



수소경제 시대의 연료전지 역할 및 현황¹⁾

임희천 한국 수소산업협회 기술부회장 hclim123@nate.com

1. 서론

정부는 지난 1월 수소 경제 활성화 로드맵을 발표하였다. 주요 내용은 2040년까지 세계 최고 수소경제 선진국 도약을 목표로 수소전기차와 연료전지 양대 축으로 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계 구축하는 것이 목표이다.

지구 온난화문제는 화석연료 중심 에너지 사회에서 재생에너지 중심 에너지 사회로 에너지 패라다임이 변화하게 되었고, 2002년 Jeremy Rifkin은 “수소경제 (Hydrogen Economy)”라는 그의 저서에서 에너지 수요 공급 면에서 수소가 화석연료를 대신할 수 있다는 경제적 의미를 부여하였고, 이어 “제3차 산업혁명”이라는 저서에서도 재생에너지 시대에서 시스템 통합을 통한 에너지 수급의 중요성을 강조하면서 수소사회의 도래를 예견하였다. 이것이 수소경제 의미를 구체적으로 제시한 첫걸음으로 생각된다.

수소 경제시대 연료전지는 현재의 분산형 발전형태

로부터 향후 재생에너지가 중심이 에너지 시대인 수소 경제 시대에서는 수소를 통한 전력변환과 함께 전력의 안정성 확보를 위한 방안으로 활용될 것으로 예상된다. 향후 연료전지는 수소경제 시대에서는 전력, 가스, 열망이 통합된 에너지 통합망에서 전력의 생산 및 저장에 담당하는 핵심적인 임무를 수행할 것으로 예상된다.

이에, 본고에서는 수소경제 시대에서 연료전지의 역할과 향후 발전 방향을 제시하는데 목적이 있다. 본고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 수소경제 시대에서 전력 및 수소의 관계를 살펴보고, 3절에서는 연료전지 기술의 개요 및 현황을 4절에서는 보급 정책 및 보급 현황 그리고 산업 발전 방향을 제시하고 제 5절에서는 향후 연료전지 발전 방향을 제시하고자 한다.

2. 수소 경제와 전력

전기는 현대의 문명을 유지 시켜주는 가장 중요한

1) 본고는 임희천, “수소경제 시대의 발전용 연료전지 역할 및 현황,” 『월간 기술과 혁신』, 한국 산업기술 진흥 협회, Vol.433 (2019, 9) 내용을 부분적으로 수정 보완한 것임.

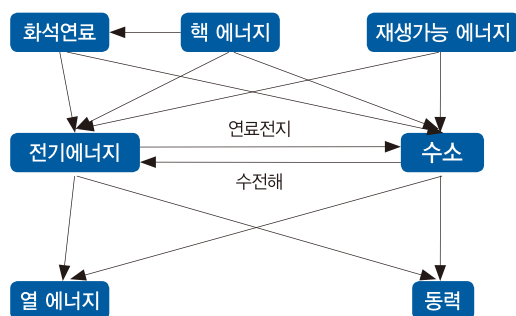


에너지원이다. 수소 경제의 핵심은 재생에너지원에서 출발하고, 재생에너지 중심의 에너지 시스템에서 수소는 에너지 캐리어로서 재생에너지와 전력을 연계시켜주는 역할을 한다. 수소 에너지의 변환 과정과 타 에너지와의 연계를 [그림 1]에서 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 수소에너지 시스템에서 수소는 연료전지와 수전해 장치를 통하여 전기에너지로 전환할 수 있다. 또한, 생산된 수소는 가스나 액체로

만들어 쉽게 수송할 수 있고 다양한 형태로 저장할 수 있다. 수소는 열 및 동력으로 활용될 수 있으며, 운반 시에도 전기에너지 형태보다도 손실을 1/10 정도로 줄일 수 있는 것으로 알려졌다. 즉, 수소는 에너지원 뿐만 아니라 저장, 수송 매체로도 활용할 수 있기 때문에 우리는 수소를 에너지매체 (energy carrier)라고도 부르고 있다.

[그림 1] 수소에너지 변환 및 타에너지원과 연계성



자료: 太田時男(김길환 역), 1988, 12

수소에너지 시스템 내에서 연료전지는 전기에너지 공급 방안뿐 아니라 잉여전력 저장 방안으로 활용될 수 있다. 이 경우 연료전지 발전은 수소를 중심으로 하는 시스템 내에서 가정 및 공장에 수소를 공급하는 수송용 가스망 그리고 열 배관과 함께 전력망을 구성하여 열, 전기, 가스가 통합되어 운용되는 통합 에너지 시스템을 구성할 수 있다. 이와 같이 수소 관련 기술 수전해, 연료전지, 수소 전력저장을 활용하여 열, 전기, 가스 망을 통합하여 에너지 시스템을 구축하게 되면, 기존 화석연료기반 에너지 시스템을 친환경 지속 가능한 에너지 시스템으로 전환하는 중요한 수단으로 활용할 수 있다.

3. 연료전지 발전 기술 개요

연료전지는 연료가 가지고 있는 화학에너지(수소)를 공기중의 산소와 전기화학적 방법으로 결합하여 물과 전기 그리고 열을 생산하는 직접 발전 방식이다. 직접발전 방식이기 때문에 에너지 변환효율이 높고, 연소과정이 없어 오염물질 발생이나 소음, 진동 등 공해 요인도 적다. 연료전지는 발전 시 나오는 고온 증기를 발전에 이용, 더욱 높은 효율을 얻을 수 있는 장점도 있다. 발전용 연료전지는 도심 위치하는 분산전원에서 대규모 전원으로도 활용이 가능하기 때문에 연료전지 발전은 환경을 중시하는 미래 수소에너지 사회에서 저



이슈와 시선

수소경제 시대의 연료전지 역할 및 현황

공해, 고효율을 갖는 가장 새로운 발전 방식으로 제시되고 있다.

발전용 연료전지 시스템은 기본적으로 전기를 생산하는 연료전지 본체(fuel cell power section : Stack), 연료인 천연가스, 메탄올, 석탄, 석유 등을 수소가 많은 연료로 변환시키는 연료처리제(fuel

processor), 발전된 직류 전기를 교류 전기로 변환시키는 전력 변환장치(power conditioner)로 구성된다. 이외 이들 시스템을 제어하고, 생산된 고온의 물을 이용하여 전기를 생산하는 배열이용 시스템(heat recovery system)이 있다.

[그림 2] 연료전지의 종류 및 특징

	저온형 연료전지		고온형 연료전지	
	고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)	인산형 연료전지 (PAFC)	용융탄산염 연료전지 (MCFC)	고체산화물 연료전지 (SOFC)
작동온도	50~100℃	150~250℃	650℃	600~900℃
효율	35%	42%	47%	55~70%
전해질	고분자막	인산염	용융탄산염	고체산화물
발전출력	수kW~수백kW	수십kW~수백kW	수백kW~수십MW	수kW~수kW
용도	건물용/수송용	건물용	분산/대규모발전	건물용/분산발전

자료: 한중희(KIST), 2019

일반적으로 발전용 연료전지는 저온 연료전지인 PEMFC (Polymer Membrane Fuel Cell), 인산형 연료전지(PAFC:Phosphoric Acid Fuel Cell) 등이 있다. 고온 연료전지는 용융탄산염 연료전지(MCFC:Molten Carbonate Fuel Cell) 고체 산화물 연료전지(SOFC : Solid oxide fuel cell)등이 있다. 분산 및 발전용으로는 PAFC 및 MCFC 그리고 SOFC 등이 사용되며, PEMFC는 소규모 가정용과 건물용 수송용 연료전지로 사용되고 있다. [그림 2]에서 연료전지 종류와 특징을 보여주고 있다. 발전용 연료전지는 전력수요 증가, 환경 문제 등의 전력공급 제약 요인 및

전기를 필요로 하는 수요처에서 요구되는 에너지 패턴 등에 따라 화력발전 대체용, 분산형 전원 그리고 가정용 전원 등으로 구분하여 운용되고 있다.

현재 전력 생산에 있어서 가장 큰 제약조건은 지구 온난화 문제로 CO₂ 발생을 억제하는 것이다. 연료전지는 수소를 바로 공급한다면 CO₂ 생산이 없고, 천연가스를 개질하여 사용하더라도 고효율 발전방식이기 때문에 기존 화력발전을 대체할 수 있는 유일한 발전방식이 된다. 연료전지의 CO₂ 배출량은 천연가스 연료를 사용하는 화력발전 방식에 비교하여도 20에서 30% 정도를 줄일 수 있다.



연료전지는 기존 화력발전소보다 건설 기간이 짧고, 급격한 전력 수요에도 빨리 대응할 수 있다. 아울러 소규모 열병합 연료전지 발전방식에서는 열과 전기를 필요로 하는 수요자 요구에 직접 대응할 수 있으며, 송배전 설비 사용을 줄여 전력 사용 비용을 줄일 수 있다. 이는 열 및 전기를 필요로 하는 일정 수요지 근처에서는 수백 kW에서 수천 kW 정도가 되는 연료전지를 설치하여 열과 전기를 동시 공급하는 분산형 전원(Distributed type)으로 활용이 가능하다. 가정은 열과 전기를 동시에 생산 소비 할 수 있는 가장 좋은 장소이다. 파이프를 공급되는 도시가스를 이용 배기가스가 적고 소음이 없는 현지 설치 소형 연료전지 발전시스템을 이용 열과 전기를 생산하여 사용할 수 있다.

4. 국내 연료전지 산업 및 보급현황

전 세계 연료전지 보급 현황을 살펴보면 아시아 지역의 연료전지 보급이 크게 두드러지고 있다. 특히, 일본, 한국 등에서는 백업전원, 마이크로 열병합 발전(m-CHP), 그리고 발전용 연료전지 활용을 위해 적극적으로 도입하고 있다. 한국은 대규모 발전용 연료전지 시스템이 중심이지만 국가별 정책에 따라 도입량 및 도입형태가 다르다. 연료전지 보급은 국내에서는 RPS(Renewable Energy Portfolio Standard) 정책, 일본은 ENEFARM(프로젝트 이름 : Energy + Farm 합성어)등의 정부지원에 크게 의존하여 증가하고 있

다. 북미지역에서도 발전용 및 하역기계용 연료전지의 보급이 증가하고 있는데, 역시 미국의 SGIP(Self Generation Incentive Policy) 정책에 기인하고 있다. 종류별로는 자동차 가정용 연료전지인 PEMFC이 주를 이루고 있으나, 미국, 한국 등은 발전용 연료전지로 MCFC, PAFC가, 일본은 PEMFC 미국은 분산전원 수요에 따라 SOFC 보급이 크게 증가하고 있다. 2017년 말 기준으로 발전용 연료전지의 보급은 약 1,000 MW 정도이고, 국내 보급은 2018년 기준 약 360 MW 정도가 보급 운용되고 있다. ([그림3], <표1>)

국내에서의 연료전지 보급은 열을 활용하여 에너지 효율을 극대화할 수 있고, 대기 오염물질(SOx, NOx, 미세먼지) 및 소음공해 발생이 없어, 전력 수요지인 도시에 설치하기 가장 적합한 청정에너지원이기 때문이다. 또한 연료전지는 타 재생에너지원과는 달리 기후 조건과 무관하게 안정적인 설비운영이 가능하고, 양질의 전력을 지속적으로 공급할 수 있기 때문이다.

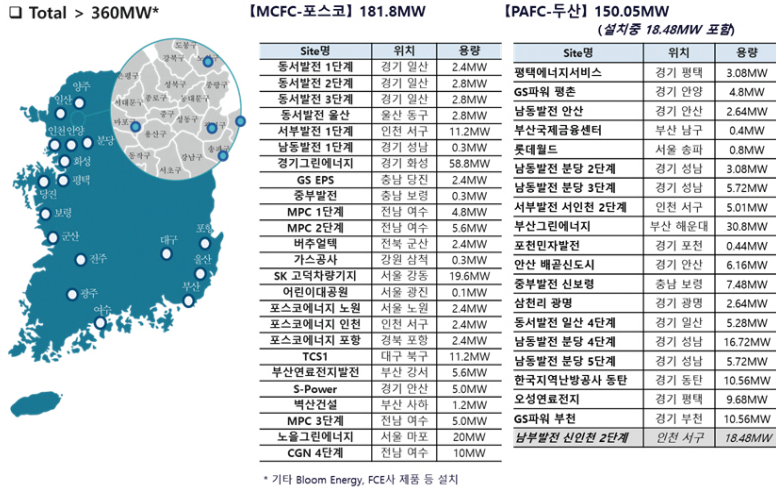
국내 연료전지 산업 현황을 살펴보면 발전용 연료전지는 기술을 가지고 있는 해외 업체와 기술제휴 또는 M&A를 통해 비교적 단기간내 국산화 및 연료전지 산업 밸류체인을 완성하고 있는 상태이다. 상용화된 해외기술을 바탕으로 독자 사업체계 구축하고 있다. 정부는 에너지기술을 선도할 수 있는 산업육성을 위해 국내의 수소 연료전지 보급확대 정책을 마련하고 있으나 단순 외산제품의 수입 설치에 따른 국내 기술향상 및 경제기여도가 불확실한 대규모 연료전지 발전사업 개발 추진 사례 증가하고 있다.



이슈와 시선

수소경제 시대의 연료전지 역할 및 현황

[그림 3] 국내 발전용 가정용 연료전지 보급현황



자료: 연료전지 산업 발전 협의회, 2019.

〈표 1〉 국내 가정용 건물용 연료전지 보급 현황

(단위: MW)

구분	'10년	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년	'16년	'17년	합 계
가정용	209	292	245	232	175	305	303	145	1,906
건물용	-	-	-	180	213	570	615	955	2,533
합계	209	292	245	412	388	875	918	1,100	4,439

자료: 연료전지 산업 발전 협의회, 2019.

국내 연료전지 산업은 기술의 난이도가 크고, 신뢰성 경제성 확보에 많은 시간이 필요하며, 장기간의 연구 및 기술개발이 필요하다. 전 세계적으로도 기술개발 상용 도입 초기 단계로 우리나라가 선도할 수 있는 가능성이 높은 특성을 가지고 있고, 타 산업과의 융복합이 가능하며 가치 사슬 내에서도 다양한 업체 참여가 가능하여 일자리 창출에도 효과가 매우 큰 산업이다.

우려되는 초기 투자비는 기술개발 및 규모의 경제에 의한 생산원가 저감으로 극복 가능할 것으로 예상된

다. 그러나, 연료전지는 아직 개발단계로 소규모 생산 체제에 따른 높은 생산원가를 해결하려는 방안이 필요하다. 이를 위해 연료전지 생산 열에 대한 의무적 활용 전력 구매가격에 송전설비 등의 회피비용 등 사회경제적 기여도 반영과 부족한 수소 인프라의 확보를 위한 노력도 필요하다. 이외 국내의 발전용 연료전지 보급은 생산 능력을 감안한 사업계획이 필중요하며 생산 능력 향상을 위한 투자도 필요하다.



5. 수소시대 연료전지 활용

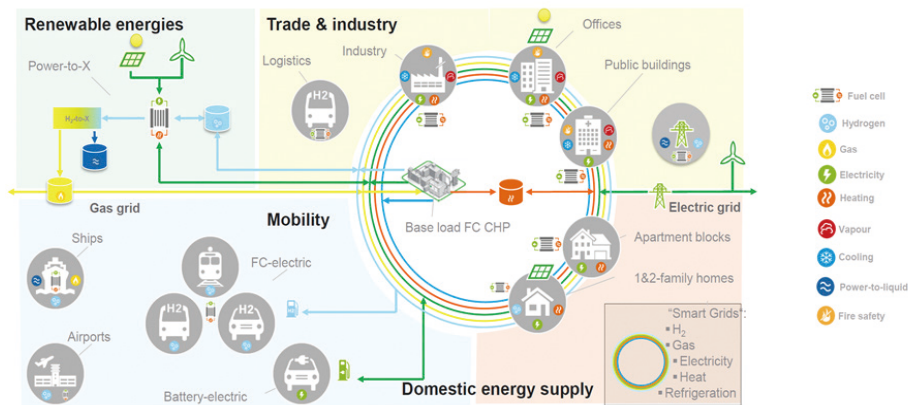
향후 에너지 시스템으로 전기는 재생에너지원으로 부터 얻어지겠지만 재생에너지 간헐성에 따른 전력의 불안정성을 해결하는 방안이 반드시 필요하다. 수소는 연료전지를 통하여 전기에너지로 변환 가능하므로 태양광, 풍력과 같은 재생에너지에서 생산된 수소를 저장하였다 필요한 경우 연료전지로 발전하여 계통에 공급하게되면 전력에너지 저장장치로 활용될 수 있다.

수소에너지 시대가 되면 재생에너지에서 생산되는 잉여전력을 수 전해를 통해 수소로 전환하여 저장하고 필요하게되는 경우 다시 연료전지를 통하여 수요지에

전력, 열 및 수소자동차 용 연료로 공급하게 된다. 그림4에서 미래 에너지 통합 망에서의 연료전지 역할을 보여주고 있다.

이외에도 저장된 수소는 단거리, 장거리 파이프 망을 통하여 지역에 공급되어 같은 방법으로 활용되고, 전력망에서는 수전해 수소저장 및 연료전지와 연결된 수소전력저장 시스템이 송전, 배전망과 연계되어 계통 안정을 도모할 수 있다. 이외에도, 분산전원을 기반으로 하는 연료전지발전은 수소전기차 충전 인프라 연계, 태양광+연료전지, 연료전지+ORC, 연료전지+전통에너지 등 여러형태의 발전원간 기술의 융·복합 모델 구축할 수 있을 것으로 예상 된다.

[그림 4] 미래 에너지 통합 망에서의 연료전지 역할



자료: Thorsten Herbert, 2018,2,8

6. 맺음말

수소에너지를 중심으로 하는 친환경 에너지 시스템은 정보 IOT 등과 결합되어 새로운 에너지 신 산업을 창조해 낼 수 있을 것이다. 에너지 변화가 곧 산업의 변화를 이끌어 왔고, 이는 수소에너지 시대가 연료전지,

수전해, 수소저장과 같은 새로운 핵심기술 개발과 연계되어 에너지, 환경, 전력, 발전, 수송 및 화학공정 분야에서 새로운 산업을 형성하게 될 것이다.

수소사회 실현은 수소 연료전지의 산업화와 함께 시작될 것이고 이는 수소 연료전지라는 기술이 일상의 생활 패턴으로 자리 잡을 수 있는 사회에서 가능하게 될



이슈와 시선

수소경제 시대의 연료전지 역할 및 현황

것이다. 즉 수소 연료전지 발전 기술과 이것을 지원하는 모든 시스템이 활성화되어 있는 사회, 즉 수소 연료전지 인프라가 확실히 구성된 사회가 구성된다며 그 실현이 가능하다. 이러한 면에서 수소로드맵 상의 두 개의 주요 산업 인 수소 자동차 역시 수소 인프라와 연료전지 보급이 잘 이루어지는 상태에서 실현이 가능할 것이다. 2040년 수소 경제사회가 선도국이되어 수소 연료전지의 산업화가 이루어 질 수 있기를 기대한다.

〈외국 문헌〉

Detlef Stolten, "Achievement and Issues of Fuel Cell Transportation at the brink of Market Introduction" WHEC 2014 Conference, Gwang Ju, Korea, June 17.

Thorsten Herbert, "Deployment of Hydrogen and Fuel Cell Technology in Germany" PyeongChang Forum 2018, Feb, 8.

참고문헌

〈국내 문헌〉

김종욱, 김종원 외, "알기쉬운 수소에너지", 한국에너지 기술연구원, 2005.3

太田時男(김길환 역), 수소에너지 21세기 문화원, 1988.12

연료전지 산업 발전 협의회, 수소 연료전지 산업 활성화 방안, 2019.5

임희천, "수소경제 시대의 발전용 연료전지 역할 및 현황," 「월간 기술과 혁신」, 산업기술 연구원, pp37-pp41, 2019.9

임희천, "수소산업동향 및 산업 발전 전망" 전기저널 2019.4

산업통상자원부, "수소경제 로드맵 보도자료", 2019.1.17