

태양전지를 이용한 국내 Window Type 광전기화학 수소생산의 경제성 평가

김봉진*[†], 김종욱**

*단국대학교 산업공학과, **한국에너지기술연구원 정책연구실

Economic Evaluation of Domestic Window Type Photoelectrochemical Hydrogen Production Utilizing Solar Cells

BONGJIN GIM*[†], JONGWOOK KIM**

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

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

ABSTRACT

This paper deals with an economic evaluation of domestic window type photoelectrochemical hydrogen production utilizing solar cells. We make some sensitivity analysis of hydrogen production prices by changing the values of input factors such as the initial capital cost, the solar to hydrogen conversion efficiency, and the system duration time. The hydrogen production price of the window type photoelectrochemical system was estimated as 1,168,972 won/kgH₂. It is expected that hydrogen production cost can be reduced to 47,601 won/kgH₂ if the solar to hydrogen conversion efficiency is increased to 14%, the system duration time is increased to 20,000 hours, and the initial capital cost is decreased to 25% of the current level. We also evaluate the hydrogen production cost of the water electrolysis using the electricity produced by solar cells. The corresponding hydrogen production cost was estimated as 37,838 won/kgH₂. The photoelectrochemical hydrogen production is evaluated as uneconomical at this time, and we need to enhance the solar to hydrogen conversion efficiency and the system duration time as well as to reduce prices of the system facilities.

KEY WORDS : Photoelectrochemical hydrogen production(광전기화학 수소 생산), Window type photoelectrochemical cell(창문형 광전기화학 전지), Solar cells(태양전지), Solar to hydrogen conversion efficiency(태양-수소 변환효율), Economic evaluation(경제성 평가), Hydrogen production cost(수소 제조가격)

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

[접수일 : 2010.8.30 수정일 : 2010.10.1 게재확정일 : 2010.12.17]

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>i</i>	: discount rate
P	: hydrogen production price of a hydrogen production system
E	: solar energy input for a hydrogen production system
N	: life period for economic analysis
n	: life period for a facility
HHV	: high heating value
CRF	: capital recovery factor
CR	: annual capital cost
PEC	: photoelectrochemical
STH	: solar to hydrogen
<i>e</i>	: solar to hydrogen conversion efficiency

1. 서 론

광전기화학(photoelectrochemical: PEC) 수소 생산 시스템은 광전기화학형 태양전지(solar cell)가 태양광을 흡수하여 물로부터 수소를 제조하는 시스템이다. 따라서 광전기화학 수소생산은 영구적인 에너지원인 태양광과 재생자원인 물로부터 수소를 생산하기 때문에 지속가능한 수소 생산방법이다. PEC 수소 생산시스템의 장점은 태양-수소(solar to hydrogen: STH) 변환효율이 비교적 높고 시스템이 상대적으로 간단하다는 점이다. 한편 PEC 수소 생산시스템의 단점은 대부분의 산화물 반도체가 수용액에서 안정하지 않으며, 시스템 지속시간이 짧고 물분해에 필요한 에너지가 높다는 점이다. 또한 PEC 수소 생산시스템은 태양전지의 위치에 따라 immersing type, window type, hybrid type 등으로 분류할 수 있다. Window type 광전기화학전지에 대한 국내 명칭은 아직 확립되어 있지 않으며, 본 논문에서는 표기의 편의를 위하여 window type를 창문형으로 표기하였다.

1991년에는 색소 분광증감제(dye sensitizer)를 사용하고 이산화티타늄을 반도체 전극으로 하는 광전기화학전지를 이용하여 물로부터 수소를 제조한 연구가 수행되었다¹⁾. 한편 미국, 일본, 독일, 영국, 스웨덴, 스위스 등의 선진국들은 PEC 전지를 이용한 수소 생산을 장기적인 대체에너지원 개발을 위한 기술개발 관점에서 연구하고 있다.

미국 DOE(department of energy)는 2017년까지 STH 효율을 10%로 높이고, 시스템 지속시간을 5,000 시간으로 향상시키는 목표를 제시한 바 있다²⁾. 또한 2015년에는 이러한 평가지표들의 달성 여부를 종합적으로 평가하여 PEC 수소 생산의 연구개발에 대한 지속 여부를 결정할 계획이다. DOE는 PEC 전지를 이용한 상업화 수소 생산기술의 연구목표를 14% 이상의 STH 효율, 20,000시간 이상의 시스템 수명시간, 수소 제조가격 \$5/kgH₂ 등으로 설정한 바 있다.

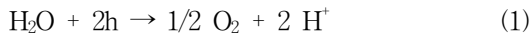
본 논문에서는 경제성 평가에 많이 사용되고 있는 수명주기에 기초한 비용 분석방법을 사용하여 태양전지를 이용한 국내 창문형 PEC 수소생산의 경제성을 평가하고 수소 제조가격을 산출하였다. 국내에서는 immersing type PEC 수소 생산의 수소 제조가격을 8,264,324원/kgH₂로 산출하였으며³⁾, PEC 수소 생산시스템이 경제성을 갖기 위해서는 STH 효율이 대폭으로 개선되고, 장비의 시스템 지속시간이 크게 증가되고, 초기투자비가 저렴한 수준으로 낮추어져야 하는 것으로 보고하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 태양전지를 이용한 국내 창문형 광전기화학 수소 생산 시스템을 설명하며, 3절에서는 국내 창문형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격을 산출하고 경제성을 평가한다. 또한 향후에 PEC 수소 생산시스템의 경제성에 큰 영향을 줄 수 있는 초기 투자비, STH 효율, 수명 시간 등의 주요 변수들의 변화에 따른 민감도 분석을 수행한다. 4절에서는 태양광발전에 의해 생산된 전기를 사용하여 알카리 수전해에 의해 수소를 생산하는 시스템의 수소 제조가격과 국내 창문형 PEC 수소 제조가격을 비교한다. 마지막으로 5절에서는 연구의 결과를 요약하고 향후 연구과제 등에 대하여 논의한다.

2. 창문형 PEC 수소 생산

물을 분해하여 수소를 생산하기 위해서는 열역학적으로 최소한 1.23eV의 에너지가 필요하며, 물분해는 다전자 이동 반응이다. 대부분의 반도체 표면에서 산화반응에 의해 산소가 발생하는 반응에는 0.7eV의 과전위가 필요하다. 이로 인해 PEC 전지의 광전극으로 사용되는 반도체는 최소한 1.8eV 이상의 띠틈(bandgap)를 가지면서 일정한 산도의 수용액에서 물의 산화-환원 에너지 준위가 해당 반도체의 결합띠 및 전도띠의 에너지 준위 내에 위치하여야 수소를 생산할 수 있다. 따라서 태양광을 이용하여 물로부터 수소를 효과적으로 생산하기 위해서는 반도체의 에너지 준위가 물의 산화-환원 에너지 준위를 포함해야 한다. 또한 가시광선 영역의 태양광을 흡수할 수 있는 bandgap을 가져야 하고, 수용액 전해질에서 안정해야 한다.

광어노드(photo anode)는 입사광 중에서 고에너지 스펙트럼(h)을 흡수하여 전자-공공의 쌍을 발생시킨다. 그리고 물 분자는 다음 식과 같이 광어노드와 수전해액의 계면에서 공공과 반응하여 산소와 수소이온(photon)을 생성시킨다.



생성된 수소이온들은 수전해액을 통하여 음극(cathode)에 도달한다. 태양전지는 다음 식과 같이 광어노드로부터 전자를 수집하여 바이어스를 증가시키고 PEC의 음극으로 이동하여 수전해액과 음극의 계면에서 수소를 발생시킨다.



일반적으로 단일 반도체 전극을 이용하여 PEC 전지를 구성하는 경우에는 물을 분해하는데 필요한 에너지를 얻기가 어렵기 때문에 단일 전극을 직렬로 연결하여 에너지를 얻거나, 필요한 에너지를 외부에서 공급하는 방법을 사용할 수 있다. Immersing type PEC 수소 생산시스템은 태양전지가 PEC cell 내부에 있는 가장 기본적인 시스템이다. 국내에서

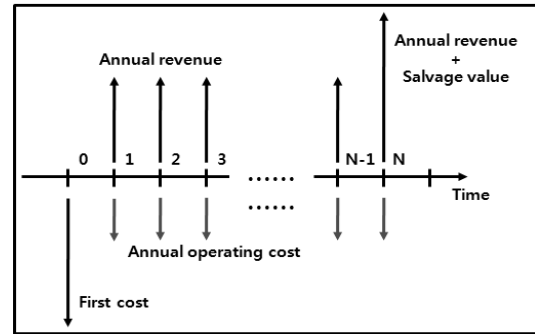


Fig. 1 Cash flow diagram of H₂ production by PEC.

는 Fe₂O₃와 WO₃ 등과 같은 투명한 반도체형 광어노드와 장파 영역에서 전기를 생산하는 염료감응형 태양전지로 구성되는 일렬배치형 immersing type PEC cell에 대한 연구를 수행하였다⁴⁾.

창문형 PEC 수소 생산시스템에서는 태양전지가 외부 창문(window)에 설치되어 있으며, 창문형의 장점은 immersing type에 비교하여 STH 효율이 높다는 점이다. 국내에서는 광전극으로 실리콘 전극, 산소촉매막으로 NiFe₂O₄, 상대전극으로 백금을 사용한 창문형 PEC 수소 생산시스템에 대한 연구를 수행하였다⁵⁾. 한편 창문형 PEC 수소 생산시스템은 태양전지를 이용한 태양광 발전에 의해 생산된 전기를 이용하여 물의 전기분해에 의해 수소를 생산하는 수소 생산시스템과 큰 차이가 없다는 견해가 제기되고 있다.

3. 창문형 PEC 수소 제조가격

3.1 이론적 배경

PEC 수소 생산시스템의 경제성은 초기 투자비, 연간 판매수입, 연간 운영비, 잔존가치, 시스템 수명, 할인율, 태양 에너지, STH 효율 등에 의하여 결정된다. Fig. 1에는 PEC 수소 생산시스템의 연도별 현금 흐름을 나타내는 현금 흐름도(cash flow diagram)를 수록하였다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이 PEC 수소 생산시스템의 경제성 분석기간은 N년으로 설정하였다. PEC

수소 생산시스템의 경제성 분석모형의 현금흐름은 시점 0에서의 초기투자비 I와 시점 $t(t=1, 2, \dots, N)$ 에서의 연간 판매수입과 연간 운영비, 수명기간인 N에서의 수소 생산시스템의 잔존가치 S 등으로 구성된다.

1) 초기투자비(I): 창문형 PEC 수소 생산시스템의 초기투자비는 음극, 광전극인 태양전지, membrane, 산소 촉매막, 전해질 및 기타, 부대 비용 등으로 구성된다.

2) 잔존가치(S): 잔존가치는 초기에 투입된 시설들을 수명이 끝난 시점에 처분하여 얻을 수 있는 수입이다. 본 논문에서는 잔존가치를 무시할 수 있는 것으로 설정하였다.

3) 연간 판매수입(R): 연간 판매수입은 수소에너지를 판매하여 얻는 수입으로 한정하였다.

4) 연간 운영비(M): 연간 운영비는 주로 membrane과 산소 촉매막 등의 교체비용에 소요되는 보수유지비와 인건비를 포함하는 기타 운영비로 구분하였다.

5) 시스템 수명기간(N): 수소 제조가격을 산출하기 위해서는 적절한 수소 수명기간을 설정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 태양전지의 수명기간을 기준하여 창문형 PEC 수소 생산시스템의 수명기간을 20년으로 설정하였다.

6) 설비 수명기간(n): 창문형 PEC 수소 생산시스템의 설비에 따라 수명기간이 다르며 광전극과 음극은 시스템 수명기간과 동일한 20년으로 설정하였다. 또한 membrane과 산소 촉매막의 수명기간은 1년 이내이므로 매년 교체하는 것으로 설정하였다.

7) 할인율(i): 경제성 분석에 사용되는 가격은 실제가격을 나타내는 경상가격과 인플레이션 효과를 제거한 불변가격(real price)이 있다. 불변 할인율은 인플레이션 효과가 제거된 할인율을 의미한다. 대다수의 선진국에서는 일반적인 에너지 사업에 대하여 4%~9%의 불변 할인율을 사용하고 있다. 본 논문에서는 보수적인 입장에서 불변 할인율을 8%로 설정하였다.

8) 태양에너지(E): 각 지역의 기후조건에 따라 태양에너지 자원량은 다르다. 각 지역의 수평면 전

일사량(B)은 광생물학적 수소 생산시스템의 경제성에 큰 영향을 준다. 수소 생산시스템에 투입되는 태양에너지 E는 생산면적과 B에 비례한다. 본 논문에서는 태양에너지를 최대한으로 활용하는 경사각 33° 에서의 태양 일조량을 기준하여 B를 $3,432\text{kcal/m}^2/\text{day}$ 로 설정하였다⁶⁾.

9) STH 변환효율(e): PEC 수소생산시스템의 기술수준을 나타내며, 수소 생산시스템에 의해 태양에너지를 수소에너지로 전환시키는 효율을 의미한다. 국내에서는 실험실 조건에서 창문형 PEC cell의 STH 효율을 9.3% 수준으로 보고한 바 있다⁵⁾. 그러나 실제 태양광 조건에서는 STH 효율이 떨어지는 요인을 감안하여 실제 태양광 조건에서의 국내 창문형 PEC 수소생산시스템의 STH 효율을 5%로 설정하였다.

잔존가치가 없는 경우에는 각 설비의 초기투자비에 다음과 같은 자본회수계수(capital recovery factor) CRF를 곱하여 각 설비의 초기투자비를 연간 비용을 나타내는 자본비용으로 환산할 수 있다⁷⁾.

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3)$$

식 (3)을 보면 자본회수계수 CRF는 i 와 n 에 의하여 결정되며, n 이 무한대로 접근할 때 CRF의 한계값은 i 가 된다. 불변가격 대신에 경상가격을 사용하여 경제성 분석을 하는 경우에 f 를 연간 인플레이션율, r 을 경상가격에 대한 할인율로 표기할 때 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$r = i + f + i \times f \quad (4)$$

식 (3)의 i 대신에 r 을 대입하면 경상가격에 기초한 자본비용을 산출할 수 있다. 한편 초기투자비와 잔존가치를 동시에 고려한 자본비용을 CRF로 표기하자. 그러면 CR은 다음과 같은 관계식을 갖는다⁷⁾.

$$\text{CR} = (I - S) \times \text{CRF} + i \times S \quad (5)$$

PEC 전지의 수소 생산면적을 A, 경사각 33° 의 태

양 일조량을 B로 표기하자. 그러면 광전기화학 전지에 투입되는 연간 태양에너지 E는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E = 365 \times A \times B \quad (6)$$

PEC 전지의 연간 수소생산량 Q는 E에 STH 효율을 나타내는 ρ 를 곱하여 산출할 수 있으며, P는 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \rho \times E \quad (7)$$

PEC 수소 생산시스템의 총 연간비용은 자본비용과 연간 운영비로 이루어진다. 단위당 수소 판매가격을 P로 표기할 때 기타 수입이 없는 경우의 PEC 수소 생산시스템의 연간 판매수입 R은 PQ이다. 한편 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격은 연간 판매수입과 연간 총비용이 같아지는 수소 판매가격으로 정의할 수 있다. PEC 수소 생산시스템의 연간 총비용은 자본비용과 연간 운영비로 이루어지므로 수소 제조가격 P는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P = (M + CR) / Q \quad (8)$$

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

3.2 경제성 분석

본 논문에서는 사례연구로서 국내 창문형 PEC 수소 생산시스템⁵⁾을 대상으로 하여 경제성 평가를 수행하였다. 따라서 계산된 경제성 평가 결과가 모든 창문형 수소 생산시스템에 적용되기는 어려울 것으로 사료된다.

PEC 전지는 12.5cm x 12.5cm 크기로서 광전극으로

Table 1 Initial cost of the window type PEC cell

구분	가격 (원)	구성비 (%)
Ni-mesh Pt coating(음극)	85,260	56.51
광전극(태양전지)	13,000	8.62
Membrane	16,700	11.07
산소촉매막	7,500	4.97
전해질 및 기타	8,740	5.79
부대비용	19,680	13.04
합계	150,880	100.00

는 실리콘 전극을 사용하였다. 산소촉매막은 NiFe_2O_4 상대전극으로 백금을 사용하였다. 백금을 음극으로 사용하는 경우에는 초기투자비가 크게 증가하므로 니켈 mesh에 백금을 코팅하여 사용할 수 있는 것으로 가정하였다. 니켈 mesh를 사용하면 초기 활성은 백금과 동일하나 반응시간에 따른 안정성은 낮게 된다. 또한 이온의 전도성을 높이기 위하여 음이온 교환막을 사용하였다. Table 1에는 창문형 PEC 전지의 초기투자비를 수록하였다.

Table 1을 보면 창문형 PEC 전지의 초기투자비 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목은 immersing type PEC 전지와 마찬가지로 니켈에 백금을 coating한 음극 비용이다. 니켈 mesh는 10cm x 10cm 크기로서 5.38g이 필요하며 42,670원이 소요된다. 니켈 표면에 백금을 coating하는 데 소요되는 무게는 약 0.269g으로 42,600원이 소요되므로 음극 비용은 85,260원이다. 한편 광전극인 실리콘 태양전지 가격은 1장에 13,000원을 기준하였다.

산소 촉매막과 membrane은 10cm x 10cm 크기로 각기 16,700원과 7,500원이 소요되며, 산소 촉매막은 20cm x 30cm 크기의 SUS-304 plate 가격을 기준하여 산출하였다. 전해질 1,000cc에 NaOH 40g을 사용하며 NaOH는 8,740원이 소요된다. 건설 및 엔지니어링 비용 등에 소요되는 부대비용은 직접 초기투자비의 15%인 19,680원으로 국내 창문형 PEC 전지의 초기투자비는 150,880원으로 추정하였다.

창문형 PEC 수소 생산시스템의 연간운영비는 membrane과 산소 촉매막 등의 교체비용에 소요되는 보

Table 2 Hydrogen production cost and annual cost of the window type PEC cell

구분	연간 비용 (원)	수소 제조가격 (원/kgH ₂)	구성비 (%)
1. 자본비용	15,375	474,684	40.61
- 음극	8,688	268,231	22.95
- 태양전지	1,325	40,908	3.50
- membrane	1,702	52,547	4.50
- 산소 촉매막	764	23,588	2.02
- 전해질+기타	891	27,508	2.35
- 부대비용	2,005	61,902	5.29
2. 연간 운영비	22,488	694,288	59.39
- 보수유지비	21,734	671,009	57.39
- 기타 운영비	754	23,279	1.99
3. 연간 비용	37,863	1,168,972	100.00

수유지비와 인건비를 포함한 기타 운영비로 구분할 수 있다. 창문형 PEC 전지의 시스템 지속시간은 300시간으로 추정하였으며, 산소 촉매막과 membrane은 매년 교체하는 것으로 설정하였다. 창문형 PEC 전지의 보수유지비는 membrane과 산소 촉매막의 교체비용에서 이들의 자본비용을 차감한 금액으로 산정하였으며, 기타 운영비는 초기투자비의 0.5%로 추정하였다. Table 2에는 창문형 PEC 전지의 연간 비용과 수소 제조비용을 수록하였다.

Table 2를 보면 창문형 PEC 전지의 membrane과 산소 촉매막의 교체비용으로 매년 24,200원이 소요되며, membrane과 산소 촉매막의 자본비용은 2,466원이므로 광전기화학 전지의 보수유지비는 매년 21,734원이 소요된다. 또한 PEC 전지의 기타 운영비는 초기투자비의 0.5%인 754원으로 추정하였다. 창문형 PEC 전지의 연간 운영비는 보수유지비와 기타 운영비를 더한 22,488원이다. PEC 전지의 연간 비용은 연간 운영비 22,488원과 자본비용 15,375원을 더한 37,863원으로 추정되었다. Fig. 2에는 창문형 PEC 전지의 항목별 수소 제조가격의 비중을 나타내었다.

Fig. 2를 보면 국내 창문형 PEC 전지의 수소 제조가격 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 보수유지

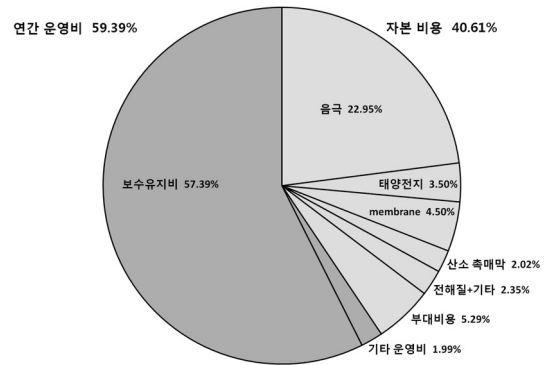


Fig. 2 Hydrogen production cost of the window type PEC cell by components.

비로서 전체 수소 제조가격의 57.39%를 차지하는 것으로 나타났다. 현재는 창문형 PEC 전지의 시스템 지속시간이 1년 이하로서 산소 촉매막과 membrane을 매년 교체하는 것으로 설정하였기 때문이며, 향후에 창문형 PEC 전지의 시스템 지속시간이 크게 증가되면 보수유지비의 비중이 크게 낮아질 것으로 전망된다. 또한 수소 제조가격 중에서 음극에 소요되는 비용이 22.95%로서, 보수유지비와 음극 비용을 더한 비용이 전체 수소 제조가격의 80%를 초과하는 것으로 분석되었다.

창문형 PEC 전지의 수소 생산면적 A는 148.25cm²이므로 E는 식 (6)에 의해 18,571kcal이다. 한편 PEC 전지의 STH 효율을 나타내는 ρ는 5%이므로 식 (7)에 의해 PEC 전지의 연간 수소생산량 P는 928.55kcal이다. 이러한 수소생산량을 대기압 25°C에서의 수소의 저위발열량인 120MJ/kg으로 환산하면 0.03239kgH₂이다. 창문형 PEC 전지의 수소 제조비용은 식 (8)에 의해 연간 총비용을 연간 수소생산량으로 나누어 산출할 수 있으며, 국내 창문형 PEC 전지의 수소 제조비용은 1,168,972원/kgH₂으로 추정된다.

이러한 국내 창문형 PEC 전지의 수소제조비용은 내부형 PEC 전지의 수소 제조비용인 8,264,324원/kgH₂의 약 14%이며, 두 PEC 전지의 수소 제조비용의 차이는 주로 STH 효율의 차이에 의한 것으로 나타났다.

Table 3 Sensitivity analysis of PEC hydrogen production cost unit : won/kgH₂

I	N	10%		14%	
		5,000 hours	20,000 hours	5,000 hours	20,000 hours
100%		355,866	266,579	254,190	190,414
50%		177,041	133,297	127,101	95,212
25%		88,963	66,641	63,545	47,601

3.3 민감도 분석

창문형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조비용에 큰 영향을 줄 수 있는 요소로는 STH 효율, 초기 투자비, 시스템 수명시간 등이다. 본 논문에서는 DOE의 목표를 감안하여 STH 효율은 10%와 14%, 시스템 수명시간은 5,000시간과 20,000시간, 초기투자비는 현재 수준의 100%, 50%, 25% 등으로 감소하는 경우를 조합하여 PEC 수소생산의 수소 제조비용에 대한 민감도 분석 결과를 Table 3에 수록하였다.

Table 3을 보면 초기투자비는 현재와 같고 DOE의 2018년 광전기화학 수소생산 목표치와 같이 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 5,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조비용은 355,861원/kgH₂으로 추정되었다. 초기투자비가 현재 수준의 50%로 감소하고 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조비용은 133,297원/kgH₂으로 추정되었다. 한편 초기투자비가 현재 수준의 25% 수준으로 감소하고, STH 효율이 14%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 낙관적인 경우의 수소 제조비용은 47,601원/kgH₂으로 감소될 것으로 전망되었다.

Table 3의 결과는 국내 창문형 PEC 수소 제조가격을 경쟁력이 있는 수준으로 낮추기 위해서는 STH 효율, 초기투자비, 시스템 수명시간 등을 대폭 개선시키는 것이 필요함을 잘 보여 주고 있다. 따라서 향후에는 STH 효율 이외에도 초기투자비 규모와 시스템 수명시간 등의 주요 지표에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료된다.

4. 태양광발전 수전해 수소 제조가격

국내 창문형 PEC 수소 생산시스템은 태양광발전 에 의해 생산된 전기를 이용하여 물의 전기분해에 의한 수소 생산시스템과 유사한 측면이 있다. 따라서 태양광발전 수전해 수소 제조가격과 창문형 PEC 수소 제조가격을 비교하였다. 태양광 발전에 의한 수전해 수소 제조가격은 수소 생산규모에 따라 큰 차이가 있다. 본 연구에서는 창문형 PEC 수소 생산시스템의 규모가 소규모인 점을 감안하고 태양광 발전에 의하여 생산된 전기를 사용하여 현재 국내에서 판매되고 있는 15Nm³/hr 생산규모의 알카리(alkaline) 수전해 설비에 의해 수소를 생산하는 경우에 대한 수소 제조가격을 산출하였다.

15Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 설비비는 1Nm³/hr에 10,000천원을 기준하여 150,000천원으로 추정하였다. 엔지니어링 비용 등에 소요되는 부대비용은 설비비의 15%인 22,500천원으로 추정하였다. 따라서 15Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 설비의 초기투자비를 172,500천원으로 설정하였다. 또한 알카리 수전해 설비의 수명기간은 7년, 수명기간이 지난 후의 잔존가치는 무시할 수 있는 것으로 가정하였다. 한편 할인율이 8%이고 수명기간이 7년인 경우의 자본회수계수 CRF는 식 (3)에 의해 0.1921이다. 알카리 수전해 설비의 자본비용은 식 (5)에 의해 초기투자비에 CRF를 곱하여 얻은 33,137천원이다.

알카리 수전해 설비의 연간 운영비는 크게 전기비, 인건비, 수도비, 보수유지비, 촉매비 등을 포함한 기타 운영비로 구분할 수 있다. 한편 연간 운영비는 설비의 가동시간에 관계없이 발생하는 고정 운영비와 가동시간에 비례하는 변동 운영비로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 알카리 수전해 설비에 의한 분산형 수소충전소의 수소 제조비용을 산출한 미국 NREL(national renewable energy laboratory)의 연구결과를 이용하여 알카리 수전해 설비의 연간 운영비를 전기비, 고정 운영비, 변동 운영비 등으로 구분하여 추정하였다⁸⁾. Table 4에는 태양광발전 에 의한 수전해 수소 생산시스템의 연간비용과 수소 제조가격을 수록하였다.

Table 4 Hydrogen production cost and annual cost of the solar cell water electrolysis

구 분	연간 비용 (천원)	수소 제조가격 (원/kgH ₂)	구성비 (%)
1. 자본비용	33,137	4,035	10.66
2. 연간 운영비	277,628	33,803	83.34
- 전기비	271,193	33,020	87.27
- 고정 운영비	5,985	728	1.93
- 변동 운영비	450	55	0.14
3. 연간 비용	310,765	37,838	100.00

알카리 전기분해 설비의 전기분해 효율은 고위발열량(high heating value: HHV)을 기준으로 63%에서 73% 사이이다. 일반적으로 수소 생산설비의 규모가 클수록 높은 수소 생산효율을 나타내는 것으로 보고하였다⁸⁾. 본 논문에서는 알카리 수전해 설비의 전기 소요량은 5.0kWh/Nm³, 수소 생산효율은 고위발열량을 기준으로 70.4%를 기준하였다. 따라서 수소 1kg 생산에 소요되는 전기는 56kWh이다.

국내에서는 발전차액지원제도에 의하여 전력회사는 생산용량이 30kW 이하이고 적용기간이 20년인 경우에 태양광발전에 의해 생산된 전기를 589.64원/kWh에 구입하고 있다. 본 논문에서는 태양광발전시스템에 의해 생산되는 전기가격을 589.64원/kWh으로 산정하였다. 그러면 국내 태양광발전 수전해에 의해 수소 1kg 제조에 소요되는 전력량은 56kWh이므로 수소 1kg 제조에 소요되는 전기비는 33,020원이다.

알카리 수전해 설비의 고정 운영비와 변동 운영비는 각기 자본비용의 18.06%와 1.36%인 5,985천원과 450천원 등으로 추정하였다⁸⁾. 또한 기타 운영비는 변동비에 포함하였다. 따라서 15Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 설비의 연간 운영비는 277,628천원, 자본비용은 33,137천원 등으로 자본비용과 연간 운영비를 더한 연간 비용은 310,765천원 등으로 추정하였다. 국내 태양광발전 수전해에 의해 생산되는 수소제조비용의 87.3%는 태양광발전에 소요되는 전기비용인 것으로 분석되었다.

알카리 수전해 설비의 연간 이용률은 분산형 수소충전소에 사용되는 것으로 가정하여 70%로 설정하였다. 그러면 15Nm³/hr 수소 생산규모의 태양광발전 수전해 설비의 1일 수소생산량은 22.5kg, 연간 수소생산량은 8,213kg이다. 따라서 15Nm³/hr 생산규모의 태양광발전 수전해 수소 생산시스템의 수소 제조가격은 연간비용을 연간 수소생산량으로 나누어 산출한 37,838원/kgH₂으로 추정하였다. 현재 국내 창문형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격은 내부형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격의 14% 수준이나, 태양전지에 의해 생산된 전기를 수전해하여 수소를 생산하는 시스템에 비교하면 경제성이 아주 낮은 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 태양전지를 이용한 국내 창문형 PEC 수소 생산시스템의 경제성 평가를 수행하였다. 창문형 PEC 수소 생산시스템의 수명주기 동안의 총비용과 연간 수소생산량에 근거하여 수소 제조비용을 산출하였으며, 이러한 수소 제조비용을 대리변수로 하여 PEC 수소 생산시스템의 경제성을 평가하였다. 국내 창문형 PEC 전지는 실제 태양광 조건에서 5%의 STH 효율, 300시간의 시스템 수명시간을 갖는 것을 기준하여 수소 제조비용을 1,168,972원/kgH₂으로 추정하였다. 한편 DOE의 2018년 광전기화학 수소생산 목표치와 같이 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 5,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조가격은 355,866원/kgH₂으로 추정되었다. 또한 초기 투자비가 현재 수준의 25%, STH 효율이 14%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 낙관적인 경우의 수소 제조가격은 47,601원/kgH₂으로 감소될 것으로 전망되었다.

국내 창문형 PEC 수소 생산시스템은 태양광발전에 의해 생산된 전기를 이용하여 물의 전기분해에 의한 수소 생산시스템과 유사한 측면이 있으며, 15Nm³/hr 생산규모의 알카리 수전해 설비를 기준한 태양광발전 수전해 수소 제조가격은 37,838원/kgH₂으로 추정되었다. 따라서 국내 창문형 PEC 수소 생산시스

템의 수소 제조가격은 내부형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격의 14% 수준에 불과하나, 태양전지에 의해 생산된 전기를 수전해하여 수소를 생산하는 시스템에 비교하면 경제성이 아주 낮은 것으로 분석되었다.

창문형 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조가격을 경쟁력이 있는 수준으로 낮추기 위해서는 STH 효율, 시스템 지속시간, 초기 투자비 등을 대폭 개선시키는 것이 필요하다. 따라서 향후에는 STH 효율 이외에도 초기투자비 규모와 시스템 수명시간 등의 주요 연구개발 지표들에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 과학기술부 프론티어 연구사업인 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단의 연구비 지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

- 1) O' Regan, and M. Gratzel, "A Low-cost, High-efficiency Solar Cell based Dye-sensitized Colloidal TiO₂ Films", Letters to Nature, Vol. 353, 1991, pp. 737-740.
- 2) Department of Energy, Multi-year Research Development and Demonstration Plan, 2007, U.S.A.
- 3) 김봉진, 김종욱, "국내 내부형 PEC 수소생산의 경제성 평가", 한국수소 및 신에너지학회지, 제18권 제2호, 2010, pp. 12-20.
- 4) 이원재, 이스와라, 김현주, 서선희, 이동운, "태양광을 이용하여 수소를 제조하는 탄땀형 광전기화학전지 모듈 개발", 제4회 수소에너지사업단 워크샵, 2008, 제주.
- 5) 주오심, 정광덕, 민병권, 오준우, 박종원, 허정은, H. Pathan, T. Gujar, V. Shinde, I. Puspitasary, "PEC전지를 이용한 수소생산기술", 제4회 수소에너지사업단 워크샵, 2008, 제주.
- 6) 조용기, 강용혁, 한반도 태양에너지 자원의 분석·평가 및 데이터 신뢰성 향상 연구, 2006, 한국에너지기술연구원.
- 7) 박찬석, 김규태, 최성호, 경제성공학, 영지문화사, 2004, p. 58.
- 8) National Renewable Energy Laboratory (NREL), Summary of Electrolytic Hydrogen Production, 2004, U.S.A.