

## 수소 기술-경제체제로의 이행을 위한 장단기 시나리오 분석

최현도<sup>†</sup>, 이민규, 박상욱

서울대학교 공과대학 기술정책대학원과정

### Long-term and Short-term Scenarios Analysis for Hydrogen Techno-Economic Regime

Hyun-Do Choi<sup>†</sup>, Min-Kyu Lee, Sangook Park

Techno-Economics and Policy Program,  
Seoul National University, San 56-1, Sillim-dong,  
Gwanak-Gu, Seoul, 151-744, Korea

#### ABSTRACT

최근 수소에너지가 환경문제를 해결해 줄 수 있는 대체에너지로 각광받으면서 수소에너지의 사용이 가지고 올 새로운 에너지 체제에 대한 시나리오 연구가 다양하게 수행되고 있다. 수소 기술-경제체제의 가능한 시나리오를 제시하는 것은 미래 사회에서 수소가 에너지 운반체로서 담당하게 될 역할을 명확히 할 수 있음과 동시에 에너지라는 거대한 기술-경제체제의 변화를 위해 현재 수행해야 할 에너지 정책과 전략에 대해 큰 시사점을 줄 수 있기에 의미가 있다.

본 연구는 수소의 생산, 저장 및 운반, 그리고 응용분야에서의 다양한 기술의 SWOT 분석을 통해 가능한 시나리오를 단기와 장기로 나누어 제시했다. 그 결과 앞으로의 수소 기술-경제체제의 구조는 기술적 완성도 뿐 아니라 사회적 수용성, 사회적 적응성 등 외부의 환경변화에도 많은 영향을 받음을 알았다. 그렇기 때문에 수소에너지에 관한 전략과 정책은 이러한 변동을 충분히 고려하면서 결정되어야 한다.

**주요기술용어** : Hydrogen energy, Techno-economic regime, Fuel cell, SWOT, Energy policy

#### 1. 서 론

지구온난화, 스모그 등 많은 환경문제와 함께

급격한 수요확대와 한정된 화석연료에 대한 에너지 확보경쟁으로 인해 화석연료의 가격이 폭등하면서 수소에너지가 보완적 신재생에너지를 넘어 산업혁명 이래 지속되어 온 석유 에너지 경제체제를 대체할 미래의 에너지로 주목받고 있다. 이 시점에서 수소 기술-경제

<sup>†</sup> Corresponding author : thchocontrolmyself@msn.com

Table 1. Hydrogen Production Cost

기	술	비용(\$/GJ)	시점	인용문헌
SMR	6.75 million Nm <sup>3</sup> /d	5.44	현지	NREL survey <sup>1)</sup>
	1.34 million Nm <sup>3</sup> /d	7.46	현지	
바이오매스 열분해		12-15		
전기분해	풍력기반	11	2010	
	PV <sup>a</sup> 기반	24.7	2010	
	유휴전기기반	20-25	현지	
생물학적 수소생산		10	202C+	Benemann <sup>2)</sup>
제4세대 원자로		9.2	202C+	Schultz <sup>3)</sup>

<sup>a</sup>photovoltaic

(techno-economic regime) 체제에 대해 가능성이 높은 이행 시나리오를 제시하는 것은 에너지 운반체로서 수소가 미래 사회에서 담당할 역할을 그려볼 수 있을 뿐 아니라, 이에 대비하여 수행해야 할 에너지 전략과 정책에 대한 시사점을 제시할 수 있기에 의미가 있다고 할 수 있다.

본 연구는 수소의 생산, 저장 및 운반, 그리고 응용분야에서 현재 연구·개발되고 있는 다양한 기술들에 대한 SWOT(Strength, Weakness, Opportunity, Threat) 분석을 통해 수소에너지가 현실화할 경우 당면하게 될 환경변수를 면밀히 분석하고 향후 예상되는 상황전개에 따라 수소 기술-경제체제에서 채용될 기술들에 관한 최적의 시나리오를 단기와 장기로 나누어 제시한다.

## 2. 본론

### 2.1 미래 수소에너지 체제에 대한 연구동향

수소는 크게 화석연료로부터의 생산, 전기분해, 생물학적 수소생산, 열화학적 수소생산을 통해 얻을 수 있다. 현 기술수준에서 제조비용이 가장 낮은 메탄증기 개질(Steam Methane Reforming, SMR)의 경우 생산규모에 따라 \$5~\$7/GJ의 비용이 들며, 바이오매스 열분해는 \$12~\$15/GJ, 유휴전기기반의 전기분해는 \$20~\$25/GJ<sup>1)</sup>의 비용이 든다. 수소생산비용에 관한 것은 Table 1에 정리

되어 있다.

각 기술별로 최근의 연구동향을 살펴보면, 화석연료에서 수소를 생산하는 기술의 경우는 기술개발이 완성단계로 현재는 효율을 높이고 생산비용을 감소시키기 위해 촉매, 멤브레인(membrane), 가스 분리기술(gas separation)에 대한 개발이 주를 이루고 있다. 이런 기술들은 수소의 순도를 높이는데도 큰 역할을 하기에 연료전지의 기능과도 직접적인 관련이 있다고 할 수 있다. 이에 더해 화석연료를 사용함으로써 발생하는 CO<sub>2</sub>를 회수하여 저장하기 위해(sequestration) 심해, 폐가스전 혹은 폐유전 그리고 사용 불가능한 탄층에 저장하는 방법도 함께 연구되고 있다<sup>1)</sup>.

전기분해도 기술개발은 거의 완성단계에 들어섰으며 화석연료에서 수소를 생산하는 기술과 마찬가지로 효율을 높이기 위한 연구가 주로 이루어지고 있다. 최근에는 고효율의 고분해전해질막(Polymer Electrolyte Membrane, PEM)을 이용한 방법이 각광받고 있다.

생물학적 수소생산의 경우 지금 가장 큰 문제는 변환과정에서 핵심적인 역할을 하고 있는 유기물(organisms)이 소비하는 에너지로 인하여 에너지 변환 효율이 낮다는 것이다. 이 문제를 해결하는데 있어 유기물의 수소생산 메커니즘에 대한 지식이 필요하지만 아직 이것이 완벽하게 밝혀지지 않았기 때문에 문제 해결에 한계를 보이고 있다. 그렇기 때문에 유기물의 수소생산 메커니즘을

Table 2. Hydrogen Storage Properties of Intermetallic Compounds <sup>11)</sup>

종류	금속간화합물	수소 최대 저장량		온도(K) (1 atm P <sub>desorption</sub> )
		H/M <sup>a</sup>	wt%	
A <sub>2</sub> B	Mg <sub>2</sub> Ni	1.33	3.6	528
AB	TiFe	0.975	1.86	265
AB	ZrNi	1.4	1.85	565
AB <sub>2</sub>	ZrMn <sub>2</sub>	1.2	1.77	440
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	1	1.49	285
AB <sub>2</sub>	TiV <sub>0.62</sub> Mn <sub>1.5</sub>	.08	2.15	267

<sup>a</sup>화합물에서 수소와 금속의 원자비

밝히고 이를 통해 수소생산을 최적화시키는 과정을 설계하는 것이 시급한 문제이다<sup>5)</sup>.

바이오매스 열분해의 경우 소량의 오염물질이 발생하기 때문에 이를 처리하기 위한 시설에 대한 연구가 이루어지고 있다<sup>6)</sup>. 이에 더해 최근에는 비용을 낮추기 위해 가스분리기술의 개발도 함께 이루어지고 있다<sup>7)</sup>.

제4세대 핵발전 중 하나인 초고온가스로(Very High Temperature Reactor, VHTR)를 이용한 수소생산도 주목받고 있는 것 중 하나다. 이는 초고온가스로에서의 고온을 이용해 열화학적 물분해로 수소를 생산하는 방법인데 반응온도가 높을수록 빠른 화학반응과 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에 반응온도를 높이기 위해 연구가 집중되고 있다. 하지만 S-I cycle이 높은 온도에서 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>농도로 인해 연성을 가지면서 부식에 강한 물질이 필요하듯이 대부분의 초고온가스로에서 높은 온도에서도 특정한 성질을 만족하는 물질이 필요하기 때문에 고온문제를 해결하는데 어려움을 겪고 있다<sup>5)</sup>.

수소의 저장 및 분배기술은 고압수소봄베, 액화수소, 수소저장합금, 파이프라인 등으로 나눌 수 있다. 현재 가장 많이 연구개발 활동이 이루어지고 있는 고압수소봄베(tube)의 1일 저장비용은 \$2-\$4/GJ이고 액화수소는 \$5-\$7/GJ, 수소저장합금은 \$3-\$7/GJ이다. 화학수소화물의 하나인 메틸시클로헥산(methylcyclohexane)은 장기간 저장에 유리하여 1일 저장비용이 \$1400/GJ인 반면

100일 저장비용은 \$15/GJ로 현저하게 낮다<sup>11)</sup>.

고압수소봄베(tube)기술은 완성단계의 기술로 현재는 저장에너지 밀도를 높이기 위해 유리 미소구체(glass microspheres)와 같이 좀 더 높은 기압에서 저장이 가능한 재료개발이 주로 이루어지고 있다<sup>8)</sup>. 액화수소의 경우 저장비용이 높지만 에너지 밀도가 높다는 점 때문에 장거리 수송에 적합한 기술로 평가되고 있다. 하지만 문제는 저장비용인데 이것은 수소를 액화하는데 저장수소 에너지의 1/3 정도의 에너지가 필요하기 때문이다<sup>9)</sup>. 따라서 현재는 열전도율이 낮으면서 가볍고 값싼 재료를 찾는 데 연구의 초점이 맞춰지고 있다. 두 저장기술의 단점을 보완하기 위해 Aceves(1998)는 단거리에서는 압축가스의 형태로, 장거리에서는 액화수소의 형태로 저장할 수 있는 복합시스템을 개발하기도 했다<sup>10)</sup>.

수소저장합금의 가장 큰 문제는 저장되는 수소무게의 비율이 낮다는 것이다. Table 2에 정리한 것과 같이 현재는 대략 1~3 wt% 정도의 수소를 저장할 수 있다. 이마저도 모두 사용할 수 있는 것이 아니라 수소저장합금에 저장된 수소의 50~90% 정도 밖에는 사용할 수 없다. 지금의 상황에서는 성능향상에 한계가 있다고 보이며, 이에 따라 연구자들은 수소저장량이 획기적으로 늘리기 위해 새로운 물질을 찾고 있다.

최근 가장 많이 각광을 받는 수소저장기술은 화학수소화물과 나노구조 탄소재를 이용한 것이다. 이중 화학수소화물의 경우 저장되는 수소무게

의 비율이 7-18 wt%로 상당히 높게 나타나고 있으며<sup>11)</sup> NaBH<sub>4</sub>의 경우는 용매없이 합성할 수 있는 특징을 가지고 있다. 나노구조 탄소재의 경우 나노크기에서만 보이는 특이한 성질을 이용해 수소저장밀도, 저장속도 등의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성이 있다. 하지만 수소저장능력에 관하여 상반된 연구결과들로 인해 논쟁이 심한 상태이고<sup>12)</sup>, 나노기술 자체에 대한 기술수준이 낮아 나노구조 탄소재에 수소가 저장되고 방출되는 메커니즘에 대한 이해의 부족으로 연구에 제약이 발생하고 있다. 그래서 지금은 이것에 대한 연구가 집중되고 있으며 근래에 수소저장량과 나노구조 탄소체 표면적간의 상관관계가 밝혀지면서<sup>13)</sup> 제올라이트(zelolites) 등을 이용해 나노구조 탄소재의 표면적을 향상시키고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

수소를 사용가능한 에너지로 변환하는 분야는 크게 연료전지와 수소연소로 나눌 수 있는데, 이중 수소연소보다는 넓은 응용범위를 가지고 있으며 전력을 바로 생산할 수 있는 연료전지를 중심으로 개발되고 있다. Putsche(1999)는 연료전지의 종류 및 크기별 가격 비교 연구를 통해 이용 상황에 따른 적절한 연료전지 선택을 가능하게 하였는데, PEMFC로 10 kW 연료전지를 사용할 경우, 1 kWh당 비용이 현시점에서 \$0.25-0.30, 미래 시점에는 \$0.09-0.095임을 보였다<sup>14)</sup>.

현재는 저온의 연료 전지가 향후 5-10년 안에 상용화를 목표로 자동차 연료 용도로 빠르게 개발되고 있다. 특히, 메이저 자동차 기업들이 연료 전지 자동차 상용화 계획을 발표하고 있으며, 낮은 가격의 연료 전지 자동차가 개발된다면 그 사용량이 폭발적으로 증가할 것이다<sup>15)</sup>.

이제까지 수행된 시나리오 분석 연구를 살펴보면 크게 두 가지 방법이 사용되었는데, 첫째 Sørensen(2004)<sup>16)</sup>과 Barreto(2003)<sup>16)</sup>와 같이 다양한 데이터의 정량적 분석을 중심으로 놓고 시나리오를 제시하는 것이고, 둘째는 Ogden(1999)<sup>17)</sup>이나 Midilli(2005)<sup>18)</sup> 등과 같이 수소에너지에 관련된 현재의 사회적·기술적 상황을 정성적으로 서술

하고 이를 바탕으로 시나리오를 제시하는 것이다. 수소 에너지의 특성상 생산, 저장 및 운반, 응용분야에서 사용되는 다양한 기술들의 경제성과 기술수준이 아직 검증되지 않아 불확실성이 높으며 수소에너지 체제로의 전환은 사회적으로 큰 영향을 끼칠 거대한 기술-경제체제의 변화이기 때문에 요소 기술을 선택하기 보다는 전체 시스템을 상정하는 것이 나올 것이다.

## 2.2 수소 기술-경제체제

미래 유망기술에 대해 논할 때 빠지기 쉬운 함정이 바로 기술결정론적 시각이다. 완성된 기술이 반드시 대중에게 선택되고 사회에서 안정적으로 사용될 것이라는 것은 희망에 불과하다. 상전도 자기부상열차에 관련한 기술은 이미 70년대에 완성되었지만 고속전철에 비해 뚜렷한 장점이 없는 데다 기존 선로와의 연계성·호환성이 전무한 탓에 특정 구간 셔틀 등 매우 제한적인 용도로, 그것도 극소수의 국가에서 운영하고 있다. 90년대 초 폴크스바겐은 정차시 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.

기술결정론적 오류를 범하지 않기 위해 종종 보완적으로 고려되는 것이 경제성 분석이다. 기존의 기술에 비해 가격 경쟁력이 있는지, 비용 대비 편익이 높은지 따져보는 것이다. 하지만 경제성 분석에 환경비용을 적용하는 것조차 비교적 최근의 일로, 아직 신기술의 사회적 수용성에 대한 고려는 미미한 수준이다.

에너지 체제는 인간의 삶에 있어서 필수적이며 수많은 이해당사자가 얽혀있는 다층적·다중적

Table 3. SWOT Analysis of Hydrogen Production

	S	W	O	T
SMR	낮은 비용 대량생산가능 생산경험 있음 기술개발완성단계	CO <sub>2</sub> 생성 인프라조건이 까다로 운 편 화석연료에 의존	CO <sub>2</sub> 회수기술의 발전 기존인프라 사용가능	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박
재생에너지 기반의 전기분해	에너지 저장매체로서 불균형한 재생에너지 의 단점 보완 오염없음 생산시설 규모가 다양 함	높은 비용 가압이 필요함 낮은 에너지 효율(에 너지 이중 변환) 많은 양의 물이 필요	화석연료가격상승과 고갈 재생에너지에 대한 사 회적 선호경향 에너지를 둘러싼 국제 적 갈등고조와 이에 따른 에너지자립화	재생에너지 개발의 어 려움 사회시스템의 전면적 개편에 따른 혼란 지역에 따른 재생에너 지격차
유휴전기 기반의 전기분해	유휴전기 활용가능 추가적인 전기발전시 설 필요없음	지금의 발전시스템에 중속 많은 양의 물이 필요	전기분해 효율이 매우 높은 고효율 PEM 기 술의 발달 <sup>19)</sup>	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박 유휴전기 부족
4세대 원자로를 이용한 열분해	발전 시 열효율이 높 음 기존 원자력에 비해 안정성과 환경성이 뛰 어남	원자력 폐기물 4세대 원자력 아직 개 발중 원자력 폐기물 처리경 험 없음	세계적으로 많은 관심 을 가지고 있음	원자로에 대한 부정적 인 인식이 팽배함
생물학적 수소생산	오염없음 수소생산과정에서 CO <sub>2</sub> 흡수됨 <sup>19)</sup> 고부가가치 부산물 생 산가능 <sup>a,19)</sup> Cyanobacteria <sup>b,19)</sup>	변환효율 낮음 개발초기단계	생물공학 발전(새로운 유기물발견 가능성 높 음) 폐기물증가에 따른 환 경적 처리방요구 증 가	효율이 높은 재생에너 지 개발
바이오매스 열분해	재생가능함 화석연료(석탄 등)의 가스화보다는 오염배 출 적음 중간단계의 에너지로 사용가능	오염물질 발생 식물생산에 넓은 농지 필요 <sup>5)</sup> 고온열분해의 경우 추 가적 주변기술이 필요 개발초기단계	폐기물증가에 따른 처 리기술 발전 일반적 고온 및 열분 해 기술의 발달	식량부족
광촉매반응	태양광을 이용하므로 깨끗하고 쉽게 인프라 구축 가능	효율이 낮음(가시광 영역문제) <sup>19)</sup> 기술적 어려움이 많음	획기적 광촉매 개발	다른 수소 발생 방법 에 비해서 상용화가 늦을 수 있음
부분산화	소규모 시설에서는 SMR에 비해 비용 ,반 응시간 등에서 우위 <sup>17)</sup> 발열반응이므로 간접 적인 열 교환기 필요 없음 <sup>17),19)</sup>	화석연료에 의존 대규모 시설에서는 순 수한 산소를 위한 시 설이 추가적으로 필요	자동차를 위한 소규모 on-site의 개발이 많 이 이루어지고 있음	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박

<sup>a</sup>비타민, 색소, 피부암 치료제 등의 고부가가치 부산물 생성.

<sup>b</sup>이산화탄소를 흡수하여 산소로 전환시키고 성장 비용이 최소로 소요되며, 배양이 단순하고 경제적이어서 가장 이상적인 미생물로 알려져 있음.

체제이다. 사람들은 현재의 화석연료 기반의 에너지체제를 자연스럽게 생각하고 있는데, 이는 굳건한 기술-경제체제가 형성되어 있는 것으로 해석할 수 있다. 수소에너지가 미래의 에너지 체제의 중심에 위치한다면 화석연료를 대신하여 새로운 기술-경제체제로의 거대한 이행(transition)이 이루어 질 것이다.

화석연료의 사용과 에너지의 중앙집중적 공급을 상징으로 하는 현 에너지체제가 수소와 분산전원으로 대표되는 수소 기술-경제체제로 바뀌는 것은 쉽지 않을 것이다. 이를 위해서는 수소의 생산과 저장 및 운반, 응용에 이르기까지 모든 기술적·사회적 참여자(actor)를 조율하고 그들의 네트워크를 관리할 수 있는 시스템 통합자(integrator)로서 '시스템 빌더(system builder)'가 필요하다. 에너지 관련 설비가 사회간접자본적 성격을 가진다는 것을 고려한다면 수소 기술-경제체제를 통합하고 구축하는 역할은 민간기업보다는 정부 차원에서 맡는 것이 바람직할 것이다.

### 2.3 SWOT 분석

SWOT 분석은 강점(strength), 약점(weakness), 기회(opportunity) 및 위협(threat)요인을 분석해 지금의 상황을 진단하고 가능성을 예측해 보는 전략분석 도구이다. 본 연구에서는 수소의 생산, 저장 및 운반 기술에 대하여 수소에너지가 처한 환경을 분석하여 표 3과 표 4에 그 결과를 제시하였다.

### 2.4 시나리오 분석

시나리오는 크게 단기와 장기로 나누어 분석했다. 이것은 시간에 따라 기술개발의 수준과 환경변수 등 분석조건이 달라지기 때문에 이를 구분하기 위함이다. 여기서 환경변수란 수소기술의 개발에 의해 좌우되지 않는 외부환경의 변화를 말한다. 또, 시간에 따른 시나리오 분석은 단기적인 목표를 이루기 위한 정책과 장기적인 목표를 이루기 위한 정책을 구분지어 줄 수 있다는 점에서

유용하다.

단기적으로는 현재 구현이 가능하거나 조만간 가능하다고 예측되는 기술을 우선적으로 고려했다. 주요 환경 변수로는 수소에너지 사용에 있어 중요한 요소인 이산화탄소 배출 문제와 원자력의 이용 등 환경에 대한 인식 및 수소 에너지 체제 및 관련기술의 사회적 수용성 정도와 단기에서 수소생산기술 선택에 큰 영향을 미칠 화석연료의 가격추이를 설정했다.

1) 화석연료 가격상승과 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 높은 경우, 재생에너지를 기반으로 하는 전기분해를 통해 수소를 생산하는 방법을 선택하더라도 경쟁력을 갖출 수 있으며, 처음부터 수소에너지가 깨끗한 에너지라는 인식을 사람들에게 심어주는 효과도 가져올 것이다. 지역적으로나 시간적으로 공급이 불균형한 재생에너지를 사용하기 때문에 액화하는 방법으로 수송하는 것이 유리하여 최종적으로 자동차 등의 연료전지에서 활용한다. 2) 화석연료 가격상승과 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 낮은 경우, 유틸리티 기반의 전기분해 방법을 이용하여 수소를 생산하고 액화하여 수송한다. 환경에 대한 인식이 제고되지 않을 경우이기 때문에 전력수요의 피크타임이 아닌 시간에 기존의 화력 및 원자력을 이용해 유틸리티를 생산하더라도 받아들여 질 것이다. 3) 화석연료 가격이 안정되고 환경에 대한 인식이 높아질 경우로, 천연가스를 이용한 SMR법이나 부분산화법을 수소 생산하여 CO<sub>2</sub>는 회수처리 한다. 화석연료의 가격이 안정되어 있기 때문에 추가적인 CO<sub>2</sub> 회수비용을 감수하면서 생산을 하더라도 어느 정도 경제성을 유지할 수 있다. SMR이나 부분산화법은 고온, 고압의 반응환경이므로 고압수소튜브를 통해 운반, 저장 경로를 거치고 최종적으로 연료전지에 이용하는 것이 적합하다. 4) 화석연료 가격이 안정되고 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 낮아지는 경우, SMR이나 부분산화법을 이용하되 CO<sub>2</sub> 회수를 거치지 않고 고압수소튜브 방법으로 수송한다.

Table 6은 장기 시나리오 분석 결과이다. 장기

Table 4. SWOT Analysis of Hydrogen Storage and Distribution

	S	W	O	T
고압수소튜브	기술개발완성단계 액화수소보다 설비비 용이 적게 들 상용화에 근접	부피가 크고 통이 무 거워서 대량저장이나 운반이 불리 초고압에서는 압축비 용이 많이 들	복합재료의 발달 기술개발에 따라 응용 기기에서의 수소밀도 요구치가 낮아질 가능 성 있음	대량수송에 대한 요구 커질 수 있음
액화수소	밀도가 높음 운반비용이 상대적으 로 낮음 수송이 용이 저장공간의 최소화 장거리 운송에 유리 비행기 자동차 등에 사용가능	액화하는데 설비가 많 이 필요 운반 후 사용 시 추가 적인 처리과정 필요 증발성문제 안전이 검증되지 않음	균등하지 못한 재생에 너지 저장 저온고압기술개발	현재 주로 연구되는 것은 고압수소기술
파이프라인	기존의 천연가스 파이 프를 개량 사용할 수 있음 <sup>17)</sup> 안정적 공급 대량소비에 대응할 수 있음	안전이 검증되지 않음 <sup>a</sup> 인프라 구축비용 큼 한정된 사용범위	가정용 분산전원 상용 화 시 적합한 기술	중앙집중형 모델의 거 부
화학수소화물	메탄올이나 NaBH <sub>4</sub> 의 경우 에너지밀도 상당 히 높음 <sup>b,5)</sup> 상온에서 다루기 쉬움 기존인프라 사용가능	수소 다시 뽑아내는 반응시간 느림 운반 후 사용 시 추가 적인 처리과정 필요 재순환과정이 필요	화학공정기술의 발달	중앙집중형 모델의 거부
수소저장합금	안전성이 큼 흡열, 발열 시 폐열회 수가능 고압수소보다 낮은 압 력필요	합금이 비쌘 무게 당 수소저장량 낮음 <sup>c,11)</sup> 충전시간 길다 <sup>d,17)</sup> 수소사용 시 열이 가 해져야 함 미분화문제 응용범위 제한	합금기술의 발달	액체 및 고압수소방 식의 시장 및 수요특 화 나노구조 탄소재의 상용화
나노구조 탄소재 이용	저장의 장점, 수송의 장점 무게가 가벼움 액체 저장에 비해 안 전함 반복적 재사용에도 문 제없음	아직까지는 기술개발 이 완전한 상태가 아 님 탄소나노튜브의 대량 생산 경험없음 수소저장능력 논란 존재 <sup>12)</sup>	이차전지의 한계 부 각 시 이동형 제품에 사용가능 합금담지기술 등 복 합재료 개발	나노기술의 발전이 더딜 수 있음

※<sup>a</sup>수소 누출 문제 등

※<sup>b</sup>66 g H<sub>2</sub>/L, 압축가스는 23 g H<sub>2</sub>/L, 액화수소는 70 g H<sub>2</sub>/L

※<sup>c</sup>표 2 참조

※<sup>d</sup>10~20분 소요

Table 5. Short-term Scenario Analysis for Hydrogen Techno-Economic System

	환경 인식 및 사회적 수용성 높음	환경 인식 및 사회적 수용성 낮음
화석연료 가격상승	재생에너지 기반의 전기분해 → 액화수소 → 연료전지	유류전기 기반의 전기분해 → 액화수소 → 연료전지
화석연료 가격안정	수증기 개질 + CO <sub>2</sub> 회수 or 부분산화 + CO <sub>2</sub> 회수 → 고압수소튜브 → 연료전지	수증기 개질 or 부분산화 → 고압수소튜브 → 연료전지

적으로는 단기에서와는 달리 수소생산에 있어서 화석연료의 사용은 자연스럽게 줄어들 것이다. 이는 화석연료의 부족으로 인해 가격이 치솟을 것은 물론, 장기에서도 화석연료로 수소를 만들어 낸다면 수소를 청정에너지로 사용하고자 하는 궁극적인 의미가 사라질 것이기 때문이다. 그리고 단기에서는 수소기술의 보급이 초기단계인 상태에서 상용화를 위한 개발이 주로 이루어졌기 때문에 적극적인 인프라 구축이 이루어지지 않았지만 장기에서는 본격적인 상용화가 이루어지면서 실제 인프라 구축이 중요한 이슈로 등장할 것이다. 실제 인프라 구축에서 가장 문제가 되는 것은 에너지 집중화 여부이다. 이것은 기술적 문제임과 동시에 사회적이고 국제적인 문제이다. 사회적으로 봤을 때 에너지 집중화 여부는 인간에게 있어 필수적인 에너지가 민주적으로 사용될 것인가 하는 문제이면서 국제적으로는 에너지 자립과 관련된 문제이기도 하다. 여기에 더해 환경에 대한 문

제는 여전히 중요한 요소로 작용할 것이다. 따라서 장기 시나리오 분석에서는 환경에 대한 인식 및 사회적 수용의 정도와 인프라 구축 시 중요한 결정이 될 수소생산의 중앙집중/분산 여부를 주요 환경 변수로 놓고 시나리오를 제시하였다.

1) 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 높고 인프라가 분산형으로 구축될 경우, 수소의 생산은 지역에서의 재생에너지를 기반으로 이루어 질 것이다. 불균형한 재생에너지를 단점을 보완하고자 소규모 풍력, 소수력, 가정용 태양광 발전 등 가능한 모든 종류의 재생에너지에서 발생시킨 전기로 전기분해를 통해 수소를 생산하고 동시에 생물학적 수소생산기술과 광촉매를 이용한 기술도 사용될 것이다. 단거리 수송이 이루어지기 때문에 고압수소튜브와 비슷한 에너지 밀도를 갖으면서도 안전성에 있어서는 고압수소튜브보다 우월한 나노구조 탄소재가 저장기술로 사용될 것이다. 2) 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 낮고 인프라

Table 6. Long-term Scenario Analysis for Hydrogen Techno-Economic System

	환경 인식 및 사회적 수용성 높음	환경 인식 및 사회적 수용성 낮음
분산형	재생에너지 기반의 전기분해 or 광촉매 or 생물학적 수소생산 → 나노구조 탄소재 → 연료전지	바이오매스 열분해 → 나노구조 탄소재 → 연료전지
중앙집중형	재생에너지 기반의 전기분해 → 액화수소 or 화학수소화물 → 연료전지	4세대 원자로를 이용한 열분해 → 파이프라인 → 연료전지



가 분산형으로 구축될 경우, 지역에서 생산한 작물을 이용하여 바이오매스 열분해를 통해 수소를 생산할 것이다. 바이오매스 열분해에서 나오는 미량의 오염물질은 사회적으로 받아들여지며, 단거리 수송에 적합한 나노구조 탄소재가 저장기술로 사용될 것이다<sup>3)</sup>. 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 높고 인프라가 중앙집중형으로 구축될 경우, 재생에너지의 지역적 불균형을 극복하고자 사막에서의 태양광 발전과 같이 대용량의 중앙집중형 재생에너지를 기반으로 수소를 생산하고, 이를 멀리 떨어진 사용지역까지 운반하기 위해 장거리수송에 적합한 액화수소나 화학수소화물이 사용될 것이다<sup>4)</sup>. 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 낮고 인프라가 중앙집중형으로 구축될 경우, 원자력 이용에 대한 사회적 합의가 이루어지면서 4세대 원자로에서 열분해로 만들어지는 대량의 수소가 파이프라인을 통해 각 지역으로 운반될 것이다.

### 3. 결론 : 수소 기술-경제체제 구현을 위한 정책

정부 정책의 역할은 한정된 자원을 체계적이며 효율적으로 지원하는 것이며, 현 상황을 분석하여 지원의 우선순위를 결정한다. SWOT 분석과 시나리오 분석은 이러한 정책적 결정을 내리는데 유용하게 사용될 수 있다. 에너지 체제의 변화는 큰 사회적 파급효과를 가져오므로 계획의 수립에 있어서 사회적 수용성을 고려해야 한다. 예를 들어 수소 에너지의 빠른 보급을 위해 단기적으로 천연가스로부터 생산하는 경우 예상치 못한 반대에 직면할 수도 있으며, 이 경우 경제적 불리함에도 불구하고 신재생에너지를 이용하거나 SMR법을 보완할 CO<sub>2</sub> 회수기술을 동시에 개발해야 한다. 장기적으로도 생산 및 배급 체계가 중앙집중적일지, 분산적일지에 따라 선택되는 기술 체계는 전혀 다를 것이다. 이러한 불확실성 속에서 본격적으로 인프라 구축에 나서는 것보다는 에너지 저장매체로서의 수소의 활용에 초점을 맞춘 정책이 마련되어야 한다. 수소에너지 시범타운을 운영

하면서 수소인프라에 대한 노하우를 축적하는 것은 필요하며, 수소에 대한 면세와 응용제품에 보조금을 지급하는 방식으로 경쟁력을 확보할 수 있도록 해야 한다. 시나리오 설정과 기술력 분석을 통해 취약한 기술 분야에 적극적으로 선진 기술을 도입할 수 있도록 전략적 기술이전 지원에도 정책적 노력을 기울여야 한다.

에너지 체제는 복잡한 기술-경제체제이며 새로운 체제에 대한 사회적 수용과 적응을 위해 대중과의 간극을 줄여야 한다. 이를 위해 외국에서와 같이 공공기관의 업무차량과 대중교통에 연료전지차를 도입하는 것은 좋은 방법일 것이다. 기술 영향평가를 통해 문제점을 미연에 인식하고 대비하여 수소 체제를 예상해 보는 것도 중요하다.

### 참 고 문 헌

- 1) C. E. Gregoire Padro and V. Putsche : "Survey of the Economics of Hydrogen Technologies", US National Renewable Energy Laboratory, Vol.2, No.22, 1999.
- 2) J. R. Benemann : "Process Analysis and Economics of Biophotolysis of Water", IEA Hydrogen Program Technical Reports, Vol.16, No.22, 1998.
- 3) K. R. Schultz : "Economic Production of Hydrogen from Nuclear Energy", US Department of Energy, 2002.
- 4) S. H. Kim and J. H. Edmonds : "Potential for Advanced Capture and Sequestration Technology in a Climate Constrained World", PNNL-13095, Pacific Northwest National Laboratory, 2000.
- 5) M. Dresselhaus. et al. : "Basic Research Needs for the Hydrogen Economy", US Department of Energy, Vol.9, No.51, 2003.
- 6) E. D. Larson. : "Advanced technologies for biomass conversion to energy", Proc. Olle Lindstrom Symp. Renew. Energy, 1999.

- 7) R. H. Williams : "Toward zero emissions for coal, roles for inorganic membranes", Int. Symp. Zero Emissions, 1999.
- 8) P. C. Souers, I. Moen, R. O. Lindahl, and R. T. Tsugawa : "Permeation eccentricities of He, Ne, and D-T from soda-lime glass microbubbles", J. Am. Ceram. Soc., Vol. 61, 1978pp. 42-46.
- 9) W. Peschka, E. A. Wilhelm, and U. Wilhelm : "Liquid Hydrogen: Fuel of the Future", Springer, New York, 1992.
- 10) S. M. Aceves and G. D. Berry : "Thermodynamics of insulated pressure vessels for vehicular hydrogen storage", J. Energy Resour. Technol., Vol. 120, 1998, pp. 137-142.
- 11) G. Sandrock : "A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view", J. alloys and compounds, Vol. 293, 1999, pp. 877-888.
- 12) R. Dagani : "Hydrogen Storage", Chem. Eng. News, Vol. 80, 2001, pp. 25-28.
- 13) M. G. Nijkamp, J. E. Raaymakers, A. J. van Dillen, and K. P. de Jong : "Hydrogen storage using physisorption - materials demands", Appl. Phys. A, Vol. 72, 2001, pp. 619-623.
- 14) M. Steinbugler and R. H. Williams : "Beyond combustion: fuel cell cars for the 21st century", Forum Appl. Res. Public Policy, Vol. 13, 1998, pp. 102-107.
- 15) Bent Sorensen. et al. : "Hydrogen as an energy carrier: scenario for future use of hydrogen in the Danish energy system", Int. J. Hydrogen Energy Vol. 29, 2004, pp. 23-32.
- 16) L. Barreto, A. Makihira, and K. Riahi : "The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario", Int. J. Hydrogen Energy Vol. 28, 2003, pp. 267-284.
- 17) J. M. Ogden : "Prospects for building a hydrogen energy infrastructure", Annu. Rev. Energy. Environ., Vol. 24, 1999, pp. 227-279.
- 18) A. Midilli, M. Ay, I. Dincer, and M. A. Rosen : "On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs", Renew. Sustainable Energy Rev., Vol. 9, 2005, pp. 255-271.
- 19) 신흥순, 박동운, 김기일, 2003 기술산업정보분석 수소에너지, KISTI, 2003, pp. 21-283.