Energy Certificate) 가중치를 조정하는 정책도 검토할 필요가 있다.

H₂ 국내 유통 및 수송

정부는 수소경제 활성화 로드맵 이행을 통해 수소경제 선진국으로 진입할 계획이다. 정해진 목표를 달성한다면 2040년까지 290만 대의 수소차와 발전용 및 가정·건물용 연료전지 각 8GW, 2.1GW의 보급이 이루어지고, 연간 526만 톤의 수소를 공급하면서 공급가격은 3,000 원/kg까지 떨어지게 된다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 수소의 생산 및 사용뿐만 아니라 수송 역시 비용 효과적으로 이루어질 필요가 있다.

부생수소는 석유화학시설이나 정유시설이 위치한 울산, 여수, 대산, 인천 등에서 생산되며, 수전해수소는 잉여 신재생에너지 전력이 발생될 대규모 태양광발전이나 풍력발전 단지에서 생산될 것으로 예상된다. 추출수소 생산설비는 대도시 주변의 천연가스 공급망 근처에 건설될 가능성이 높고, 소규모 분산형 추출수소는 대도시나 고속도로 등에 건설될 가능성이 높다.

에너지용 수소 사용설비인 수소자동차는 도시지역이나 고속도로 휴게소의 충전소를 통해서 수소를 공급받을 것이며, 발전용 연료전지와 가정·건물용 연료전지는 당분간은 기존의 천연가스 배관망을 이용하여 공급받은 천연가스를 개질하여 수소를 사용할 것으로 예상된다. 2035년부터 도입될 수소 가스터빈 발전은 개질설비를 갖추는 것보다는

별도의 배관망을 통해서 수소를 직접 공급받을 것으로 예상된다.

이와 같이 수소를 생산하는 지역은 석유화학단지과 대도시 주변의 천연가스 배관망 근처, 대규모 태양광과 풍력발전 단지로 예상된다. 반면 자동차용 및 가정·건물용 수소 사용은 대도시 지역에서, 발전용 수소 사용은 비도시지역에서 이루어질 것으로 예상된다. 이처럼 수소의 생산과 사용이 지역적으로 분리되어 있기 때문에, 2040년의 수소 공급 가격 목표인 3,000원/kg 달성을 위해서는 비용 효과적인 방식으로 수송이 이루어질 필요가 있다.

■ 수소 수송 기술

수소의 수송기술은 크게 기체수송과 액체수송으로 구분된다. 기체수송은 튜브트레이일러를 통한 고압수송과 배관을 통한 저압수송이 있으며, 액체수송은 저압의 액화수송과 액상수송으로 구분할 수 있다.

수소는 상온/상압에서 기체상태로 존재하기 때문에 부피당 에너지밀도가 낮은 특징을 지니고 있으며,⁸³ 기체 상태의 수소 저장 및 운송에는 폭발을 방지하기 위해 고강도의 고압가스 탱크를 사용한다. 튜브트레이일러를 통한 고압기체 수송은 수소인프라 초기에 중장거리용 수송에 사용하는 기술로서, 초기 자본비용이 적지만 1회 운송량도 적다

는 단점이 있다. 현재 우리나라에서 가장 많이 사용되고 있는 type1은 압력이 200bar,⁸⁴ 최대 수송용량은 340kg이며, 2020년 초 현재 553대의 튜브트레일러⁸⁵를 통해 운송되고 있다. type4의 압력은 450bar, 최대 수송용량은 950kg이며, type1에 비해 수송 용량은 두 배 이상이지만 무게는 더 가볍다는 특징이 있다(type1의 중량은 31톤, type4의 중량은 20톤).⁸⁶

배관을 통한 수소 수송은 초기 자본비용이 매우 높은 단점이 있지만 대규모 장거리 수송이나 소규모 단거리 수송에 유리한 방식이다. 공급압력은 20bar이지만 대량 수송을 위해 공급압력을 100bar까지

높이고, 배관의 수명을 50년으로 연장할 수 있는 소재 및 설치에 대한 기술개발이 해외에서 진행되고 있다. 우리나라에는 2020년 초 기준으로 울산화학단지에 99km, 여수화학단지에 63.3km, 대산화학단지에 13.6km, 안산에 12.9km, 군산에 3.8km 등 전국에 192.6km의 수소 배관망이 건설되어 있다.

액화수송은 기체수송에 비해 안전하고, 부피가 1/700이기 때문에 많은 양을 수송할 수 있지만 초기 투자비용이 높고, 수소의 액화에 많은 에너지가 소비된다. 수소를 영하 253℃까지 냉각하여 1~2bar 압력 이하의 액체 상태 수소를 탱크로리로 운송하는 방식으로 고압가스 수송과 관련된 규제의 적용을 받지 않는 수송방식이다. 우리나라에서는 2023년까지 하루 0.5톤 규모의 수소 액화실증플랜트를 구축할 계획으로 핵심설비의 국산화 연구가 진행되고 있으며, 일본에서도 하루 5톤 규모의 수소 액화플랜트 개발을 진행하고 있다.

액상수송은 수소를 액상 암모니아 또는 LOHC와 같은 액상유기 화합물에 저장하여 운송하고, 사용처에서 수소를 추출하는 운송방식이다.⁸⁷ 액상수송은 장거리 수송에 유리한 방식이지만 수소를 저장 및 추출하는 두 번의 화학반응에 많은 에너지가 소모된다는 단점이 있다.⁸⁸ 액상수송 기술은 우리나라에서 원천기술 개발 단계, 해외에서는 실증 단계에 있는 것으로 평가된다.

■ 수소 유통량 추이

수소를 소비하는 대부분의 기업들은 자체적으로 수소를 생산하여 사용하고 있지만, 기업별 및 계절별로 수소의 공급이 균형을 이루지 못하면서 수소 유통시장이 형성되고 있다. 수소 유통기업이 수소를 생산하는 기업으로부터 저순도 수소를 공급받아 수소정제설비를 통해 고순도 수소로 정제한 후 공급하게 된다. 또한 개질설비를 설치 및 운영하여 수소의 공급을 조절하는 역할도 유통기업이 수행하고 있다.

2019년 우리나라의 연간 수소 유통량(자체 소비 수소 제외분)은 약 21만 톤으로 수소 생산량의 11.2%를 차지하고 있다. 지역별로는 울산이 수소 유통량의 40.9%, 여수가 38.4%, 대산이 19.3%, 기타지역이 1.4%를 차지한다. 업종별로는 석유화학이 99.0%로 유통량의 대부분을 공급한 반면 또 다른 주요 수소 생산 업종인 정유산업에서는 수소를 외부로 판매한 실적이 나타나지 않았다. 판매되는 수소의 생산방식은 개질설비가 35.0%, 소금물 분해가 30.3%, 프로판 탈수소(PDH: Propane Dehydrogenation)가 18.7%, 납사 분해가 15.0%, 코크오븐가스가 1.0%를 차지했다. 수소 유통을 수송방식에 따라 분류하면 수소 배관에 의한 유통이 92.7%로 높은 비중을 보이며, 튜브트레이일러를 통한 유통은 7.2%에 불과한 것으로 추정된다.⁸⁹

2019년 부생수소의 외부 판매량

(단위: 천 톤/연, %)

지역	판매량		업종	판매량		방식	판매량	
	판매량	비중		판매량	비중		판매량	비중
여수	80.7	38.4	정유	-	-	개질	73.6	35.0
울산	86.0	40.9	석화	208.2	99.0	납사분해	31.5	15.0
대산	40.6	19.3	기타	2.0	1.0	PDH	39.4	18.7
기타	3.0	1.4		210.2	100	소금물 분해	63.7	30.3
	210.2	100				COG	2.0	1.0
						소계	210.2	100

자료: ㈜덕양 내부자료, 신소재경제신문(2020)을 참고하여 에너지경제연구원 작성

수소 유통비용 추정

• 튜브트레일러 수송비용

고압기체 튜브트레일러의 압력은 200bar로 회당 수송량은 최대 300kg이지만, 잔압(50~80bar)을 감안하면 실제 수송량은 250kg으로 줄어든다. 40km/h의 운행속도로 편도 100km를 왕복운행 한다면 5시간이 소요되며, 하루에 2회 운행할 경우 튜브트레일러 1대가 하루에 500kg의 수소를 수송할 수 있다.⁹⁰ 이용률을 20%로 가정하는 경우에도 튜브트레일러의 연간 수송량은 한 대당 36,500kg⁹¹에 이를 것으로 추정된다.

튜브트레일러의 구입가격은 약 2억 원이며, 5년마다 1,000만원의 검사비용이 소요되는 것으로 알려져 있다. 튜브트레일러의 수명을 10년으로 가정하는 경우에 구입 및 검사비용은 연 2,200만원에 이를 것으로 추정된다. 튜브트레일러의 연비는 경유기준 km당 2리터로 2018년 자동차용 경유가격(1,391.9원/리터)을 적용하면 유류비용은 km당 2,783.8원에 해당하며, 하루 400km를 운행(이용률 20%)한다면 연간 8,129만원의 유류비가 소요될 것으로 추정된다. 인건비는 시간당 34,000원(각종 수당 및 비용 포함)으로 하루 10시간 근무할 경우 인건비는 연간 1억 2,410만원으로 추정된다.

튜브트레일러 수송비용 추정

구입비용 (대/원)	검사비용 (원/대/5년)	유류비용 (원/리터)	인건비 (원/시간)	운행거리 (km/대/회)	수송량 (kg/대/회)	이용률
2억원	1,000만원	1,391.9원	34,000원	200km	250kg	20%

자료: 신소재경제신문(2020), 홍성안(2020)을 참고하여 에너지경제연구원 작성

연간 비용(2억 2,739만원)을 연간 수송량(36,500kg)으로 나누면 수송 단가는 수소 1kg당 6,230원으로 추정된다. 튜브트레일러 이용률을 50%로 올리면 수송 단가는 3,828원/kg으로 낮아지고, 이용률을 90%로 올리면 3,117원/kg으로 낮아진다. 수송용량이 800kg(450bar, 이용률 20%)으로 상승하면 수송 단가는 1,947원/kg으로 낮아지고,

이용률이 50%, 90%로 높아지는 경우에 수송 단가는 각각 1,196원/kg, 974원/kg으로 낮아진다. 800kg 용량의 튜브트레일러를 50% 이용률로 운용하면 수송단가는 1,196원/kg까지 떨어져, 현재 상황을 참고하여 설정한 250kg 용량-이용률 20%의 수송단가인 6,230원/kg보다 80%까지 낮아질 것으로 추정된다.

현재 국회에 설치된 수소 충전소의 경우 수소 수송비용이 약 3,000~4,000원/kg에 이르고 있는 것으로 알려지고 있다. 이는 위에서 개략적으로 추정한 튜브트레일러에 의한 수소 수송비용 추정치 (3,117~6,230원/kgH₂) 중에서 현재 수소 수송비용은 이용률 50%의 250kg 수송 용량 튜브트레일러의 수송 단가에 해당된다.

튜브트레일러 수송비용 추정

(단위: 원/kgH₂)

구분		이용률		
		20%	50%	90%
수송량	250kg/대	6,230	3,828	3,117
	800kg/대	1,947	1,196	974

주: 800kg의 수송용량 튜브트레일러는 모든 조건이 250kg과 동일하다고 가정

• 배관 수송비용

배관의 길이는 비교의 편의를 위하여 튜브트레일러와 같이 100km를 건설하는 것으로 가정하는데, 100km의 수송거리는 도시와 도시, 그리고 지역과 지역을 연결하는 주배관망에 해당한다는 점을 감안하여 배관의 지름은 20인치로 가정한다. 이러한 종류의 배관 투자비는 최근 km당 10억 원을 상회하고 있으며, 4km마다 안전시설을 설치해야 한다고 가정하면 배관 투자비는 km당 평균 34억 원을 상회하는 수준으로 예상된다. 그러므로 100km의 배관 건설에 소요되는 총 투자비는 3,412억 5,000만원으로 추정되며, 배관의 수명을 40년으로 가정하면 연간 투자비는 68억 2,500만원으로 추정된다.

튜브트레일러와의 수송량 비교를 위해 20인치 배관의 연간 수소 수송량을 36,500kg로 가정하면 배관의 수송 단가는 233,733원/kg에 이를 것으로 추정된다. 그러나 수송량이 5,000Nm³/h 규모의 추출수소 생산설비의 수소 생산량(가동율 90% 가정 시 연간 3,543톤 생산)으로 증가하는 경우의 수송 단가는 2,408원/kg로, 10,000Nm³/h 규모의 생산설비의 수소 생산량(7,086톤)을 가정하면 수송 단가는 1,204원/kg으로 하락한다. 튜브트레일러와 동일한 수송비용(6,230원/kg)에 해당하는 연간 수소 수송량은 1,369톤으로써, 약 2,000Nm³/h의 규모의 추출수소 생산설비의 공급량에 해당된다.

배관의 수송비용 추정

(단위: 원/kgH₂)

구분	수송량(kg/연)					
	36,500	91,250	164,250	1,369,382	3,543,052	7,086,105
수송단가	233,733	93,493	51,941	6,230	2,408	1,204
비고	250kg 튜브트레일러			2,000N m ³ /h	5,000N m ³ /h	10,000N m ³ /h

자료: 에너지경제연구원 자체 작성 자료

• 튜브트레일러와 배관의 수송 단가 비교

튜브트레일러를 통해 수소를 수송하는 경우에 튜브트레일러의 이용률을 높이고, 수송량을 증가시키면 수송 단가가 낮아지는 것으로 나타났다. 현재는 수소의 사용량이 적고 출하시설에 제약이 있어서 튜브트레일러의 이용률이 낮은 것으로 알려져 있다. 그러므로 튜브트레일러의 수송 단가 하락을 위해서는 튜브트레일러의 이용률을 제고시킬 수 있는 운영방안 마련과 고압(800bar) 튜브트레일러의 개발과 보급이 필요할 것으로 생각된다.

배관의 경우에는 수송량을 증대시키는 것이 경제성을 제고시킬 수 있는 유일한 방안으로 보인다. 따라서 수소를 대규모로 사용할 수 있는 수요지에 배관을 건설하여 수소를 공급하는 것이 효율적인 방안이다.

앞에서 살펴본 것처럼 편도 100km⁹²의 거리를 튜브트레일러와

배관을 통해 수송하는 경우를 비교하면, 수송량이 적고 단거리인 경우에는 튜브트레일러의 수송 단가가 배관보다 낮지만 수송거리가 길어지고 수송량이 많을 경우에는 배관의 수송 단가가 튜브트레일러보다 낮을 것으로 보인다.⁹³

■ 정책적 시사점

「수소경제 활성화 로드맵」이 성공하기 위해서는 수소의 생산과 수송 및 사용 설비 등 모든 분야에서 비용 절감 노력이 이루어져야 한다. 수소의 수송비용을 절감하기 위해서는 튜브트레일러의 경우에 이용률을 높이고 450bar 이상의 고압기체 수송기술(수송량 800kg/대)을 개발하는 것이 중요하다. 아울러 수소의 수요증가에 대비하여 액화수소 수송기술도 개발할 필요가 있다.

또한 대규모 수소 수요가 발생하는 지역에 대하여는 배관을 설치하여 수송하는 것이 비용 효과적인 방안인 것으로 나타났다. 특히 수소를 대량으로 소비할 가능성이 있는 광역시 단위의 시내버스에 대해서는 공영버스차고지까지 배관을 설치하는 방안을 마련할 필요가 있다. 배관을 건설하지 않고 튜브트레일러를 이용하는 경우에 빈번한 수송은 주민수용성 등의 문제를 발생시킬 가능성이 높다. 그러므로 거점형 수소

생산기지와 버스공영차고지를 배관으로 연결하는 것을 우선적으로 추진하고, 향후 일반 수소 충전소의 수요가 증가하는 상황에 따라서 환상형 배관망을 구축하는 방안도 고려할 필요가 있다.

정부가 「수소경제 활성화 로드맵」에 제시한 것처럼 장기적으로 그린수소 사회로 전환하기 위해서는 2030년 이후 수전해수소가 빠른 속도로 도입되어야 한다. 태양광이나 풍력발전에서 생산된 전력을 이용하여 수소를 생산하는 것이 그린수소 사회로 진입할 수 있는 지름길이 될 것이다. 따라서 잉여 신재생전력을 이용한 수전해수소 생산전략을 구체적으로 수립할 필요가 있으며, 이와 병행하여 태양광발전 단지나 풍력발전 단지에서 생산된 수전해수소를 효율적으로 수송하기 위한 정책도 마련해야 할 것이다.

수소 모빌리티

수소경제 활성화에 대한 관심이 국제 사회에서 높아지고 있는 가운데 수송 부문에서의 수소 활용 확대는 주요국을 중심으로 의미 있는 영향을 끼칠 수 있을 것으로 보인다. 현재까지 수소전기차의 판매량은 미미했지만 세계의 주요 자동차 제작사들을 중심으로 수소 자동차 공급역량이 늘어가는 중이다. 글로벌 시장분석 기업인 Allied Market

Research는 최근 자료에서, 글로벌 수소연료전지차 시장규모가 2018년 6억 5천만 달러에서 2026년 420억 달러 규모로 급성장할 것이란 전망을 제시하고 있다.⁹⁴

그러나 수소자동차가 지속적으로 발전하는 배터리 기술로 무장한 전기자동차와의 경쟁에서 우위를 점하기 위해서는 아직은 다양한 해결 과제가 남아있는 것으로 평가되며,⁹⁵ 단기적으로는 버스와 대형 트럭과 같은 대형차량(heavy duty vehicle)의 연료로 수소가 사용될 가능성이 높다는 견해가 일반적이다. 그럼에도 사계절이 뚜렷한 우리나라의 기후적인 여건을 고려할 때 전기자동차는 겨울에 운행가능 거리가 축소될 수 있다는 불편요인이 있지만,⁹⁶ 수소자동차는 이와 같은 불편 요인이 없는 장점을 보유하고 있다.

■ 수소 모빌리티 정책 현황

「수소경제 활성화 로드맵」에서 수소 모빌리티 이행부문을 살펴보면 내수 기준으로 2040년까지 수소차의 누적 판매 목표를 290만대로 설정하고 있으며, 2040년의 수소 공급 능력을 연간 526만 톤 규모로 높이는 것을 목표로 한다. 또한 2040년까지 도달하고자 하는 수소의 가격 수준을 2022년 대비 절반인 kg당 3,000원으로 제시하고 있다.

국내 수소 모빌리티 주요내용

수소 모빌리티 이행 로드맵				수소 공급 계획				
구분	'18년	'22년 '40년		구분	'18년	'22년	'30년	'40년
수소차	0.9천대	6.7만대	290만대	공급량	13만톤 /연	47만톤 /연	194만톤 /연	526만톤 /연
승용차	0.9천대	6.5만대	275만대		공급 가격	-	6천원/kg	4천원/kg
택시	-	-	8만대	공급 방식		부생 추출수소 중심 → 수전해 수소 및 해외생산 확대		
버스	2대	2천대	4만대		* '40년 수소 공급량의 70%를 수전해 생산 및 해외 수입으로 확보			
트럭	-	-	3만대					
수소 충전소	14개소	310개소	1,200개소 이상					

자료: 관계부처 합동(2019a)

2019년 10월에 발표된 미래자동차 산업 발전 전략에서는 수소차와 전기차를 포함하는 미래차 산업의 발전을 위한 정책 목표를 제시했는데, 주요 목표로 국내 신차 판매에서 두 차종을 합한 판매 비중을 2019년 2.6%에서 2030년 33%까지 끌어올리겠다는 목표를 설정했다. 이와 더불어 세계 수소차, 전기차 시장에서 양쪽을 합쳐 10%의 판매 점유율을 달성하겠다는 목표를 설정했다. 충전인프라 부문에서는 주요도시에서 20분 이내에 충전소 도달이 가능하도록 하겠다는 비전 아래 2030년까지 전국에 수소 충전소 660기를 구축하는 것을 목표로 세웠다.

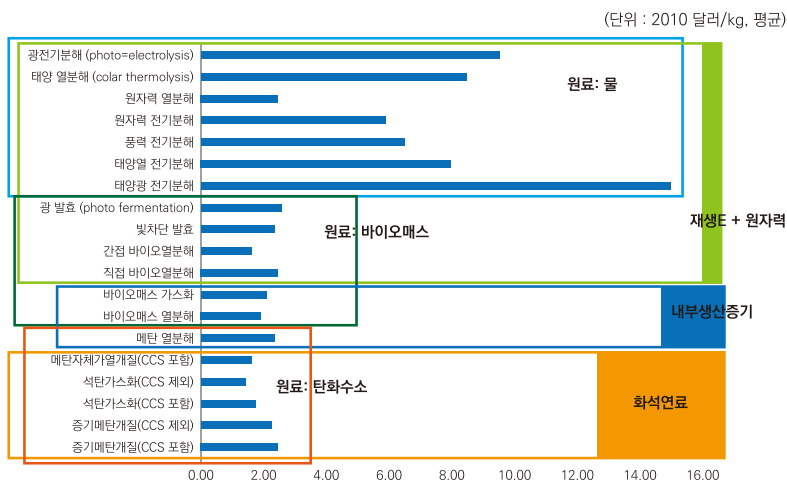
2020년 5월 14일 개최된 “수소트럭 및 수소택시 실증 협력 MOU 체결식”에서 성윤모 산업통상자원부 장관은 포스트 코로나 시대의 핵심 전략산업으로 수소차 산업을 집중 육성할 것이라고 강조하며, 상용차와 대중교통을 중심으로 새로운 수소차 시장을 창출할 것이라고 밝혔다. 기존의 국내 수소차 및 충전인프라 보급 계획을 차질 없이 진행하는 동시에, 해당 수소트럭 실증사업 성과를 바탕으로 공공분야에 수소트럭의 선제적 도입을 목표로 내세웠다.

■ 수소 모빌리티 관련 이슈: 연료비

수소 모빌리티 활성화를 위한 중요한 전제조건은 공급되는 수소의 가격경쟁력과 공급안정성이 확보되어야 한다는 점이다. 이와 관련해

서 수소의 생산부문에 대한 검토가 필요한데, 일반적으로 수소의 생산을 위해서는 다른 에너지와 원료를 필요로 한다. 세계 수소 생산량의 약 75% 정도가 천연가스를 원료로 사용하는 메탄개질(SMR) 방식에 의해 공급된다.⁹⁷ 수소 생산방식별 비용을 살펴보면, 천연가스를 원료로 하는 개질수소는 kg당 2달러 전후 수준을 나타내지만 물을 원료로 전기분해 혹은 열분해 방식으로 수소를 생산하는 비용은 6달러를 상회(원자력 열분해 제외)하는 수준을 보인다. 바이오매스를 원료로 하는 수소 생산은 비용면에서 상대적으로 유리할 수 있으나 아직은 추가적인 R&D가 필요한 것으로 평가되고 있다.⁹⁸

수소제조 방식별 수소 비용



자료 : Nikolaidis and Poullikkas(2017)를 참고하여 에너지경제연구원 작성

그린수소는 일반적으로 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 방식을 통해 공급될 수 있는데, 수소 1kg을 생산하기 위한 전력 소비량을 45kWh⁹⁹로 본다면 우리나라의 2019년 산업용 전기요금(106.6원/kWh)을 적용할 때 kg당 그린수소 생산에 필요한 전력비용은 4,794원으로 추정된다.¹⁰⁰

현재의 수소생산 여건을 전제로 수소의 생산비용 관점에서 우선적으로 선택될 수 있는 방안은 탄화수소를 원료로 하며, 화석연료를 에너지원으로 사용하는 방식¹⁰¹이 될 것이다. 우리나라의 「수소경제 활성화 로드맵」에서 수소의 생산방식으로 부생수소와 개질(추출)수소를 우선적인 대안으로 고려하고 있는 것도 수소의 경제성을 중요하게 고려한 결과로 생각된다.

한편 관점에 따라 차이가 있으나 수소자동차의 친환경적 요소를 고려하여 실제 주행에 소요되는 비용을 전기자동차와 연료비 관점에서만 비교해 보면, 수소자동차의 주행비용은 전기자동차에 비하여 상당히 높은 수준을 나타내고 있다.

수소 비용은 수전해 수소원가(4,653~8,294원/kg)를 바탕으로 충전소 판매가격이 7,948~52,557원/kg에서 결정된다고 가정¹⁰²하는 경우 수소자동차의 주행단가는 km당 67~441원 수준으로 추정된다.¹⁰³ 반면, 2019년 발표된 한 연구는 전기자동차의 주행비용으로 km당 32

~96원을 제시하고 있다.¹⁰⁴ 이러한 주행비용은 에너지저장장치(ESS)의 방전원가(141~147원/kWh)에 송배전원가 15원/kWh와 충전소 가동률을 고려한 충전소 비용을 반영하여 추산되었다.

전기 승용차와 수소 승용차 주행비용 비교

구분	차량 주행비용	비고
수소차	67 ~ 441 원/km	현대 2018 넥쏘: 0.84 kgH ₂ /100km 기준
전기차	32 ~ 96 원/km	현대 2019 아이오닉: 6.3km/kWh 기준

자료: 김지희 외(2019)

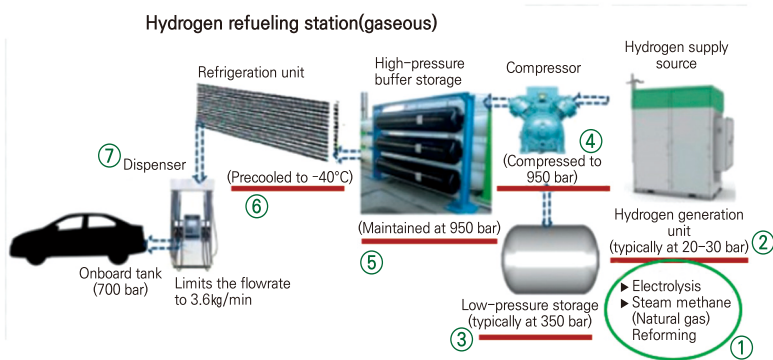
■ 수소 모빌리티 관련 이슈: 친환경성¹⁰⁵

수소경제를 통해 발생하는 환경적인 편익을 극대화하기 위해서는 궁극적으로 비화석 자원(non-fossil resources)으로부터 수소를 생산해야 한다. 수소경제의 가치사슬은 생산, 수송, 저장 및 활용으로 구분할 수 있으며 각 단계에서 비화석 자원을 이용한 수소경제 구축에 필요한 적절한 기술적 수단이 필요하다. 그러나 아직까지는 가격, 성과, 신뢰성 등 여러측면에서 기존의 화석연료에 비하여 수소가 경쟁력을 확보하기 어렵다고 평가되고 있다.

또한 수소 모빌리티 측면의 활용을 위해서는 수소를 높은 에너지 밀도로 저장하는 것이 반드시 필요한데, 이 과정에서의 에너지 손실

발생을 줄이는 것이 수소의 친환경성 측면에서 중요하다. 전통적인 수소의 저장 방법은 액화수소 방식과 고압가스 형태로 구분할 수 있다. 액화수소로 저장하기 위해서는 높은 에너지 비용을 수반하는데, 저장하는 에너지량의 40% 이상이 액화하는 과정에서 손실될 수도 있다.¹⁰⁶

수소 충전소의 에너지 소비



주: ①전기분해: 전기, SMR: 열 및 전기, ②압력: 전기, ③압력: 전기, ④압력: 전기, ⑤압력: 전기, ⑥냉각: 전기, ⑦주입: 전기
 자료: Reddi et al.(2016)

고압으로 저장된 수소를 수소차에 충전하는 과정에서도 손실이 발생한다.¹⁰⁷ 수소 충전소는 튜브트레이러, 압축기, priority panel, 수소 저장탱크, 디스펜서, pre-cooler, chiller로 구성되는데 수소 충전소의 입고량과 디스펜서의 계량값(kg)을 이용해 출고량을 정산해보면, 입고량 대비 19.6%의 손실이 발생할 수 있다.

■ 수소 모빌리티의 미래

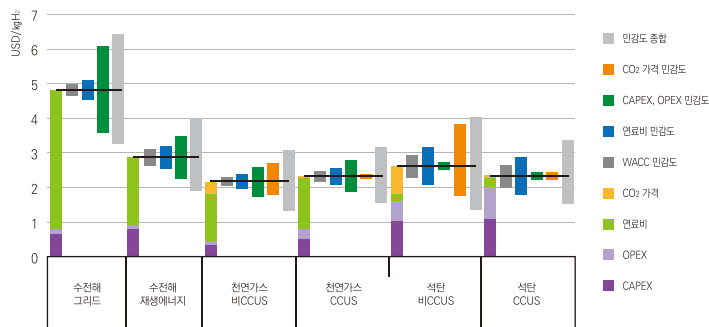
수소차의 장점은 상대적으로 긴 주행거리와 빠른 충전시간을 꼽을 수 있다. 반면 단점으로는 낮은 에너지밀도의 수소를 연료로 사용하기 때문에 수소탱크의 크기와 주행거리에 한계가 존재한다는 점이다. 최근에는 배터리 기술의 발전에 힘입어 전기차의 1회 충전 운행거리가 수소차에 근접하는 수준에 이르렀다는 평가가 나오고 있다. 하지만 이러한 평가는 승용차에 국한되는 것으로, 여전히 버스, 트럭 등 대형 차량의 경우 전기차가 극복해야 할 한계가 존재한다. 장거리 운행 조건과 중량 수송을 위해서는 대량의 배터리 탑재가 필요한데 이는 주행거리 손실과 적재공간 부족으로 연결될 수 있다. 그러므로 주행비용 면에서만 본다면 전기차가 수소차에 비해서 경쟁력을 보이는 부분은 승용차에 한정할 수 있으며, 대형·장거리 운행차량의 경우에는 수소차가 전기차에 비해서 경쟁력을 확보할 가능성이 높다고 평가할 수 있다.

우리나라의 현대·기아자동차와 일본의 도요타, 혼다가 수소차량을 시장에 출시하여 현재는 수송부문 수소경제를 선도하는 모습을 보이고 있지만, 글로벌 자동차업체인 독일의 BMW사가 2022년부터 수소자동차 출시 계획을 밝히고 있어서 앞으로는 수소차의 기술발달 속도도 빨라지고 수송부문 시장경쟁도 심화될 것으로 전망된다.

H₂ 연료전지

천연가스는 현재 세계적으로 수소 생산에 가장 많이 활용되는 에너지원으로서 연료전지 산업에서 중요한 역할을 담당하고 있다.¹⁰⁸ 친환경적인 수소 생산을 위해서는 재생에너지 잉여 전력을 활용한 수전해 방식의 수소 생산이 가장 이상적이지만, 이러한 방식의 수소 생산 활성화를 위해서는 수전해 기술의 경제성 제고와 재생에너지 보급 가속화가 선결되어야 한다. 이러한 선결과제가 해결되기 이전까지 천연가스는 지배적인 수소 공급원 역할을 일정 기간 담당할 것으로 기대된다.¹⁰⁹

2030년 수소 생산비용 전망



자료: IEA(2019)

이러한 상황 속에서 국내외 천연가스 사업자들은 새로운 방식으로

천연가스를 이용할 수 있는 연료전지 부문에 주목하고 있다. 우리나라는 2040년까지 내수용으로 발전용 연료전지 8GW, 가정·건물용 연료전지 2.1GW 보급을 정책 목표로 제시하고 있어 적극적인 연료전지 보급 확대가 요구되고 있는 상황이다. 그러므로 국내외 천연가스 사업자들이 추진하고 있는 연료전지 사업의 사례분석을 통해 연료전지 보급 확대를 위한 효과적인 방안에 대해 살펴보는 것이 필요하다 하겠다.

■ 국내 연료전지 시장 동향

국내 발전용 연료전지 시장은 지속적인 기술개발과 보급 정책을 바탕으로 그 규모를 키우고 있다. 발전용 연료전지는 한국남동발전이 2006년 250kW급을 설치한 것을 시작으로 2012년 신재생에너지공급의무(RPS: Renewable Energy Portfolio Standard) 제도가 시행되면서 본격적으로 보급이 확대되어 현재 300MW 이상의 규모에 달하고 있다.

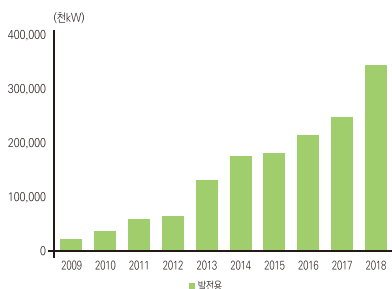
국내의 대표적인 발전용 연료전지 제조사인 포스코에너지와 두산은 해외기술을 도입하여 자체 생산시스템을 구축하였다. 포스코에너지는 2007년 미국의 Fuel Cell Energy로부터 연료전지 기술을 도입하였으며, 2015년 포항에 100MW 이상의 생산시설을 준공하며 국내 발전

용 연료전지 시장을 선점하였다. 최근 수주 실적이 두드러지고 있는 두산의 경우에는 2014년 미국의 Clear Edge Power와 국내 기업인 퓨얼 셀파워를 인수하면서 연료전지 시장에 진입하였으며, 전북 익산과 미국 코네티컷주에 각각 63MW 규모의 생산시설을 갖추고 있다.

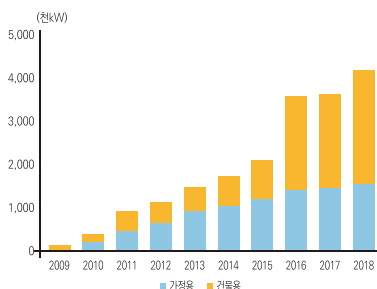
국내 발전용 연료전지는 RPS 제도가 시행되면서 초기시장을 확보하였으나, 향후 국내 발전용 연료전지 보급 확산을 위해서는 규모의 경제 실현을 통한 원가 절감 노력이 필요하다. 이에 국내 제조사들은 지속적인 기술개발을 통해 선도 기술을 확보하고 독자적인 사업체계 구축을 위한 노력을 지속하고 있다.

우리나라 가정·건물용 연료전지는 정부의 보조금 지원이나 규제 시행 등과 같은 정책수단에 의존하여 보급이 확대되어 왔다. 가정용 연료전지는 신재생에너지보급(주택지원) 사업을 통해 보조금이 지급되고 있는데, 2019년의 보조금은 1,875만 원/kW¹¹⁰으로 설치비용의 70% 이상을 차지하고 있다. 건물용 연료전지는 공공 및 민간 건축물에 대한 신재생에너지 공급의무화 비율 상향조정에 따라 보급이 확대되고 있다. 공공 건축물에 대한 신재생에너지 공급의무화 비율은 2012년 10%에서 점진적으로 상향 조정되어 2019년에는 27%에 달하였으며 2020년 이후부터는 30%로 확대 적용될 예정이다. 민간 건축물에 대해서도 일정 규모를 넘어서는 경우 지자체 별로 신재생에너지 공급의무화 비율을 설정하여 적용하고 있으며, 이러한 규제는 지속적으로 확대될 것으로 전망하고 있다.

국내 발전용 연료전지 누적 설치 용량



국내 가정·건물용 연료전지 누적 설치 용량



자료: 한국에너지공단 신·재생에너지센터

가정용 연료전지는 현재 정부 보조금 없이 경제성 확보가 어려운 상황으로 자생력을 갖춘 시장을 조성하기 위해서는 지속적인 기술개발을 통한 비용 절감 노력이 필요하다. 또한 정부가 주도하는 보급 사업에 의존하여 시장이 형성되었기 때문에 가정용 연료전지 산업의 가치사슬 전반에 걸친 성장이 이루어지기 어렵다는 한계가 존재한다. 특히 가정용 연료전지 사용기간에 발생하는 유지·보수에 대한 전반적인 관리 시스템의 부재도 중요한 문제점으로 지적되고 있어,¹¹¹ 향후 효율적인 사업모델 개발이 필요할 것으로 보인다.

■ 천연가스를 활용한 연료전지 신사업 추진 동향

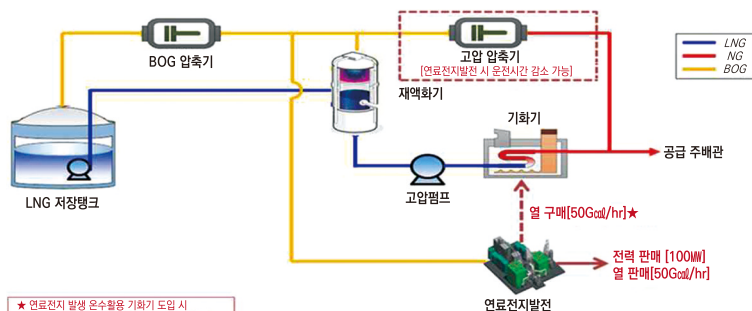
• 증발가스를 활용한 연료전지 발전 사업

최근 국내에서는 LNG 생산기지에 연료전지 발전소를 건설하고, LNG 저장탱크에서 발생하는 증발가스(BOG: Boil-off Gas)를 연료전지의 연료로 공급하는 형태의 연료전지 발전 사업이 검토되고 있다.¹¹² 증발가스는 LNG 저장탱크 내부¹¹³와 외부의 온도 차이에 의한 내부온도 상승으로 일부 LNG가 자연적으로 기화되어 발생한다. 이러한 증발가스는 저장탱크 내부압력의 상승 요인이 되어 구조적 안전성에 문제를 발생시킬 수 있기 때문에 적절한 방식으로 처리하게 되는데, 주로 재액화

과정을 거치거나 압력을 상승시켜 송출한다. 그러나 증발가스를 연료전지의 연료로 사용하는 경우에는 이러한 처리과정을 생략할 수 있어서 증발가스의 처리비용이 절감될 뿐 아니라 에너지 효율도 높일 수 있다는 장점이 있다.

증발가스를 활용한 연료전지 사업에서도 가장 중요한 것은 경제성을 확보하는 것이다. 우리나라는 세계 3위의 LNG 수입국으로 총 7개의 LNG 생산기지를 운영하고 있음을 고려할 때, 증발가스 활용 연료전지 발전 사업의 경제성 확보가 가능하다면 향후 국내 연료전지 발전 용량 확대에 상당 부분 기여할 것으로 보인다. 또한 국내의 성공 사례를 바탕으로 관련 사업 모델과 관련 기술을 활용하여 해외 잠재적 시장에 대한 진출 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

증발가스 처리 과정



자료: 한국가스공사(2019)

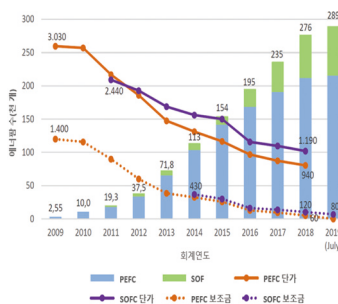
• 가정용 연료전지 보급 사업: 일본 에네팜 보급사업

일본은 2005년 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO) 출범을 바탕으로 ‘에네팜’이라는 가정용 연료전지 국가 브랜드를 출시하였다. NEDO를 주축으로 도시가스회사와 연료전지 제조사가 참여하여 실증 사업을 진행하여, 2009년 5월 700W 용량의 에네팜이 상용화되었다. 일본 정부의 보조금 지원을 바탕으로 에네팜은 빠른 속도로 보급이 확대되어 2019년 7월에는 누적 보급 대수가 약 29만 대를 기록하고 있다. 반면 시스템 단가는 꾸준히 하락하여 2018년 고분자전해질 연료전지(PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) 시스템 단가는 2009년의 30% 수준이며 고체산화물 연료전지(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) 시스템 단가는 2011년 대비 48% 수준에 불과하다.¹¹⁴ 또한 에네팜 상용화 초기 PEFC 시스템 단가의 절반에 달하였던 정부의 보조금 지원 규모도 지속적으로 감소하여 일본의 가정용 연료전지 시장은 자생력을 일부 확보한 것으로 볼 수 있다.

일본의 에네팜 보급은 가스소매사업자인 도시가스회사를 중심으로 이루어지고 있는 것이 특징이다. 도시가스회사는 천연가스 신사업 개발의 일환으로 연료전지 제조사와 공동으로 에네팜 기술 개발을 추진하였으며, 자사의 도시가스 판매망을 이용하여 에네팜 홍보 및 판매, 사후 관리를 담당하고 있다.

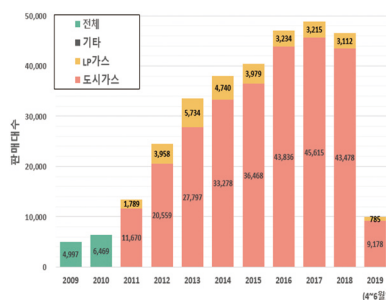
일본도 우리나라와 마찬가지로 정부 주도의 보급 정책을 시행하였으나, 도시가스회사와 연료전지 제조사 등이 참여하는 사업 모델을 구축하여 기술개발, 제조, 설치, 판매에 이르기까지 산업의 가치사슬 전반에 대한 성장을 유도했다는 점이 우리나라와 일본의 가정용 연료전지 보급 사업 모델의 가장 큰 차이점으로 생각된다.

일본 에네팜 보급 및 시스템 단가 현황



자료: EU-Japan Centre for Industrial Cooperation(2019)

일본 에네팜 제조사 연간 판매대수 현황



정책적 시사점

국내 연료전지 산업은 꾸준한 기술개발과 투자를 바탕으로 성장하여 왔으며, 정부 지원을 기반으로 시장 규모도 확대되었다. 발전용 연료전지는 RPS 시행을 기반으로 초기시장을 확보하였으며, 가정·건물용 연료전지는 정부의 보조금 사업을 통해 꾸준히 보급이 확대되고 있

다. 향후 연료전지 보급 목표를 달성하기 위해서는 정부 정책이나 지원에 의존하지 않는 자생력을 갖춘 시장이 형성되어야 하며, 이를 위해서는 지속적인 원가절감을 통한 경제성 확보가 반드시 필요하다. 지속적인 기술개발과 시장 확대를 통한 규모의 경제 달성이 원가 절감으로 이어질 수 있기 때문에 합리적인 보급 확대와 기술개발을 유도할 수 있는 사업모델이 개발되어야 한다.

이러한 측면에서 천연가스 사업자들이 추진하고 있는 새로운 연료전지 사업 모델을 주목할 필요가 있다. 증발가스를 활용한 연료전지 발전 사업은 연료전지의 연료를 보다 경제적으로 공급할 수 있는 새로운 형태의 사업이며, 국내 보급실적 축적을 바탕으로 해외 수출 기회도 모색할 수 있다. 또한 일본의 가정용 연료전지 보급 사업은 지역 판매망을 가지고 있는 도시가스회사가 기술개발부터 연료전지 판매 및 관리까지 관여함으로써 효율적인 보급 확대를 유도하였다. 현재 우리나라 가정용 연료전지 보급 사업에서 나타나고 있는 보급 이후 관리시스템 부재로 인한 문제점을 고려하면 일본의 사례를 벤치마킹하는 것을 검토할 필요가 있다.

H₂ 수소 관련 국제협력

세계 주요 국가들은 수소에너지의 친환경적 장점 및 재생에너지 원 전력의 저장수단으로서의 잠재력 등에 주목하여, 수소를 자국의 에너지시스템 청정화를 위한 전략적 자원으로 활용한다는 구상 하에 국가 차원의 수소계획을 마련하여 추진하고 있다. 수소 에너지시스템 구축을 위해서는 수소산업 생태계의 모든 부문에 대하여 국가 간에 다양한 형태의 협력과 공조 활동이 요구된다. 특히, 수소를 이용하는 기술의 표준화 및 안전기준을 정립하는 것은 개별 국가가 추진해야 할 정책과제인 동시에 국제적인 협력과 합의가 요구되는 글로벌 정책과제의 성격도 가지고 있다. 세계적으로 수소에너지 시스템 구축이 시작되고 있는 시점에서 수소산업 생태계 부문별로 개별 국가의 기술적 우위가 상이하기 때문에, 국제협력 활동을 통해 국가별 비교우위를 상호 공유할 수 있다면 수소에너지 시스템 구축과 관련된 고비용 문제를 일정 부분 해소하여 수소경제 실현을 촉진할 수 있다.

이러한 관점에서 국내외적으로 수소경제 실현을 촉진하기 위해서는 효율적인 국제적 협력이 이루어지는 것이 필수적이다. 수소경제 국제협력에서 주도적 역할을 수행하려면 그 추진배경 및 활동 내역을 점검하고 그것을 토대로 우리나라가 지향해야 할 수소에너지 국제협력의

추진전략을 고려해야 한다. 뿐만 아니라 추진전략의 이행을 뒷받침할 수 있는 추진체계의 구축까지도 신속히 제시되어야 할 것이다.

■ 국제협력 활동 필요성 및 선결과제

정부는 수소에너지 시스템의 구축 및 지속적인 발전을 위해 우선적으로 추진해야 할 과제로서 세계 최고 수준의 수소 활용체계 구축, 안정적·보편적 공급 시스템 확충, 수소 산업생태계 조성, 수소경제 안전성 확보 등을 설정하고 있다. 정부가 설정한 세부 추진과제들은 수소경제를 지향하는 모든 국가들이 직면하고 있는 과제이며, 동시에 여러 수소 다자협의체의 핵심적인 협력의제이기도 하다.

우리나라가 수소에너지 시스템 구축을 세계적으로 선도하기 위해서는 수소산업 생태계 분야별(수소 공급원 확보, 시장제도 설계, 수소 이용기술 인증, 안전기준 설정 등)로 국제협력 및 공조 활동에 대한 전략을 마련하고 적극적으로 추진하는 것이 필요하다. 이러한 국제협력 활동을 통해서 주요 선도국의 수소기술 발전 동향을 파악하는 한편, 우리나라가 지닌 선도적인 수소기술의 우수성을 국제적으로 홍보하고, 동시에 국내 수소기술 표준이 국제적인 표준으로 채택될 수 있는 기반을 마련할 수 있기 때문이다.

특히 수소 공급망의 구축, 생산·수송·이용 기술의 고도화, 수소 이용의 촉진을 위한 시장제도 설계 및 제도적·정책적 지원체계 정비, 수소 국제무역 제도특례(관세 및 비관세 특례 등) 설정, 수소 안전성 확보를 위한 국제기준 정립 등은 국제협력 활동이 반드시 필요한 영역으로 판단된다. 이는 수소산업 생태계의 수급 요건(공급 및 소비), 기술 여건(생산, 수송, 저장, 이용 기술 등), 제도적 요건(지원제도 및 무역세제 설정) 등이 특정 국가의 독자적인 활동만으로는 발전하는데 한계가 있기 때문이다. 또한 세계적으로 기술적, 산업적 비교우위와 경쟁력을 보유한 국가가 선도하면서 수요 잠재력을 보유한 국가들 간의 협력활동이

원활하게 추진되는 경우에 수소산업 생태계가 국제적인 규모로 발전할 가능성이 높기 때문이다.

우리나라가 국제협력 활동에 대한 목표와 전략을 마련하기 위해서는 우선적으로 세계 주요국이 추진하고 있는 수소경제로의 이행 상황을 면밀히 파악하고, 각 국가가 직면한 정책적·기술적 장애요인을 세밀하게 분석하는 것이 필요하다. 이는 국가별 수소경제에 대한 잠재력을 점검한다는 의미와 함께 해당 국가가 보유한 고유의 경쟁력 요소(호주의 수소 생산·공급 잠재력, 일본의 수송·이용 기술, 미국 및 EU국가의 기술표준 주도 등)를 평가한다는 것을 뜻한다. 또한 안정적인 경제적인 대규모 수소 공급원을 확보하는 것은 수소경제를 실현하기 위한 선결조건이기 때문에, 주요 국가들은 전 세계에 걸쳐 수소 공급원을 확보하는데 노력을 기울이고 있다.

한편, 수소 다자협의체의 협력활동을 분석하여 국제사회 및 개별 국가가 해결해야 할 기술적, 제도적, 정책적 과제를 파악하고 수소 다자협의체별 참여 및 대응 전략을 마련하는 것이 필요하다. 동시에 수소다자협의체 활동에 적극적으로 참여하여 수소의 수급지표 작성 방법, 국가 에너지통계 편제 기준, 안전 및 기술 표준 등 수소와 관련된 국제기준 마련에 주도적인 역할을 수행하는 것이 국익에 기여하는 활동으로 판단된다.

■ 국제협력활동 추진 전략

수소경제 활성화를 위한 국제협력 활동의 영역은 수소의 생산에서 최종 소비단계까지 요구되는 기술의 개발, 안전기준 및 규제의 설정, 시장시스템 설계 등 모든 분야를 포함하고 있다. 우리나라가 수소경제 활성화를 도모하는 동시에 세계적으로 수소경제를 선도하기 위해서는 체계적인 국제협력 추진전략 마련이 요구된다.

수소 국제협력을 통해 우리나라가 확보하고자 하는 것은 수소공급원 확보, 수소기술의 국제표준 설정 주도, 선도 기술(수소자동차 등)의 국제적 인정 등 매우 다양한 영역을 포함하고 있지만, 이의 달성을 위한 국제협력 추진전략은 선택과 집중의 원칙 하에 수소산업 생태계 분야별로 차별화하여 수립되어야 한다. 특히, 국제협력 방식을 설정하는 것은 협력의제의 특성에 따라 전략적으로 다자 및 양자협력 채널을 선택하여 활용할 필요가 있다.

양자협력의 추진은 특정 대상국과 협력을 통해 상호 이익이 될 수 있는 분야에서 상호호혜 원칙 하에 협력활동을 전개하지만, 제3국에 대해서는 배타적인 협력활동을 추진하는 것을 의미한다. 양자협력 추진전략은 수소의 잠재력을 인식하고 수소경제를 지향하고 있는 개별 국가를 대상으로 추진하는 것이 적절하다고 판단된다. 즉, 수소 생산·공급·

수소 에너지시스템 구축 개요

공급			수요				
분야	공급기반	수송 · 저장	수소이용 촉진				
	생산 · 수입	저장	발전	주택 · 건물	Mobility	산업용	기타
· 기술개발 (R&D)	· P2G 생산 · 수전해 기술개발 · 재생에너지 수소화	· 대규모 저장기술 · 에너지NW 활용(기존) · 탱크개발	· 연료전지발전 · 수전해 설비개발	· 건물용 연료 전지	· FC버스 개발 · 수소선박 개발	· 산업용 연소기기 개발	
· 제도정비	· 무역 · 관세 · 보조금 · 세금공제	· 안전관리 · 수소공급자 사업법	· 연료전지발전 (REC)정비	· 연료전지 보조금	· Mobility 보조금 제도 설계		
· 실증사업	· 석탄 가스화 · 갈탄 가스화 · 석유화학산업 활용 · 천연가스 개발	· 수소 Career 1)고압가스 2)액화수소 3)유기하이드로 레이드 4)암모니아	· 수소연료 전지발전				· 공공건물 Zero Emission화
· 시장화	· 에너지팜	· 수소 충전소(ST) 보조금	· 수전해 설비보급		· FCEV		· 공공건물 수소연료 전지발전 지원
· 인프라 구축	· 수소수입 기지 개발	· 수송망 구축	· 분산전원계통 구축		· 교통요지 수소공급망 구축		
· 정책개발 · 국제 표준화	· 국가 목표 설정	· 수소 충전소(ST) 확충 계획 설정	· P2G 설비 확충목표 설정		· FC보급 목표설정	· 산업부문 연료청정화 계획	
	· 국제표준화 주도						
	· 수소공급 역량 확대 방안		· 부문별 수소 이용 안전관리 점검 가이드라인 제시 · 운영				
	· 수소 공급 통계 · 정보 시스템 확립						

자료: 에너지경제연구원 자체 작성 자료

이용 기술 협력, 대규모 수소 공급선 확보, 수소 모빌리티 기술 보급 확대 등을 위해 국가 간 전략적 양자협력 관계를 구축하고 협력활동을 지

속적으로 추진하는 것이 필요하다. 특히, 캐나다와 호주와 같은 국가에 대해서는 이들 국가가 경쟁력을 보유하고 있는 수소 공급 측면에 대한 협력의제를 발굴하고, 수소 활용 측면에 비교우위가 있는 국가들과는 수소시장 기반 확대와 관련된 협력의제를 발굴하는 것이 필요하다.

수소 다자협약체 활동은 수소경제 활성화를 위한 발전방향의 설정, 수소에너지 기술표준 및 안전성 확보 등 비배타적인 성격을 보이는 협력의제에 대해 논의하는 방향으로 추진전략을 설정할 필요가 있다. 일반적으로 다자 국제협력 활동은 참여국의 합의 또는 다수결 원칙으로 협력활동이 결정된다는 측면에서 양자협력과 차이점이 존재한다. 이에 수소 다자협약체 활동전략은 기존의 수소 국제협약체의 설립 취지, 활동 내용, 활동 방향을 점검하는 활동을 지속적으로 추진하면서, 우리나라가 기술적으로 선도할 수 있는 분야에 대해서는 협력의제를 적극적으로 발굴 및 제기하고, 해당 협력의제에 대한 논의를 적극적으로 주도하는 방식의 활동전략 마련이 필요하다. 수소협력 다자협약체인 CEM-H2I는 대표적인 협력의제를 마련하여 제시하고 있는데, 우리나라는 이러한 다자협력 활동에 포괄적으로 참여하면서 전기자동차 분야와 같이 기술적 우위가 있는 의제에 대해서는 다자 협력활동을 주도하는 전략이 필요하다.

수소다자협의체(CEM-H2I)의 협력의제

발전방향	주요활동
• 수소국제지형 (Global hydrogen landscape) 에서 H2I 위상 정립 • 수소 관련 글로벌 목표 수립에 지속적인 기여	• 실무그룹(Working Groups, WGs) 구성 1) 청정 수소 생산 및 공급 2) 수소 운송 3) 수소 산업 4) 수소 상업화를 위한 지속가능한 자원조달 • 첫 번째 프로그램 개발 (수소도시) • 전략적 파트너십 구축 및 가동 • H2I 웹사이트 개발 • 지역 및 글로벌 워크숍-웹inar • 수소 보고서(격년) 발간

자료: CEM-H2I

수소에너지 국제협력 추진 체계 구상

수소에너지 국제협력 추진체계를 구축하기 위해서는 관련된 다자 국제협력기구의 역할과 기능을 면밀히 분석하고 주요 수소경제 선도국가별로 기술적 비교우위 분야와 협력의제를 도출하여, 이에 대응하는 우리나라 고유의 추진체계 설정이 요구된다. 예컨대 수소에너지 다자 국제협력 활동은 주요 다자협의체별 기능 및 역할, 핵심 의제를 기준으로 특화하여 전개하되, 특히 중점적으로 참여하고 주도해야 하는 다자 협의체 활동을 선택 및 집중하는 방식으로 접근할 필요가 있다. 양자협력 활동은 다자협력 활동보다 더 구체적이고 신속한 협력활동의 추진이 가능하므로, 전략적 파트너를 적절히 선정하고 해당 국가의 비교우

위에 적합한 의제를 발굴해야 한다.

수소에너지 시스템의 구축은 세계적으로 아직 초기단계에 있기 때문에, 수소에너지 관련 기관의 전문 역량 및 기능을 유기적으로 연계할 수 있는 수소에너지 국제협력 체계를 수립·운영하는 것이 중요하다. 무엇보다도 우리나라에서 수소에너지 국제협력 업무를 총괄하는 기관을 설정하는 것이 필요하다. 현재는 다수의 기관에서 산발적으로 수소에너지와 관련된 국제협력 기능을 수행하고 있지만, 이러한 방식은 전략적이고 신속하게 대응할 필요가 있는 국제협력 업무의 특성상 효과적이지 않다고 생각된다. 그러므로 수소에너지 국제협력과 관련된 총괄 기능을 수행할 정부부처를 지정할 필요가 있으며, 현재의 상황에서는 에너지와 관련된 업무를 담당하는 산업통상자원부가 총괄업무 수행에 적합할 수 있다.

다음으로 수소에너지 국제협력 전담기관(가칭 “수소에너지 국제협력센터”)을 지정할 필요가 있다. 수소에너지에 관한 세부적인 국제협력전략 수립, 협력의제 발굴, 정보 공유, 국제협력 지원활동을 수행하기 위한 수소에너지 국제협력 전담 공공기관을 신설하거나 또는 기존 공공기관을 이용하는 방안을 검토할 수 있다. 이와 같은 국제협력 전담기관은 분야별 국제협력 담당기관이 유기적으로 협력활동을 전개할 수 있도록 조정 및 지원하는 역할을 수행하도록 하여야 한다.

마지막으로 수소에너지 분야별로 실질적인 국제협력을 수행하는 기관을 지정하는 것이 필요하다. 지정된 기관들의 전문성에 따라서 개별 기관에 분야별 수소에너지 국제협력 기능을 부여할 필요가 있다. 즉, 수소에너지 국제협력 업무를 실질적으로 수행할 수 있는 국내 기관(개인 포함)을 기관별 기능, 역할, 활동 내용, 전문성 등을 기준으로 평가하고, 각 기관의 고유기능 및 전문성에 기초하여 분야별 국제협력 활동의 주관기관으로 활용할 필요가 있다. 위에서 제시한 3가지 핵심 요소를 고려한 우리나라 수소에너지 국제협력 추진 체계 구축(안)이 아래 표에

국제협력활동 추진체계(기관별 수소에너지 협력 기능 및 역할) 구축(안)

	기관	수소에너지 관장 기능	협력기능 우위성	유관(관할) 부처
정부 부처	산업통상자원부 (자원정책실)	• 국가 에너지협력 총괄 • 수소경제 촉진 정책 관장	• 정부의 제반 수소정책 총괄 기능 수행	-
	미래과학부	• 원천기술 개발	• 수소 생산·수송·이용 원천기술 개발 총괄	-
	국가기술표준원	• 수소관련 인증 및 국제표준 관장	• 수소기술 인증 및 국제표준화 주도	• 산업통상자원부
연구 기관	에너지경제연구원	• 수소에너지 정책교류 및 시장·정책 정보 분석	• 에너지정책 부문 국제협력 총괄	• 국무조정실
	과학기술연구원	• 수소 원천기술 연구	• 수소기술 개발 및 기술협력 수행	• 미래과학부
공공 기관	한국가스공사	• 천연가스 기반 수소에너지 공급망 구축	• PNG망 구축·운영 • 수소 공급망 구축 계획 수립·추진	• 산업통상자원부
	한국가스안전공사	• 수소R&D 지원 및 평가 • 실증사업 개발지원 수행	• 수소공급의 안전기준 관리·운영 능력 보유	• 산업통상자원부

	기관	수소에너지 관장 기능	협력가능 우위성	유관(관할) 부처
지원·평가	한국에너지공단	• 수소에너지 보급·확대 지원	• 수소에너지 산업 지원 기능 수행 • 수소기술 해외수출 진흥을 위한 홍보	• 산업통상자원부
	한국에너지기술평가원	• 수소R&D 지원 및 평가 • 실증사업 개발지원 수행	• 기술역량 평가 기능 보유	• 산업통상자원부
	한국산업기술진흥원	• 수소산업 진흥 및 R&D 지원	• 산업역량 강화를 위한 지원체계 보유	• 산업통상자원부
해외 활동	한국무역진흥공사	• 해외 수소산업 기술 파악 및 수출지원	• 해외 수소산업 및 기술변화 동향 파악을 위한 Network 구축 운영	• 산업통상자원부
	한국무역협회	• 국내 수출 진출 국가 시장 분석 및 해외 정보 보급·확산	• 수출대상국 시장진출 조건 분석	• 산업통상자원부
민관 협의체	수소융합 얼라이언스추진단	• 수소에너지 확산 및 수소 연관산업의 발전 지원 • 정책과제 및 제도개선 과제 제시, 민간주도의 수소 보급 활성화 도모	• 관련부처, 기관, 산업의 정책협력 및 정보교류 창구 역할 수행	• 민관 자치 단체
대학	연세대 (설용근 교수)	• 수소 다자협의체 활동 주도	• IPHE 한국대표 수행	• 민간전문가
	우석대 (이흥기 교수)	• 수소관련 국제표준 분야 전문가	• 수소 국제표준화 관련 다자협의체 및 표준부 자문활동 수행	• 민간전문가
산업계	산업계(공공부문) - POSCO 등	• 수소산업 기술 개발 및 산업 활동 주도	• 산업부문 수소기술 개발 주도 및 시장개척	• 산업계
	산업계(민간부문) - 현대자동차 등	• 우리나라 수소시장 개척 및 수출 시장 개발해의 수소산업 기술 파악 및 수출지원	• 수송부문 수소기술 개발 주도 및 시장개척	• 산업계

자료: 수소경제 활성화 활동에 참여하고 있는 기관의 기능에 기초하여 에너지경제연구원 작성

요약되어 있다. 본 구축(안)은 우리나라의 수소에너지 관련 기관 중 대표적인 기관을 중심으로 추진체계를 구성하고 있지만, 향후 수소에너지

국제협력 체계를 확정하는 경우에 관련된 기관들에 대한 심층적인 평가와 역할을 할당하는 과정이 필요할 것이다.

■ 정책적 시사점

수소는 생산, 저장·수송, 이용 기술의 발전과 소재 기술의 진전으로 새로운 에너지원으로 활용할 수 있는 영역이 확대되고 있으며, 화석 에너지의 대안으로 미래에너지시스템에서 중추적인 역할을 담당할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 하지만 IEA가 지적하고 있는 바와 같이, 수소가 에너지시스템에서 본격적인 역할을 담당하기까지에는 기술, 제도, 시장 측면에서 해결되어야 할 과제가 산적해 있는 것도 사실이다. 이는 수소에너지가 새로운 에너지원으로 활용되기 위한 필요조건으로 전 세계 국가들의 협력이 필수적이라는 것을 의미한다.

이미 세계 주요 국가들이 다양한 형태의 국제협력 활동을 전개하고 있는 만큼, 우리나라도 국제적인 시각에서 신속하게 수소에너지 국제협력 관계를 도모하여야 한다. 우선 세계 수소에너지 선도국의 수소에너지 발전전략을 파악하고, 이들 국가와의 협력을 통해 우리나라의 수소에너지 기술수준을 제고하기 위한 협력 요소 및 협력 의제 발굴을 지속적으로 추진하는 것이 필요하다. 또한 수소 관련 다자간 국제협의

체의 설립 취지 및 목표, 활동 내역, 활동 방향, 핵심 협력 의제 등을 파악하여 우리나라 수소산업이 경쟁력을 보유한 영역에 대해서는 전략적으로 글로벌 리더십을 발휘할 필요가 있다. 주요 국가들이 세계 수소경제 발전에 선도적인 위치를 차지하고자 경쟁하고 있는 상황에서 우리나라가 수소에너지 국제협력 업무를 효율적으로 수행할 수 있는 체제를 구축하고, 이를 바탕으로 우리나라가 세계 수소경제 발전의 한 축을 담당할 수 있기를 기대한다.

주 석

- 1) ISO13600에 따르면 에너지 운반체(energy carrier)는 스프링, 압축공기, 전기 등 에너지를 생산하지 않고, 단순히 다른 시스템에 의해 채워진 에너지를 담고 있는 물질 또는 현상으로 정의함.
- 2) 광합성 및 혐기성 발효에 의해 수소를 생산하는 생물학적 방식, 광촉매 기술을 이용하는 광 화학적 방식, 원자력 기반 수소 생산 방식 등에 대한 연구도 국내외에서 이루어지고 있다.
- 3) 천연가스 주성분인 메탄 기준으로 이산화탄소 분자 1개당 수소 분자 4개가 생성되어 메탄이 가진 열량의 65~75%가 수소에너지로 전환 됨.
- 4) 원료별 수소 1톤 생산 시 온실가스 발생량은 천연가스 10톤, 석유제품 12톤, 석탄 19톤이다.
- 5) 에너지경제연구원, 산업통상자원부, 2019. 『수소경제 활성화 로드맵 수립 연구』.
- 6) 재생에너지만으로 생산된 수소를 그린 수소로 정의한다면 화석연료 발전 설비가 포함된 일반적인 전력망에 맞물려 생산된 수전해 수소는 그린 수소에서 제외된다. 따라서 수전해에 사용 된 전기의 온실가스 배출량이 일정 수준 이하이면 그린 수소로 인정하는 방식이 일반적이다.
- 7) 유영돈. 2019. 「수소의 저장, 운송 및 충전」, 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술 진흥협회.
- 8) 암모니아를 수소 운반체로 이용하는 기술로서 밀도가 수소 대비 두 배 높은 수준이며, 끓는 점이 약 영하 33°C로 액화에 필요한 에너지가 낮고 액화(25°C, 8bar)가 용이하므로 저압용 기에 저장이 가능하여 현재의 암모니아 저장 및 이송 인프라를 사용할 수 있는 경제적 기술임(유영돈, 2019).
- 9) MCH 기술은 기체수소의 1/500 수준의 에너지밀도를 유지하여 상온·상압에서 액상으로 장기저장이 가능하며, 선박 및 탱크 등 기존 수송·하역 인프라 활용이 가능하다.
- 10) MCH 외에도 N-methyl carbazole, Dibenzyl-toluene의 수소화된 화합물이 있음.
- 11) 유석현. 2019. 「수소의 실체와 함께 살펴보는 수소경제의 미래」, 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술진흥협회.
- 12) 『수소경제 활성화 로드맵(2019)』의 안전성 관련 내용을 중심으로 정리함.
- 13) 일본 고압가스안전협회 자료와 미국 수소사고 보고데이터 등에 따르면 폭발 사고를 제외한 2005~2014년 일본의 수소 충전소 사고는 21건, 2004~2012년 미국의 수소 충전소 사고 는 22건으로 집계되었음.
- 14) 관계부처 합동. 2019a. 『수소경제 활성화 로드맵』.
- 15) National Research Council and National Academy of Engineering. 2004. *The*

hydrogen economy: opportunities, costs, barriers, and R&D needs. National Academies Press. 재인용: 에너지경제연구원, 산업통상자원부, 2019. 『수소경제 활성화 로드맵 수립 연구』.

- 16) 정책위키. 에너지전환 정책. <http://www.korea.kr/special/policyCurationView.do?newsId=148864795>.
- 17) 대한민국 정부. 2017. 『100대 국정과제』.
- 18) 배용호. 2019. 「수소경제 주요 계획과 미래 전망」. 『Future Horizon Plus』, Vol. 43. 과학 기술정책연구원.
- 19) 관계부처 합동. 2018. 『혁신성장 전략투자 방향』.
- 20) ① 데이터 「블록체인」공유경제 ② AI ③ 수소경제를 3대 전략투자 분야로 선정하고 공통 분야로 ④ 혁신인재 양성을 선정
- 21) 산업통상자원부. 2020. 『수소경제 추진 1년, 눈부신 초기 성과 달성』. 보도자료. (1월 13일).
- 22) ① 표준 분야: 『수소경제 표준화 전략 로드맵(2019년 4월)』, ② 공급·충전소: 『수소 인프라 및 충전소 구축방안(2019년 10월)』, ③ 수소차: 『미래자동차 산업 발전전략(2019년 10월)』, ④ R&D 분야: 『수소 기술개발 로드맵(2019년 10월)』, ⑤ 수소도시: 『수소 시범도시 추진 전략(2019년 10월)』, ⑥ 안전 분야: 『수소안전관리 종합대책(2019년 12월)』
- 23) 2019년 1~10월 수소차 총 판매대수: 현대 3,666대(비중 60%), 도요타 2,174대, 혼다 286대.
- 24) HyNet(하이넷, Hydrogen Energy Network) : 한국가스공사, 현대차 등 13개사 참여
- 25) 연료전지 발전용량(2019년): 미국(382MW), 일본(245MW)
- 26) 미국 에너지부의 수소와 연료전지 관련 예산은 2008년 267.3백만 달러에서 2017년 122.1백만 달러로 급속히 줄었다. (Department of Energy. “Budget.” <https://www.hydrogen.energy.gov/budget.html>.)
- 27) WIKIPEDIA. “United States hydrogen policy.” https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_hydrogen_policy.
- 28) 미국의 수소와 연료전지와 관련된 법규와 지원제도로는 ‘대체 연료 및 자동차 표시 요건 (Alternative-fuel and vehicle labeling requirements)’, ‘대체 연료 기반시설 세금 공제 (Alternative-fuel infrastructure tax credit)’, ‘연료전지 자동차 세금 공제(Fuel-cell motor vehicle tax credit)’, ‘수소 연료 소비세 공제(Hydrogen fuel excise tax credit)’, ‘에너지 기술 개선 대출 (Improved energy technology loans)’, ‘기업 에너지 투자 세액 공제(Business Energy Investment Tax Credit)와 ’주거용 재생 에너지 세액 공제 (Residential Renewable Energy Tax Credit.)’ 등이 연방정부 차원에서 마련되어 있다.

- 이 중에서 '연료전지 자동차 세제 공제'와 '수소 연료 인프라 세액 공제', '액화수소 소비세 세액 공제'와 같은 지원제도는 2017년 말에 만료되어 시행이 중단되었다. (FCHEA, "Incentive Programs." <http://www.fchea.org/incentive-programs.>)
- 29) 홍원표, 강수현. 2015. 『미국의 수소연료전지차 보급을 위한 민관파트너십 사례와 시사점』. 『충남리포트』, 제180호. 충남연구원.
- 30) 해당 자료는 "www.ushydrogenstudy.org"에서 다운로드 받을 수 있다.
- 31) WIKIPEDIA. "United States hydrogen policy." https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_hydrogen_policy.
- 32) 에너지경제연구원, 산업통상자원부, 2019. 『수소경제 활성화 로드맵 수립 연구』.
- 33) 홍원표, 강수현. 2015. 『미국의 수소연료전지차 보급을 위한 민관파트너십 사례와 시사점』. 『충남리포트』, 제180호. 충남연구원.
- 34) WIKIPEDIA. "California Hydrogen Highway." https://en.wikipedia.org/wiki/California_Hydrogen_Highway.
- 35) "83 new hydrogen refuelling stations worldwide." 2020. *H2Stations.org*. (February 19)
- 36) 에너지경제연구원, 산업통상자원부, 2019. 『수소경제 활성화 로드맵 수립 연구』.
- 37) 양익석, 임지영. 2018. 「일본 수소기본전략 추진 배경과 핵심내용 분석(Ⅰ)」. 『세계 에너지 시장 인사이트』, 제18-44호. 에너지경제연구원.
양익석, 임지영. 2018. 「일본 수소사회 실현을 위한 기본전략(Ⅱ)」. 『세계 에너지시장 인사이트』, 제18-45호. 에너지경제연구원.
- 38) 해당 로드맵은 2016년 3월에 개정되어 가정용 연료전지(에네팜), 연료전지자동차, 수소 충전소 자립화 전략·목표 등을 포함하고 있음.
- 39) 해당 비용을 무게 기준으로 환산하면 약 360엔/kg에 해당함.
- 40) 메탄화(CO₂-free Methanation) 기술은 수소를 CO₂와 합성하여 메탄화(Methanation) 하여 활용하는 것으로 기존 에너지인프라(도시가스 파이프라인 및 LNG화력 발전소 등)의 활용 관점에서 큰 잠재력을 보유하고 있는 것으로 평가되고 있다.
- 41) 해당 실증사업은 호주 빅토리아주의 Latrobe Valley에서 생산된 갈탄으로 수소를 제조한 뒤 액화하여 일본 고베시로 수송하는 사업으로(Hydrogen Energy Supply Chain Project, HESC Project) 사업비는 약 5억 호주 달러이며, 호주 연방 정부와 빅토리아 주정부로부터 각각 5천만 호주 달러의 보조금을 받아 추진되고, 수소 공급망(수소 생산, 액화, 해상 수송 및 선적·하역 등)의 상용화를 위한 시범사업이다.
- 42) 2009년 중국 정부는 13개 지역에 수소차 지원책으로 20만~60만 위안(약 3450만~1억

300만 원)의 보조금을 지급하는 지원책을 내놓고, 2014년에는 수소에너지 기술을 중점 육성대상으로 지정했으며, 2015년에는 중국의 차세대 첨단산업 육성 국가 정책인 '중국 제조 2025'를 통해 연료전지기술 개발, 수소전기차 산업 육성 촉진, 수소에너지 기술개발 등과 관련된 정책 및 목표치 등을 제시하였다. (곽예지, 2020. 「[보고서로 읽는 중국] 팽창하는 중국 수소차 시장」. 『아주경제』. (5월 16일))

- 43) 김학주, 2019. 「수소경제를 여는 중국」. 『경북매일』. (1월 24일)
- 44) KOTRA 해외시장뉴스, 2019. 중국 수소산업을 이끄는 수소경제도시 루가오 현장 속으로. <http://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/7/globalBbsDataView.do?setIdx=245&dataIdx=178216&pageViewType=&column=title&search=&searchAreaCd=&searchNationCd=&searchTradeCd=1039141&searchStartDate=&searchEndDate=&searchCategoryIdxs=&searchIndustryCatIdx=&searchItemCode=&searchItemName=&page=1&row=10>.
- 45) 김학주, 2019. 「수소경제를 여는 중국」. 『경북매일』. (1월 24일)
- 46) 주 시안 총영사관, 2018. 중국 수소연료전지 산업 발전 현황. http://overseas.mofa.go.kr/cn-xian-ko/brd/m_752/view.do?seq=1344383&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&multi_itm_seq=0&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&company_cd=&company_nm=&page=4.
- 47) 현대자동차그룹, 2020. 탄소 경제에서 수소 경제로 이동하는 세계. <https://news.hmgjournal.com/Group-Story/%ED%83%84%EC%86%8C-%EA%B2%BD%EC%A0%9C%EC%97%90%EC%84%9C-%EC%88%98%EC%86%8C-%EA%B2%BD%EC%A0%9C%EB%A1%9C-%EC%9D%B4%EB%8F%99%ED%95%98%EB%8A%94-%EC%84%B8%EA%B3%84>.
- 48) 임해중, 2019. 「[단독] 수소패권 욕심 드러낸 중국…수소차 판매 가점 확대」. 『뉴스1』. (10월 22일)
- 49) 곽예지, 2020. 「[보고서로 읽는 중국] 팽창하는 중국 수소차 시장」. 『아주경제』. (5월 16일)
- 50) MOT Consultant, 2019. 한국·중국·일본의 수소 경제 추진 정책. <https://blog.naver.com/drryuhk/221566866053>.
- 51) KOTRA 해외시장뉴스, 2019. 중국 수소산업을 이끄는 수소경제도시 루가오 현장 속으로. <http://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/7/globalBbsDataView.do?setIdx=245&dataIdx=178216&pageViewType=&column=title&search=&searchAreaCd=&searchNationCd=&searchTradeCd=1039141&searchStartDate=&searchEndDate=&searchCategoryIdxs=&searchIndustryCatIdx=&searchItemCode=&searchItemName=&page=1&row=10>.

- 52) UNDP China. Hydrogen Economy Pilot in China (Rugao Project). https://www.cn.undp.org/content/china/en/home/operations/projects/environment_and_energy/china-hydrogen-economy-pilot-in-rugao.html.
- 53) Cagatay, Gulsen. 2018. "Wuhan to become new hydrogen city in central China." Anadolu Agency. (January 22)
- 54) 부경진. 2006. 「해외 주요국의 수소경제로의 이행 전략」, 『에너지포커스』, 2006년 1-2월호. 에너지경제연구원.
- 55) 이어서 2005년 7월에는 '유럽의 수소와 연료전지기술 플랫폼 - 전략적 연구 의제 (European Hydrogen & Fuel Cell Technology Platform - Strategic Research Agenda)'가 수립·발간되었고, 2005년 8월에는 관련 '전개 전략 (Deployment Strategy)', 그리고 2007년에는 '이행 계획 (Implementation Plan)'이 수립되었는데, 이들이 2008년에 설립된 'Fuel Cells and Hydrogen - Joint Undertaking (FCH-JU)'을 탄생시킨 근거가 되었다.
- 56) FCH-JU, "VISION & OBJECTIVES." <https://www.fch.europa.eu/page/vision-objectives>.
- 57) European Commission. "Hydrogen." https://ec.europa.eu/energy/topics/technology-and-innovation/energy-storage/hydrogen_en.
- 58) 글로벌 과학기술정책정보 서비스. 2018. 수소경제를 향한 유럽의 정책 발표. <https://now.k2base.re.kr/portal/trend/mainTrend/view.do?poliTrndId=TRND0000000000034227&menuNo=200004&pageIndex=>.
- 59) "83 new hydrogen refuelling stations worldwide." 2020. *H2Stations.org*. (February 19)
- 60) 한국에너지공단 블로그. 2018. [신재생 에너지] 유럽의 수소버스 도입 지원 프로그램이란?. <http://blog.energy.or.kr/?p=16402>.
- 61) 2018년 7월을 기준으로 독일에 40대, 영국에는 22대의 수소버스가 도입이 되었다.
- 62) Psalidakis, Daphne. 2018. "EU countries agree to explore hydrogen as energy source." *Reuters*. (September 18)
- 63) KOTRA 해외시장뉴스. 2019. 독일, 수소 인프라 확충에 총력. <http://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/7/globalBbsDataView.do?setIdx=245&dataIdx=176265>.
- 64) KOTRA 해외시장뉴스. 2018. 독일의 수소경제 이행 동향 및 협력 방안. <http://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/699/globalBbsDataView.do?setIdx=383&dataIdx=167790>.
- 65) P2G 사업은 태양광, 풍력과 같은 대규모 재생에너지단지에서 생산된 잉여전력을 활용

하여 전기분해 방식으로 수소를 생산하는 기술로 신재생에너지 발전이 가지는 간헐성의 문제와 전력부하 관리 해결에도 기여할 수 있다.

- 66) Williams, Bret. 2019. "Power-to-gas industry in Germany to experience massive boost in the next five years." *Hydrogen Fuel News*. (December 5)
- 67) 동 프로그램은 가정용 연료전지 실제 테스트 프로젝트로 총 소요예산 7,500만 유로(이 중 연방교통디지털인프라부가 NIP 프로그램 차원에서 3,600만 유로 분담) 소요
- 68) KOTRA 해외시장뉴스. 2018. 독일의 수소경제 이행 동향 및 협력 방안. <http://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/699/globalBbsDataView.do?setIdx=383&dataIdx=167790>.
- 69) Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems(ISE)와 Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research
- 70) <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/ueber-fraunhofer/wissenschaftspolitik/Positionen/2019-10-a-hydrogen-roadmap-for-germany.pdf>
- 71) 독일 경제협력개발부. 2020. *Die Nationale Wasserstoffstrategie*.
- 72) 에너지경제연구원. 2020. 「독일, 수소산업에서 우위를 점하기 위한 국가수소전략 발표」. 『세계 에너지시장 인사이트』, 제20-13호.
- 73) Fraunhofer ISE. 2020. Public Net Electricity Generation in Germany 2019: Share from Renewables Exceeds Fossil Fuels. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2019/Public-net-electricity-generation-in-germany-2019.html>.
- 74) CSIRO. 2018. *National Hydrogen Roadmap*. 요약 발췌
- 75) COAG Energy Council. 2019. *Australia's National Hydrogen Strategy*.
- 76) 양익석, 김태환. 2019. 「수소에너지 글로벌 선도를 위한 국제협력 방안 연구」. 산업통상자원부, 에너지경제연구원.
- 77) 재생에너지원을 통해 만들어진 전력을 이용하여 친환경 수소(그린 수소) 생산을 위한 전기 분해 설비를 구축함으로써 후쿠시마를 수소 공급 중심으로 조성하기 위한 프로젝트
- 78) 일본 경제산업성. 2018. Tokyo Statement – Chair's Summary of Hydrogen Energy Ministerial Meeting. <https://www.meti.go.jp/press/2018/10/20181023011/20181023011-5.pdf>.
- 79) 일본 경제산업성. 2019. Chair's Summary of 2nd Hydrogen Energy Ministerial Meeting – Global Action Agenda of Tokyo Statement. https://h2em2019.go.jp/summary/summary_en.pdf.

- 80) Yoo, E., Kim, M., and Song, H. H. 2018. "Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea." *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(41), 19267-19278.
- 81) 전 과정 평가가 아닌 천연가스에서 수소를 추출하는 공정에서의 배출량만 측정한다면 온실가스 배출량은 이보다 낮아짐.
- 82) 현재까지는 2020년 준공예정인 남사 분해공정 부생수소를 활용하는 50MW급 대산그린에너지(주)의 연료전지 발전소가 예측 가능한 발전용 연료전지 부문의 남사 분해공정 부생수소 소비의 전부인 것으로 보인다.
- 83) 부피당 에너지밀도는 휘발유의 1/4 수준에 불과하지만 중량당 에너지밀도는 휘발유의 3배 수준임.
- 84) 대기압은 1.013bar이므로 1bar는 거의 대기압과 동일한 압력임.
- 85) 수소를 담은 튜브가 10개로 구성된 단위를 튜브트레이일러(혹은 카트리지)라고 하며, 이를 운반하는 자동차를 트렉터라고 부름.
- 86) Type 1은 강철, 알루미늄 등의 금속으로 제작된 용기로서 무거운 단점이 있음. Type 2는 몸통부만 복합재료로 보강하여 금속용기의 벽두께를 감소시켜 무게를 경감시켰으나 여전히 무거운 금속용기임. Type 3은 내충용기를 복합재료로 제작하여 가볍지만 큰 직경 용기의 경우 내구성이 높지 않은 단점이 있음. Type 4는 복합재료로 만들어서 가볍고 내구성이 우수한 용기임. 400bar 이상의 Type 1과 2의 용기 개발이 진행 중임(유영돈. 2019. 「수소의 저장, 운송 및 충전」. 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술진흥협회.).
- 87) 수소 수송기술의 주요 내용은 김수현(2019) 및 유영돈(2019)에서 인용 (김수현. 2019. 「수소 저장/운송 기술 개요 및 현황」. 『에너지포커스』, 2019 겨울호. 에너지경제연구원. 유영돈. 2019. 「수소의 저장, 운송 및 충전」. 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술진흥협회.)
- 88) 일본 NEDO는 Toluene-MCH(Methylcyclohexane)사이클을 이용한 수소저장, 재방출 촉매 및 시스템에 대한 연구를 수행하고 있는데, 톨루엔에 수소를 첨가하여 MCH 형태로 전환한 후 수송하여 수소 수요처에 구축된 탈수소화 플랜트를 통해 수소를 추출하여 다시 톨루엔으로 전환하는 기술임(유영돈. 2019. 「수소의 저장, 운송 및 충전」. 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술진흥협회.).
- 89) 관계부처 합동. 2019a. 『수소경제 활성화 로드맵』.
- 90) 편도 200km를 하루에 한 번 운행하는 경우와 동일하게 가정함.
- 91) 튜브트레이일러의 이용률을 50%로 가정할 경우 연간 수송량은 91,250kg, 이용률 90% 가정시 164,250kg임.

- 92) 편도 100km를 하루에 2회 왕복하는 것으로 가정했기 때문에 편도 200km를 하루에 한 번 왕복하는 경우와도 동일함.
- 93) 수소융합얼라이언스는 수소의 소비자 가격(55,019원/kg)을 수소 제조가격 3,099원/kg, 수송비용 7,656원/kg, 충전소 비용 44,263원/kg으로 추정함. 튜브트레일러 이용률을 20%에서 50%로 올리면 수송비용은 4,187원/kg, 이용률을 100%로 올리면 3,031원/kg으로 하락할 것으로 예상함. 수송거리를 200km에서 100km로 단축하면 수송단가는 4.3% 하락할 것으로 예상함. 수소자동차가 경유 자동차(산타페) 대비 경쟁력을 확보할 수 있는 수소의 소비자 가격을 8,000원/kg 이하로 예상함(수소융합얼라이언스추진단. 2017. 『수송용 수소연료의 가격 설정 및 수급체계 구축방안』).
- 94) Allied Market Research. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Market To Garner \$42.03 Billion by 2026. <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/02/21/1988377/0/en/Hydrogen-Fuel-Cell-Vehicle-Market-To-Garner-42-03-Billion-by-2026-AMR.html>.
- 95) 류연화. 2019. 『수소전기차 Stress Test』. 한화투자증권.
- 96) 겨울 조건에서 전기자동차는 평균 18.5%의 운행거리 감소 가능성이 있는 것으로 분석됨 (NAF. 20 popular EVs tested in Norwegian winter conditions. <https://www.naf.no/elbil/aktuelt/elbiltest/ev-winter-range-test-2020>).
- 97) 이서진, 김성균. 2019. 「수소 기반 저탄소 에너지 시스템의 구현을 위한 해외 정책 동향」. 『세계 에너지시장 인사이트』, 제19-22호. 에너지경제연구원.
- 98) Nikolaidis, P. and Poullikkas, A. 2017. "A comparative overview of hydrogen production processes." *Renewable and sustainable energy reviews*, 67.
- 99) Bhaskar, A., Assadi, M., and Nikpey Somehsaraei, H. N. 2020. "Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen." *Energies*, 13(3), 758.
- 100) 울산지역 수소 파이프라인 수소 공급원가(200원/Nm³)의 약 2배가 넘는 수준임.
- 101) 수소를 직접 연소시키거나 화력발전으로 생산된 전기를 사용
- 102) 김지희, 김영옥, 박정연. 2019. 「신재생 여유전력을 활용한 수소 생산의 경제성 분석」. 『에너지포커스』, 2019 겨울호. 에너지경제연구원.
- 103) 벡스 연비 119.0 km/kg 적용(Pollet, B. G., Kocha, S. S., and Staffell, I. 2019. "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport." *Current opinion in Electrochemistry*, 16, 90-95.)
- 104) 김지희, 김영옥, 박정연. 2019. 「신재생 여유전력을 활용한 수소 생산의 경제성 분석」. 『에너지포커스』, 2019 겨울호. 에너지경제연구원.

- 105) Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., and Sutherland, E. 2016. "Building a hydrogen infrastructure in the United States." *Compendium of hydrogen energy*. Woodhead Publishing.
- 106) Crabtree, G. W., Dresselhaus, M. S., and Buchanan, M. V. 2004. "The hydrogen economy." *Physics today*, 57(12), 39-44.
- 107) 이택홍, 강병우, 이은웅, 정진배. 2017. 「수소 충전소 연료계량방법의 차이에서 발생하는 연료단가의 상이점에 대한 고찰」. 『한국수소 및 신에너지학회논문집』, 28(3), pp.279-286.
- 108) 2018년 세계 수소 생산(부생수소 제외)의 3/4 이상이 천연가스 개질 방식으로 생산되었다 (IEA. 2019. *The Future of Hydrogen*.).
- 109) IEA(2019)의 분석에 따르면 2030년 천연가스 기반 수소 생산 비용이 가장 낮다. 해당 분석 대상은 유럽이고, CO₂가격을 \$40/tCO₂로 가정하여 분석하였다(IEA. 2019. *The Future of Hydrogen*.).
- 110) 산업통상자원부. 2019. 2019년 신재생에너지보급(주택지원)사업 지원공고. https://motie.go.kr/motie/in/ay/policynotify/announce/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=65231&bbs_cd_n=6.
- 111) 고은지. 2020. 「10년간 672억원 지원했는데...가정용 연료전지 64% '미가동'」. 『연합뉴스』. (10월 13일)
- 112) 한국가스공사와 한국수력원자력 등은 가스공사의 인천LNG 생산기지에서 발생하는 BOG를 활용한 연료전지 사업을 검토 중이다(임성현, 김태준, 문재용, 오찬중, 김연주, 양연호, 송민근, 김형주. 2020. 「1한국가스공사, 수소경제 박차 '미세먼지 제로' 앞장선다」. 『매일경제』. (1월 15일)).
- 113) LNG 저장탱크는 영하 162°C 이하의 극저온 상태를 유지하도록 단열구조로 이루어져 있다.
- 114) 일본 에네폼에는 PEFC와 SOFC 타입의 연료전지가 활용되고 있다.

표·그림 출처

- 관계부처 합동. 2019a. 『수소경제 활성화 로드맵』.
- 관계부처 합동. 2019b. 『수소 시범도시 추진전략』.
- 김지희, 김영옥, 박정연. 2019. 「신재생 여유전력을 활용한 수소 생산의 경제성 분석」, 『에너지 포커스』, 2019 겨울호. 에너지경제연구원.
- 산업통상자원부. 2017. 『제8차 전력수급기본계획(2017~2031)』.
- 수소융합얼라이언스추진단. 2020. 『수소에너지·수소경제 30문30답』.
- 「2020년 산업용 수소 시장 진단」, 2020. 『신소재경제신문』, (2월 3일)
- 에너지경제연구원, 산업통상자원부, 2019. 『수소경제 활성화 로드맵 수립 연구』.
- 유영돈. 2019. 「수소의 저장, 운송 및 충전」, 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술 진흥협회.
- 유석현. 2019. 「수소의 실체와 함께 살펴보는 수소경제의 미래」, 『기술과 혁신』, 2019년 9월호. 한국산업기술진흥협회.
- 정기대. 2019. 「수소경제의 경제적·기술적 이슈」, 『POSRI 이슈리포트』. 포스코경영연구원.
- 한국가스공사. 2019. 『수소사업 추진 로드맵』.
- 한국에너지공단 신·재생에너지센터. 신재생에너지보급통계 DB.
- 홍성안. 2020. 『수소산업 미래와 전망-에너지전환과 수소사회』. (2월 11일)
- KOTRA 해외시장뉴스. 2018. 독일의 수소경제 이행 동향 및 협력 방안. <https://news.kotra.or.kr/user/globalBbs/kotranews/699/globalBbsDataView.do?setIdx=383&dataIdx=167790&pageViewType=&column=&search=&searchAreaCd=&searchNationCd=&searchTradeCd=&searchStartDate=&searchEndDate=&searchCategoryIdx=&searchIndustryCatIdx=&searchItemCode=&searchItemName=&page=7&row=60>.
- CEM-H2I. "Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative." <https://www.iea.org/programmes/clean-energy-ministerial-hydrogen-initiative>.
- COAG Energy Council. 2019. *Australia's National Hydrogen Strategy*.
- EU-Japan Centre for Industrial Cooperation. 2019. *Hydrogen and Fuel Cells in Japan*.
- FCHEA. 2020. *Road Map to a US Hydrogen Economy*.

- FCH-JU. "VISION & OBJECTIVES." <https://www.fch.europa.eu/page/vision-objectives>.
- "83 new hydrogen refuelling stations worldwide." 2020. H2Stations.org. (February 19)
- Nikolaidis, P. and Poullikkas, A. 2017. "A comparative overview of hydrogen production processes." *Renewable and sustainable energy reviews*, 67.
- Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., and Sutherland, E. 2016. "Building a hydrogen infrastructure in the United States." *Compendium of hydrogen energy*. Woodhead Publishing.
- IEA. 2019. The Future of Hydrogen.

이미지 출처

- 김우보. 2019. 「[수소경제 가는길, 일본서 배운다] 日, 가정용 '에네팜' 23만대 보급...2030년 수소로 LNG발전 대체」. 『서울경제』. (2월 24일)
- 류청희. 2018. 「2022년, 우리가 살게 될 자동차 세상 - 수소연료전지차 운명은」. 『JASONRYU.NET』. (5월 1일)
- 박상우. 2020. 「한화그룹 투자한 니콜라, 29일 전기픽업 '벤티' 예약판매 개시...실물도 공개」. 『M오토데일리』. (6월 9일)
- 박철민. 2020. 「수소경제, 미래를 열다⑨ '아프리카'를 주목해야 하는 이유」. 『시사위크』. (4월 28일)
- 박종근. 2019. 「[ZOOM] 도심 한복판에서 수소차 충전」. 『중앙시사매거진』. (10월 7일)
- 이창주. 2020. 「한화에너지, 세계 최초·최대 규모 부생수소 연료전지 발전소 준공」. 『웰빙뉴스』. (7월 28일)
- 한재영. 2016. 「두산 세계 첫 복층형 연료전지발전소 가보니...컨테이너박스 같은 모듈형 눈길」. 『서울경제』. (11월 28일)
- 「현대자동차, 수소전용 대형트럭 콘셉트카 '넵튠(Neptune)'최초 공개」. 2019. 『현대자동차』. (10월 29일)
- "Alstom's hydrogen train Coradia iLint completes successful tests in the Netherlands." 2020. *Alstom*. (March 6)
- Esterdahl, Tim. 2018. "Toyota's Hydrogen Fuel Cell Project Portal Class 8 Semi Truck." *Truck Trend Network*. (July 11)
- Flickr. "U.S. Department of Energy," <https://www.flickr.com/photos/departmentofenergy/48981195407>.
- "Kiwa provides insight into the quality of Groningen Seaports' hydrogen transport piping system." 2019. *Kiwa*. (July 18)
- Martin, Nik. 2020. "Germany and hydrogen - €9 billion to spend as strategy is revealed." *DW*. (June 10)
- OVID. "Tube Trailers." <https://www.ovid.it/en/tube-trailers/>.
- Shutterstock. "Shutterstock Images." <https://www.shutterstock.com/ko/home>.

- Wikimedia Commons. "File:Hyundai NEXO Hydrogen Fuel Cell Car beim Autosalon Genf 2018 e.jpg." https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyundai_NEXO_Hydrogen_Fuel_Cell_Car_beim_Autosalon_Genf_2018_e.jpg.
- Xinhua. 2018. "Hydrogen fuels green future for China's transportation." *China Daily*. (November 8)
- 李琦, 殷再宏. 2019. "1500大咖齐聚长三角“氢谷”如皋为国际氢能与燃料电池汽车产业发展把脉." *SOHU.com*. (September 27)

용어집

- **고분자 전해질 연료전지** : 수소이온을 통과시키는 고분자막을 전해질로 사용하는 연료전지로서 저온에서 작동하고 시동이 빨라 자동차 탑재에 적합한 특성 보유.
- **고체산화물 연료전지** : 수소이온을 통과시키는 고체산화물을 전해질로 사용하는 연료전지로서 고온에서 작동하고 구조가 간단하여 발전설비로 활용하기에 적합한 특성 보유.
- **그레이수소** : 화석연료 개질 방식으로 추출된 수소 중 생산과정에서 발생하는 이산화탄소를 그대로 대기 중으로 배출하는 것.
- **그린수소** : 주로 재생에너지로 생산한 전기로 물을 전기분해하여 생산된 수소. 생산과정에서의 온실가스 배출량이 다른 방식에 비해 상당히 낮아 향후 생산량이 크게 늘어날 전망.
- **납사 분해** : 원유를 증류할 때 LPG와 등유 유분 사이에 유출되는 물질인 납사(naphtha)를 800℃ 이상의 고온에서 열분해하여 석유화학의 기초원료인 에틸렌, 프로필렌, C4유분, 열분해 가솔린 등을 생산하는 공정.
- **동위원소** : 원자 번호는 같지만 질량수는 다른 원자. 즉, 양성자 수는 같지만 중성자 수는 다른 원소.
- **메탄화** : 일산화탄소, 이산화탄소에 수소를 첨가하여 천연가스의 주성분인 메탄을 생산하는 방법.
- **바이오매스** : 목재, 볏짚, 열매, 플랑크톤, 분뇨 등 동식물 그 자체 또는 그로부터 생산되는 유기물 중 에너지 생산이나 제조공정의 원료로서 가치가 있는 것.
- **부생수소** : 석유정제, 석유화학이나 제철 공정 등에서 부산물로 나오는 수소 혼합가스에서 분리하여 활용하는 수소.
- **분산형 전원** : 대도시 등 주요 수요처로부터 먼 곳에서 전력을 생산, 송전하는 화력발전, 원자력 발전과 같은 대규모 발전 설비와 달리 전력 소비지 인근에 분산 배치될 수 있는 소규모의 발전 설비. 태양광, 바이오매스, 지열 등 재생에너지 발전설비, 연료전지, 소규모 열병합발전 설비 등이 이에 해당.
- **블루수소** : 화석연료 개질 방식으로 추출된 수소 중 생산과정에서 배출되는 이산화탄소를 CSS 등의 기술을 활용하여 현재저 줄인 것.
- **세일가스** : 퇴적암인 셰일(혈암)에 부존되어 있는 천연가스로서 석유(타이트오일)와 함께 매장되어 있거나 가스만 매장되어 있는 형태로 분류. 특정 지질구조에 모여 있는 전통가스와 구분되는 비전통가스 중 가장 대표적.
- **수소 가스터빈** : 발전 연료로 천연가스 대신 수소를 사용하는 가스터빈.
- **수소경제** : 에너지시스템 내에서 수소를 대규모로 사용하는 경제·산업구조. 여기서 사용되는

수소는 궁극적으로는 재생에너지, CCS 기술과 결합된 화석연료 등 저탄소 에너지원으로 생산하는 것을 전제함.

- **수소차/수소전기차** : 수소와 공기 중의 산소를 반응시켜 전기를 생산하는 연료전지를 동력원으로 하는 자동차로서 물 이외의 다른 물질을 배출하지 않는 친환경자동차. 과거에는 수소를 내연기관에서 직접 연소시키는 수소차도 존재.
- **수소화 반응** : 유기 화합물 속의 불포화 결합에 수소를 첨가하는 반응.
- **수전해** : 물을 전기분해 하는 것으로 수소와 산소를 생산.
- **신재생에너지 공급인증서** : 신재생에너지 생산시설에서 전력을 생산한 발전사업자에게 생산된 전력량과 생산 방식별 가중치에 따라 발급해 주는 인증서.
- **에너지믹스** : 다양한 에너지원으로 국가 전체의 에너지 공급을 구성하는 것. 경제성, 환경성, 공급 안정성 등을 고려하여 특정 에너지원에 편중되지 않게 구성하는 것이 일반적이며 최근에는 온실가스, 오염물질 배출 감축을 위해 태양광, 풍력, 바이오매스 등 재생가능에너지의 비중이 늘어나는 추세.
- **에너지원** : 에너지로 사용이 가능한 자원으로써 석유, 석탄, 천연가스, 태양에너지, 풍력, 우라늄 등이 이에 해당하며 전기, 수소 등은 에너지 운반체(carrier)에 해당.
- **에너지 저장 시스템** : 전기를 저장했다가 전력이 필요할 때 공급하는 시스템으로 우리나라에서는 대개 배터리를 활용한 시스템을 지칭. 에너지 저장 수단으로는 배터리 외에도 댐, 양수 발전, 수소, 압축공기 등 다양한 형태가 존재.
- **연료전지** : 수소를 양극, 산소를 음극에 계속 공급하여 산화-환원반응을 통해 수소와 산소의 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 전기화학적 장치.
- **증발가스** : 천연가스를 영하 163°C로 냉각해 액체상태가 된 LNG에서 외부 온도, 압력 등의 영향으로 자연적으로 기화가 이루어져 생성되는 기체 상태의 천연가스.
- **타이트오일** : 모래와 진흙이 굳어진 셰일층에 존재하는 원유로 기존 원유와는 매장 형태가 다른 비전통 에너지원
- **탄소포집 및 저장** : 주로 화력발전, 에너지 집약형 산업 등 대규모 에너지 소비처에서 공기 중으로 배출되는 이산화탄소를 포집하여 지하 지질 구조에 저장함으로써 온실가스 배출을 크게 줄이는 기술
- **탈탄소화** : 에너지 공급에서는 화석연료의 비중 감소, 소비에서는 에너지 효율 개선으로 사회 전반에서 에너지 사용에 의한 이산화탄소 배출이 줄어드는 현상.
- **튜브트레일러** : 수소를 도로수송하는 대표적 방식으로 고압 수소를 담은 10개의 튜브로 구성된 트레일러(카트리지)를 트럭(트랙터)로 견인.

- **화석연료 개질(추출)** : 석탄이나 천연가스를 고온·고압에서 수증기와 반응시켜 수소를 생산하는 방식.
- **히트펌프** : 자연 상태에서 높은 온도에서 낮은 온도로 이동하는 열을 낮은 온도에서 높은 온도로 끌어 올리는 장치.
- **P2G** : 전기를 수소, 메탄 등 기체 에너지로 변환하여 활용 또는 저장하는 기술로서 태양광, 풍력 등 가변성 재생에너지의 효율적 활용에 중요.
- **2차 전지** : 방전 후에도 다시 충전해 반복 사용이 가능한 전지. 충전이 불가능하면 1차 전지.

약어집

- **BOG** : Boil-off Gas (증발가스)
- **CaFCP** : California Fuel Cell Partnership (캘리포니아 연료전지 파트너십)
- **CEM** : Clean Energy Ministerial (청정에너지장관회의)
- **CEM H2I** : Clean Energy Ministerial Hydrogen Initiative (청정에너지장관회의 수소 이니셔티브)
- **CSIRO** : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (호주 연방 과학·산업 연구회)
- **CSS** : Carbon Capture and Storage (탄소 포집 및 저장)
- **DOE** : Department of Energy (미국 에너지부)
- **EC** : European Commission (EU 집행위원회)
- **ESS** : Energy Storage System (에너지 저장 시스템)
- **FCEV** : Fuel Cell Hydrogen Vehicle (수소차/수소전기차)
- **FCHEA** : Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (미국 연료전지 및 수소 에너지 협회)
- **FCH-JU** : Fuel Cells and Hydrogen - Joint Undertaking (EU 연료전지 및 수소 합동 사업)
- **GCAS** : Global Climate Action Summit (세계기후행동회의)
- **HC** : Hydrogen Council (수소위원회)
- **HEM** : Hydrogen Energy Ministerial (수소에너지장관회의)
- **HyENet** : Hydrogen Energy Network (EU 수소에너지 네트워크)
- **IEA** : International Energy Agency (국제에너지기구)
- **IPHE** : International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (국제 수소·연료전지 파트너십)
- **IRENA** : International Renewable Energy Agency (국제재생에너지기구)
- **JIVE** : Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (유럽 수소차 공동 이니셔티브)
- **LNG** : Liquefied Natural Gas (액화 천연가스)

- **LOHC** : Liquid Organic Hydrogen Carrier (액상 유기 수소 운반체)
- **MCH** : Methylcyclohexane (메틸사이클로헥세인)
- **NEDO** : New Energy and Industrial Technology Development Organization (일본 신에너지·산업기술종합개발기구)
- **NIP** : National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology (독일 수소·연료전지 기술 혁신 프로그램)
- **NOW** : Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (독일 수소 및 연료전지 기술 기구)
- **P2G** : Power-to-Gas
- **PEFC/PEMFC** : Polymer Electrolyte (Membrane) Fuel Cell (고분자전해질 연료전지)
- **REC** : Renewable Energy Certificate (신재생에너지 공급인증서)
- **SOFC** : Solid Oxide Fuel Cell (고체산화물 연료전지)
- **WEF** : World Economic Forum (세계경제포럼)
- **WEC** : World Energy Council (세계에너지총회)
- **ZEV** : Zero Emission Vehicle (무공해 차량)

수소경제가 온다: 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망

2020년 8월 인쇄

2020년 8월 발행

발행인 조용성

발행처 에너지경제연구원

주 소 44543 울산광역시 중구 중가로 405-11

홈페이지 <http://www.keei.re.kr>

전 화 (052)714-2114(대)

팩 스 (052)714-2028

등 록 369-2016-000001호(2016년 1월 22일)

I S B N 978-89-5504-763-9 93320

디자인인쇄 디자인 범신(042)254-8737

수소경제가 온다

- 쉽게 읽히는 수소경제의 동향과 전망 -



비매출/무료



9 788955 047639

ISBN 978-89-5504-763-9



83320