

국내 광전기화학 수소생산의 경제성 평가

김봉진[†], 김종욱^{**}

*단국대학교 산업공학과, **한국에너지기술연구원 정책연구실

Economic Evaluation of Domestic Photoelectrochemical Hydrogen Production

BONGJIN GIM[†], JONGWOOK KIM^{**}

**Dankook Univ., Dept. 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 immersing type photoelectrochemical hydrogen production. We also 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 immersing type photoelectrochemical system was estimated as 8,264,324 won/kgH₂. It is expected that the production cost by photoelectrochemical hydrogen production can be reduced to 26,961 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 10% of the current level. 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), Immersing type photoelectrochemical cell(내부형 광전기화학 전지), Solar to hydrogen conversion efficiency(태양-수소 변환효율), 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 : 2009.12.2 수정일 : 2009.12.14 게재확정일 : 2010.2.16]

- P : hydrogen production price of a hydrogen production system
- E : solar energy input for a hydrogen production system
- N : life period for economic analysis
- CRF : capital recovery factor
- CR : annual capital cost
- PEC : photoelectrochemical
- DSSC : dye sensitized solar cell
- STH : solar to hydrogen
- e : solar to hydrogen conversion efficiency

1. 서 론

태양광과 물을 이용하여 수소를 생산하는 광화학적 수소 생산 방법은 활성전극과 반대전극을 회로로 구성하고 반도체 활성전극에 태양빛을 조사하여 각각의 전극에서 산화-환원 반응이 일어나게 하는 광전기화학(photoelectrochemical: PEC) 방법과 반도체 광촉매를 이용하여 광자(photon) 흡수와 동시에 물분해가 일어나게 하는 광촉매 방법으로 분류할 수 있다.

Fujishima and Honda는 1972년에 광촉매와 자외선을 이용하여 물분해에 의해 수소를 생산하는 반응을 최초로 시현한 바 있다. 그러나 기존의 광촉매 기술은 대부분이 이산화티타늄을 바탕으로 하고 태양광 중에서 에너지 비중이 5% 이하인 자외선을 이용하기 때문에 태양-수소(solar to hydrogen: STH) 변환효율이 낮아서 대체 에너지보다는 환경오염 정화기술로서 관심이 집중되어 왔다. 또한 최근에는 지구온난화에 따른 기후변화 협약 등이 관심을 끌게 됨에 따라 광촉매에 의한 수소 생산은 친환경적인 대체 에너지 생산방법으로 새롭게 인식되고 있다.

광전기화학 수소 생산방법은 반도체 전극과 전해액으로 구성된 광화학전지를 이용하여 태양광에 의해 물분해를 하여 수소를 생산하는 방법이다. 광전기화학 수소 생산의 장점은 STH 효율이 비교적 높고 시스템이 상대적으로 간단하다는 점이다. 한편 광전기화학 수소 생산의 단점은 대부분의 산화물 반도체가 수용액에서 안정하지 않으며, 시스템

지속시간이 짧고 물분해에 필요한 에너지가 높다는 점이다.

O'Regan and Gratzel(1991)은 이산화티타늄을 반도체 전극으로 사용하고 색소 분광증감제(dye sensitizer)를 사용하여 광전기화학 방법으로 수소를 생산한 바 있다. 미국, 일본, 독일, 영국, 네덜란드, 스웨덴, 스위스 등의 선진국들은 PEC 전지를 이용한 수소 생산을 장기적인 대체에너지원 개발을 위한 기술개발 관점에서 연구하고 있다. 국내에서는 한국전기연구원과 한국과학기술연구원 등에서 PEC 전지를 이용한 광전기화학 수소 생산에 대한 연구를 진행하고 있다.

DOE(2007)는 2017년까지 STH 효율을 10%로 높이고, 시스템 지속시간을 5,000시간으로 향상시키는 목표를 제시한 바 있다. 또한 2015년에는 이러한 평가지표들의 달성 여부를 종합적으로 평가하여 PEC 수소 생산의 연구개발에 대한 지속 여부를 결정할 계획이다. 현재 PEC 수소생산의 경제성을 다룬 연구는 거의 없는 실정이다. 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 수명주기(life cycle)에 기초한 비용 분석방법을 사용하여 국내 PEC 수소생산의 경제성을 평가하고 수소 제조가격을 산출하였다. 현재 시점에서의 광촉매에 의한 수소 생산시스템의 경제성 평가는 시기상조인 것으로 판단되어 고려 대상에서 제외하였다.

2. 광전기화학 수소 생산

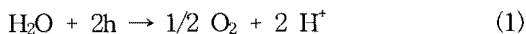
PEC 수소 생산시스템은 광전기화학형 태양전지(solar cell)가 태양광을 흡수하여 물로부터 수소를 제조하는 시스템이다. 따라서 광전기화학 수소생산은 영구적인 에너지원인 태양광과 재생자원인 물로부터 수소를 생산하기 때문에 지속가능한 수소 생산방법이다. 광전기화학 수소 생산시스템은 태양전지 cell의 위치에 따라 immersing type, window type,

hybrid type 등으로 분류할 수 있다. Immersing type는 태양전지가 PEC cell 내부에 있으며, window type는 외부 window에 위치한다. Hybrid type는 이들의 혼합형으로서 태양전지가 내부 window에 존재한다. 본 논문에서는 이들 중에서 가장 기본적인 형태인 immersing type PEC를 대상으로 국내 광전기화학 수소생산의 경제성을 평가하였다.

태양전지는 태양광 발전시스템의 핵심 부품으로서 물성에 따라 실리콘 태양전지, 화합물 태양전지, 염료감응형(dye sensitized solar cell: DSSC) 태양전지, 유기물 태양전지 등으로 구분할 수 있다. 현재 실용화되어 널리 사용되고 있는 것은 결정질 실리콘 태양전지이다. 한편 태양전지의 저가화를 위하여 박막형 태양전지에 대한 연구가 진행되고 있으며, 염료감응형 태양전지는 주로 이산화티타늄과 같은 유기소재를 광활성층의 일부 또는 전부에 적용하는 시스템이다.

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. 이원재 외(2008)는 Fe_2O_3 와 WO_3 등과 같은 투명한 반도체형 광어노드(photo anode)와 장파 영역에서 전기를 생산하는 염료감응형 태양전지로 구성되는 일렬배치형 PEC cell에 대한 연구를 수행하였다.

광어노드는 입사광 중에서 고에너지 스펙트럼(h)을 흡수하여 전자-공공의 쌍을 발생시키며, 물 분자는 다음 식과 같이 광어노드와 수전해액의 계면에서 공공과 반응하여 산소와 수소이온(phonon)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.



물을 분해하여 수소를 생산하기 위해서는 열역학적으로 최소한 1.23eV의 에너지가 필요하며, 물 분해는 다전자 이동 반응이다. 대부분의 반도체 표면에서 산화반응에 의해 산소가 발생하는 반응에는 0.7eV의 과전위가 필요하므로 PEC 전지의 광전극으로 사용되는 반도체는 최소한 1.8eV 이상의 띠틈(bandgap)을 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.

3. PEC 수소생산의 경제성 분석

3.1 이론적 배경

본 연구에서는 수명주기에 기초한 편익 및 비용 분석방법을 이용하여 국내 PEC 수소생산의 경제성 분석을 수행하였다. PEC 수소 생산시스템의 경제성은 초기 투자비, 연간 판매수입, 연간 운영비, 잔존가치, 시스템 수명, 할인율, 태양 에너지, STH 효율 등에 의하여 결정된다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 PEC 수소 생산시스템의 경제성 분석기간은 N년으로 설정한다. 수소 생산시스템의 경제성 분석 모형의 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): PEC 수소 생산시스템의 초기투자비는 음극, membrane, 태양전지, 산소 촉매막, 전해질 및 기타, 부대 비용 등으로 구성된다.
- (2) 잔존가치(S): 잔존가치는 초기에 투입된 시설들을 수명이 끝난 시점에 처분하여 얻을 수 있

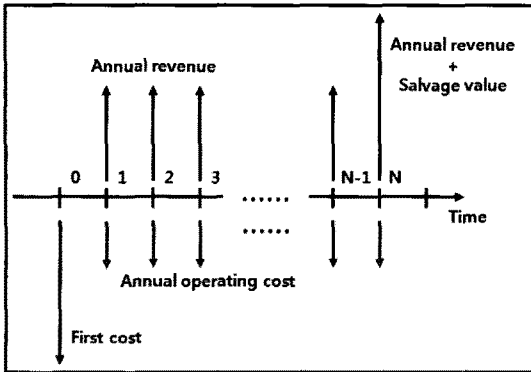


Fig. 1 Cash flow diagram of H₂ production by PEC.

는 수입이다. PEC 수소 생산시스템의 잔존가치는 음극에 소요되는 금속을 처분하여 얻을 수 있는 수입으로서 본 논문에서는 초기 투자비의 10%로 설정하였다.

- (3) 연간 판매수입(R): 연간 판매수입은 수소에너지를 판매하여 얻는 수입과 산소 등과 같은 부산물을 판매하여 얻을 수 있는 기타 수입으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 기타 수입을 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.
- (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 PEC 수소 생산시스템의 수명기간을 20년으로 설정하였다.
- (6) 할인율(i): 경제성 분석에 사용되는 가격은 실제가격을 나타내는 경상가격과 인플레이션 효과를 제거한 불변가격(real price)이 있다. 불변할인율은 인플레이션 효과가 제거된 할인율을 의미한다. 대다수의 선진국에서는 일반적인 에너지 사업에 대하여 4%~9%의 불변 할인율을 사용하고 있다. 본 논문에서는 보수적인 입장에서 불변 할인율을 9%로 설정하였다.

(7) 태양에너지(E): 각 지역의 기후조건에 따라 태양에너지 자원량은 다르다. 각 지역의 수평면 전일사량(B)은 광생물학적 수소 생산시스템의 경제성에 큰 영향을 준다. 수소 생산시스템에 투입되는 태양에너지 E는 생산면적과 B에 비례한다. 본 논문에서는 조용기와 강용혁(2006)의 연구결과를 이용하였으며, 태양에너지를 최대한으로 활용하는 경사각 33°에서의 태양 일조량을 기준하여 B를 3,432kcal/m²/day로 설정하였다.

(8) STH 변환효율(e): PEC 수소생산시스템의 기술 수준을 나타내며, 수소 생산시스템에 의해 태양에너지를 수소에너지로 전환시키는 효율을 의미한다. 해외에서는 실험실 조건에서 immersing type 광전기화학 전지의 STH 효율을 5% 수준으로 보고한 바 있다. 그러나 태양광 조건에서는 STH 효율이 떨어지고 국내 광전기화학 전지의 효율이 해외에 비교하여 낮은 점을 감안하여 실제 태양광 조건에서의 국내 PEC 수소 생산시스템의 STH 효율을 1%로 설정하였다.

잔존가치가 없는 경우에는 초기투자비 I에 다음과 같은 자본회수계수(capital recovery factor) CRF를 곱하여 I를 연간 비용을 나타내는 자본비용으로 환산할 수 있다.

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4)$$

식 (4)를 보면 자본회수계수 CRF는 I와 N에 의하여 결정되며, N이 무한대로 접근할 때 CRF의 한계 값은 i가 된다. 불변가격 대신에 경상가격을 사용하여 경제성 분석을 하는 경우에 f를 연간 인플레이션을, r을 경상가격에 대한 할인율로 표기하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$r = i + f + i \times f \quad (5)$$

식 (4)의 i 대신에 r을 대입하면 경상가격에 기초한 자본비용을 산출할 수 있다. 한편 초기투자비와

잔존가치를 동시에 고려한 자본비용을 CR으로 표기하자. 박찬석 외(2004)에 의하면 CR은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$CR = (I - S) \times CRF + i \times S \quad (6)$$

PEC 전지의 수소 생산면적을 A, 경사각 33°의 태양 일조량을 B로 표기하자. 그러면 광전기화학 전지에 투입되는 연간 태양에너지 E는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E = 365 \times A \times B \quad (7)$$

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

$$Q = \rho \times E \quad (8)$$

PEC 수소 생산시스템의 총 연간비용은 자본비용과 연간 운영비로 이루어지며, 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.

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

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.

Table 1 First cost of PEC cell

| 구분 | 가격(원) |
|------------------------|--------|
| 음극(Ni-mesh Pt coating) | 30,700 |
| DSSC | 4,200 |
| Membrane | 6,700 |
| 산소촉매막 | 3,000 |
| 전해질 및 기타 | 3,500 |
| 광어 노드 + FTO glass | 3,300 |
| 부대비용 | 7,700 |
| 합계 | 59,100 |

주) 규격: 10cm × 10cm

3.2 경제성 분석

국내에서는 PEC 수소 생산시스템에 의해 수소를 생산한 경험이 적으므로, 본 논문에서는 이원재 외(2008)의 연구에 근거하여 국내 PEC 수소 생산시스템의 경제성을 평가하였다.

PEC 전지는 Ag grid를 포함하는 FTO 글라스 위에 Fe₂O₃ 입자로 구성된 반투명 광어노드 전극을 아크릴 구조물에 고정시키고, 백금 wire를 음극으로 하는 물분해 장치이다. 또한 5cm x 5cm 크기의 직렬연결형 DSSC 4개로 구성된 태양전지 panel을 물분해장치 뒤에 위치시키고 광어노드 전극과 직렬로 연결한 시스템이다. 백금을 음극으로 사용하는 경우에는 초기투자비가 크게 증가하므로 Ni mesh에 백금을 coating하여 사용할 수 있는 것으로 가정하였다. Table 1에는 immersing type PEC 전지의 초기투자비를 수록하였다.

Table 1을 보면 PEC 전지의 초기투자비 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목은 니켈에 백금을 coating 한 음극 비용이다. 니켈 mesh는 6cm x 6cm 크기로서 1.94g이 필요하며 15,560원이 소요된다. 니켈 표면에 백금을 coating하는 데 소요되는 무게는 0.097g으로 15,340원이 소요되므로 음극 비용은 30,700원이다. 한편 DSSC는 현재 대량생산이 되지 않으므로 비교적 고가이나, 향후에는 대량으로 생산되는 것을 가정하여 실리콘 태양전지 가격의 60% 수준인 4,200원에 구입할 수 있는 것으로 추정하였다.

산소 촉매막과 membrane은 약 6cm x 6cm 크기로 각기 6,700원과 3,000원이 소요된다. 산소 촉매막은 20cm x 30cm 크기의 SUS-304 plate 가격을 기준하여 산출하였다. 전해질 400cc에 NaOH 16g을 사용하며 NaOH 가격은 3,500원을 기준하였다. 물이 분해되어 양이 감소하면 NaOH는 반응 중에 소모되지 않으므로 추가하지 않고 순수한 물을 계속 추가하며, 광어노드와 FTO glass의 제작비용은 3,500원으로 추정하였다. 건설 및 엔지니어링 비용 등에 소요되는 부대비용은 초기 장비구입비가 많이 소요되는 점을 감안하여 직접 초기투자비의 15%인 7,700원으로 추정하였다.

수소 생산시스템의 초기투자비가 사업초기에 소요되는 회성 비용인 반면에 연간 운영비는 매년 소요되는 반복성 비용이다. PEC 수소 생산시스템의 연간운영비는 주로 membrane과 산소 촉매막 등의 교체비용에 소요되는 보수유지비와 인건비를 포함한 기타 운영비로 구분할 수 있다. 지역에 따라 차이는 있으나 국내에서 태양전지는 1일 약 3.8시간 정도 가동되며 이를 연간으로 환산하면 1,387시간이다. 현재 PEC 전지의 시스템 수명시간은 약 300시간으로 추정되며, 원활한 수소생산을 위해서는 산소 촉매막을 300시간마다 교체할 필요가 있다.

산소 촉매막을 1년마다 교체하는 경우에는 STH 효율이 감소되는 단점이 있으나, 산소 촉매막을 시스템 수명시간인 300시간마다 교체하는 것은 비경제적이므로 1년마다 산소 촉매막을 교체하는 것으로 설정하였다. 또한 membrane도 1년이 경과하면 성능이 크게 감소하므로 매년 교체하는 것으로 설정하였다.

수소 제조비용 분석을 위해서는 적절한 분석기간 N의 선정이 필요하다. 본 논문에서는 태양전지의 수명기간을 기준하여 N을 20년으로 설정하였다. 또한 PEC 전지의 잔존가치는 초기투자비의 10%인 5,910원으로 추정하였다.

PEC 전지의 수소 제조비용을 산출하기 위해서는 초기투자비와 잔존가치를 연간비용으로 환산한 자본비용을 산출하는 것이 필요하다. 식 (4)에 의해 $N = 20$ 년이고 $i = 9\%$ 인 경우에 자본회수계수 CRF

Table 2 Annual cost and manufacturing cost of PEC hydrogen production

| 구 분 | 연간 비용(원) | 수소 제조비용 (원/kgH ₂) | 구성비 (%) |
|--------------------|----------|-------------------------------|---------|
| 1. 자본비용 | 6,356 | 3,435,676 | 41.57 |
| - 음극 | 3,361 | 1,816,757 | 21.98 |
| - DSSC | 460 | 248,649 | 3.01 |
| - Membrane | 734 | 396,757 | 4.80 |
| - 산소 촉매막 | 329 | 207,027 | 2.15 |
| - 전해질 및 기타 | 383 | 195,135 | 2.51 |
| - 광어노드 + FTO Glass | 361 | 181,622 | 2.36 |
| - 부대비용 | 843 | 455,675 | 5.51 |
| - 잔존가치 | -115 | -62,162 | -0.75 |
| 2. 연간 운영비 | 8,933 | 4,828,648 | 58.43 |
| - 보수유지비 | 8,637 | 4,668,648 | 56.49 |
| - 기타 운영비 | 296 | 160,000 | 1.94 |
| 3. 연간 비용 | 15,289 | 8,264,324 | 100.00 |

= 0.1095이며, 식 (6)에 의해 산출한 PEC 전지의 자본비용은 6,356원이다. Table 2에는 PEC 전지의 항목별 연간비용과 수소 제조비용을 수록하였다.

PEC 전지의 보수유지비는 membrane과 산소 촉매막 등의 교체비용 9,700원에서 이들의 자본비용인 1,063원을 차감한 8,637원이 매년 소요되는 것으로 산정하였다. 한편 PEC 전지의 기타 운영비는 최봉하 외(2006)의 태양광발전의 경제성 분석에 관한 연구결과를 감안하여 초기투자비의 0.5%인 296원으로 추정하였으며, PEC 전지의 연간 운영비는 보수유지비와 기타 운영비를 더한 8,933원이다. 따라서 PEC 전지의 연간 비용은 연간 운영비 8,933원과 자본비용 6,356원을 더한 15,289원으로 연간운영비와 자본비용은 각기 연간 비용의 58.43%와 41.57%를 차지하는 것으로 분석되었다.

PEC 전지의 전체 면적은 100cm²이지만 수소 생산면적 A는 42.24cm²으로 한정되며, PEC 전지에 투입되는 연간 태양에너지 E는 식 (7)에 의해 5,291kcal이다. STH 효율을 나타내는 ρ 는 1%이므로 한 개의 PEC 전지에서 생산할 수 있는 연간 수소생산량 Q는 식 (8)에 의해 52.91kcal이고 이를 대기압 25°C

에서의 수소의 저위발열량인 120MJ/kg으로 환산하면 0.00185kgH₂이다. 한편 PEC 수소 생산시스템의 수소 제조비용은 식 (9)에 의해 연간 총비용을 연간 수소생산량으로 나누어 산출할 수 있으며, 국내 immersing type 광전기화학 전지의 수소 제조비용은 8,264,324원/kgH₂으로 추정된다.

3.3 민감도 분석

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%, 10% 등으로 감소하는 경우를 조합하여 PEC 수소생산의 수소 제조비용에 대한 민감도 분석 결과를 Table 3에 수록하였다.

초기투자비는 현재와 같고 DOE의 2018년 광전기화학 수소생산 목표치와 같이 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 5,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조비용은 474,216원/kgH₂으로 추정되었다. 초기투자비가 현재 수준의 50%로 감소하고 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조비용은 188,730원/kgH₂으로 추정되었다. 한편 초기투자비가 현재 수준의 10% 수준으로 감소하고, STH 효율이 14%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 낙관적인 경우의 수소 제조비용은 26,961원/kgH₂으로 감소될 것으로 전망되었다.

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

| I | STH N | 10% | | 14% | |
|-----|----------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | | 5,000 hours | 20,000 hours | 5,000 hours | 20,000 hours |
| | | 100% | 474,216 | 377,459 | 338,706 |
| 50% | 237,108 | 188,730 | 169,363 | 134,807 | |
| 10% | 47,422 | 37,746 | 33,873 | 26,961 | |

Table 3의 결과는 PEC 수소 제조비용을 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. 결 론

본 논문에서는 국내 PEC 수소 생산시스템의 경제성 평가를 수행하였다. PEC 수소 생산시스템은 immersing type, window type, hybrid type 등으로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 immersing type PEC 수소 생산시스템에 대한 수소 제조비용을 산출하였다. PEC 수소 생산시스템의 수명주기 동안의 총비용과 연간 수소생산량에 근거하여 수소 제조비용을 산출하였으며, 이러한 수소 제조비용을 대리변수로 하여 PEC 수소 생산시스템의 경제성을 평가하였다.

국내 immersing type PEC 전지는 실제 태양광 조건에서 1%의 STH 효율, 300시간의 시스템 수명시간을 갖는 것을 기준으로 하여 수소 제조비용을 8,264,324원/kgH₂으로 추정하였다. 한편 2018년 DOE의 광전기화학 수소생산 목표치와 같이 STH 효율이 10%, 시스템 수명시간이 5,000시간으로 개선되는 경우의 수소 제조비용은 474,216원/kgH₂으로 추정되었다. 또한 초기 투자비가 현재 수준의 10%, STH 효율이 14%, 시스템 수명시간이 20,000시간으로 개선되는 낙관적인 경우의 수소 제조비용은 26,961원/kgH₂으로 감소될 것으로 전망되었다.

PEC 수소 생산시스템의 수소 제조비용을 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) 이원재, 이스와라, 김현주, 서선희, 이동윤, "태양광을 이용하여 수소를 제조하는 탄뎀형 광전기화학전지 모듈 개발", 제4회 수소에너지사업단 워크샵, 2008, 제주.
- 4) 조용기, 강용혁, 한반도 태양에너지 자원의 분석·평가 및 데이터 신뢰성 향상 연구, 2006, 한국에너지기술연구원.
- 5) 박찬석, 김규태, 최성호, 경제성공학, 영지문화사, 2004, p. 58.
- 6) 최봉하, 박수억, 이덕기, 김석기, 송진수, "Sunbelt 지역의 태양광발전 경제성분석", 신재생에너지, Vol. 2, No. 4, 2006, pp. 86-92.