

국내 저온수전해 수소생산의 경제성 평가

김봉진[†], 김종욱^{**}, 고현민^{*}

*단국대학교 산업공학과, **한국에너지기술연구원 정책연구실

Economic Evaluation of Domestic Low-Temperature Water Electrolysis Hydrogen Production

BONGJIN GIM[†], JONGWOOK KIM^{**}, HYUNMIN KO^{*}

**Dankook University, Department of Industrial Engineering, San 29 Anseo-dong, Cheonan-si Chungnam 330-714, Korea*

***Korea Institute of Energy Research, R&D Policy Research Dept. 71-2 Jang-dong, Yusong-ku Daejeon 305-343, Korea*

ABSTRACT

This paper deals with an economic evaluation of domestic low-temperature water electrolysis hydrogen production. We evaluate the economic feasibility of on-site hydrogen fueling stations with the hydrogen production capacity of 30 Nm³/hr by the alkaline and the polymer electrolyte membrane water electrolysis. The hydrogen production prices of the alkaline water electrolysis, the polymer electrolyte membrane water electrolysis, and the steam methane reforming hydrogen fueling stations with the hydrogen production capacity of 30 Nm³/hr were estimated as 18,403 won/kgH₂, 22,945 won/kgH₂, 21,412 won/kgH₂, respectively. Domestic alkaline water electrolysis hydrogen production is evaluated as economical for small on-site hydrogen fueling stations, and we need to further study the economic evaluation of low-temperature water electrolysis hydrogen production for medium and large scale on-site hydrogen fueling stations.

KEY WORDS : Low-temperature water electrolysis hydrogen production(저온수전해 수소 생산), Alkaline water electrolysis(알카리 수전해), Polymer electrolyte membrane water electrolysis(고분자전해질막 수전해), On-site hydrogen fueling station(분산형 수소충전소) Economic evaluation(경제성 평가), Hydrogen production price(수소 제조가격)

Nomenclature

I	: initial capital cost of a hydrogen production system
S	: salvage value of a hydrogen production system
M	: annual operating and maintenance cost of a hydrogen production system
i	: discount rate

[†]Corresponding author : bjgim@dankook.ac.kr

[접수일 : 2011.7.25 수정일 : 2011.8.12 게재확정일 : 2011.8.22]

- P : hydrogen production price of a hydrogen production system
- N : life period for economic analysis
- CRF : capital recovery factor
- CR : annual capital cost
- PEM : polymer electrolyte membrane
- SMR : steam methane reforming
- PSA : pressure swing absorption
- NREL : national renewable energy laboratory
- HHV : high heating value

1. 서 론

물의 전기분해에 의하여 수소를 생산하는 방법은 오래 전부터 잘 알려진 공정으로, 물에 전류를 흘리면 양극에서 산소, 음극에서 수소가 발생한다. 물의 전기분해(수전해)에 의한 대표적인 수소 제조방법은 150°C 이하의 저온에서 수소를 생산하는 고분자 전해질막(polymer electrolyte membrane: PEM) 수전해 및 알칼리(alkaline) 수전해와, 800°C 이상의 고온에서 수소를 생산하는 고온 수증기 수전해(high temperature steam electrolysis) 등으로 구분할 수 있다. 저온 수전해 수소 생산 방법은 비교적 소규모의 분산형 수소 생산에 적합하며, 고온 수전해 수소 생산은 대규모의 수소 생산에 적합하다. 한편 전기는 석탄, 석유, 천연가스, 수력, 원자력, 바이오매스, 풍력, 태양광 등의 다양한 에너지를 이용하여 생산할 수 있으며 각 나라의 전기 요금에 따라 수전해에 의한 수소 제조가격은 크게 차이가 날 수 있다. 본 논문에서는 국내에서 저온수전해에 의해 수소를 생산하는 경우에 대한 경제성 평가를 수행하였다.

알칼리 수전해의 전해조는 음극과 양극으로 이루어진 각각의 셀을 연결한 형태이며, 전극은 KOH를 넣어 전도성을 갖는 수용액에 담겨져 있다. 양극은 니켈과 구리 위에 망간, 텅스텐, 루테튬 등의 금속 산화물을 코팅하며, 음극은 니켈 위에 소량의 백금을 코팅하여 사용한다. 알칼리 수전해에 의한 수소 생산은 널리 실용화되어 있는 방법으로 생성된 수소의 순도가 높고 장치 구조가 단순한 장점이 있다.

고분자 전해질막 수전해는 전해 셀에 전류를 가

하면 양극에서는 물이 H⁺ 이온과 물로 분해되고, 음극에서는 H⁺ 이온이 이온교환막을 선택적으로 투과하여 수소 분자가 되어 나온다. 수소 이온을 선택적으로 투과하는 이온교환막으로는 불소계 이온교환막을 사용하고 이를 백금족 촉매전극, 다공성 집전체, 주 전극으로 덮어 누르는 구조로서 양극측의 집전체로 순수한 물이 공급되기 때문에 알칼리 수전해와 같은 재료부식 문제가 없는 장점을 갖고 있다.

본 논문에서는 일반적인 경제성 평가에 많이 사용되고 있는 수명주기(life cycle)에 기초한 편익 및 비용 분석방법을 사용하여 국내 저온수전해 수소생산의 경제성을 평가하고 수소 제조가격을 산출하였다. 수소 제조를 제조장소의 관점에서 분류하면 대규모의 수소 제조공장에서 수소를 생산하는 집중형(central, off-site)과 수소의 이용 현장에서 생산하는 분산형(distributed, on-site)으로 구분할 수 있다. 저온수전해에 의해 수소를 생산하는 가장 전형적인 사례는 분산형 수소충전소이며, 본 논문에서는 현 시점을 기준하여 30Nm³/hr의 생산규모를 갖는 국내 분산형 수소충전소에서 알칼리 수전해와 PEM 수전해 수소 생산에 대한 경제성 평가를 수행하였다.

분산형 수소충전소에 적합한 수소 생산방식 중의 하나는 천연가스의 증기개질(steam methane reforming: SMR) 방식이다. 미국의 DOE(department of energy)는 54Nm³/hr 생산규모의 분산형 SMR 수소충전소의 목표 수소 제조가격을 \$3.38/kgH₂로 제시하였다¹⁾. 한편 미국의 다른 연구에서는 70Nm³/hr 생산규모의 분산형 SMR 수소충전소의 수소 제조가격을 \$14.23/kgH₂로 제시하였다²⁾. 국내에서는 30Nm³/hr 생산규모의 분산형 SMR 수소충전소의 수소 제조가격을 18,472원/kgH₂으로 산출하였다³⁾. 또한 태양광 발전에 의해 생산된 전기를 사용하는 15Nm³/hr 생산규모의 알칼리 수전해 분산형 수소충전소의 수소 제조가격을 37,838원/kgH₂으로 산출하였다⁴⁾. 한편 미국에서는 연간 수소생산량이 1ton~10ton인 생산규모를 기준하여 물의 전기분해에 의한 분산형 수소충전소의 수소 제조가격을 \$19.01/kgH₂로 추정한다⁵⁾.

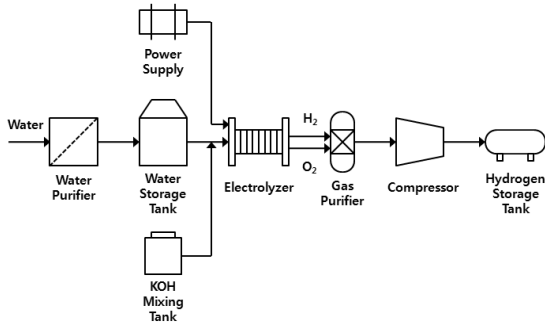


Fig. 1 A process diagram of an alkaline water electrolysis

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 저온 수전해 수소 생산시스템을 설명하며, 3절에서는 알카리 수전해, PEM 수전해, SMR 등에 의한 30Nm³/hr 생산규모의 국내 분산형 수소충전소의 수소 제조가격을 산출하고 국내 저온수전해 수소 생산시스템의 경제성을 평가한다. 마지막으로 4절에서는 연구의 결과를 요약하고 향후 연구과제 등에 대하여 논의한다.

2. 저온수전해 수소생산

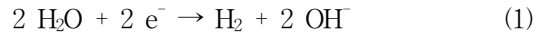
알카리 수전해는 전해질로 수산화칼륨(KOH)를 사용하며 unipolar와 bipolar의 두 가지 방식으로 구분된다. Unipolar 전기분해 장치는 tank를 닮았으며 전해질막이 음극과 양극 사이에 있어서 ion은 통과시키나 생산된 수소와 산소 가스를 분리시킨다. Bipolar 전기분해 장치는 filter press를 닮았으며 전기분해 cell이 병렬로 연결되어 있다. 전해질막은 전극을 분리시키며 수소는 cell의 한 측면에서 생산되고 산소는 cell의 다른 측면에서 생산된다.

알카리 수전해는 전해질로 20~30% 정도의 KOH 수용액을 이용하며, 물을 원료로 하고 전기를 에너지원으로 하여 수소와 산소를 생산한다. Fig. 1에는 알카리 수전해의 공정도를 수록하였다.

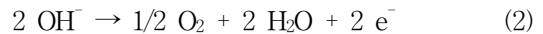
Fig. 1에 나타난 바와 같이 알카리 수전해의 주요 설비는 전기분해 설비(electrolyzer), 수처리 장치(water purifier), 수산화칼륨 혼합탱크 등이다. 또한 알카리 수전해에 의한 분산형 수소충전소에는 컴프레서 및

펌프, 수소 저장설비, dispenser 등의 설비가 추가로 필요하다.

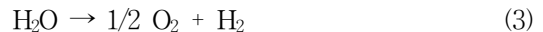
알카리 수전해 시스템에서 수소는 음극에서 발생되며 반응식은 다음과 같다.



한편 산소는 양극에서 발생되며 반응식은 다음과 같다.



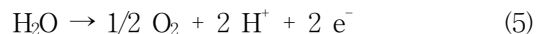
식 (1)과 (2)를 결합하면 전체적인 알카리 수전해의 반응식은 다음과 같다.



PEM 수전해는 고체고분자 전해질 수전해(solid polymer electrolysis: SPE)라고도 부르며 전해질로 수소 이온 전도체인 이온교환막을 사용한다. PEM 수전해 수소 생산시스템에서 수소는 음극에서 발생되며 반응식은 다음과 같다.



한편 산소는 양극에서 발생되며 반응식은 다음과 같다.



PEM 수전해를 이용한 분산형 수소충전소는 수전해 설비가 다르고 KOH 혼합탱크가 없는 것을 제외하면 알카리 수전해를 이용한 분산형 수소충전소와 거의 동일하다. 현재 유통되고 있는 알카리 전기분해 설비들의 시스템 전기분해 효율은 고위발열량(high heating value: HHV)를 기준하여 63~73%이며 일반적으로 수소 생산시스템의 규모가 커질수록 높은 수소 생산효율을 나타내고 있다. 전기분해 장치에 투입되는 물의 순도는 전기분해 방법에 따라 차이가 있으며, 일반적으로 탈이온기와 역삼투압법을 이용하여 물을 정제한다. 저온수전해 설비는 대개 하나의 컨테이너에 모든 설비가 수용되어 있는

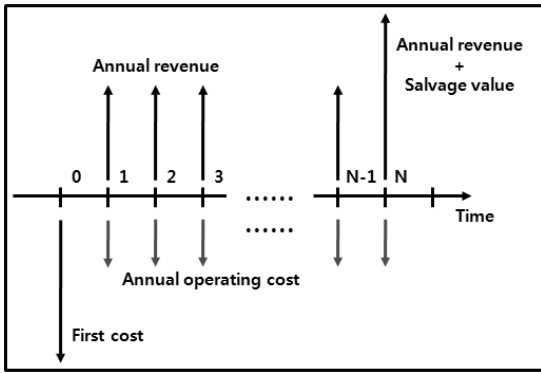


Fig. 2 Cash flow diagram of H₂ production by low-temperature hydrogen production

package 형태를 취하고 있으며 4.6Nm³/hr의 수소를 생산하는 소규모 설비부터 1ton/hr 이상의 수소를 생산하는 대형 장치들이 개발되어 있다.

3. 저온수전해 수소생산의 경제성 분석

3.1 이론적 배경

본 논문에서는 수명주기에 기초한 편익 및 비용 분석방법을 이용하여 국내 저온수전해 수소생산의 경제성분석을 수행하였다. 저온수전해 수소 생산시스템의 경제성은 크게 연간 판매수입, 초기 투자비, 잔존가치, 시스템 수명기간, 할인율, 에너지 효율 등에 의하여 결정된다. 본 논문에서는 모든 가격을 인플레이션의 효과를 제거한 불변가격을 기준하여 경제성 평가를 수행하였다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 저온수전해 수소 생산시스템의 경제성 분석기간은 N으로 설정한다. 수소 생산시스템의 경제성 분석모형의 현금흐름은 시점 0에서의 초기투자비 I와 시점 t(t= 1, 2, ..., N)에서의 연간 판매수입과 연간 운영비, 수명기간인 N에서의 수소 생산시스템의 잔존가치 S 등으로 구성된다.

(1) 초기 투자비(I): 초기 투자비는 사업 초기에 소요되는 1회성 비용으로 저온수전해 분산형 수소 충전소의 초기 투자비는 전기분해 설비, 수소 저장 설비, 컴프레서 및 펌프, dispenser 등의 설비 구입

비와 건축비, 부대비용 등으로 구성된다.

(2) 잔존가치(S): 잔존가치는 초기에 투입된 설비들을 수명기간이 지난 시점에 처분하여 얻을 수 있는 수입이다.

(3) 연간 판매수입(R): 연간 판매수입은 수소에너지의 판매수입과 산소 등의 부산물을 판매하여 얻을 수 있는 기타수입을 포함하며, 본 연구에서는 기타수입을 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.

(4) 연간 운영비(M): 초기 투자비가 1회성 비용인 반면에 연간 운영비는 매년 소요되는 비용이다. 연간 운영비의 주요 구성 요소는 인건비, 연료비, 보수유지비, 수도비, 기타 운영비 등이다.

(5) 시스템 수명기간(N): 수소 제조가격을 산출하기 위해서는 수소 생산시스템의 적절한 수명기간을 설정하는 것이 필요하며 저온수전해 분산형 수소충전소의 수명기간은 20년으로 설정하였다.

(6) 불변 할인율(i): 불변 할인율은 인플레이션 효과를 제거하기 위하여 불변가격을 사용한 할인율을 의미하며, 일반적으로 에너지 사업에 대해서는 4%~9%의 불변 할인율을 적용하고 있다. 본 연구에서는 분산형 저온수전해 수소충전소에 대해서 다소 보수적인 입장에서 8%의 불변 할인율을 적용하였다.

잔존가치가 없는 경우에는 초기 투자비 I에 다음과 같은 자본회수계수(capital recovery factor: CRF)를 곱하여 I를 연간 비용을 나타내는 자본비용으로 환산할 수 있다.

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6)$$

식 (6)을 보면 자본회수계수는 할인율 i와 수명기간 N에 의하여 결정되며, N이 무한대로 접근할 때 CRF의 극한 값은 i가 된다. 불변가격 대신에 경상가격을 사용하여 경제성 분석을 하는 경우에는 f를 연간 인플레이션을, r을 경상가격에 대한 할인율로 표기할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$r = i + f + i \times f \quad (7)$$

식 (6)의 i 대신에 식 (7)의 r을 대입하면 경상가

격에 기초한 자본비용을 산출할 수 있다. 한편 잔존 가치가 있는 경우에 초기투자비와 잔존가치를 동시에 고려하여 연간비용으로 환산한 자본비용을 CR으로 표기하자. 그러면 자본비용을 나타내는 CR은 다음과 같은 관계식을 갖는다⁶⁾.

$$CR = (I - S) \times CRF + i \times S \quad (8)$$

수전해 수소 생산시스템의 연간 수소생산량을 Q, 단위당 수소 판매가격을 P로 표기하자. 그러면 수전해 수소 생산시스템의 연간 판매수입 R은 PQ이다. 한편 수전해 수소 생산시스템의 수소 제조가격은 연간 판매수입과 연간 총비용이 같아지는 수소 가격으로 정의할 수 있다. 수전해 수소 생산시스템의 연간 총비용은 자본 비용과 연간 운영비로 이루어지므로 수소 제조가격 P는 다음과 같은 관계식으로 표현될 수 있다.

$$P = (M + CR) / Q \quad (9)$$

이러한 수소 제조가격 P는 투자한 자본에 대하여 매년 i만큼의 수익률을 얻을 수 있는 수소 제조가격을 나타낸다. 수전해 수소 생산시스템의 경제성은 수소 제조가격 P를 대리변수로 하여 파악할 수 있다. 시장에서의 적정 수소 판매가격과 P를 비교하여 P가 적정 수소 판매가격보다 저렴하면 수전해 수소 생산시스템은 경제성이 있고, 그렇지 않으면 경제성이 없는 것으로 평가할 수 있다.

3.2 알카리 수전해의 경제성 평가

현재 국내에서는 15Nm³/hr 규모의 알카리 수전해 설비가 생산되고 있으며, 본 연구에서는 두 개의 15Nm³/hr 규모의 알카리 수전해 설비를 병렬로 연결하여 30Nm³/hr 생산 규모를 갖는 수소 생산시스템을 가정하였다. Table 1에는 30Nm³/hr 생산 규모의 국내 알카리 수전해에 의한 분산형 수소충전소의 초기투자비를 수록하였다.

분산형 수소충전소의 초기투자비는 크게 수소 제조장비, 수소충전소 건설비, 부대비용 등으로 구

Table 1 Domestic initial investment cost of an on-site hydrogen fueling station by the alkaline water electrolysis (30Nm³/hr) unit: million won

Items	Initial capital cost
Electrolysis	300
Storage	137.0
Compressor, pump	140.4
Dispenser	127.3
Construction	120
Supplement	140.9
Total	965.6

성된다. 알카리 수전해에 의한 수소 제조장비는 수전해 설비, 저장 시스템, 컴프레서 및 펌프, 디스펜서, 수산화칼륨 혼합탱크, 전기 및 기타 설비 등으로 구성된다. 알카리 수전해 설비는 수처리 장치와 수산화칼륨 혼합탱크를 포함하여 1,000만원/Nm³ 정도가 소요되며, 30Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 설비의 초기투자비를 3억원으로 추정하였다.

알카리 수전해 설비에 소요되는 비용을 제외한 분산형 수소충전소의 기타 비용은 선행 연구결과³⁾를 이용하여 추정하였다. 다만 환율 등을 포함한 모든 가격은 2010년을 기준으로 조정하였으며 부대비용은 수소 제조장비의 20%로 추정하였다. 수소충전소의 건축면적은 30평이고 건축비는 1평에 400만 원을 기준으로 1.2억 원으로 추정하였고 수소충전소 부지는 임대하여 사용하는 것으로 가정하여 부지구입비는 초기투자비에서 제외하였다. 따라서 알카리 수전해에 의한 30Nm³/hr 생산규모의 국내 분산형 수소충전소의 초기투자비를 약 9.7억원으로 추정하였다. 또한 건물의 수명기간은 40년으로 수소충전소의 수명기간인 20년 후의 잔존가치는 4,000만원으로 추정하였으며, Table 2에는 국내 알카리 수전해 수소충전소의 연간비용과 수소 제조가격을 수록하였다.

알카리 수전해 설비의 수명기간은 10년이며 수소 저장시스템, 컴프레서 및 펌프, dispenser 등의 주요 설비들의 수명기간은 20년으로 추정하였다. 한편 수명기간이 10년과 20년인 경우의 자본회수계수 CRF

Table 2 Domestic hydrogen production price and annual cost of an on-site hydrogen fueling station by the alkaline water electrolysis (30Nm³/hr)

Items	Annual cost (million won)	Hydrogen production price (won/kgH ₂)
1. Capital cost	111.65	6,798
- Electrolysis	44.70	2,721
- Storage	13.96	850
- Compressor, pump	14.31	871
- Dispenser	12.97	790
- Construction	12.23	745
- Supplement	14.36	874
- Salvage value	-0.88	-54
2. Operating and maintenance cost	190.62	11,605
- Electricity	68.99	4,200
- Labor	70.0	4,262
- Maintenance	14.09	858
- Other operating cost	7.05	429
- Water	0.49	29
- Land rent	30.0	1,826
3. Total	302.27	18,403

Table 3 Domestic hydrogen production price and annual cost of an on-site SMR hydrogen fueling station (30Nm³/hr)

Items	Annual cost (million won)	Hydrogen production price (won/kgH ₂)
1. Capital cost	141.56	8,619
- SMR+PSA	65.23	3,971
- Storage	13.96	850
- Compressor, pump	14.31	871
- Dispenser	12.97	790
- Construction	12.23	745
- Supplement	23.74	874
- Salvage value	-0.88	-54
2. Operating and maintenance cost	210.18	12,796
- City gas	59.81	3,641
- Electricity	12.47	759
- Labor	70.0	4,262
- Maintenance	23.30	1,419
- Other operating cost	11.65	709
- Water	2.95	180
- Land rent	30.0	1,826
3. Total	351.74	21,415

는 식 (6)에 의해 각기 0.149와 0.1019이다. 초기투자비에 CRF를 곱하면 자본 비용을 산출할 수 있으며 알카리 수전해 설비의 초기투자비에 대응되는 CRF인 0.149, 기타 설비들의 초기투자비에 0.1019를 각기 곱하여 설비들의 자본비를 산출하였다. 한편 자본 비용에 연간 운영비를 더하면 수소충전소의 연간 비용을 산출할 수 있다.

알카리 수전해 분산형 수소충전소의 연간 운영비는 크게 전기 요금, 인건비, 보수유지비, 기타 연간 운영비, 수도 요금, 부지 임차료 등으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 분산형 수소충전소의 이용률이 70%이고, 1년에 365일을 영업하는 것으로 설정하였다. 따라서 알카리 수전해에 의한 30Nm³/hr 생산규모의 분산형 수소충전소의 1일 수소생산량은 45kg이고 연간 수소생산량은 16,425kg으로 산정하였다.

알카리 수전해 설비의 수소 생산에 따른 전기 소

요량은 5.0kWh/Nm³로 에너지 효율은 고위발열량을 기준으로 약 70%이다. 전기 요금은 산업용 전력 요금을 기준하고 계약용량 요금을 감안하여 75원/kWh으로 산출하였고 분산형 수소충전소의 연간 전기사용량은 920MWh이므로 연간 전기 요금은 68,985천원이다.

인건비는 연봉이 4,000만원인 정규직원 1인과 1,500만원인 비정규직원 2인으로 운영하는 시스템을 가정하여 연간 7,000만원으로 추정하였다. 알카리 수전해 설비에는 냉각수가 필요하지 않으며, 반응용(demineralized) 물 사용량은 26.5kg/hr을 기준하여 연간 162톤의 물을 사용하는 것으로 가정하였다. 반응용 물은 filter 비용을 포함하여 3,000원/톤을 기준하여 연간 수도 요금은 498천원으로 추정하였다. 보수유지비와 기타 운영비는 선행 연구결과⁷⁾를 참고하여 각기 초기 설비비의 2%와 1%로 추정하였다. 또한 수소충전소의 부지 규모는 300m²이고 연간 부

Table 4 Domestic initial investment cost of an on-site hydrogen fueling station by the PEM water electrolysis (30Nm³/hr)
unit: million won

Items	Initial capital cost
Electrolysis	600
Storage	137.0
Compressor, pump	140.4
Dispenser	127.3
Construction	120
Supplement	200.9
Total	1,325.6

지 임차료는 100천원/m²을 기준하여 30,000천원으로 추정하였다.

Table 2를 보면 30Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 분산형 수소충전소의 자본비용은 약 112백만원, 연간 운영비는 약 190백만원으로 총 연간비용은 약 302백만원으로 추정되었다. 알카리 수전해 수소충전소의 연간 수소생산량이 16,425kg이고 총 연간비용은 302백만원이므로 30Nm³/hr 생산규모의 국내 알카리 수전해 수소충전소의 수소 제조가격은 식 (9)에 의해 18,403원/kgH₂으로 추정된다.

국내 알카리 수전해 수소충전소의 수소 제조가격과 동일한 규모의 천연가스를 이용한 SMR 수소충전소의 수소 제조가격을 비교하기 위하여 선행 연구결과³⁾를 이용하였다. 초기투자비와 관련된 비용은 환율 등을 고려하여 설비투자액과 관련된 모든 가격을 2010년을 기준하여 조정하였으며, Table 3에는 30Nm³/hr 생산규모의 국내 SMR 분산형 수소충전소의 수소 제조가격을 수록하였다.

Table 3을 보면 30Nm³/hr 생산규모의 국내 SMR 분산형 수소충전소의 수소 제조가격은 21,415원/kgH₂으로 동일한 규모의 알카리 수전해 수소충전소의 수소 제조가격인 18,403원/kgH₂보다 비싼 것으로 추정되었다. 특기할 사항은 또한 30Nm³/hr 생산규모의 국내 SMR 분산형 수소충전소의 초기투자비를 약 14억원으로 추정하였으며, 도시가스 가격은 2011년의 서울 지역의 도시가스 소매가격인 728원/Nm³으로 선행 연구결과³⁾에서 기준한 504원/Nm³보다

Table 5 Domestic hydrogen production price and annual cost of an on-site hydrogen fueling station by the PEM water electrolysis (30Nm³/hr)

Items	Annual cost (million won)	Hydrogen production price (won/kgH ₂)
1. Capital Cost	162.46	9,891
- Electrolysis	89.40	5,443
- Storage	13.96	850
- Compressor, Pump	14.31	871
- Dispenser	12.97	790
- Construction	12.23	745
- Supplement	20.47	1,246
- Salvage value	-0.88	-54
2. Operating and maintenance cost	214.41	13,054
- Electricity	82.78	5,040
- Labor	70.0	4,262
- Maintenance	20.09	1,223
- Other operating cost	10.05	612
- Water	1.49	91
- Land rent	30.0	1,826
3. Total	376.87	22,945

크게 증가하였다는 점이다.

3.3 PEM 수전해의 경제성 평가

현재 국내에서는 5Nm³/hr 생산규모의 PEM 수전해 설비가 생산된 바 있으며, 본 논문에서는 6기의 PEM 수전해 설비를 병렬로 연결하여 30Nm³/hr 생산 규모를 갖는 분산형 수소충전소를 가정하였다. Table 4에는 30Nm³/hr 생산 규모의 국내 PEM 수전해 분산형 수소충전소의 초기투자비를 수록하였다.

Table 4를 보면 30Nm³/hr 생산규모의 PEM 수전해 설비비는 6억원으로 알카리 수전해 설비에 비교하여 2배의 설비투자비가 필요하며, 30Nm³/hr 생산규모의 국내 PEM 수전해 수소충전소의 초기투자비는 약 13.3억원으로 추정되었다. 따라서 30Nm³/hr 생산규모의 국내 PEM 수전해 분산형 수소충전소의 초기투자비는 알카리 수전해 수소충전소의 초기

투자비보다는 비싸지만 SMR 수소충전소의 초기투자비보다는 저렴한 것으로 추정되었다. Table 5에는 국내 PEM 수전해 수소충전소의 연간비용과 수소 제조가격을 수록하였다.

미국에서는 $10\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모의 PEM 수소 제조장비인 Proton사의 Hogen 380의 에너지 효율을 56%로 보고한 바 있다⁵⁾. 한편 $5\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모를 갖는 국내 PEM 수소제조장비의 전기사용량은 $6.0\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ 로 약 58%의 에너지 효율을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 그러면 PEM 수전해 분산형 수소충전소의 연간 전기사용량은 $1,104\text{MWh}$ 이고 연간 전기 요금은 82,782천원이다.

알카리 수전해와 마찬가지로 보수유지비와 기타 운영비는 각기 초기 설비비의 2%와 1%로 추정하였다. 또한 PEM 수전해 설비의 반응용 물 사용량은 $26.9\text{kg}/\text{hr}$ 을 기준하여 연간 165톤의 물을 사용하는 것으로 추정하였다. 또한 냉각수는 약 $200\text{kg}/\text{hr}$ 이 사용되어 연간 1,226톤이 필요하며 냉각수 가격은 하수도 요금을 포함하여 $770\text{원}/\text{kg}$ 을 기준하여 연간 수도 요금을 1,493천원으로 추정하였다.

$30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모의 PEM 수전해 분산형 수소충전소의 자본비용은 약 162백만원, 연간 운영비는 약 214백만원으로 총 연간비용은 약 377백만원으로 추정되었다. 따라서 $30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모의 국내 PEM 수전해 수소충전소의 수소 제조가격은 $22,945\text{원}/\text{kgH}_2$ 으로 추정되었다. 따라서 $30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모의 국내 PEM 수전해 수소충전소의 수소 제조가격은 동일한 규모의 알카리 수전해 수소충전소의 수소 제조가격보다 $4,542\text{원}/\text{kgH}_2$ 이 더 소모되는 것으로 분석되었다. 이러한 수소 제조가격의 차이는 PEM 수전해 기술이 충분히 개발되어 있지 않기 때문에 초기투자비도 많이 소요되고 에너지 효율도 낮기 때문이다. 따라서 PEM 수전해가 경쟁력을 갖기 위해서는 많은 연구개발이 필요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

저온수전해 수소 생산시스템의 대표적인 방식은 알카리 수전해와 PEM 수전해로 구분할 수 있으며,

본 논문에서는 국내 알카리 수전해와 PEM 수전해 수소생산에 의한 $30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모의 분산형 수소충전소의 경제성 평가를 수행하였다. 저온수전해 수소 생산시스템의 수명주기 동안의 총비용과 연간 수소생산량에 근거하여 수소 제조가격을 산출하였으며, 이러한 수소 제조가격을 대변수로 하여 국내 저온수전해 수소 생산시스템의 경제성을 평가하였다.

국내 저온수전해 수소충전소의 수소 제조가격을 SMR 수소충전소의 수소 제조가격과 비교하였으며 $30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모를 갖는 국내 알카리 수전해, PEM 수전해, SMR 수소충전소의 수소 제조가격은 각기 $18,403\text{원}/\text{kgH}_2$, $22,945\text{원}/\text{kgH}_2$, $21,412\text{원}/\text{kgH}_2$ 등으로 추정되었다. 일반적으로 SMR 수소충전소는 분산형 수소충전소 중에서 가장 가격 경쟁력이 높은 것으로 알려져 있으나, 국내에서는 알카리 수전해에 의한 수소 생산이 $30\text{Nm}^3/\text{hr}$ 생산규모에서 가장 경제적인 수소 생산방식인 것으로 판단된다.

한편 국내에서는 분산형 수소충전소의 수소 생산규모가 커져도 물의 전기분해에 의한 수소 생산이 상당한 경쟁력을 가질 것으로 예상된다. 이러한 예상을 할 수 있는 근거는 국내 도시가스가격은 액화 천연가스를 사용하여 매우 고가이며 전기가격은 비교적 낮은 수준이기 때문이다. 따라서 에너지 가격이 상이한 외국의 연구결과에 근거하여 국내에서도 수전해에 의한 수소 생산이 경쟁력이 없을 것이라는 기존의 연구결과를 다시 검토할 필요가 있으며, 향후에는 비교적 대규모의 분산형 수소충전소에 대한 수전해와 SMR 방식의 수소 제조가격을 비교 분석하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부 프론티어 연구사업인 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단의 연구비 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) D. Meyers, G. Ariff, B. James, J. Lettow, C.

- Thomas, and R. Kuhn, "Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances", Proceeding of the 2002 U.S.A. DOE Hydrogen Program Review, 2002.
- 2) C. Adame, M. Caldwell, J. Crosby, P. Glanvill, M. Gonzalez, R. Heffner, K. Heinen, R. McCarthy, and J. Weinert, "Bid in Response to the DOE/NHA Proposal to Design a Public Hydrogen Fueling Station", U.C. Davis, 2004.
- 3) 김봉진, 김종욱, "국내 분산형 수소충전소의 규모의 경제성 분석", 에너지공학, Vol. 16, No. 4, 2007. pp. 170-180.
- 4) 김봉진, 김종욱, "태양전지를 이용한 국내 Window Type 광전기화학 수소생산의 경제성 평가", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No. 6, 2010. pp. 595-603.
- 5) NREL(National Renewable Energy Laboratory), Summary of Electrolytic Hydrogen Production, NREL/MP-560-36374, 2004, U.S.A.
- 6) 박찬석, 김규태, 최성호, 경제성공학, 영지문화사, 2004, pp. 58.
- 7) P. Neumann, and F. Linde, "Opportunities for an Economical Hydrogen Supply", Inform, Vol. 14, No. 5, 2003, pp. 313-315.