

수소 기술-경제체제로의 이행을 위한 장·단기 시나리오 분석
 Long-term and Short-term Scenarios Analysis for
 Hydrogen Techno-Economic System

최현도, 이민규, 박상욱
 서울대학교 공과대학 기술정책대학원과정

1. 서론

최근 화석연료의 가격 상승과 이산화탄소 배출량 규제 문제가 부상하면서 수소에너지가 보완적 신재생에너지를 넘어 산업혁명 이래 지속되어 온 석유 에너지 경제체제를 대체할 미래의 에너지로 주목되고 있다. 이 시점에서 수소 기술-경제체제에 관해 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 것이다.

본 연구는 수소의 생산, 저장 및 운반, 그리고 응용분야에서 현재 연구·개발되고 있는 다양한 기술들에 대한 SWOT 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(SMR)의 경우 생산규모에 따라 \$5~\$7/GJ의 비용이 들고 바이오매스 열분해는 \$12~\$15/GJ, 전기분해는 \$20~\$25/GJ의 비용이 든다.¹⁾ 최근에는 4세대 원자로의 하나인 초고온가스로(VHTR)에서 발생하는 고온의 수증기를 이용한 열화학적 물분해를 통해 수소를 생산하는 방법이 관심을 받고 있다.²⁾

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/GJ 이다. 화학수소 화물인 메틸시클로헥산(methylcyclohexane)은 장기간 저장에 유리하여 1일 저장비용이 \$1400/GJ인 반면 100일 저장비용은 \$15/GJ로 현저하게 낮다.¹⁾ 이외에도 대표적인 화학 수소화물 저장방법인 NaBH₄와²⁾ 나노기술의 발달로 급격한 성능향상이 예상되는 나노구조 탄소재를 이용한 수소저장기술이 최근 주목을 받고 있다.

수소를 사용가능한 에너지로 변환하는 분야는 크게 연료전지와 수소연소로 나눌 수 있는데, 이중 수소연소보다는 넓은 응용범위를 가지고 있으며 전력을 바로 생산할 수 있는 연료

전지를 중심으로 한다. 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.¹⁾

이제까지 수행된 시나리오 분석 연구를 살펴보면 크게 두 가지 방법이 사용되었는데, 첫째 Sørensen(2004)³⁾과 Barreto(2003)⁴⁾와 같이 다양한 데이터의 정량적 분석을 중심에 놓고 시나리오를 제시하는 것이고, 둘째는 Ogden(1999)⁵⁾이나 Midilli(2005)⁶⁾ 등과 같이 수소에너지에 관련된 현재의 사회적·기술적 상황을 정성적으로 서술하고 이를 바탕으로 시나리오를 제시하는 것이다. 수소 에너지의 특성상 생산, 저장, 운반, 응용분야에서 사용되는 다양한 기술들의 경제성과 기술수준이 아직 검증되지 않아 불확실성이 높으며 수소에너지 체제로의 전환은 사회적으로 큰 영향을 끼칠 거대한 사회-기술체제의 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 것이 희망에 불과하다. 에너지 체제는 인간의 삶에 있어서 필수적이며 수많은 이해당사자가 얽혀있는 다층적·다중적 체제이다. 사람들은 현재의 화석연료 기반의 에너지체제를 자연스럽게 생각하고 있는데, 이는 굳건한 사회-기술체제(socio-technical regime)가 형성되어 있는 것으로 해석한다. 수소에너지가 미래의 에너지 체제의 중심에 위치한다면 화석연료를 대신하여 새로운 사회-기술체제로의 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, 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(strengths), 약점(weaknesses), 기회(opportunities) 및 위협(threats) 요인을 분석해 지금의 상황을 진단하고 가능성을 예측해 보는 전략분석 도구이다. 본 연구에서는 수소의 생산, 저장 및 운반 기술에 대하여 수소에너지가 처한 환경을 분석하여 표 1에 그 결과를 제시하였다.

	S	W	O	T
스팀 메탄 개질(SMR)	낮은 비용 대량생산가능 생산경험 있음 기술개발완성단계	CO ₂ 생성 인프라조건이 까다로운 편 화석연료에 의존	CO ₂ 회수기술의 발전 기준인프라 사용가능	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박
재생에너지 기반의 전기분해	에너지 저장매체로서 불균형한 재생에너지의 단점 보완 오염없음 생산시설 규모가 다양함	높은 비용 가압이 필요함 낮은 에너지 효율(에너지 이중 변환) 많은 양의 물이 필요	화석연료가격상승과 고갈 재생에너지에 대한 사회적 선 호경향 에너지를 둘러싼 국제적 갈등 고조와 이에따른 에너지자립화	재생에너지 개발의 어려움 사회시스템의 전면적 개편에 따른 혼란 지역에 따른 재생에너지격차
유류전기 기반의 전기분해	유류전기 활용가능 추가적인 전기발전시설 필요없 음	지금의 발전시스템에 종속 많은 양의 물이 필요	전기분해 효율이 매우 높은 고 효율 PEM 기술의 발달 ⁷⁾	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박 유류전기 부족
4세대 원자로를 이용한 열분해	발전 시 열효율이 높음 기존 원자력에 비해 안정성과 환경성이 뛰어남	원자력 폐기물 4세대 원자력 아직 개발중 원자력 폐기물 처리경험 없음	세계적으로 많은 관심을 가지 고 있음	원자로에 대한 부정적인 인식 이 팽배함
생물학적 수소생산	오염없음 수소생산과정에서 CO ₂ 흡수됨 ⁷⁾ 고부가가치 부산물 생산가능 ⁷⁾ Cyanobacteria ⁷⁾	변환효율 낮음 식물생산에 넓은 농지 필요 ²⁾ 개발초기단계	생물공학 발전(새로운 유기물 발전 가능성 높음) 폐기물증가에 따른 환경적 처 리방법요구 증가	식량부족
바이오매스 열분해	재생가능함 화석연료(석탄 등)의 가스화보 다는 오염배출 적음 중간단계의 에너지로 사용가능	오염물질 발생 식물생산에 넓은 농지필요 고온열분해의 경우 추가적 주 번기술이 필요 개발초기단계	폐기물증가에 따른 처리기술 발전 일반적 고온 및 열분해 기술의 발달	식량부족
광촉매반응	태양광을 이용하므로 깨끗하고 쉽게 인프라 구축 가능	효율이 낮음(가시광 영역문제) 기술적 어려움이 많음	획기적 광촉매 개발	다른 수소 발생 방법에 비해서 상용화가 늦을 수 있음
부분산화	소규모 시설에서는 수증기 개질 에 비해 비용, 반응시간 등에서 우위 ⁵⁾ 발열반응이므로 간접적인 열 교 환기 필요 없음 ^{5,7)}	화석연료에 의존 대규모 시설에서는 순수한 산 소를 위한 시설이 추가적으로 필요	자동차를 위한 소규모 on-site 의 개발이 많이 이루어지고 있 음	화석연료 가격상승과 고갈 국제적 환경규약 압박

	S	W	O	T
고압수소튜브	기술개발안정단계 액화수소보다 설비비용이 적게 됨 상용화에 근접 밀도가 높음 운반비용이 상대적으로 낮음 수송이 용이 저장공간의 최소화 장거리 운송에 유리 비행기 자동차 등에 사용가능	부피가 크고 통이 무거워서 대량저장이나 운반이 불리 초고압에서는 압축비용이 많이 들 액화하는데 설비가 많이 필요 운반후 사용시 추가적인 처리과정필요 증발성문제 안전이 검증되지 않음	부합재료의 발달 기술개발에 따라 용융기기에서의 수소밀도 요구치가 낮아질 가능성 있음	대량수송에 대한 요구 커질 수 있음
액화수소				현재 주로 연구되는 것은 고압수소기술
파이프라인	기존의 천연가스 파이프라인 개량 사용할 수 있음 ⁵⁾ 안정적 공급 대량소비에 대응할 수 있음	안전이 검증되지 않음(수소 누출 시 문제 등) 인프라 구축비용 큼 한정된 사용범위 수소 다시 뽑아내는 반응시간 오래걸림 운반후 사용시 추가적인 처리과정필요 제순환과정이 필요 합금이 비쌌 무게당 수소저장량 낮음 ⁵⁾ 충전시간 길다(10~20분) 수소사용 시 열이 가해져야 함 미분화문제 용융범위 제한	가정용 분산전원 상용화 시 적합한 기술	중앙집중형 모델의 거부
화학수소화물	메탄올이나 NaBH ₄ 의 경우 에너지밀도 상당히 높음 ²⁾ 상온에서 다루기 쉬움 기존인프라 사용가능		화학공정기술의 발달	중앙집중형 모델의 거부
수소저장합금	안전성이 큼 흡열, 발열 시 폐열회수기능 고압수소보다 낮은 압력필요		합금기술의 발달	액체 및 고압수소방식의 시장 및 수요특화 나노구조 탄소재의 상용화
나노구조 탄소재 이용	저장의 강점, 수송의 장점 무게가 가벼움 액체 저장에 비해 안전함 반복적 재사용에도 문제없음	아직까지는 기술의 개발이 완전한 상태가 아님 탄소나노튜브의 대량생산 경험없음	이차전지의 한계 부각 시 이동형 제품에 사용가능 나노기술에 많은 투자	나노기술의 발전이 더딜 수 있음

표 1 수소 생산, 저장, 운반 기술의 SWOT 분석

2.4 시나리오 분석

	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 ₂ 회수 or 부분산화 + CO ₂ 회수 → 고압수소튜브 → 연료전지	수증기 개질 or 부분산화 → 고압수소튜브 → 연료전지

표 2 수소에너지 생산 및 배급 체계 단기 시나리오

단기적으로는 특히 구현 가능한 기술을 우선적으로 고려했다. 주요 환경 변수로는 이산화탄소 배출 문제와 원자력의 이용 등 환경에 대한 인식 및 수소 에너지 체제 및 관련기술의 사회적 수용성 정도, 그리고 화석연료의 가격의 추이를 설정하였다.

1) 화석연료 가격상승과 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 높은 경우, 오염물을 배출하지 않는 재생에너지를 기반으로 전기분해를 통해 수소를 생산한 후, 액화하는 방법으로 수송, 최종적으로 자동차 등의 연료전지에서 활용한다. 2) 화석연료 가격상승과 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 낮은 경우, 유류전기 기반의 전기분해 방법을 이용하여 수소를 생산하고 액화하여 수송한다. 환경에 대한 인식이 제고되지 않을 경우 기존의 화력 및 원자력을 발전 방법에 대한 저항이 크지 않을 것이다. 3) 화석연료 가격이 안정되고 환경에 대한 인식이 높아질 경우로, 천연가스를 이용한 SMR법이나 부분산화법으로 수소를 생산하여(CO₂는 회수처리)한 후 고압수소튜브를 통해 운반, 저장 경로를 거치고 최종적으로 연료전지에 이용한다. SMR이나 부분산화법은 고온, 고압의 반응환경이므로 고압수소를 이용하는 체계가 적합하다. 4) 화석연료 가격이 안정되고 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성이 낮아지는 경우, SMR이나 부분산화법을 이용하되 CO₂ 회수를 거치지 않고 고압수소튜브 방법으로 수송한다.

표 3은 장기 시나리오 분석 결과이다. 장기적으로는 수소생산에 있어서 화석연료의 사용은 줄어들 것이다. 그리고 본격적인 상용화와 함께 수소 생산과 배급 인프라 구축이 중요한 이슈로 등장할 것이며, 여기에 더해 환경문제는 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 기준으로 시나리오를 제시하였다.

1) 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 높고 인프라가 분산형으로 구축될 경우, 지역에서의 소규모 풍력, 소수력, 가정용 태양광 발전 등 분산형 재생에너지 기반의 전기분해와 생물학적 수소생산기술이 사용되고 단거리 수송이 이루어지기 때문에 나노구조 탄소재가 저장기술로 사용될 것이다. 2) 환경에 대한 인식 및 사회적 수용성 낮고 인프라가 분산형으로 구축될 경우, 미량의 오염물질이 배출되는 바이오매스 열분해가 사회적으로 받아들여지며, 단거리 수송에 적합한 나노구조 탄소재가 저장기술로 사용될 것이다. 3) 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 사용지역까지 운반하기 위해 장거리수송에 적합한 액화수소나 화학수소화물이 사용될 것이다. 4) 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.

	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

표 3 수소에너지 생산 및 배급 체계 장기 시나리오

3. 결론: 수소 기술-경제체제 구현을 위한 정책

정부 정책의 역할은 한정된 자원을 체계적이며 효율적으로 지원하는 것이며, 현상황을 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 CO₂ 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 운영하면서 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 기술분야에 적극적으로 선진 기술을 도입할 수 있도록 전략적 기술이전 지원에도 정책적 노력을 기울여야 한다.

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

참고문헌

- 1) C. E. Gregoire Padro and V. Putsche, Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, National Renewable Energy Laboratory(US), 2-22 (1999).
- 2) Mildred Dresselhaus. et al., Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, Department of Energy(US), 9-51 (2003).
- 3) Bent Sørensen. et al., Hydrogen as an energy carrier: scenario for future use of hydrogen in the Danish energy system, International Journal of Hydrogen Energy 29, 23-32 (2004).
- 4) L. Barreto, A. Makihira and K. Riahi, The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario, International Journal of Hydrogen Energy 28, 267-284 (2003).
- 5) J. M. Ogden, Prospects for building a hydrogen energy infrastructure, Annual Review of Energy & Environment 24, 227-279 (1999).
- 6) A. Midilli, M. Ay, I. Dincer and M. A. Rosen, On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs, Renewable & Sustainable Energy Reviews 9, 255-271(2005).
- 7) 신흥순, 박동운, 김기일, 2003 기술산업정보분석 수소에너지, KISTI, 21-28 (2003).