

국내 광생물학적 수소생산의 경제성 평가

김봉진[†], 김종욱^{**}

*단국대학교 산업공학과, **한국에너지기술연구원 정책연구실

Economic Evaluation of Domestic Photobiological Hydrogen Production

BONGJIN GIM[†], JONGWOOK KIM^{**}

**Department of Industrial Engineering, Dankook Univ.
San 29 Anseo-dong, Cheonan 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 photobiological hydrogen production. We evaluate the economic feasibility of domestic photobiological hydrogen production utilizing green algae and cyanobacteria. In addition, we make some sensitivity analysis of hydrogen production prices by changing the values of input factors such as the price of a photo-bioreactor and the value of solar to hydrogen efficiency. The estimated hydrogen production price of the two-step indirect biophotolysis was 12,099won/kgH₂. It is expected that the hydrogen production price by the two-step indirect biophotolysis can be reduced to 2,143won/kgH₂ if the solar to hydrogen efficiency is increased to 10% and the price of a photo-bioreactor is decreased to \$25/m². The two-step indirect biophotolysis is evaluated as uneconomical at this time, and we need to enhance the solar to hydrogen efficiency and to reduce the prices of the photo-bioreactor and system facilities.

KEY WORDS : photobiological hydrogen production(광생물학적 수소 생산), green algae(녹조류), cyanobacteria(남조류), two-step indirect biophotolysis(이단계 간접 광합성 물 분해), hydrogen production price(수소 제조가격), economic evaluation(경제성 평가)

Nomenclature

I : initial capital cost of a hydrogen production system
 M : annual operating and maintenance cost of a hydrogen production system

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

- C : hydrogen production price of a hydrogen production system
- E : solar energy input for a hydrogen production system
- i : discount rate
- N : life period for economic analysis
- CR : capital recovery factor
- e : solar to hydrogen efficiency
- PSA : pressure swing absorption

1. 서 론

자연계에는 수소를 생산하는 생물이 많으며 크게 광합성 세균, 혐기성 세균, 녹조류(green algae), 남조류(cyanobacteria) 등으로 구분할 수 있다. 이 중에서 녹조류, 남조류, 광합성 세균 등은 수소생산을 위해 빛에너지를 필요로 하지만 혐기성 세균은 발효에 의해 성장 및 수소생산을 한다. 생물학적 수소생산 방법은 광생물학적(photobiological) 수소생산 방법, 광합성 세균 방법, 발효 방법, 생체모방(in vitro) 방법, 이러한 방법들을 여러 단계로 혼합한 방법 등으로 구분할 수 있다.

광생물학적 수소생산은 녹조류나 남조류 등의 생물을 이용하고 광합성 작용에 의해 이산화탄소와 물로부터 수소를 생산하는 방법이다. 광생물학적 수소생산에 관한 대부분의 선행연구들은 실내 실험실 설비나 100m²이하의 작은 실외 반응기를 이용하여 수행되었다. 광생물학적 수소생산에 대해서는 최근 30년 동안에 많은 연구가 수행되었으나, 광생물학적 수소생산의 경제적 타당성 분석을 다룬 연구는 별로 없는 편이다.

Benemann¹⁾은 1단계에서 연못을 이용하여 조류를 배양하고 2단계에서는 1단계에서 생산된 조류를 원료로 하여 암 발효(dark fermentation)와 간접 biophotolysis에 의해 수소생산을 하는 2단계 간접 biophotolysis 수소생산의 경제성을 평가하였다. 그는 평균 일조량이 5.83kWh/m²/day인 지역을 대상으로 태양-수소 변환효율이 10%로 개선된다는 낙관적인 가정 하에 광생물학적 수소생산비용을 \$10/MMBtu로 추정하였다.

Benemann²⁾은 international energy agency에 제출한 보고서에서 2단계 간접 biophotolysis 수소생산의 공정분석과 경제성분석을 자세하게 기술하였다. Amos³⁾는 chlamydomonas reinhardtii 녹조류를 이용한 광생물학적 수소 판매가격을 산출하였다. 그는 300kgH₂/day 및 600kgH₂/day 생산규모를 가진 광생물학적 분산형(on-site) 수소 생산 시스템에서의 수소 판매가격을 각기 \$13.53/kg와 \$11.96/kg으로 추정하였다.

본 논문에서는 경제성 평가에 많이 사용되고 있는 수명주기(life cycle)에 기초한 비용 분석방법을 사용하여 국내 2단계 간접 biophotolysis 수소생산의 경제성을 평가하고 수소 제조가격을 산출한다. 국내에서는 이러한 수소 생산시스템에 대한 실외에서의 본격적인 실증연구가 이루어진 적이 없기 때문에 본 연구는 국내 광생물학적 수소생산에 대한 예비 경제성 평가로 간주할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 광생물학적 수소생산 과정 및 방법을 기술한다. 3장에서는 광생물학적 수소생산시스템의 경제성분석 모형을 정립하고 수소 제조가격 산출방법을 논한다. 또한 국내 2단계 간접 biophotolysis 수소생산 방법에 의한 수소제조가격을 산출하고 경제성을 평가한다. 4장에서는 연구의 결과를 요약하고 향후 연구과제 등에 대하여 논의한다.

2. 광생물학적 수소생산 방법

2.1 직접 Biophotolysis

식물은 광합성 작용에 의해 물을 분해하여 산소와 양성자(H⁺)를 발생하며, 공기 중의 이산화탄소를 고정하여 고분자물질인 탄수화물을 생산한다. 식물에는 수소발생을 유도하는 효소인 hydrogenase가 없어서 양성자를 수소로 환원하지 못하지만, 수소를 생산하는 녹조류는 공기 중의 이산화탄소를 고정하여 탄수화물을 자체 내에 축적하고 동시에 hydrogenase를 통하여 양성자를 수소로 환원할 수 있다.

직접 biophotolysis 반응에서는 물이 분해되어

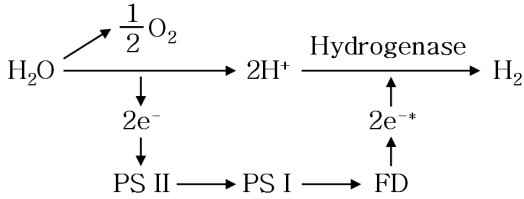


Fig. 1 Hydrogen production process by direct biophotolysis

발생한 전자(e⁻)가 microalgae 내의 두 광합성시스템인 PS II와 PS I을 거쳐 전자전달체인 ferredoxin(FD)을 통하여 수소발생 효소인 hydrogenase로 전달되며, Fig. 1에는 이러한 수소 생산 과정을 나타내었다.

빛에너지(photon)는 물이 분해되어 발생한 2개의 전자(e⁻)를 전위를 높은 상태(e^{-*})로 바꾸어 이를 PS II와 PS I을 거쳐서 ferredoxin을 통하여 hydrogenase로 전달한 후, 2개의 양성자를 수소로 환원하여 수소가스를 발생한다.

hydrogenase는 산소에 매우 민감하며 광합성에 의해 발생하는 산소 농도가 높아짐에 따라 수소 발생량은 감소하게 된다. 이러한 hydrogenase의 산소 민감성을 극복하기 위하여 산소를 효과적으로 제거하거나, 자연 상태에서 산소 민감도가 작은 hydrogenase를 발견하는 것이 필요하다. 또한 유전공학 등의 기술을 이용하여 산소에 민감하지 않은 녹조류의 돌연변이를 만드는 것도 유력한 방법이다. 그러나 산소 민감성을 해결하기 전에는 직접 biophotolysis에 의한 수소생산은 경제성이 없는 것으로 평가되고 있다.

2.2 간접 Biophotolysis

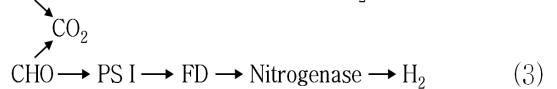
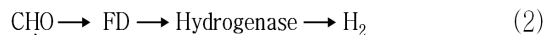
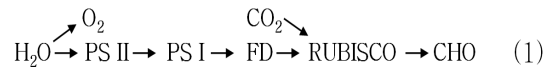
질소 고정력이 있는 남조류는 광합성에 의해 물을 분해하여 산소를 생산하고 이산화탄소를 고정하는 과정과 nitrogenase에 의해 질소고정을 하는 과정이 공간적 또는 시간적으로 분리되어 있다. 공간 분리는 정상적인 광합성을 수행하는 성장세포(vegetative cell)와 이산화탄소 및 수소를 발생하는 세포인 heterocysts에 의하여 이루어진다.

수소를 생산하는 남조류는 이산화탄소를 증가

물(intermediate)로 하여 산소와 수소를 동시에 생산한다. 남조류에 의한 수소 생산은 nitrogenase에 의해 이루어지며 한 달 이상의 장기간 동안에 질소가 없는 상태의 실험실과 소규모의 실외 반응기⁴⁾ 수준에서 수소와 산소를 동시에 생산하는 시스템이 개발된 바 있다. 그러나 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산은 질소 결핍조건에서 이루어지므로 실험실이 아닌 자연 상태에서 성립하기 어려우며, 다른 미생물과 비교하여 수소 생산량이 적은 단점을 갖고 있다.

2.3 2단계 간접 Biophotolysis

2단계 간접 biophotolysis는 1단계에서 연못을 이용하여 microalgae를 성장시키고, 2단계에서는 microalgae를 이동시켜 dark fermentation 과 간접 photolysis를 통하여 수소를 생산한다. 2단계 간접 biophotolysis는 다음과 같은 다단계 반응으로 구성된다.



1단계는 연못을 이용하여 microalgae를 성장시키고 축적하는 단계이다. 1단계에서는 식 (1)과 같이 RUBISCO 효소를 촉매로 하여 광합성에 의해 이산화탄소를 고정하여 탄수화물(CHO)로 변환시킨다. 2단계에서는 1단계에서 생산되어 농축된 algal slurry를 이동시켜 식 (2)와 같이 빛을 차단하고 공기가 없는 조건을 유지하여 hydrogenase 효소에 의해 수소를 발생시킨다. 그후, 식 (3)과 같이 다시 빛을 공급하여 PSI 만을 활성화하여 nitrogenase에 의해 수소를 발생시킨다.

2단계의 암 발효(dark fermentation) 과정은 일직선의 깊고 덮개를 덮은 연못에서 수행되며 축산 폐기물을 이용한 메탄발효 과정과 유사하게 진행

된다. 이러한 암 발효 과정에서 전체 수소생산량의 약 25%에 해당되는 수소가 발생되며, 배양물(culture)은 photo-bioreactor로 이동된 후 빛을 공급하면 간접 biophotolysis에 의해 나머지 수소가 생산된다. 수소 생산이 완료된 바이오매스는 다시 연못으로 이동하여 약 10번의 recycle을 거친 후에 폐기된다. 2단계에서 생산되는 수소를 포획하기 위해서는 폐쇄된 형태의 발효기(photo-bioreactor)가 필요하며, 연관(tubular) 형태의 발효기가 적합한 것으로 알려져 있다.

3. 광생물학적 수소생산의 경제성

3.1 이론적 배경

본 논문에서는 수명주기에 기초한 비용 분석방법을 이용하여 광생물학적 수소생산의 경제성분석을 수행한다. 광생물학적 수소생산의 경제성은 초기투자비, 연간운영비, 잔존가치, 시스템 수명, 할인율, 태양에너지, 태양-수소 효율 등에 의하여 결정된다. 잔존가치는 초기에 투입된 시설들을 수명이 끝난 시점에 처분하여 얻을 수 있는 수입이며, 본 논문에서는 이를 무시할 수 있는 것으로 가정하였다.

초기투자비(I) : 수소 생산시스템의 초기투자비는 연못 조성비용, 발효기 구입비용, 가스기기와 PSA(pressure swing absorption) 구입비용, 전기와 물 및 nutrient 공급장치 등의 시스템 비용, 건설 및 엔지니어링 비용 등의 부대비용 등으로 구성된다.

연간운영비(M) : 수소 생산시스템의 연간운영비는 전기요금, nutrient 비용, 인건비, 토지 임차료, 보수유지비, 기타운영비 등으로 구성된다. 전기요금은 PSA(pressure swing absorption), 펌프, 가스기기 등의 운영에 소요되는 전력비용이며 토지는 임차하여 사용하는 것으로 가정하였다.

시스템 수명(N) : 수소 생산시스템의 주요 설비는 발효기, 가스기기 및 PSA, 기타 시스템 기기 등으로 구성되며, 본 논문에서는 보수적인 입장에서 시스템 수명을 주요 설비들의 평균 수명의 추

정치인 10년으로 설정하였다.

할인율(i) : 경제성 분석에 사용되는 가격은 실제가격을 나타내는 경상가격과 인플레이션 효과를 제거한 불변가격(real price)이 있다. 불변 할인율은 인플레이션 효과가 제거된 할인율을 의미하며, 본 논문에서는 불변 할인율을 9%로 설정하고 불변가격을 기준으로 경제성 분석을 하였다.

태양에너지(E) : 각 지역의 기후조건에 따라 태양에너지 자원량은 다르다. 수평면 전일사량(B)은 광생물학적 수소 생산시스템의 경제성에 큰 영향을 주며, 수소 생산시스템에 투입되는 태양에너지 E는 생산면적과 B에 비례한다. 본 논문에서는 조용기와 강용혁⁴⁾의 연구결과를 이용하여 B를 3,077kcal/m²/day로 설정하였다.

태양-수소 변환효율(e) : 광생물학적 수소생산시스템의 기술수준을 나타내며, 수소 생산시스템에 의해 태양에너지를 수소에너지로 전환시키는 효율을 의미한다. 본 논문에서는 Akkerman et. al.⁶⁾의 연구결과를 감안하여 e를 1.5%로 설정하였다.

수소 생산시스템의 초기투자비 I가 사업 초기에 소요되는 1회성 비용인 반면에, 연간운영비 M은 매년 소요되는 비용이다. 잔존가치가 없는 경우에는 I에 다음과 같은 자본회수계수(capital recovery factor) CR을 곱하여 I를 연간 비용을 나타내는 자본비용으로 환산할 수 있다⁷⁾.

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

식 (4)를 보면 자본회수계수 CR은 i와 N에 의하여 결정되며, N이 무한대로 접근할 때 CR의 한계는 i가 된다. 불변가격 대신에 경상가격을 사용하여 경제성 분석을 하는 경우에 f를 연간 인플레이션율, 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 기

초한 자본비용을 산출할 수 있다. 한편 합리적인 수명주기 비용을 산출하기 위해서는 적절한 할인율 i 를 선택하는 것이 요구된다. 대다수의 선진국에서는 일반적인 에너지 사업에 대하여 4%~9%의 할인율을 사용하고 있으며 본 논문에서는 보수적인 입장에서 할인율을 9%로 설정하였다.

2단계 간접 biophotolysis 수소생산의 경제성에 크게 영향을 주는 요인은 수평면 전일사량 (horizontal insolation)이다. 수평면 전일사량 $3,077\text{kcal/m}^2/\text{day}$ 을 전기에너지로 환산하면 $3.59\text{kWh/m}^2/\text{day}$ 이며, 이러한 에너지는 Benemann¹⁾의 연구에서 사용한 $5.83\text{kWh/m}^2/\text{day}$ 의 61.4%에 해당된다. 한편 광생물학적 수소생산의 태양-수소 최대 변환효율은 10%로 알려져 있으며, 모든 조건이 최적화된 실험실에서 녹조류의 인공빛-수소 변환효율은 10%를 초과하는 경우도 있으나 실외 조건에서의 실제 태양-수소 효율은 상당히 낮은 실정이다⁶⁾.

광생물학적 수소 생산시스템의 microalgae 생산 면적을 A 로 표기하자. 그러면 광생물학적 수소 생산시스템에 투입되는 연간 태양에너지 E 는 microalgae 생산 면적 A 와 수평면 전일사량 B 에 비례하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

수소 생산시스템의 연간 수소생산량 P 는 E 에 태양-수소 변환효율인 e 와 연간 이용률 ρ 를 곱하여 얻을 수 있다. 수소 생산시스템의 연간 이용률 ρ 는 Benemann²⁾의 연구결과를 감안하여 90%로 설정하였으며, P 는 다음과 같이 표현된다.

$$P = E \times e \times \rho \quad (7)$$

광생물학적 수소 생산시스템의 수소 제조가격 C 는 자본비용과 연간 운영비로 이루어지는 총 연간비용을 연간 수소 생산량으로 나누어 얻을 수 있으며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C = (M + I \times CR) / P \quad (8)$$

이러한 수소 제조가격은 투자한 자본에 대하여 매년 할인율만큼의 수익률을 얻을 수 있는 수소 제조가격을 나타낸다. 광생물학적 수소 생산시스템의 경제성은 이러한 수소 제조가격 C 를 대리변수로 하여 파악할 수 있다. C 를 시장에서의 적정 수소 판매가격과 비교하여 C 가 적정 수소 판매가격보다 저렴하면 경제성이 있고, 그렇지 않으면 경제성이 없는 것으로 평가할 수 있다.

3.2 2단계 간접 Biophotolysis의 수소 제조가격

광생물학적 수소생산 방법 중에서 1단계 직접 biophotolysis에 의한 수소생산은 산소 민감성 등의 문제가 있으며, 1단계 간접 biophotolysis에 의한 수소생산은 수소 생산량이 작아서 현 시점에서는 이들에 대한 경제성을 평가하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 현 시점에서 상대적으로 경제성이 우수한 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템을 대상으로 하여 국내 광생물학적 수소 생산에 대한 수소 제조가격을 산출하였다.

2단계 간접 biophotolysis 수소생산의 경제성은 수소생산시스템의 생산규모에 의하여 크게 좌우된다. 일반적으로 수소생산시스템의 생산규모가 커질수록 규모의 경제(economy of scale) 효과에 의하여 수소 제조가격이 낮아지며, 현재 실외에서의 광생물학적 수소생산의 태양-수소 변환효율이 낮은 점을 고려하여 소규모 수소충전소에 적합한 2단계 간접 biophotolysis 수소생산시스템을 연구 대상으로 하였다.

2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템의 연못은 microalgae의 성장을 위한 open pond, 분리 및 배양을 위한 inoculum pond, 농축과 정착을 위한 settling pond 등으로 구성된다. Open pond는 10ha 규모의 연못 2개로 이루어지고 inoculum pond와 settling pond는 각기 1ha 규모의 연못 2개로 구성되며, 발효기의 총 규모는 2ha로서 전체 시스템의 필요 면적은 30ha인 수소 생산시스템을 기준하였다.

식 (6)에 의해 20ha(200,000m²)의 open pond에

Table 1 Capital cost of H₂ production by two stage indirect biophotolysis

| 구 분 | | 초기 투자비(I) | |
|------------|----------|-----------|------------|
| | | 천불(1998년) | 백만원(2007년) |
| 연못 | Open | 68 | 94.4 |
| | Inoculum | 24 | 33.3 |
| | Settling | 24 | 33.3 |
| | 소계 | 116 | 161.0 |
| 발효기 | | 1,000 | 1,388.4 |
| 가스기기 및 PSA | | 580 | 724.9 |
| 기타 시스템 | | 430 | 597.0 |
| 부대 비용 | | 744 | 1,033.0 |
| 합 계 | | 2,870 | 3,904 |

주) 가스기기 및 PSA는 2003년 가격 기준이고, 1\$=1,000 원을 기준

투입되는 연간 태양에너지는 약 224.6Tcal이다. 그러면 식 (7)에 의해 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템은 연간 약 3.032Tcal의 수소를 생산할 수 있으며, 이를 대기압 25℃에서의 수소의 저위 발열량인 120MJ/kg으로 환산하면 연간 수소생산량은 105,763kg이다.

국내에서는 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산 시스템에 의해 수소를 생산한 경험이 거의 없으므로 주로 Benemann²⁾과 Amos³⁾의 연구에서 사용한 시스템 비용에 근거하여 수소 생산시스템의 초기투자비 I를 추정하였고 이를 Table 1에 수록하였다.

Table 1을 보면 2단계 간접 biophotolysis의 초기투자비 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목은 발효기 비용이다. 발효기 가격은 폴리에틸렌 필름을 사용하는 경우에는 \$1/m² 이하이고, 플라스틱 유리나 유리 등을 사용하는 경우에는 \$100/m²로 큰 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 발효기 가격을 중간가격인 \$50/m²로 설정하였

으며 발효기 면적인 2ha를 곱하여 전체 발효기 비용을 \$1,000,000로 추정하였다. 연못조성비의 기준은 Benemann²⁾의 연구에서 사용한 1998년 가격지수를 기준하여 open pond는 \$34,000/ha, inoculum pond와 settling pond는 각각 \$12,000/ha를 기준하였다.

가스기기와 PSA는 이산화탄소를 recycle하고 수소를 수집, 고순도화, 압축하는 데 사용되며 Amos³⁾의 연구에서 사용한 \$1,600/kgH₂/day를 기준하여 \$580,000으로 추정하였다. 기타 시스템 비용과 부대비용은 Benemann²⁾의 연구를 기준하였으며, 기타 시스템 비용은 혐기소화 시스템, 물의 저장 및 분배, 배수 및 도로, 전기 및 기계설비 등에 소요되는 비용이다. 또한 부대비용은 엔지니어링, 설계, 건설 등에 소요되는 비용으로 직접 초기 투자비의 35%에 해당하는 \$744,000으로 추정하였다. 여기서 직접 초기투자비는 연못 조성비, 발효기 비용, 가스기기 및 PSA 비용, 기타 시스템 비용 등의 합으로 구성된다. 따라서 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템의 초기투자비를 \$2,870,000으로 추정하였다.

한편 Benemann²⁾의 연구에서 사용한 금액은 1998년을 기준하였으므로 이러한 금액을 기준시점인 2007년의 가격으로 환산하기 위하여 미국의 생산자물가지수(PPD)를 사용하였다. 1998년의 생산자물가지수를 100으로 기준하면 2007년의 생산자물가지수는 138.84로, 미국의 2007년 생산자물가는 1998년의 생산자물가와 비교하여 평균 1.3884배인 것을 의미한다. 가스기기 및 PSA 비용은 2003년 가격을 사용하였으며, 이러한 금액을 생산자물가지수를 이용하여 2007년 가격으로 환산하면 1.2498배가 된다. 이러한 기준에 따라 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템의 초기투자비를 2007년 가격으로 환산하여 약 39억원으로 추정하였다.

2단계 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산시스템의 초기투자비를 자본비용으로 환산하기 위해서는 I에 자본회수계수 CR을 곱하여 산출한다. 식 (4)에 의해 N = 10년, i = 9%인 경우에 CR은

Table 2 Annual operating cost and production price of H₂ by two stage indirect biophotolysis

| 구 분 | 연간비용 (백만원) | 수소제조가격 (원/kgH ₂) | 구성비 (%) |
|----------------|---------------|---------------------------------|------------|
| 1. 자본비용 | 608.2 | 5,751 | 47.53 |
| - 연못 | 25.1 | 237 | 1.96 |
| - 발효기 | 216.3 | 2,046 | 16.90 |
| - 가스기기/PS A | 112.9 | 1,067 | 8.82 |
| - 기타 시스템 | 93.0 | 879 | 7.27 |
| - 부대비용 | 160.9 | 1,521 | 12.57 |
| 2. 연간 운영비 | 671.4 | 6,348 | 52.47 |
| - 전기비 | 43.6 | 412 | 3.41 |
| - nutrient 비용 | 45 | 426 | 3.52 |
| - 인건비 | 90 | 851 | 7.03 |
| - 토지 임차료 | 216 | 2,042 | 16.88 |
| - 보수 유지비 | 146.4 | 1,384 | 11.44 |
| - 기타 운영비 | 130.4 | 1,233 | 10.19 |
| 3. 연간 총비용 | 1,279.6 | 12,099 | 100.00 |

0.1558이며 2단계 간접 biophotolysis의 자본비용은 연간 약 608백만원이다. 수소 생산시스템의 연간 총비용은 자본비용과 연간운영비(M)의 합이며 Table 2에는 2단계 간접 biophotolysis 수소 생산시스템의 연간 총비용과 수소 제조가격을 수록하였다.

연간 운영비 중에서 전기는 주로 연못 운영을 위한 혼합 및 펌프, PSA 등에 소요되며, Amos³⁾의 연구를 기준하여 \$0.33/kgH₂를 사용하였다. 이러한 기준 하에 연간 전기비를 2007년 가격으로 환산하면 약 43.6백만원으로 추정된다. 또한 인건비는 연봉이 3천만원인 직원 3명을 기준하여 연간 9천만 원으로 산정하였다.

보수유지비는 Eggeman⁸⁾의 추정치를 사용하여 초기투자비의 3.75%인 128.6백만원, 기타운영비는

Table 3 H₂ production prices by solar conversion efficiency and bioreactor price

unit: won/kgH₂

| 태양-수소 변환 효율 | 발효기 가격 | |
|----------------|---------------------|---------------------|
| | \$25/m ² | \$50/m ² |
| 5 % | 3,656 | 4,259 |
| 10 % | 2,143 | 2,444 |

초기투자비의 3.34%인 114.5백만원으로 추정하였다. Nutrient 비용은 Benemann²⁾의 연구를 감안하여 인건비의 50% 수준인 연간 45백만원으로 추정하였다. 수소 생산시스템의 토지는 8,000원/m²을 기준하여 연간이자율 9%로 임차하여 사용하는 것으로 가정하였다. 따라서 토지임차료는 연간 720원/m²이며 연간 216백만원을 토지임차료로 지불하는 것으로 추정하였다.

2단계 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산시스템의 연간 운영비는 671백만원으로 추정되었으며, 연간 총비용은 약 1,280백만 원으로 추정되었다. 수소 제조가격은 식 (8)에 의해 연간 총비용을 연간 수소생산량인 105,763kg으로 나누어 얻을 수 있으며 2단계 간접 biophotolysis에 의한 국내 수소 제조가격은 12,099원/kg으로 추정된다.

3.3 민감도 분석

2단계 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산시스템의 수소 제조가격에 큰 영향을 줄 수 있는 요소로는 태양-수소 변환효율, 발효기 가격, 수명 기간, 할인율 등이다. 이 중에서 수명기간과 할인율은 보수적으로 추정하였고 수소 제조가격에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 민감도 분석대상에서 제외하고 태양-수소 변환효율과 발효기 가격을 대상으로 하여 민감도 분석을 수행하였다. 태양-수소 변환효율은 5%, 10%인 경우와 발효기 가격은 \$25/m², \$50/m²인 경우를 조합하여 수소 제조가격을 추정한 결과를 Table 3에 수록하였다.

태양-수소 변환효율이 향상되는 경우에는 가스

기기 및 PSA의 초기투자비가 1배 증가할 때마다 규모의 경제 효과에 의하여 효율 향상치의 0.6배가 증가하는 것으로 가정하였다. 예를 들어, 태양-수소 변환효율이 1.5%에서 5%와 10%로 향상되면 가스기기 및 PSA의 초기투자비는 각기 효율 향상치의 0.6배인 2배와 4배로 증가하는 것으로 추정하였다. 또한 초기투자비가 증가하면 이에 비례하여 부대비용, 보수유지비, 기타 운영비가 증가하는 것으로 설정하였다.

Table 3을 보면 발효기의 가격이 \$50/m²으로 고정되어 있고 태양-수소 변환효율이 각기 5%와 10%로 향상되는 경우의 수소 제조가격은 4,259원/kgH₂과 2,444원/kgH₂인 것으로 추정되었다. 또한 태양-수소 변환 효율이 10%로 개선되고 발효기 가격이 \$25/m²로 감소되는 낙관적인 경우의 수소 제조가격은 2,143원/kgH₂으로 감소될 것으로 전망되었다.

Table 3의 결과는 광생물학적 수소 제조가격을 경쟁력이 있는 수준으로 낮추기 위해서는 기술개발에 의하여 태양-수소 변환효율을 획기적으로 낮추는 것이 최우선 과제임을 시사하고 있다. 또한 광생물학적 수소 생산시스템을 실용화하기 위해서는 발효기와 기타 시스템 등의 비용을 기술개발과 대량생산에 의하여 크게 낮추는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 광생물학적 수소생산의 경제성 평가를 수행하였다. 현 시점에서는 1단계 직접 및 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산방법의 경제성이 아주 낮으며, 2단계 간접 biophotolysis에 의해 연간 106톤의 수소를 생산하는 시스템에 대한 경제성을 평가하였다. 수소 생산시스템의 수명주기 동안의 총비용과 연간 수소생산량에 근거하여 수소 제조가격을 산출하였으며, 이러한 수소 제조가격을 대리변수로 하여 수소 생산시스템의 경제성을 평가하였다.

2단계 간접 biophotolysis에 의한 수소 생산시스템은 분산형 수소생산에 적합한 소형 생산시스

템으로서 태양-수소 변환효율이 1.5%이고 발효기 가격이 \$50/m²인 기준 하에 수소 제조가격을 12,099원/kgH₂으로 추정하였다. 이러한 수소 제조가격은 상당히 비싼 편이며 현 시점에서는 경제성이 상당히 부족한 것으로 평가되었다. 광생물학적 수소 생산시스템의 수소 제조가격을 경쟁력이 있는 수준으로 낮추기 위해서는 기술개발에 의하여 태양-수소 변환효율을 획기적으로 낮추는 것이 최우선 과제이며, 아울러 발효기와 기타 시스템 등의 비용을 기술개발과 대량생산에 의하여 낮추는 것이 필요하다.

광생물학적 수소 생산시스템에서는 부산물을 이용하여 약품, 비료, 식품 등을 생산되며 이러한 부산물의 판매수입이 전체 시스템의 총 수입에 큰 영향을 줄 수 있다. 또한 향후에는 기후변화협약 등의 환경문제로 인하여 광생물학적 수소생산에 대한 보조금 지급 등의 인센티브가 주어질 수 있다. 본 논문에서는 이러한 측면을 고려하지 않았으므로 향후에는 광생물학적 수소생산에 의한 수소 제조가격이 현재보다는 낮아질 수 있을 것으로 기대된다. 또한 광생물학적 수소 생산시스템의 기술 발전에 따라 동태적으로 수소 생산시스템의 경제성을 평가하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) J.R. Benemann, 1997, "Feasibility Analysis of Photobiological Hydrogen Production", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22, pp. 979-987.
- 2) J.R. Benemann, 1998, Process Analysis and Economics of Biophotolysis of Water, IEA/H₂/10/TR2-98.
- 3) W.A. Amos, 2004, Updated Cost Analysis of

- Photobiological Hydrogen Production from *Chlamydomonas reinhardtii* Green Algae, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A.
- 4) I.K. Kapdan, and F. Kargi, 2006, "Bio-hydrogen Production from Waste Materials", *Enzyme Microbial. Technol.*, Vol. 38, pp. 569-582.
 - 5) 조용기, 강용혁, 한반도 태양에너지 자원의 분석·평가 및 데이터 신뢰성 향상 연구, 한국에너지기술연구원, 2006.
 - 6) I. Akkerman, M. Janssen, J. Rocha, and R.H. Wijffels, 2002, "Photobiological Hydrogen Production: Photochemical Efficiency and Bioreactor Design", *Int. J. of Hydrogen Energy*, Vol. 27, pp. 1195-1208.
 - 7) 박찬석, 김규태, 최성호, 경제성공학, 영지문화사, 2004, p. 58.
 - 8) T. Eggeman, 2004, *Boundary Analysis for H₂ Production by Fermentation*, Neoterics International Inc., U.S.A..