

2001 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

수소제조방식별 비용의 비교

Comparison of hydrogen production costs by option

김승수, 이한명, 이만기, 문기환, 임채영

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

청정하고 재생가능한 수소에너지에 대한 관심이 증가하면서 생산방법들에 관한 연구개발이 선진국을 중심으로 전개되고 있다. 문제의 핵심은 환경오염을 최소화하면서 경제적인 방법으로 수소를 생산하는 것이다. 기존 수소생산방법의 경제성을 상호비교하고 원자력기술을 중심으로 향후의 기술개발전망을 검토하였다.

Abstract

Hydrogen energy is recently being highlighted by developed countries as new energy source which is clean and renewable. The research and development projects on the new technologies of hydrogen production are also commenced in many countries. In this paper, hydrogen production costs by existing options are compared by the absolute production costs and cost index. On the other hand, the prospects for production technologies to be developed in the near future is shortly discussed.

1. 서 론

산업사회발전 및 경제성장의 중추적 역할을 담당해온 에너지의 안정적 공급은 인류의 생활수준을 유지 혹은 제고시키는데 있어서 필수불가결한 요소이다.

전세계의 1차 에너지 소비량은 1999년을 기준으로 할 때 총 8,534 백만TOE 로써

이를 에너지원별로 구분해 보면 석유 40.5%, 석탄 25%, 천연가스 24.2%, 원자력 7.6%, 수력 2.7% 등의 비율로 구성되어 있다. 이중 전력생산과정에서 소비되는 1차 에너지의 비중은 약 30% 정도에 이르고 있다.

현재까지 에너지 소비의 대부분(약 90%정도)을 화석연료에 의존해 왔는데 이것은 수송수단에의 사용, 가정난방 및 취사, 전력생산 등의 과정을 통해 지구의 환경을 지속적으로 악화시키는 주요한 요인으로 지목되어 왔다. 한편, 에너지소비의 지속적 증가전망 및 기존화석연료자원의 유한성, 화석연료사용에 따른 심각한 환경오염 문제 등으로 인해 선진각국은 환경오염문제의 해결 및 지속적 공급이 가능한 새로운 에너지원의 개발에 꾸준한 노력을 해왔다. 이러한 새로운 에너지원중의 하나가 수소에너지로서 연소시 물 이외의 부산물이 생기지 않으며 환경오염이 없고 무한 공급이 가능한 2차 에너지로서 저장 및 수송이 용이한 특성을 가지고 있다. 미국의 경우는 국가 안보의 차원에서 석유의존도의 감소, 공해문제, 자국내 석유산업의 지원과 석유시추로 인한 환경훼손 등의 문제를 해결함과 동시에 새로운 에너지시대에서의 경쟁력을 확보하기 위해 수소에너지 생산기술의 개발에 집중적인 노력을 기울이고 있다.

현재는 화석연료자원을 원료로 이용하여 수소를 생산하는 경우가 대부분이고 수소에너지의 활용분야도 암모니아 제조, 비료제조, 반도체생산, 우주선연료 등에 한정되어 있으나 미래에는 원료가 비화석연료로 대체되고 사용분야도 자동차연료를 포함한 모든 에너지소비 분야로 확대될 가능성이 있다. 수소에너지의 저장가능성으로 인해 전력과 수소에너지의 대체에 관해서도 많은 관심을 기울이고 있는데 특히 전력수요변동이 크거나 첨두부하 전력소비시간대의 대체에너지 수단으로 수소에너지의 사용가능성이 연구되고 있다. 또한 수소의 생산에 있어서는 천연가스나 원유, 석탄 등의 화석연료를 원료로 활용하는 수소생산이 전체의 96% 정도를 차지하고 물의 전기분해를 이용하는 것이 나머지 4% 정도를 차지하고 있는 상황이다.

수소에너지의 중요성이 점차 증가할 것이 예상되지만 화석연료를 원료로 하는 현재의 생산방식하에서는 수소생산과정에서 환경오염물질이 발생하기 때문에 물, 생물균, 광화학적 방법 등에 의한 청정생산기술의 개발에 노력을 집중하고 있다. 쟁점사항은 각 기술별 생산비용의 비교 우위문제로서 환경오염, 화석연료원의 가격전망, 신생산기술의 수소제조비용 등이 종합적으로 고려되고 있다.

2. 수소생산방식별 비용

지금까지 수소를 생산해왔던 방법을 보면 원료물질로써 무엇을 사용했는가에 따

라 분류가 가능하다. 원료물질은 화석연료자원(천연가스, 석탄, 중유, 바이오매스 등)과 재생가능자원(물,태양에너지 등)으로 나뉘어질 수 있으며 다음의 표1과 같이 요약할 수 있다. 이 중에서 광화학적 방법, 생물학적 방법, 열화학적 방법, 바이오매스의 열분해방법 등은 개발의 초기단계에 있기 때문에 앞으로 상업적 이용가능성에 관한 자료가 더 축적되어야 할 것이다.

표 1 수소생산 방식의 분류

원료물질 또는 투입에너지	생 산 방 법
천연가스	Steam Reforming(SMR) Partial Oxidation(POX)
중 유	Partial Oxidation(POX)
석 탄	Gasification
바이오매스	Gasification 열분해 방법
전기, 물	전기분해 방법 열화학적 방법
태양광, 물	광화학적 방법
태양광, 생물유기체, 물	생물학적 방법

2.1 증기개질법(Steam Reforming: SMR)

천연가스의 증기개질법은 대규모의 수소 생산을 위해 가장 널리 이용되는 방법으로서 전세계 수소공급의 약 48%를 담당하고 있다. 이 방법의 원료로서 주로 천연가스(메탄가스)가 사용되는데 천연가스는 높은 온도(500 - 1,000 °C)상태에서 니켈촉매하에 수증기와 반응하게 된다. 반응부산물로써 수소와 일산화탄소의 혼합물인 합성가스(syngas)가 만들어 지는데, 합성가스는 다른 유기화학물생산의 원료물질로써도 이용될 수 있다. 그러나 더 많은 수소의 생산을 위해서는 합성가스를 냉각하고 일산화탄소가 수증기와 반응하도록 water-gas 반응기로 보낸다. 그리고 최종적으로 고순도의 수소를 얻기 위하여 PSA(Pressure Swing Absorption unit)로 보낸다. 증기개질법은 에탄이나 나프타 같은 탄화수소물질도 원료로 사용할 수는 있지만 불순물을 함유하고 있고 개질기에 넣을 때 증기상태로 되어야 하기 때문에 잘 이용되지

않는다. 대규모의 SMR 플랜트는 주로 원유정련소와 함께 있는데 이는 원유정련시에 필요한 수소를 공급하기 위한 것이다. 생산비용의 추정치는 비용추정치의 연도, 가격의 기준년도, 설비의 규모, 원료물질의 가격, 적용 이자율 등에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 최근의 수소생산비용 비교결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2 증기개질법에 의한 수소생산비용의 비교

자료원	시설규모 (백만 Nm ³ /day)	경제적 변수		수소생산비용 (\$/GJ)	천연가스비용 의 비중(%)
		가격 기준년도	수명기간		
Sentech, Inc (1997)	1.4 - 6.67	1997년	20년	4.14 - 7.03	50%-60%
NREL ^(*) (미국,1999)	1.34 - 25.4	1998년	20년	5.44 - 7.46	52%-68%

(*) : National Renewable Energy Laboratory(미국의 DOE Lab.)

표2에 나타난 시설은 대규모의 용량을 가지고 있는 경우에 해당되며 이보다 훨씬 작은 소규모인 경우에는 수소생산비용이 10\$/GJ 이상으로 상승하고 총 비용중 천연가스의 비용은 약 40% 정도로 하락하게 된다. 또한 수소생산비용중 천연가스비용을 제외한 대부분의 비용(약 30%)이 자본투자비 부분에 해당되고 있다. 한편, 자본투자비에 대한 규모의 경제효과에 있어서는 위의 두 연구결과가 모두 매우 긍정적으로 평가하고 있다.

2.2 Partial Oxidation(POX)

POX 방법은 SMR, 가스화방법과 유사성을 가지고 있지만 원료물질의 종류에 따라서 생산방법을 달리하고 있다. POX와 가스화 방법은 POX가 기체(메탄) 혹은 액체(중유)가 원료물질로 사용됨에 비해 가스화 방법은 고체상태(석탄, 바이오매스 등)의 원료물질을 사용한다는 점에서 구별된다. 한편, POX방법은 촉매존재하(혹은 비촉매)에 약 600℃의 상태를 필요로 한다. 메탄으로부터 나프타에 이르는 원료물질의 사용이 가능하기 때문에 SMR과 비교되지만 경제성 측면에서 천연가스 같은 저분자 탄화수소에 대해서는 SMR을 사용하는 것이 효과적인 반면 중유는 POX 방법이 더욱 경제적이기 때문에 생산방법이 차별화 된다.

생산공정은 합성가스 생산, water-gas 이동 반응, 고순도화 과정 등 크게 세부분

으로 나뉘어지며 각 과정에서는 산소플랜트, 이동반응기, SMR에서 요구되는 것보다 큰 규모의 가스분리기(PSA) 등이 필요하기 때문에 SMR에 비해 더 많은 투자비가 소요된다. 그러나 SMR에 비해 수소생산효율이 우수하기 때문에 POX 플랜트와 SMR을 비교 평가할 때 자본투자비와 효율성의 상관성을 고려해야 한다. SMR에서 인용한 자료원을 근거로 한 비용비교는 표 3과 같다.

표 3 POX 방법에 의한 수소생산비용의 비교

자료원	시설규모 (백만 Nm ³ /day)	경제적 변수		수소생산비용 (\$/GJ)	공정 특성
		가격 기준년도	수명기간		
Sentech, Inc (1997)	2.83	1997년	20년	11.3	축매 사용
NREL (미국,1999)	1.34 - 2.80	1998년	20년	6.94 - 9.83	축매 미사용

원료물질로써 주로 증유를 사용하기 때문에 상업적으로 POX방법을 활용하고 있는 회사는 Shell Oil Company(Houston, TX, 미국), Texaco Inc. 등이 있다.

2.3 가스화 방법(Gasification)

가스화방법은 POX 방법에 비해 훨씬 더 높은 온도(약 1100℃ - 1300℃)를 필요로 하며 비축매하에서 수행한다. 가스화방법에 있어서는 석탄이 가장 널리 사용되고 있으며 바이오매스 또한 현실적인 대안으로 고려되고 있다. 석탄가스화 방법에 의한 수소의 공급량은 전체의 18% 정도에 달하고 있다. Gasifier를 개발한 기관과 사용 원료물질에 따라서 서로 상이한 방법을 채택하고 있으며 바이오매스의 경우 가스화용기로의 열 전달방식의 차이, 석탄가스화시 초기가스화의 압력조건 등에 있어서도 상이한 조건을 채택하고 있다. 공통적인 공정상의 특징을 보면 산소공급과정, 탈황과정, 순도향상과정 등을 거쳐야 하며 석탄의 경우에는 대규모의 공정폐기물인 재를 처리하는 문제로 인해 복잡하고도 자본집약적인 공정이 되고 있다. 또한, 바이오매스의 경우에는 석탄가스화의 공정에 더하여 수분함량이 70%에 이르는 바이오매스의 건조작업을 추가적으로 필요로 한다.

석탄가스화 방법은 낮은 원료물질 비용에도 불구하고 높은 자본비용으로 인해 증유의 POX에 비해 비싼 편이다. 자료원별로 살펴본 수소생산비용은 표 4와 같다.

표 4 가스화방법에 의한 수소생산비용의 비교

자료원	시설규모 (백만 Nm ³ /day)	경제적 변수		수소생산비용 (\$/GJ)	원료물질/ 원가비중(%)
		가격 기준년도	수명기간		
Sentech, Inc (1997)	2.83	1997년	20년	15.9	석탄/ 16%
	1.31	1997년	20년	21.7	바이오매스/ 19%
NREL (미국,1999)	2.80 - 6.78	1998년	20년	9.87 - 11.57	석탄/ 25%

석탄가스화 방법은 상용화 되어 있기 때문에 자료의 비교에 신뢰성이 있으나 바이오매스는 상용화가 아닌 연구개발단계에 있기 때문에 정확한 비용자료가 없는 상황이다. 가스화방법의 경우 자본투자비의 비중이 생산비용의 약 60%에 달하고 있다.

2.4 전기분해법(Electrolysis)

전기를 이용하여 원료물질인 물을 수소와 산소로 분리함으로써 수소를 생산하는 방법을 말한다. SMR 방법이 도입되기 전에는 수소생산의 주요 수단이었으나 현재는 대규모의 수소 생산에는 적용되지 않고 있으며 전기분해법을 이용한 수소생산량은 세계수요의 4% 정도를 차지하고 있다. 그러나 천연가스 도입이 용이하지 않은 지역에서는 아직도 반도체나 식품처리산업을 위한 1차적인 공급수단으로 자리하고 있다. 또한 아주 고순도의 수소를 필요로 하는 소규모의 사용자들에게는 전기분해법이 비용효과적인 수소공급수단이 되고 있다. 주로 사용되는 기술로는 Alkaline 전기분해기 방식이 있다.

물을 원료로 이용하는 수소생산방법은 아주 다양하게 연구되고 있는데 주로 연구개발단계에 머물고 있다. 예를 들면, 태양에너지를 추가로 이용하는 광화학적 방법, 생물의 광합성 작용을 이용하는 생물학적 방법, 고열을 이용한 열화학적 방법, 고온과 전기를 함께 이용하는 방법 등이 여기에 속한다.

전기분해법의 주요 비용요인은 전력으로서 전체 생산비용의 80%이상을 차지하고 있으며 화석원료물질의 비용보다 약 3-5배 정도 높다. NREL보고서에서는 기준 전력비용을 0.049 \$/kWh로 가정하였다. 이러한 높은 전력비용으로 인해 고온 수증기

전기분해법을 활용하려고 하는데 이 방법은 전기와 고온의 수증기를 함께 사용한다. 예로써, 1000℃ 하에서 요구되는 총에너지의 40% 이상을 고온의 수증기가 대신하게 된다.

표 5 전기분해법에 의한 수소생산비용의 비교

자료원	시설규모 (백만 Nm ³ /day)	경제적 변수		수소생산비용 (\$/GJ)	사용전력원가/ 원가비중(%)
		가격 기준년도	수명기간		
Sentech, Inc (1997)	2.83	1997년	20년	25.8	0.05 (\$/kWh)/ 68%
NREL (미국,1999)	2.80 - 6.75	1998년	20년	20.6 - 24.5	0.049 (\$/kWh)/ 80%

2.5 지표에 의한 수소생산방식별 비용 비교

수소생산비용을 비교하는 과정에서 나타나는 어려운 점은 수소의 생산방식에 따른 차이점과 동일한 생산방식이라도 어떠한 공정을 택했는 지에 따라 비용이 다르게 나타날 수 있다. 또한 비용산출과정에서 가정하고 있는 경제적 가정들(가격표시의 방법 및 기준년도, 할인율, 투자수익률, 수명기간, 열효율, 설비의 규모, 물가상승률 등)의 차이는 여러 연구보고서들에서의 비용산출결과를 비교하기 어렵게 만드는 요인이 되고 있다.

비용의 비교를 합리적으로 하기 위한 방법으로써 지표를 이용하는 방식을 많이 채택하고 있다. 기준이 되는 방식을 1로 정하고 비교가 되는 다른 생산방식의 비용을 평가하는 것으로써 기술적 혹은 경제적 가정들을 균등하게 설정한다. 여기에서는 일본 원자력연구소에서 예상하고 있는 수소생산비용의 전망 혹은 목표치에 대한 비용분석과 IAEA-TECDOC-1085에서 제시한 비용분석을 비교하였다.

표 6 지표에 의한 수소생산비용의 비교

수소 생산방법	JAERI의 연구 사례(2000.10)		IAEA의 자료(1993년 DOE 추정)
	CO2 고려치 않음	CO2 고정화비용포함	
메탄증기개질법-화석연료(기존형)	1	1	1
메탄증기개질법-HTGR (미래형 : 목표치)	0.9	0.8	-
중유의 POX법	-	-	1.8
석탄가스화법	-	-	1.4 - 2.6
물의 전기분해법	2.5	1.1	5 - 10
열화학사이클(hybrid)	-	-	6
열화학법(IS공정)-HTGR(미래형)	1.5	0.7	-

(참고) 메탄증기개질법-화석연료(기존형)를 각각 연구사례의 기준비용(1의 값)으로 평가함.

IAEA자료와 JAERI의 연구결과를 볼 때 동일한 기술에 대해 직접적인 비교를 할 수는 없지만 물의 전기분해법에 있어서의 비용평가는 상당한 차이를 나타내고 있다. 비교적 최근의 연구결과인 JAERI의 평가에 의하면 전기분해법, 열화학법 등의 기술이 과거에 비할 때 매우 긍정적인 방향으로 평가하고 있음을 알 수 있다. 특히 환경오염에 대한 국제사회의 분위기 변화를 감안한 이산화탄소의 고정화 비용(21 엔/kgCO₂)을 고려하면 원자력기술인 고온가스로의 이용이 매우 경제적인 것으로 전망하고 있다. 물론 이러한 수치는 상용화된 것이 아니고 연구개발단계의 목표 설정치를 반영시킨 것이기 때문에 완전한 비교로는 볼 수 없으나 향후의 기술개발 효과를 높이 평가하고 있음을 알 수 있다.

또한, JAERI의 열화학법(IS공정)의 경우 총비용의 약 79%가 원자로의 열비용에 해당하고 있으며 증기개질법의 경우 이산화탄소 고정화비용이 상당부분 차지하고 있다.

3. 원자력에 의한 수소생산

원자력을 이용하여 수소를 생산할 수 있는 방법으로는 원자력발전에서 얻어지는

전기를 이용하여 물을 전기분해 하는 방법과 원자로에서 생산되는 열을 각 수소제조공정에 이용하는 방법으로 구분할 수 있다.

원자력발전의 전력을 이용한 전기분해법은 시간대별 전력수요의 특성을 감안하여 심야시간대의 발전량을 수소생산에 활용함으로써 원자력발전의 경제성을 향상시킬 수 있는 지에 대한 타당성 분석이 전제되어야 할 것이다. 예를 들면 전기분해법에서 가정하고 있는 0.05 \$/kWh의 전기요금은 원화로 환산할 때 약 60 원/kWh으로 예상할 수 있다. 현재 우리나라의 원자력 발전원가는 약 35원/kWh 정도로써 위의 가정에 비해 약 40% 정도의 원료비용(에너지) 절감을 예상할 수 있고 이는 총 비용의 약 30%에 해당하는 커다란 비용절감이 된다. 물론 이렇다 하더라도 증기개질법 등에 비해 경제성이 떨어지는 것은 여전하지만 환경문제를 고려한 이산화탄소의 배출방지 및 전기분해기술의 고도화 등 외부문제가 우호적으로 변하거나 화석연료원의 국제가격이 심각하게 상승한다면 경제적인 수소제조방안으로 충분히 고려될 수 있을 것이다.

원자력발전의 전력이 아니고 원자로에서 배출되는 고열을 이용하는 방안에 대한 연구가 최근 많은 관심을 불러 일으키고 있다. 특히, 일본의 HTTR(High Temperature Test Reactor)을 중심으로 하는 연구개발과정에 많은 주의력이 집중되고 있다. 현재 운영중인 원자로의 열을 이용하여 수소생산과정에 적용가능한 원자로형을 정리하면 다음과 같다.

- 메탄증기개질법의 합성가스 생산공정(400 - 800℃) : **LMFBR, HTGR**
- 석탄가스화법의 합성가스 생산공정(700 - 800℃) : **HTGR**
- 수증기 전기분해법 / 열화학법(IS) (800 - 1,000℃) : **HTGR**

원자로의 고열을 이용하여 수소를 생산하는 데에는 약 950℃ 이상의 고열을 발생시키는 고온가스로가 적합하며 기존의 화석원료를 이용한 수소생산과정에 매우 효율적으로 열원을 공급할 수 있는 특성이 있다. 이는 전기를 생산한 후 수소를 생산하는 것보다 더욱 효율적인 방법으로 여겨지고 있다.

원자력을 이용한 수소생산방법중에서 가장 관심을 끄는 것은 열화학법에 의한 수소제조방법이다. 이것은 물분해를 단계적 반응으로 나누어 1300° K이하에서의 화학반응들로 구성하며 전체적으로는 물을 분해하는 폐사이클로서 1967년 이래 약 200여개의 많은 사이클이 제안되어 있는 방법이다.

원자력을 이용한 수소생산의 경제성평가는 이루어진 것이 거의 없으며 아직 연구개발 단계에서의 평가가 대부분이다. 그러나 앞의 JAERI 연구에서 예측한 것처럼 지속적인 기술개발과 화석연료원에 대한 환경오염규제가 가시화될 경우 원자력을 활용한 수소에너지 생산이 각광받을 수 있다. 현재 수소제조기술의 고온가스로 개

발에 대한 외국의 사례를 보면 다음과 같다.

- 독일 : AVR 및 THTR-300
- 일본 : HTTR
- 미국 : HTGR 및 MHTGR-GT
- 중국 : HTR-10
- 러시아 : VGM

4. 결 론

에너지가 산업발전의 핵심적 역할을 담당해왔다는 것은 부인할 수 없는 사실이다. 그러나 우리가 사용하는 석탄, 석유, 가스 등 화석연료자원의 유한성과 석유에너지 의존도 심화로 인한 에너지안보의 위협 가능성, 환경오염문제에 대한 지구차원의 대응책 마련 등의 여건 조성은 청정에너지이면서 재생가능한 수소에너지에 대한 관심을 집중시키기에 충분했다. 특히 미국의 경우는 2010년까지 미국에서 판매되는 자동차의 25%를 수소자동차로 대체한다는 계획을 내놓고 있으며 세계 각국은 수소생산의 신기술개발을 위한 광범위한 연구개발에 착수하고 있다. 부존자원이 빈약한 우리나라의 경우, 이러한 새로운 에너지원의 개발에 대한 관심과 지원이 절대적으로 필요하며 특히 이미 확보되어 있고 기술집약적이며 화석연료원의 수입이 필요 없는 원자력기술 혹은 광촉매 등의 방법개발에 힘써야 할 것이다.

현재는 화석연료원에 비해 경제성이 떨어지지만 지속적인 연구개발과 원자력기술의 활용을 통해 경제성제고의 가능성을 모색하는 것이 신에너지기술개발 및 신경제의 흐름에 뒤쳐지지 않을 수 있는 대안이 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 장중화, “원자력을 이용한 수소제조 기술현황보고서”, KAERI, 2001.6.
2. 김종원, “수소에너지 정책의 세계동향”, 2001.
3. “Hydrogen as an energy carrier and its production by nuclear power”, IAEA-TECDOC-1085, May 1999.
4. “Hydrogen production costs-A survey”, Sentech, Inc., Dec. 1997.
5. “Nuclear production of hydrogen”, OECD/NEA, Oct. 2000.
6. “Survey of the economics of hydrogen technologies”, NREL/TP-570-27079, Sep. 1999.