

새로운 사회-기술체제로서의 연료전지 자동차

서울대학교 공과대학 기술정책대학원과정 연구원

박상욱(spark@scieng.net)

1. 서론

세계 유수의 자동차 회사들이 사운을 걸고 연료전지 자동차를 개발하고 있는 것은 이미 대중적으로 잘 알려진 사실이다. 2004년부터는 각국 정상들이 자랑스레 자국 기업의 시제품 연료전지 자동차(Fuel Cell Vehicle, 이하 FCV)를 시승하는 사진이 신문지상을 장식하고 나섰다. 주요 모터쇼에서는 빠짐없이 FCV 컨셉트카가 전시되고 있으며, 언론에서는 곧 거리에서 만날 수 있을 것처럼 떠든다. 하지만, 연료전지의 개념이 제시된 것이 이미 100여 년 전의 일이고, 특수 분야에서 사용된지는 50년이 넘고, “앞으로 5년 이내에 일반 소비자가 연료전지 자동차를 구입할 수 있을 것”이라는 호언장담이 되풀이되고 있는 것도 이미 10년 전부터의 일이며, 최근의 좋은 분위기에 불구하고 소리 소문 없이 출시 일정이 미뤄지고 예측된 시장 규모가 축소 발표되고 있다는 것까지 아는 사람은 그리 많지 않을 것이다.

물론, 석유에 의존하는 에너지 체제가 유한적이라는 데에 이견의 여지가 없는 만큼, 언젠가는 적어도 가솔린, 디젤, 천연가스, 액화석유가스 등 화석연료를 사용하는 내연기관 자동차는 사라지는 날이 온다는 것은 분명하다. “연료전지차에 미래를 걸겠다.” 이 말은 연료전지 연구자나 학생이 한 말이 아니고 도요타자동차 사장이 한 말이다. FCV는 세계 유수의 메이커들이 양산을 목표로 개발에 박차를 가하고 있다는 점에서, 이전의 여러 대체에너지 자동차와 구별된다. 2차전지를 이용한 전기자동차도 양산, 시판된 적이 있고 일본에선 가솔린과 전지를 함께 쓰는 하이브리드카가 제법 팔리기도 하지만, FCV차처럼 세계적으로 개발경쟁이 붙을 이룬 것은 아니다.

수소경제(hydrogen economy)라는 큰 그림에서 볼 때, FCV는 다른 어떤 분야보다도 기술개발에 대한 자원 투입이 많고 상용화를 위한 민간기업의 경쟁이 심한 분야이다. 왜 이런 현상이 일어나는지에 대해 분석하는 것이 FCV에 대해 객관적 시각으로 고찰하는 시발점이 되어야 한다. 그 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다. 첫째, 자동차의 구동에 있어서 화석연료에 대한 의존이 절대적이기 때문에 유가 상승, 심지어는 언젠가 먼 미래에 닥칠 고갈에 대한 위기의식이 매우 높다. 둘째, 자동차는 전세계적으로 거의 보편재의 지위에 이른 제품으로 국경을 초월하는 무한 경쟁이 이루어지고 있어 미래 시장 주도권은 곧 기업의 존망이 걸린 문제이다. 이는 새로운 사회-기술체제(Socio-technical regime)로의 전이를 의미하는 것으로 오랜 탐색과 고민의 결과 세계 업계가 FCV를 차세대 체제로 인정한 것으로 보이기 때문에 사실상 어떤 자동차 회사도 FCV 개발로부터 자유로울 수 없는 것이다. 대규모 발전이나 분산전원으로서의 수소 이용은 FCV에 비하면 아직 시간 여유를 갖고 준비하는 것으로 보이는데, 이들 분야는 에너지원과 저장매체가 비교적 다원화되어 있으며, 내연기관 자동차가 FCV로 넘어가는 것과 같은 급격한 사회-기술체제의 변혁이 단기간 내에

일어날 것으로 보이지 않고, 많은 나라에서 에너지의 배급과 발전·송전이 공공의 영역·민영화된 형식이더라도 존재한다는 점에서 자동차 산업계 주도의 FCV 개발과는 여러 가지 다른 특징을 갖는다.

group	type	fuel	electrolyte	operating temp.	catalyst	application
low temp. types	PAFC	H ₂	phosphoric acid	190 °C	platinum on PTFE/carbon	Small Power Plant
	PEMFC	H ₂	polymer electrolyte	85~100 °C	Pt-Ru or Pt/C	Electric Powered Vehicles, Residential Power Generation
	DMFC	MeOH	polymer electrolyte	RT~130 °C	Pt-Ru or Pt/C	Electric Powered Vehicles, Mobile Electronic Appliances
	AFC	H ₂	KOH	RT~100 °C	platinum on carbon	spacecraft
high temp. types	MCFC	LNG LPG	Lithium or potassium carbonate	600~700 °C	Ni or Ni compound	Power Plant
	SOFC	LNG LPG	Yttria-stabilized zirconia	700~1000 °C	Ni/Zirconia cermet	Power Plant

<표 1> 작동온도에 따른 연료전지의 분류와 사용 연료, 그 특징

또, 수소경제와 연료전지 자동차의 관계에 대한 정리가 필요하다. 이는 해당 분야 기술 연구개발자 사이에서도 이견이 존재하는 부분이다. 수소경제(hydrogen economy)라는 용어는 '90년대 초 제너럴모터스에서 처음 사용하기 시작한 것으로 알려져 있는데, '노동의 종말(The end of work)' 등의 저서로 대중적 영향력이 있는 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin)이 2002년 'The hydrogen economy(국내 번역서는 '수소 혁명(2003)')'를 발표해 베스트셀러가 되면서 화석연료를 에너지 운반 매체로 하는 현 산업-에너지체제를 대체할 미래의 대안으로 널리 인식되기 시작하였다. 이에 따라 수소의 생산, 저장 및 운반, 그리고 활용 기술 및 관련 사회간접자본의 설치, 수소와 관련한 경제학과 정책 분야의 연구가 활기를 띠게 되었고 세간의 주목을 받기 시작하였다. 그러나 연료전지 분야를 보면 예전부터 수소 에너지의 한 활용분야로서 자리매김 했었다기 보다는 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 방법의 하나로 연구·개발되어 왔다. 연료전지는 작동 온도와 사용하는 연료에 따라 그 종류가 다양한데, 소형 전자기기부터 대형 발전소에 이르기까지 크기가 다양하다는 점과 함께, 사용할 수 있는 연료가 수소에 국한하지 않는다는 점에서 연료전지를 수소 관련 기술의 하부 기술로 볼 수 없다는 의견이 합리적이다. <표 1>은 연료전지의 종류와 응용분야를 정리한 것이다. 따라서 연료전지 연구자들 사이에서는 수소경제라는 거대한 체제적 변화보다는 응용되는 최종제품의 개발에 더 높은 관심을 기울이고 있으며, 최근 미국에서 전자기기용으로 실용화되기 시작한 소형 직접메탄올형 연료전지(direct methanol fuel cell)이나 화합물형 고분자 전해질연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 수소를 발생시키기 위해 NaBH₄ 등 수소화물과 알코올을 사용한다)는 수소 공급 인프라와는 전혀 무관하다. 일본에서는 노트북 컴퓨터용으로 직접메탄올형 연료전지의 상용화가 목전에 있는데, 연료인 메탄올 수용액은 기존의 일회용 라이터 회사의 유통망을 이용하여 카트리지 형태로 모든 편의점이나 가판대에서 구입할 수 있을 것으로 보인다. 이 역시 수소경제라는 큰 담론에서 다룰 필요성이 그리 보이지 않는다.

그러나 연료전지 자동차의 경우 그 시각과 입장이 다소 복잡하다. FCV의 성능과 양산 여부는 차치하고라도, 어떻게 연료를 공급할 것인지에 대해서는 수많은 고민이 있었고, 유행도 있었다. FCV의 상용화가 수소경제로의 이행보다 앞서 이루어질 것으로 확신한 연료전지 연구자들은 수소 공급 인프라가 구축된다는 희망적 기대를 하기보다는 현실적인 대안을 찾았고, 그 결과 많은 FCV 시스템이 개질기(reformer)가 부착된 형태로 설계되었다. 주행 중 가솔린이나 메탄올을 분해하여 수소를 발생시킨다는 구상으로, 수소 공급 인프라나 주입 방법, 차내 수소 저장의 문제 등을 해결하지 않아도 되기 때문이다. 그러나 개질기의 성능 향상 속도가 더디고, 일산화탄소에 의한 촉매 피독 작용을 극복하지 못했으며, 이산화탄소의 발생을 피할 수 없다는 점, 기존 화석연료에 대한 의존이 계속될 수 있다는 점 등 여러 약점이 드러났고, 또 미국과 유럽을 중심으로 수소경제가 국가적 과제로 선포·추진되면서 순수한 수소를 사용하는 애초의 형태로 돌아가는 분위기이다. 그에 따라 FCV 실용화에 있어서 기술개발과 함께 수소 생산과 배급을 위한 사회간접자본의 구축이 최대 관심사로 떠올랐고, 수소경제론자들과 수소 관련 기술 연구자들과의 불편한 공생 관계를 피할 수 없게 된 것이다.

수소경제론자와 관련 기술 연구자들은 연료전지를 ‘수소경제체제에서 최종 응용분야이며 수소를 전기에너지로 전환하는 수단일 뿐’이라고 여기고 있으며 ‘수소는 연료전지뿐 아니라 항공기의 제트엔진, BMW가 추진하는 수소 내연기관 자동차 등 연소 방식으로 동력화할 수도 있으므로 수소경제체제에서 연료전지만이 유일한 응용방법은 아니다’고 말하고 있다. 반면 연료전지 그룹에서는 ‘수소경제체제가 성공하기 위해서는 연료전지의 실용화와 보급 확대가 결정적 관건이 될 것’이라고 주장하고 있다. 즉, 연료전지와 FCV가 수소경제체제의 killer application이라는 것이다. 수소 그룹도 FCV가 수소경제를 현실화할 첩경이라는 점은 동의하고 있으며, 이용 상의 지리적 국한성이 배제되어야 하는 자동차의 특성상 수소 관련 인프라의 설치를 이끌어낼 응용분야가 분명함을 인식하고 있다. 두 그룹간의 의견차이는 때로 수소에너지의 생산과 운반, 인프라 구축에 대한 연구가 선행되어야 하는지, 아니면 연료전지 연구에 박차를 가해야 하는지에 대한 연구개발 투자 우선순위 논쟁을 일으키기도 하는데, 이는 여러 선진국에서 보편적으로 발생하고 있는 문제이다.

이처럼 연료전지 자동차(FCV)는 수소경제의 중심에 놓여 있으며 FCV의 실용화 성공 여부에 수소경제의 운명이 달려있다고 말해도 무리가 없다. 그럼에도 불구하고 FCV가 계획대로 실용화되지 못하고 있고 향후 전망 또한 불투명하다는 점은 쉽게 간과되고 있다. 실패가 일어나지 않도록 하기 위해서는 장밋빛 전망보다는 냉철한 분석과 과감한 정책적 지원이 필요하다. 그러나 수소기술체제나 FCV는 그 기술적 첨단성과 복잡성이 높을 뿐 아니라 전문가의 저변이 넓지 않아 일반 국민은 물론이고 정책 입안자, 결정자들의 이해도와 문제인식의 정도가 높지 않다. 이 글에서는 FCV를 어떻게 보아야 하는지, 현재 알려지거나 예측된 난점들은 무엇인지, 나아가 향후 당면할 수 있는 기회와 위기는 무엇인지 다루어 보고, FCV와 관련된 정책적 화두를 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. 연료전지차(FCV)의 개념

연료전지차는 근본적으로 전기자동차(EV)이다. 전기자동차는 현재 골프카트, 배달차량 등 제한적인 용도로 사용되고 있다. 전기자동차는 최고속도, 가속력 등 주행성능의 측면에서 기술적 난점은 거의 없고, 정숙성이나 변속기가 불필요한 시스템의 단순함, 그리고 운행 중 배출가스가 전혀 없다(zero-emission)는 점에서 강점이 있다. 그러나 결정적으로 값비싸고 반영구적이지도 못한 2차전지가 필수적이라는 점과 제한적인 주행거리, 그리고 무엇보다도 운행가능 시간과 맞먹거나 더 긴 시간의 충전이 필요하다는 점 때문에 내연기관 자동차를 완전히 대체하는 것은 매우 어렵다.¹⁾

연료전지는 연료를 전기화학반응을 통해 바로 전기로 바꾸는 장치로, 화학적 개념으로는 화학전지에 가까우나 공학적 개념으로는 오히려 발전기에 가깝다. FCV는 전기자동차에서 2차전지가 하는 역할을 연료전지로 대체한 것이며, 그 외 구동부는 전기자동차와 동일하다. 연료전지와 2차전지의 장단점을 표 2에 비교하였다. FCV에서는 연료전지 외에도 연료(수소 등) 저장을 위한 용기, 연료 공급을 제어하는 장치, 연료전지 스택(stack)을 제어하고 온도를 조절하는 장치, 냉각계통, 폐열 활용계통, 수소 외의 연료를 사용하는 경우 개질기 등이 추가로 필요하며 주행 중 부하가 계속 변하는 것을 고려할 때 2차전지와 연동이 필수적이다. 이렇게 복잡한 탓에 FCV를 개발하는 것은 전기자동차를 개발하는 것보다 훨씬 어렵고 많은 비용이 소요된다. 시스템의 부피 또한 작지 않아서 다임러크라이슬러 등 일부 회사 외에는 FCV 시제품은 보통 SUV(스포츠유틸리티차량)에 연료전지시스템을 탑재하고 있다.

연료전지차가 미래의 자동차로 여겨지는 이유는, 막연히 '석유는 언젠가 고갈 된다' 하는 것으로 부족하다. 그리고 그런 막연한 이유로 거대 자본이 모두 같은 방향으로 움직이는 것이 설명되지 않는다. 연료전지는 수소나 천연가스, 메탄올 등을 '리필'하면 되므로 운전자 입장에서선 보통 자동차와 별 다를 것이 없다. 메이저 자동차 메이커들은 70년대 후반 오일쇼크를 겪으며 한때 미래의 자동차는 전기자동차라고 판단했다. GM은 EV-1이라는 전기 승용차를 양산 판매하기도 했다. 무거운 납축전지를 대체하기 위해 니켈-카드뮴 전지, 나트륨-황 전지나 니켈수소전지가 대안으로 제시되었으나 무게, 에너지밀도, 안전성, 환경문제, 메모리효과²⁾ 등 여러 난점을 해결하지 못했다. 리튬이온전지가 대부분의 문제를 해결할 수 있지만 자동차에 적용하기엔 너무 비싸다. 또, 고속 충전이 가능한 리튬이온전지라도 400킬로미터를 달릴 수 있을만한 전기에너지를 5분 이내에 충전할 수 있는 것은 아니다.

1) 물론, 전기자동차를 가정용으로 양산하려는 시도는 석유파동 이래 수차례에 걸쳐 이루어졌다. 그보다 먼 옛날인 20세기 초 한때 자동차의 최고속도 경쟁에서는 전기자동차가 가솔린엔진 자동차를 압도한 시절이 있었는데, 이를 두고 기술의 사회적 구성을 강조하는 연구자들은 전기자동차가 기술적으로 더 우위에 있었으나 가솔린엔진 진영의 세력이 더 강하여 이후 가솔린엔진 자동차의 시대를 가져왔다고 주장하기도 한다. 그러나 이러한 견해는 일상 용도상의 자동차에 필요로 하는 여러 요구점을 간과하고 최고속도라는 특정한 기술 부분만을 기준으로 삼은 오류라고 할 수 있다. FCV에 대해서도 마찬가지로, 각각의 기술적 완성도뿐 아니라 수요측면까지 고려한 사회-기술체제적 접근이 필요하다.

2) 니켈카드뮴전지는 완전방전하지 않고 다시 충전할 경우 사용할 수 있는 용량이 줄어드는 문제가 있는데, 이를 메모리효과라 한다.

	2차전지	연료전지
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 시스템이 단순하다 • 에너지 효율이 높다 • 부하반응성이 비교적 좋다 • zero-emission 	<ul style="list-style-type: none"> • 가솔린엔진 대비 에너지 효율이 높다 • 고가 촉매 등은 재활용이 가능하다 • 충전이 필요없다 • 수소 사용시 zero-emission
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 가격이 비싸다 • 전극과 전해질이 열화되면 교체해야 한다 • 긴 재충전시간이 필요하다 	<ul style="list-style-type: none"> • 시스템이 복잡하고 부피가 크다 • 2차전지 대비 에너지 효율이 낮다

<표 2> 2차전지와 연료전지의 장단점 비교

내연기관은 눈부신 발전을 거듭하여, 사실 선진 메이커에서 내어 놓은 최신의 가솔린 엔진은 공해물질을 놀랄 만큼 조금밖에 만들어내지 않는다. 연료 처리 기술도 발전하여 납과 황을 제거한 휘발유는 제법 청정한 연료이다. 캘리포니아의 가혹한 환경기준³⁾이 대체에너지 자동차의 개발을 부추긴다고들 말하지만, 사실상 대체에너지차를 개발하는 데에 인센티브를 주기 위해 그러한 기준이 시범케이스로 적용되고 있는 것이라고 볼 수 있다. 내연기관의 연료로 사용될 수 있는 물질은 일반 대중의 생각보다 많다. 브라질에선 알코올을 사용하는 차가 많고 독일에선 식물로부터 만들어진 바이오디젤이 인기다.

그렇다면, 연료전지 자동차는 어떠한 장점과 이점이 있나? 연료로서 석유의 생산량 감소와 국제적 수요 증가에 의한 유가 상승, 그리고 언젠가 닥칠 고갈 외에, 내연기관 자동차와 경쟁할 경제적 경쟁력이 있는 것인가? 결론부터 말하자면 현재로서는 '아니다.' 마치 성장 가능성이 큰 벤처회사에 투자하는 것처럼, 미래엔 '예'가 된다는 믿음으로 사업화가 추진되고 있는 것이다. 연료전지의 장점은 첫째, 에너지 효율이 매우 높다. 열기관이 아니므로 카르노 기관의 효율 한계에 부딪히지 않는다. 화합물을 연소시켜 화학에너지를 열에너지로 바꾼 뒤 다시 운동에너지로 바꾸는(그나마 또 상하운동을 회전운동으로 바꾸고, 클러치(또는 유체), 트랜스미션, 다시 구동축으로 전달하면서 추가로 조금씩 더 에너지 손실이 있다.) 내연기관과는 달리, 화학에너지를 바로 전기에너지로 바꾸고, 4륜(또는 2륜)에 독립적으로 부착된 브러시리스(brushless) 모터로 직결되어 트랜스미션조차 필요 없기 때문이다.⁴⁾ 둘째, 공해가 거의 없거나 매우 적다. 순수한 수소를 고압 수소 봄베에 충전하여 사용하는 경우 배기가스는 수증기뿐이다. 고압 수소의 불편함과 수소 공급 인프라의 문제로 가솔린이나 메탄올을 개질하여 수소를 얻는 경우에도 배기가스는 내연기관에 비해 월등히 적은 양의 이산화탄소, 극소량의 탄화수소 정도로, 보통 자동차의 50분의 1에서 100분의 1 수준이다. 연료전지를 자동차에 적용했을 때 부수적으로 얻는 이점으로는 첫째, 전기자동차와 동일한 정속성과 운전 편의성을 제공한다. 둘째, (에너지원에 해당하는 부분의 복잡성에도 불구하고) 동력전달 계통이 단순해지며, 근본적으로 바이와이어(by-wire) 컨트롤이 가능하다. 따라서 넓은 실내공

3) 캘리포니아 지역에서 연간 4,500대 이상의 자동차를 판매하는 업체는 2003년부터 ZEV를 의무적으로 판매해야 한다. 향후 의무판매 비율은 계속 높아진다.

'03 ~'08	'09 ~'11	'12 ~'14	'15 ~'17	'18
10%	11%	12%	14%	16%

4) 2차전지를 이용하는 전기자동차에 비한다면 에너지 효율이 떨어진다. 이점이 일부 환경주의자들에게 “연료전지차는 여전히 에너지 대량 소비적”이라는 비판을 일으키고 있다. 친환경적이라 생각되는 FCV가 개발단계에서 SUV등 대형차의 형태로 보여지고 있는 것도 비판의 빌미가 될 수 있다.

간을 제공하는 평판형 플랫폼을 만드는 데에도 유리하다. 이것은 하나의 플랫폼을 여러 차종이 공유하는 데에 큰 이점을 제공한다. 셋째, 연료전지 스택(stack)은 회수하여 처리할 경우 재활용이 가능하다. 그림 1.은 GM의 '스케이트보드(skateboard) 컨셉으로, 단일 플랫폼 다차종을 구현하는 FCV 시스템의 예시이다.



<그림 1> GM의 FC car 프레임 'skateboard'.



<그림 2> 혼다의 FCX.

통칭명	FCX	
승차 정원	4명	
최고속도	150km/h	
모터	최대 출력	80kW(109PS)
	최대 구동 토크	272N·m(27.5kg·m)
	종류	교류 동기 전동기(Honda제)
연료 전지 스택 (2기 탑재)	형식	PEMFC(고체 고분자막형) (Honda제)
	출력	86kW
연료	종류	압축 수소 가스
	저장 방식	고압 수소 탱크(350기압)
	용량	156.6L
치수(전체 길이×전폭×전고mm)	4,165×1,760×1,645	
에너지 저장	울트라 캐패시터(Honda제)	
항속 거리(LA4모드)	395km	

<표 3> 혼다 FCX의 제원
(자료: 혼다 홈페이지)

<표 4>에 FCV를 기존의 내연기관 자동차 및 하이브리드카, 전기자동차 등과 비교하였다. 성능과 친환경성만을 강조하는 기존의 비교와는 달리 소비자들이 고려하는 점을 반영하여 비교하였다. FCV가 자동차 산업의 구세주처럼 떠받들여지고 있으나 여전히 FCV로 가는 것이 정당인지에 대한 질문은 유효하며, 더 심하게 말하자면 전기자동차가 그랬던 것처럼 '아직은 아니다'는 결론에 도달하고 사라질 수도 있다. 그러나 70년대와 비교할 때 최근의 환경은 분명히 다른데, 그것은 본격적인 고유가 시대에 접어들었다는 점과 더불어 교토 의정서에 의한 이산화탄소 배출량 규제라는 새로운 '친환경' 변수가 등장했다는 점일 것이다.

2.2. FCV 실용화에의 걸림돌

연료전지차가 갖는 현 시점에서의 난점, 그리고 실용화가 되는 단계에서의 난점, 또 미래의 문제점은 무엇인가? 연료전지 자동차의 실용화에 의구심을 품는 사람들의 견해를 열거해 보겠다. 이미 일본 도요타, 혼다는 양산 가능한 연료전지차의 개발을 완료하고 제한적인 판매⁵⁾와 공로 시험주행에 돌입했다. 즉, 이 시점에서 '실용화가 될지 확실할 수 없다'는 말은 이미 적절치 못하다. 양산

5) 혼다 FCX는 지방자치단체와 수소 관련 인프라를 개발하는 회사들에게 대여 형식으로 판매되고 있다.

	점화 엔진	압축착화 엔진	하이브리드	전기자동차	연료전지차
구동기관	내연기관	내연기관	내연기관+모터	모터	모터
연료	휘발유, LNG, LPG	경유	휘발유 또는 경유	없음	수소 ^a
연료 충전 편의성	높음	높음	높음	낮음	(가)
배기가스 공해	중간	높음 ^b	낮음	없음	거의 없음 ^c
주행성능 (가속력, 최고속도)	높음	다소 높음	다소 낮음	다소 낮음	다소 낮음
주행거리(1회)	600 km 이상	600 km 이상	600 km 이상	< 200 km	< 400 km
거주성	높음	높음	높음	다소 낮음 ^d	다소 낮음 ^d
정속성	높음	다소 낮음	높음	매우 높음	매우 높음
사고시 안전성	높음	높음	다소 낮음 ^e	다소 낮음 ^e	낮음 ^f
기술적 성숙성	높음	높음	상용화 됨 ^g	높음	낮음
사회적 수용성	높음	다소 높음	높음	높음	알 수 없음
운영 경제성	다소 높음	높음	높음 ^h	높음	알 수 없음
제조 비용/ 예상 소비자 가격	낮음	다소 낮음	다소 높음	높음	매우 높음 ⁱ

<표 4> 여러 종류의 자동차 특징 비교

a 개질기를 사용하는 경우 메탄올, 가솔린, LNG 등

(가) 현재로서는 일반 소비자가 수소 충전하는 것은 불가능함. 개질기를 사용하는 경우 편의성 높음

b 경유 승용차에 대한 환경 기준이 점차 높아지면서 공해 배출량은 감소중이며 연비가 높은 것을 감 안할 때 저공해로 볼 수 있으나 미세먼지와 주행조건, 운행기간에 따른 변화를 고려해야 함

c 수소를 사용할 경우 전혀 없음

d 2차전지를 비롯한 시스템의 부피 및 에어컨디셔너의 출력 문제

e 고전압을 사용하므로 스파크에 의한 화재, 2차전지의 폭발, 구조상의 난점 등이 존재함

f 전기자동차의 문제에 추가하여 수소 저장 용기(초고압 수소 봄베 또는 액화수소통)의 문제

g 도요타 프리우스, 혼다 시빅 하이브리드, 인사이트 등

h 2차전지의 수명, 비이상적인 실주행 조건, 에어컨 가동 등에 의해 하이브리드 시스템의 경제성에 의문을 제기하는 견해도 존재

i 대량생산을 통해 현재의 하이브리드카 수준으로 낮출 수 있을 것으로 전망됨

가능한 차가 나왔다는 것은 이미 실용화가 된 것이다. 다만 그것이 큰 성공을 거두고, 내연기관 자동차의 시장을 어느 정도 빼앗아 시장 진입에 성공할 것이냐 하는 것이 관점인 것이다. 그러나 여전히 해결해야 할 난점들이 존재하므로, 그것에 대해 정확히 파악하는 것이 먼저다.

가. 수소 공급 인프라

주유소 대신 '수소 스테이션'을 세워야 한다. 분자량이 40~60 사이인 LPG(액화석유가스, 주성분은 프로판(C₃H₈)과 부탄(C₄H₁₀)이다.)의 경우 쉽게 액화할 수 있기 때문에 주변에서 어렵지 않게 가스충전소를 찾아 볼 수 있을 것이다. 국내에서 시내버스에 채용되기 시작한 LNG(액화천연가스)만 해도 메탄(CH₄)이 주성분으로, 끓는점(-160 ℃)이 매우 낮아 다루기가 까다롭다. 택시와 일부 승합차가 LPG를 쓰지만 LNG는 쓸 수 없는 이유이다. 수소는 우주에서 가장 가벼운 기체이며, 끓는점은 영하 260도이다. 이는 저장이 쉽지 않다는 것을 뜻한다. 작고 운동 속력이 빠르기 때문에 잘 새어 나가고, 액화시켜 보관하는 경우 높은 비용과 위험을 동반한다. 따라서 수소는 도시가스처럼 파이프라인으로 '수소 스테이션'로 공급되어야 하며, 스테이션은 이것을 받아 컴프레서로 압축

하거나 냉각하여 지하탱크에 보관하다가 자동차가 들어오면 차에 내장된 초고압수소봄베에 다시 가압하며 주입해야 한다.

소수의 연료전지차가 주행한다면 별 문제가 되지 않으나, 시장 원리에 의해 민간이 인프라 구축에 참여하는 수준이라면 꽤 많은 FCV가 보급된 상황일 것이다. 즉, 수소의 생산과 공급도 문제가 될 수 있다. 여러 가지 수소 생산 방식이 논의되고 있으나, 현 시점에서 생산 단가와 기술적 성숙도, 대량 생산 능력을 만족시키는 방법은 Steam methane reforming(SMR) 뿐이다. 그러나 SMR은 근본적으로 천연가스를 사용하며 CO₂가 발생한다는 점에서 장기적으로 볼 때 진정한 수소경제의 구현과는 어울리지 않는다. 그러나 FCV 보급 초기에 사용될 수소의 상당량을 SMR로부터 얻을 수 밖에 없을 것으로 여겨진다. 야간 유휴 전력이나 풍력을 이용한 전기분해가 대안이 될 수 있는데, 대량 생산 능력이 떨어져 개별 수소 스테이션 수준에서의 on-site 수소 발생 설비 이상으로 활용되기는 어렵다. 더욱이 전기분해 방식으로 생산한 수소는 저장과 운반, 주입을 위해 별도의 가압장치가 필요하며 이때 가압에 사용되는 에너지는 무시할 수 없는 비용을 일으킨다.

장기적으로 값싼 수소를 대량으로 얻기 위해서는 원자력의 이용이 필수적이다. 특히 4세대 원자로의 일종인 고온 가스로의 경우 고온의 수증기를 쉽게 얻을 수 있어 산화물 촉매를 이용한 열화학적 수소 생산에 최적일 것으로 여겨지고 있다. 실제로 수소경제를 구상하는 사람들과 연료전지 연구자들은 차세대 로형에서의 원자력에 의한 수소 생산에 큰 기대를 걸고 있는데, 세계적으로 원자력의 사용이 감소하는 추세 속에서 원자력의 사회적 수용성이 크게 낮아지고 있기 때문에 안전성이 제도되고 폐기물 배출 문제가 개선된 차세대 로형이라 할지라도 국민을 설득하여 설치·가동할 수 있을지 여부는 불투명한 상태이다. 수소경제와 연료전지차의 미래를 원자력이 좌우하고 있는 형국이다.

생산된 수소를 어떻게 저장하고 운반하느냐 하는 것은 별개의 문제이며 만만치 않은 난점이다. 수소 누출을 막기 위해서는 고가의 시설이 필요하며, 기존의 도시가스관을 특수 물질을 코팅하는 등으로 개량하는 것으로 가능할지 연구가 진행되고 있다. 초고압수소봄베나 탄소나노튜브, 수소저장합금, 화합물 등 여러 기술이 개발되었으나 아직 저장 질량비나 가역성 등의 문제가 시원하게 해결되지 않은 상태이다.

나. 차내 수소 저장의 문제

연료전지차에서 수소는 연료이므로 필요한 주행거리를 달릴 수 있을만한 충분한 수소를 싣는 것이 무엇보다 중요하다. 초기 FCV의 개념에선 여러 가지가 시도되었다. 수소저장합금은 그 대표격이다. 니켈을 기반으로 한 합금은 그 격자 내에 수소 분자를 '끼워' 둘 수 있다. 일종의 고체-기체 용액이 되는 셈이다. 고압 분위기에서 격자에 끼어들어갔던 수소는 열을 가하면 천천히 다시 나오므로 수소저장합금은 비교적 안전하며 제어하기 쉬운 수소 저장 방법이다. 그러나 결과적으로, 현재 FCV에 수소저장 합금을 쓰려던 계획은 수포로 돌아갔다. 그 이유는 수소저장 밀도 때문이다. 수소저장합금 자체의 무게와 부피 때문에, 수소를 가득 넣어도 고압수소봄베에 비해 불리하다. 결국 구식기술로 보이던 고압수소봄베를 개량하는 쪽으로 연구가 진행되고, 수백기압 이상의 어마어마한 압력으로 수소를 저장할 수 있게 되면서부터 수소연료전지차는 커다란 고압수소'폭탄'을

싹고 다니게 되었다. 수소 공급 인프라가 구축되기 전까지는, 연료전지 자동차는 리필이 쉬운 연료로 달려야 한다. 즉, 과도기적으로, 개질기(reformer)를 이용할 수밖에 없다는 것이다. 개질기란 고온에서 메탄올, 가솔린, LPG 등의 탄화수소 연료를 촉매를 사용하여 분해, 수소를 얻는 것이다. 개질기를 사용하여 얻는 장점은, 액체 형태의 연료를 주입하면 되므로 아무런 연료 공급 인프라가 필요 없다는 것이다. 메탄올은 가정의 차고에서도 주입할 수 있다. 또 기존의 주유소 시설을 그대로 사용할 수도 있다. 그러나 개질기 방식도 문제는 있다. 가장 심각한 문제는, 바로 시동 시간이다. 사람들은 자동차의 시동키를 돌리며 10분을 기다리기를 원치 않는다. 개질기를 사용하는 경우, 개질기와 연료전지 스택(stack)을 예열하고, 연료전지를 가동할 만큼의 충분한 수소가 나오기까지 기다려야 하는데, 이것을 1분 이내로 줄여야 현실성이 있다. 물론, 개질기가 수소를 본격적으로 만들어내기 전까지, 내장된 리튬이온전지나 납축전지로 만든 하이브리드 시스템으로 차를 기동할 수 있다. 개질기 방식의 또 다른 문제는, 연료전지의 최대 장점 중 하나인 에너지 효율의 문제이다. 개질기는 에너지적으로 유리하지 않은 반응을 양론과 반응속도론적 제어로 일으키는 장치로, 에너지 효율을 갉아먹는다. 필요한 열은 연료전지 스택 작동시 발생하는 폐열로 대체할 수 있으나, 무겁고 덩지 큰 개질기의 존재는 연료전지차의 장점을 상당 부분 잠식할 수밖에 없다. 세 번째 문제는, 개질기를 사용할 경우 여전히 화석연료나 생합성된 탄화수소 연료에 의존할 수밖에 없다는 것이며, 비록 내연기관보다는 적으나 온실가스인 이산화탄소나, 공해물질인 질소산화물, 황산화물이 소량 발생하는 것을 감수해야 한다는 것이다. 넷째 문제는 개질된 수소에 혼합된 미량의 일산화탄소가 연료전지에 사용되는 고가의 백금 촉매 표면을 오염시켜 성능을 저하시키는 것이다. 이러한 촉매 피독작용을 해소하고 적은 양의 촉매로 높은 성능을 내기 위해 합금촉매의 개발이 활발하나 완전한 해결을 바라기 힘들다. 상기의 여러 핸디캡 때문에, 개질기 방식은 수소 공급 인프라가 구축되기 전까지의 과도기적 방식으로 인식되었고, 그나마도 연료전지차의 양산 일정이 계속 늦춰지면서 아예 수소 공급 인프라를 구축하는 계획과 발맞추는 것이 낫다는 결론에 도달하였다.

다. 구동력 이외의 문제

연료전지는 근본적으로 발전기와 같으므로, 구동력 이외의 전자장치와 편의장치를 위한 전원으로 도 물론 사용 가능하다. 엔진 동력의 일부로 발전기를 돌려 차내 전력을 공급하고 배터리를 충전하던 내연기관에 비해 오히려 단순한 시스템이 된다. 자동차에서 엔진은 바퀴를 굴리는 데에 사용할 뿐 아니라 두 가지 역할이 더 있다. 바로 진공을 공급하는 것과 압축기를 작동하는 것이다. 진공을 가장 필요로 하는 곳은 브레이크이다. 브레이크 페달을 밟는 발의 힘을 수백배 증폭하여 브레이크 캘리퍼에 전달하기 위해 승용차는 진공 배력 부스터를 사용한다.(버스나 트럭은 별도의 고압 에어 시스템을 갖춘다.) 당연히, 차의 시동이 꺼지면 브레이크도 제대로 작동하지 않는다. 일부 차종은 이 진공의 힘을 차내의 공조장치를 조작하는 데에도 사용한다. 두 번째로, 압축기란 바로 에어컨을 위한 것을 말한다. 에어컨은 열펌프(heat pump)로, 큰 에너지를 요구하는데, 자동차의 에어컨은 전기모터로 컴프레서를 돌리는 것이 아니라 엔진의 힘으로 돌린다. 소비기량 자동차의 경우 에어컨 작동시 출력이 부족한 것을 느낄 수 있을 정도로 많은 에너지를 소모한다. FCV

의 경우, 내연기관이 없으므로 결국 진공과 에어컨디셔너 컴프레서는 전기에너지를 이용할 수밖에 없다. 하이브리드카도 이런 문제점을 가지고 있다. 하이브리드카는 시내 정속 주행시는 모터로, 급히 큰 힘이 필요하거나 내장 2차전지의 전압이 떨어지면 엔진을 구동하며 충전하는 시스템을 갖고 있다. 도요타 프리우스의 경우 고속주행 중 급가속이 필요할 경우 최대 1분 30초간 엔진과 모터의 구동력을 함께 사용하며, 그 외 에어컨 작동이나 2차전지 전압이 일정 수준 이하로 떨어진 경우, 경사로 등판 등 부하가 큰 경우 엔진을 가동한다. FCV엔 엔진이 아예 없으므로, 하이브리드카에 비해 해결할 난제가 훨씬 더 많다. 장기적으로 브레이크는 진공 배력 디스크-캘리퍼 시스템에 더해 모터를 발전기처럼 사용해 역부하를 전기방식을 병용하면 제동력도 높이고 에너지 효율도 높일 수 있다.(전철에 사용되는 방식이다.) 에어컨디셔너의 경우 열전 소자를 이용한 전자식 방법이 고려될 수 있지만 가격이나 성능면에선 아직 컴프레서 방식에 비해 불리하다. 겨울철 난방은 연료전지의 폐열을 이용하면 되므로 큰 걱정이 없다. 각종 편의장치는 연료전지에서 여유전력이 생길 때마다 충전되는 내장 2차전지로 작동시킬 수 있다. 내장된 2차전지는 시동이나 급가속등 연료전지 한계를 넘는 peak 파워 필요시에 구동을 돕기도 한다.

라. 만약 연료전지차가 도로를 덮는 날이 온다면

앞서 언급했던 여러 난점들에도 불구하고, 시간이 지날수록 화석연료 생산량 감소와 공해문제로 인해, 이미 수억대가 굴러다니고 있는 내연기관 자동차는 다른 어떤 구동수단으로 대체될 것이다. 그리고 그 정답이 연료전지차인가에 대해 아직 확신이 없고, 대중을 대상으로 한 양산차가 시장의 선택을 받은 것도 아니다. 그러나 분명한 것은 그나마 몇 개 남지도 않은 메이저급 자동차회사들이 예외없이 거액을 투자, 아니 사운을 걸고 연료전지차 개발에 매달리고 있다는 것이다. 연료전지차가 연간 천만대 정도 팔리는 날이 온다고 가정하자. 전기화학공학과 공학의 승리로 연료전지차가 잘 운행한다고 해서 기술 외적인 문제가 해결되는 것은 아니다. 가장 큰 문제는, 바로 백금(platinum)이다. 현재 저온형 연료전지(인산형, 고분자전해질형, 직접메탄올형)에는 산화극과 환원극 모두에 백금을 기반으로 한 전기화학 촉매가 사용되고 있다. 연료전지의 핵심인 'stack'(연료전지 단위전지들이 다층 샌드위치처럼 직렬연결된 것)에는 최소 수십 g의 백금이 들어간다. 그나마도, 최소량을 사용하여 최대의 촉매면적을 얻기 위해 수십년간 촉매 입자의 나노사이즈화와 탄소지지체의 개발, 합금 촉매의 개발, 전해질막과의 접합기술 등에 전세계 수천명의 연구자가 노력한 온 결과이다. 백금 사용량을 줄이려는 노력은 계속되고 있지만, 단순한 계산으로도, 매년 천만대의 자동차를 위해선 매년 1000톤의 백금이 필요하다. 백금은 전세계 생산량의 대부분을 아프리카에 있는 몇 개의 대형 광산에 의존하고 있는데, 이 양은 백금의 연간 생산량을 가볍게 넘어서는 수준이다. 실제, 2003년 초 미국 부시 대통령이 연료전지 개발에 대한 투자를 늘린다는 선언을 한 뒤 백금의 국제 시장 거래 가격이 크게 오를 정도로, 연료전지와 백금의 관계는 뗄 수 없는 관계이다.

마. 경쟁 기술의 존재

연료전지차의 최대 경쟁 상대는 현재의 내연기관 자동차들이 되겠지만, 기술적 개념과 특징만

으로 보자면 전기자동차가 가장 큰 위협이 될 것이다. FCV는 전기자동차의 결정적 약점인 에너지 저장 밀도와 충전 시간, 그리고 2차 전지의 수명과 가격이라는 점을 파고든 변형된 전기자동차로, 한마디로 말해 전기에너지의 저장매체로서 수소를 사용하는 것이다. 만약 전기자동차가 알려진 단점을 획기적인 기술 발전을 통해 해결한다면, 자동차 회사들은 굳이 여러 난점이 존재하는 연료 전지차를 만들 필요가 없어지며, 수소경제 전체가 좌초 위기에 봉착하거나 현실화가 수십 년 미루어질 수 있다.

2차전지 연구자들은 충전 시간을 줄이기 위해 전극 구조를 개선하는 연구를 진행 중에 있으며, 최신의 리튬이온전지는 불과 수 분만에 최대 전압의 7~80%선까지 충전할 수 있을 정도로 발전했다. 리튬이온전지의 가격이 더욱 지속적으로 낮아지고 충전시간이 개선된다면 전기자동차가 경쟁력을 가질 수 있을 것이다. 상대적으로 소수의 연구자들이 울트라캐패시터(ultra-capacitor)를 개발하고 있는데, 이것은 축전기의 일종으로 극판 사이에 전하를 가두어 둬으로써 전기에너지를 저장하는 장치이다. 축전기는 고품질의 전류를 위해 전자회로에 사용되는 정도로 소용량인데, 이것을 나노기술을 적용한 표면적 극대화로 고용량화 한다는 구상이다. 캐패시터의 특성상 고전압으로 충전할 경우 순식간에 많은 양의 전기에너지를 저장할 수 있으며, 부하 변화에도 빠르게 대응할 수 있어서 전기에너지 저장 문제를 일거에 해결할 수 있을 것이라 기대되고 있다. 다만 현재 기술 수준으로는 2차전지에 비해 그 용량이 매우 작으며, 기술개발 속도가 더디고 어떠한 한계점이 있을 것으로 예상되고 있다. 충전시간의 문제가 해결되어 연료전지차와 전기자동차가 경제성을 기준으로 경쟁하는 상황이 발생한다면, 그 경쟁의 관건은 수소를 가정용 전기보다 값싸고 사용하기 편한 형태로 공급할 수 있는냐하는 점이 될 것이다. 이는 역시 수소경제의 인프라와 연결될 수밖에 없는 것으로, 연료전지차와 수소경제체제는 상호 의존적일 수밖에 없다.

전기자동차 외에도 바이오매스를 이용한 가스 자동차나 바이오디젤 등 친환경적 연료를 사용하는 내연기관이 경쟁상대가 될 수 있다. 이러한 신재생에너지 자동차들은 화석연료의 고갈이라는 위협으로부터는 자유로울 수 있으나, 이산화탄소 배출 규제나 에너지의 대량생산-대량소비 체제에는 어울리지 않는다는 한계를 갖고 있다.

<p>S</p> <ul style="list-style-type: none"> • 전기자동차의 장점을 모두 가지며 충전시간 없음 • 배기가스가 거의 없음 	<p>W</p> <ul style="list-style-type: none"> • 기술적 발전이 더딤 • 수소 공급 인프라가 없음
<p>O</p> <ul style="list-style-type: none"> • 유가의 지속적 상승 • CO₂ 배출 규제 확대 · 강화 • 기술적 난점 해결 • 수소경제 조기 구축 	<p>T</p> <ul style="list-style-type: none"> • 생산원가 저감이 어려울 수 있음 • 수소 저장에 대한 대중 수용성 검증 안됨 • 수소 대량 생산 가능 여부 불확실 • 전기자동차의 획기적 발전

<표 5> FCV에 대한 SWOT 분석

2.3. 사회적 수용성과 새로운 사회-경제체제로서의 연료전지차

미래 유망기술에 대해 논할 때 빠지기 쉬운 함정이 바로 기술결정론적 시각이다. 즉 기술적으로 완성되기만 하면 소비자 대중에게 선택되고 사회에서 안정적으로 활용될 것이라는 희망이다. 기술결정론적 오류를 범하지 않기 위해 종종 보완적으로 고려되는 것이 경제성 분석이다. 기존의 기

술에 비해 가격 경쟁력이 있는지, 비용 대비 편익이 높은지 따져보는 것이다. 경제성 분석에 환경 비용을 적용하는 것조차 비교적 최근의 일로, 아직 신기술의 사회적 수용성에 대한 고려는 그 경험이 일천한 수준이다.

상전도 자기부상열차에 관련한 기술은 이미 70년대에 완성되었지만 고속전철에 비해 뚜렷한 장점이 없는데다 기존 선로와의 연계성·호환성이 전무한 탓에 특정 구간 셔틀 등 매우 제한적인 용도로, 그것도 극소수의 국가에서 운영하고 있다. 90년대 초 폴크스바겐은 정차 시 시동이 자동으로 꺼져 연료소비를 절감하고 배출가스를 줄이는 기술을 개발했으나 엔진이 계속 돌기 원하는 소비자들의 외면으로 사장되었다. 프랑스가 상용화한 조력발전은 80년대 자연의 거대한 에너지를 이용하는 무공해 발전방법으로 주목받았으나 이후 갯벌 생태 보전이 더 중요하다는 조류가 퍼지며 관심 밖으로 사라졌다. 이외에도 기술적으로 완성되었으나 선택받지 못한 기술의 예를 들자면 얼마든지 있을 것이다.

소비자는 제품을 구매할 때 공익성에 대한 고려를 심각하게 하지 않는다. 친환경적이라는 장점은 식품의 경우에는 강력한 장점이 되겠지만, 자동차의 경우에는 그렇지 않다. 소비자가 친환경적 자동차를 선택하도록 하기 위해서는 정부의 규제나 지원이 필요하다. 연료전지차가 소비자의 선택을 받기 위해서는 기존의 화석연료 자동차에 비해 소비자에게 높은 편익-낮은 가격, 낮은 유지비용, 낮은 운행경비, 높은 성능-을 제공해야만 한다. 최근 유럽에서 개발된 연료전지 오토바이의 경우, 너무 정숙한 나머지 행인을 치는 교통사고 위험이 높아지고, 오토바이 애호가들 사이에서 부릉거리는 엔진 음이 없다는 불만이 접수되어 효과음을 내도록 장치하는 해프닝까지 발생하였다.⁶⁾ 환경에 해악적이며 연비도 엄청나게 나쁜 고배기량의 스포츠카나 커다란 SUV, RV 들이 고유가에도 불구하고 잘 팔리는 현상은 어떻게 설명할 것인가? FCV가 가솔린엔진이 내는 박력과 고성능을 제공하지 못한다면 FCV를 위한 시장은 한계를 가질 수밖에 없을 것이다.

초고압수소봄베나 액체수소탱크 위에 앉아서 고속도로를 달린다는 것은 그리 유쾌한 상상이 아니다. 그것이 비록 탄소섬유로 강화된 복합고분자재료로 되어 있어 폭발의 위험성이 없다고 설득하더라도 기술적 안전성과 심리적 안전성을 별개인 경우가 많다. 스티어링 휠이나 브레이크 페달이 바퀴에 직접 톱니나 강철 와이어로 연결되어있지 않고 단지 조이스틱 조작처럼 전자신호만으로 연결되어 있다고 하면, 후자의 고장 날 확률이 훨씬 낮다고 설득하더라도 불안감을 떨칠 수 없는 사람이 많을 것이다. 자동차는 인간이 직접 탑승하고 조작하는 운송수단이며 사고가 생명과 직접 연결되기 때문에 자동차 기술에 있어서의 혁명적 전환을 다룰 때에 대중의 수용성을 간과한다면 실패를 면하기 힘들 것이다.

자동차 산업은 기계, 금속, 석유화학, 심지어 금융에 이르기까지 펼쳐져 있는 방대한 범위의 복합산업이며 참여기업들의 계층구조가 다층적이다. 전세계에 수많은 차종이 있으나 99% 이상의 자동차가 내연기관을 사용하고 있어 그 자체가 거대한 사회-기술체제(socio-technical regime)이다. 즉, 사람들은 '자동차란 내연기관 엔진을 가진 것'이라는 굳건한 생각을 갖고 있으며, 엄청난 수의 사람들이 관련한 기술을 알고 있고 관련된 일에 종사하고 있다. 연료전지차가 자동차의 미래임이 분명하다면, 그래서 내연기관 자동차가 언젠가의 미래에 연료전지차로 대체된다면, 이는 사

6) BBC 뉴스, 2005년 3월 16일자.

회-기술체제의 거대한 이행(transition)인 것이다. 물론, 산업혁명 이래 화석연료를 에너지 매체로 하는 시대가 종말을 맞고 수소를 매체로 하는 시대-소위 수소경제의 시대-로 돌입한다면 이는 더 큰 사회-기술체제의 변혁이 될 것이다. 그러나 화석연료의 사용과 에너지의 중앙집중적 공급을 상정으로 하는 현 에너지체제가 수소와 분산전원으로 대표되는 수소경제체제로 바뀌는 데에는 상당한 시간이 소요될 것이다.7) 말하자면, 연료전지차의 사회-기술체제(자동차를 위한 수소공급 인프라를 포함하는)는 본격적인 수소경제체제가 가능할지 미리 짐쳐보는 테스트베드(test-bed) 역할을 수행할 것이다.

새로운 사회-기술체제를 설계하고 도입하기 위해서는 '시스템 빌더(system builder)'가 필요하다. 19세기 전기가 보급되고 가스등이 전등으로 교체될 때 발전부터 송전, 변전을 거쳐 콘센트와 플러그, 전등 소켓과 전등에 이르기까지 일관 체계를 만들어 낸 에디슨의과 같은 역할을 할 시스템 빌더가 나타나야 한다. 각개적으로, 심지어 철통같은 보안 속에 이루어지고 있는 연료전지차의 경우에도, 하다못해 차내 수소 저장 방식 및 압력, 주수소구의 규격 등에 대한 표준이 만들어져야 수소 스테이션이 제 역할을 할 수 있을 것이다. 수소의 생산과 운반, 저장, 활용에 이르기까지 모든 참여 주체를 조율하고 네트워크를 관리할 수 있는 시스템 통합자(integrator)가 필요하다. 경제 규모와 사회간접자본적 성격을 고려한다면 연료전지차 체계, 나아가 수소경제 시스템의 통합과 구축의 역할은 민간보다는 정부 차원에서 맡는 것이 바람직할 것이다. 이는 기술에 대한 전문적 수준의 이해는 물론 사회-기술체제적 통찰력을 필요로 한다.

3. 결론 - FCV 실용화와 보급을 위한 정책

수소경제로의 전진이라는 거창한 어젠다를 던진 상황에서 정책적 지원을 기울여야 할 부분은 수소 생산인가, 배급체계인가, 아니면 연료전지 자동차인가? 한정된 자원을 효과적으로 배분하는 것이 혁신정책의 존재 의의이고, 전술한대로 연료전지차 기술체제와 수소경제체제를 위한 시스템 빌더로서 민간보다는 정부의 역할이 중요하다고 할 때, 당면한 정책적 결정은 연구개발 예산의 투입과 배분 문제일 것이다.

국민의 이용이 결여된 사회간접자본을 설치할 수는 없으니, 수소경제 구현을 위한 인프라부터 갖추는 것보다는 수소의 에너지 저장 매체로서의 활용에 초점을 맞춘 수요지향적 정책이 마련되어야 할 것이다. 한국의 경우 에너지의 대부분을 수입에 의존하고 있고, 특히 운송수단에 쓰이는 화석연료는 전량 수입하고 있으니, 안정적 경제성장과 에너지 안보를 위해서라도 수소에너지에 특단의 관심을 기울여야 할 것이다. 즉, 수소경제체제 구현의 성공여부를 가늠해 볼 시험으로서 먼저 연료전지차의 국내 개발과 실용화를 지원하는 것이 좋다.

다음으로는 지방자치단체 중에서 지원을 받아 수소에너지 시범타운을 운영하면서 수소경제 인프라에 대한 노하우를 축적하는 것이 필요하다. 수소 스테이션을 설치하고 FCV를 운행해 보는 것으로 시작해서, 수소 가스관을 통해 가정과 빌딩에 설치된 정치형 연료전지를 통해 분산 발전 그리드를 운영할 수 있다. 이러한 초기 단계에 사용될 수소를 어떤 방식으로 생산하느냐는 크게 중

7) 아이슬란드가 풍부한 지열 에너지를 바탕으로 수소경제를 구축할 첫 국가로 예상되고 있으나, 인구 30만에 불과한 1차, 3차 산업국과 우리나라 또는 기존 선진국들의 상황은 분명히 다를 것이다.

요하지 않다고 볼 수 있으며, 수요가 창출되어 본격 상용화 단계에서 그 시점에 맞는 경제성과 기술적 완성도를 갖춘 대량 생산 기술을 채택하는 것이 적절하다. 수소에너지 시범타운에서는 무엇보다도 소비자 즉 거주자의 수용성에 대한 연구가 이루어져야 한다. 이를 통해 안전성 확보 방안을 비롯하여 수소에너지 관리체계의 거버넌스에 관한 밑그림을 그려내야 할 것이다. 잘못된 지식에 의해 수소에너지 설비에 대한 사회의 첫인상이 혐오시설로 새겨지지 않도록 관리하는 것도 중요하다. 이를 위해서는 SMR이나 원자로를 이용한 수소 생산보다는 풍력이나 태양광 등 신재생에너지를 이용한 on-site 소규모 수소 생산 설비를 운영하는 것이 낫다. 막연히 깨끗하고 편리한 에너지라는 인식이 퍼질 것이라는 기대를 해선 안 된다. 원자력도 도입 초창기에는 ‘깨끗하고 값싸며 에너지 수입 대체 효과가 큰 에너지’라는 이미지를 가지고 있었다.

소비자들이 환경친화적이거나 혁신적 신기술이기 때문에 연료전지차를 선택할 것이라는 기대는 환상에 지나지 않으며 백년 넘는 역사를 가진 내연기관 자동차에 대한 시장과 사회의 굳은 신뢰를 파괴할 수 있는 적절한 정책적 지원이 필요하다. 선진국의 경우 공공기관의 업무용 차량과 대중교통으로부터 연료전지차를 도입하려고 하는 것은 좋은 시도로, 자연스럽게 국민 생활 속에 연료전지차를 도입시키는 방법이다. 시장 형성 초창기에는 구입 보조금 지급과 각종 세금 면제 등의 적극적 혜택을 제공함으로써 기존 자동차에 비해 경쟁력을 가질 수 있도록 배려해야 한다. 수소 공급이 중단되거나 공급 가격이 상승할지도 모른다는 불안감을 불식시키는 것도 매우 중요하다. 수소 보급 확대를 위해서는 일정기간 수소에는 전혀 세금을 붙이지 않는 면세정책이 필요하며, 각종 유류에 붙는 세금을 감안할 때 수소의 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것이다.

현 시점에서 연료전지 자동차 실용화와 수소경제체제 구현을 위해 시급히 필요한 정책적 조치는 바로 수소경제 정책 자체에 대한 투자와 노력이다. 에너지의 운반과 이용에 대한 사회-기술체제 및 산업-경제체제를 송두리째 바꾸는 작업이 개발경제 시대처럼 ‘만들면 된다’는 식으로 접근해서는 곤란하다. 기술개발에서의 난점을 극복하는 것도 중요하지만 그 외에 고려해야 할 점이 많다는 것을 간과해서는 안 된다. 기술영향평가(technology assessment)를 통해 연료전지와 수소경제체제의 사회를 예측해 보는 것도 의미있는 일이 될 것이다.

참고문헌

G. Padro and V. Putsche(1999), *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies*, National Renewable Energy Laboratory (US).

R. R. Moore and V. Raman(1998), *Hydrogen Infrastructure for Fuel Cell Transportation*, *Journal of hydrogen energy* 23, pp. 617-620.

M. Momirlan and T. N. Veziroghu(2002), *Current Status of Hydrogen Energy*, *Renewable & sustainable energy reviews* 6, pp. 141-179.

S. S. Penner, *Steps toward the Hydrogen Economy*, *Energy*, article in press.

8) SMR 방법으로 대량 생산된 수소의 경우 CO₂ 회수비용을 제외하면 기가주울(GJ)당 가격이 \$5.97로 계산되었는데, 유가는 1 GJ당 \$14 정도이다. 상온 전기분해의 경우 SMR의 10배가량의 비용이 든다. 수소는 생산 이후 가압 저장에 추가 비용이 소요된다.(G. Padro, 1999)

B. D. Solomon and A. Banerjee, A Global Survey of Hydrogen Energy Research, Development and Policy, *Energy Policy*, article in press.

J. M. Ogden(1999), Prospects for Building a Hydrogen Energy Infrastructure, *Annual Review of Energy & Environment* 24, pp. 227-279

D. Hart et al.(2000), Hydrogen Supply for Spec Vehicles, *ETSU report*.

A. E. Farrell, D. W. Keith and J. J. Corbett(2003), A strategy for Introducing Hydrogen into Transportation, *Energy Policy* 31, pp. 1357-1367.

M. Specht et al.(1998), Comparison of the Renewable Transportation Fuels, Liquid Hydrogen and Methanol, with Gasoline-energetic and Economic Aspects, *Journal of hydrogen energy* 23, pp. 387-396.

G. D. Berry et al.(1996), Hydrogen as a Future Transportation Fuel, *Energy* 21, pp. 289-303.

T. Oi and K. Wada(2004), Feasibility Study on Hydrogen Refueling Infrastructure for Fuel Cell Vehicles using the Off-peak Power in Japan, *International Journal of Hydrogen Energy* 29, pp. 347-354.

K-A. Adamson(2005), Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, pp. 341-350.

T. O'Garra, S. Mourato and P. Pearson(2005), Analysing Awareness and Acceptability of Hydrogen Vehicles: A London Case Study, *International Journal of Hydrogen Energy* 30, pp. 649-659.

C. Azar, K. Lindgren and A. Andersson(2003), Global Energy Scenarios Meeting Stringent CO₂ Constraints; Cost-effective Fuel Choices in the Transportation Sector, *Energy Policy* 31, pp. 961-976.