

## 발효에 의한 수소생산의 경제성 평가

김봉진<sup>†</sup>, 김종욱<sup>\*\*</sup>, 박상용<sup>\*\*</sup>

\*단국대학교 산업공학과, \*\*한국에너지기술연구원 정책연구센터

## Economic Evaluation of Hydrogen Production by Fermentation

Bongjin Gim<sup>†</sup>, Jong-Wook Kim<sup>\*\*</sup>, Sang Yong Park<sup>\*\*</sup>

*\*Dankook University, Department of Industrial Engineering, 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 hydrogen production by fermentation. We evaluate the economic feasibility of domestic hydrogen production by fermentation utilizing glucose and waste water sludge in terms of hydrogen production prices. In addition, we make some sensitivity analysis of hydrogen prices by changing the values of input factors such as the price of glucose, the capital cost of the hydrogen production system, and the hydrogen production yields.

The estimated hydrogen prices of the two-step dark-light hydrogen production by fermentation utilizing glucose was 5,347won/kgH<sub>2</sub>, and the single-step hydrogen production by anaerobic fermentation utilizing waste water sludge was 4,255won/kgH<sub>2</sub>, respectively. It is expected that the hydrogen production price by anaerobic fermentation can be reduced if we produce methane or hydrogen utilizing by-products such as alcohols and organic acids, or the government imposes some legal regulations on the treatment of waste water sludge.

**KEY WORDS** : hydrogen production(수소 생산), fermentation(발효), glucose(포도당), waste water sludge(하수 슬러지), hydrogen price(수소 가격), economic evaluation(경제성 평가)

### Nomenclature

$C_t$  : annual operating cost of a hydrogen production system at time t

$R_t$  : annual revenue income of a hydrogen production system at time t

$O_t$  : other sales revenue income of a hydrogen production system at time t

$I$  : first capital cost of a hydrogen production system

$S$  : salvage value of a hydrogen production

<sup>†</sup>Corresponding author : bjgim@dankook.ac.kr

- system
- $NPV$  : net present value for a hydrogen production system
- $\beta_2$  : capital recovery factor
- $P$  : hydrogen price of a hydrogen production system
- $i$  : discount rate
- $N$  : life period for economic analysis
- AE : annual equivalent
- PSA : pressure swing absorption

## 1. 서 론

수소는 사용 시에 환경오염이 발생하지 않는 청정에너지이며 차세대의 에너지로 사용하기 위하여 수소에너지의 제조, 저장, 이용 등의 각 분야에서 많은 연구개발이 진행되고 있다. 수소는 화석연료, 원자력, 태양광, 풍력, 바이오매스, 생물 등의 다양한 에너지원으로부터 얻을 수 있다. 현재는 대부분의 수소를 화석연료를 이용하여 생산하고 있으며 풍력, 태양, 바이오매스, 생물 등은 고갈되지 않는 재생에너지로 향후 유력한 수소 생산 원료로 대두되고 있다.

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

발효(fermentation)에 의해 포도당 등의 유기물로부터 수소와 유기산을 생산하는 방법은 유기물로부터 수소로의 전환효율은 낮지만 수소생산 속도가 빨라서 생물학적 수소생산 방법 중에서 상용화에 가장 근접한 방법으로 전망되고 있다. 발효에 의한 수소생산의 경제성을 다룬 연구는 많지 않은 편이다. 최근에 Vrije and Classeen<sup>(1)</sup>은 목질계(lignocellulosic) 바이오매스를 원료로 하여 발효에 의해 수소생산을 하는 425 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/hr 생산규모의

수소 생산시스템에 대한 경제성 분석을 수행하였다. 그들은 1단계에서 dark fermentation을 하고 2단계에서 photo fermentation을 하는 2단계 수소 생산시스템을 기준하였으며, 목질계 바이오매스의 원료비가 소요되지 않는다는 전제 하에 수소 생산가격을 \$2.74/kg으로 추정하였다. Tanisho<sup>(2)</sup>는 사탕수수를 원료로 하여 발효에 의해 수소 생산을 하는 대안의 수소 생산가격을 \$0.48/Nm<sup>3</sup>로 산출하였다. 그는 사탕수수를 원료로 하여 수소 생산을 하는 대안과 에탄올을 생산하는 대안의 경제성을 비교분석하였으며, 두 대안의 경제성이 근접한 것으로 평가하였다. 그러나 이 연구는 plant 운영과 투자비에 대한 자세한 설명이 없어서 수소 생산가격의 산출근거가 빈약한 것으로 사료된다. Eggeman<sup>(3)</sup>은 사탕수수를 원료로 하여 혐기발효와 광합성발효의 2단계 발효에 의해 1일 수소생산량이 120ton인 수소 생산시스템의 수소 제조가격을 \$2.08/kg으로 추정하였다. 하지만 그는 1mole의 포도당으로부터 10mole의 수소를 얻을 수 있고, 포도당의 가격을 \$0.05/lb로 가정하여 시장가격보다 훨씬 저렴한 가격에 근거한 best scenario에 의한 경제성 평가를 하였다. 오유관 외<sup>(4)</sup>는 하수 슬러지를 이용하여 1단계에서 혐기발효 수소생산을 하고, 2단계에서는 1단계에서 생성된 유기산들을 사용하여 메탄 생산을 하는 2단계 수소/메탄 생산시스템의 수소 생산가격을 \$0.26/Nm<sup>3</sup>로 추정하였다.

본 논문에서는 일반적으로 경제성 평가에 많이 사용되고 있는 수명주기(life cycle)에 기초한 편익 및 비용 분석방법을 사용하여 발효에 의한 국내 수소생산의 경제성을 평가하고 수소 제조가격을 산출하였다. 국내에서는 목질계 바이오매스의 수집비용을 포함한 원료비가 상당히 소요되므로 목질계 바이오매스를 원료로 하여 발효에 의해 수소를 생산하는 것은 비경제적인 것으로 판단되어 고려 대상에서 제외하였다. 본 논문에서는 주성분이 포도당인 원당을 원료로 하여 발효에 의해 수소를 생산하는 대안과 하수 슬러지를 이용하여 혐기발

효 수소생산을 하는 대안에 대한 경제성 평가를 수행하였다.

## 2. 발효에 의한 수소생산의 경제성분석

### 2.1 경제성모형의 정립

본 논문에서는 수명주기에 기초한 편익 및 비용 분석방법을 이용하여 발효에 의한 수소생산의 경제성분석을 수행한다. 수소생산의 경제성은 수소 판매수입 및 부생물의 판매수입 등으로 구성되는 연간 수입과 연간 운영비, 초기투자비, 잔존가치 등에 의하여 결정된다.

Fig. 1에 제시된 바와 같이 경제성 분석기간은 N년으로 설정한다. 수소 생산시스템의 경제성 분석모형의 현금흐름은 시점 0에서의 초기투자비 I와 시점 t에서의 연간 판매수입 Rt와 연간운영비 Ct, for t= 1, 2, ..., N, 그리고 시점 N에서의 수소 생산시스템의 잔존가치 S 등으로 구성된다.

할인율 i가 연도에 상관없이 일정하다고 가정하면, 시점 0에서 수소 생산시스템의 순현재가를 나타내는 NPV는 식 (1)과 같다. 참고로 음수는 지출을 의미한다.

$$NPV = -I + \frac{S}{(1+i)^N} + \sum_{t=1}^N \frac{R(t) - C(t)}{(1+i)^t} \quad (1)$$

발효에 의한 수소 생산시스템의 초기투자비를

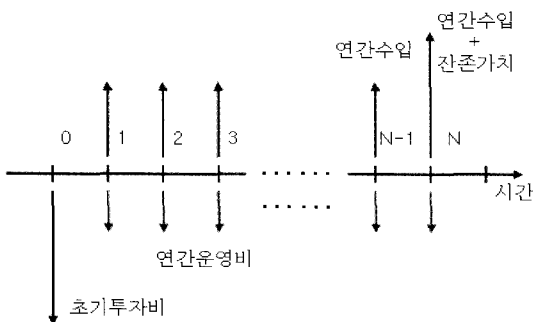


Fig. 1 Cash flow diagram of H<sub>2</sub> production by fermentation

나타내는 I는 발효기, 컴프레서, 고순도 정제장치인 PSA(pressure swing absorption) 등의 장비 구입비용과 건설 및 엔지니어링 비용 등의 모든 부대비용을 포함한다. 또한 잔존가치 S는 초기에 투자된 장비들을 수명기간인 N년 후에 처분하여 얻을 수 있는 수입을 나타낸다.

전체 시스템의 연간 판매수입은 수소에너지를 판매하여 얻는 수입과 기타 판매수입으로 구성된다. Qt를 시점 t의 연간 수소생산량, Ot를 시점 t의 기타 판매 수입, P를 단위당 수소 판매가격으로 표기하자. 그러면, 시점 t에서의 연간 수소 판매수입을 나타내는 Rt는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$R_t = P Q_t + O_t \quad (2)$$

수소 생산시스템의 초기투자비가 사업 초기에 소요되는 1회성 비용인 반면에, 수소 생산시스템의 시점 t에서의 연간운영비(operating and maintenance cost)를 나타내는 Ct는 매년 소요되는 비용이다. 발효에 의한 수소 생산시스템의 연간 운영비는 원료비, 전력비, nutrient 비용, 인건비, 보수유지비, 부지 임대비, 기타 운영비 등으로 구성된다.

합리적인 수명주기 비용을 산출하기 위해서는 적절한 할인율 i를 선택하는 것이 요구된다. 본 논문에서는 모든 가격을 인플레이션 효과가 제거된 불변가격(real price)을 사용한다. 불변 할인율은 인플레이션 효과가 제거된 할인율을 의미한다. 대다수의 선진국에서는 4%~9%의 불변 할인율을 사용하고 있으며 본 논문에서는 불변 할인율을 8%로 설정하였다.

수소 생산시스템의 연간 판매수입과 연간운영비가 불변가격을 기준하여 매년 동일한 경우에 식 (1)은 다음과 같이 간략하게 표현될 수 있다.

$$NPV = -I + \frac{S}{(1+i)^N} + (R - C)\beta_1 \quad (3)$$

여기서,

$$\beta_1 = \sum_{t=1}^N \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{\{(1+i)^N - 1\}}{i(1+i)^N} \quad (4)$$

참고로 연간 판매수입과 연간운영비가 동일한 경우에는 Rt를 R로, Qt를 Q로, Ct를 C로, Ot를 O 등으로 표시할 수 있다. 또한  $\beta_1$ 은 현재가치 계수로서 매년 동일한 금액이 지불될 때, 이러한 동일 금액을 현재가치로 환산하는 계수를 나타낸다.

수소 생산시스템의 순현재가를 나타내는 식 (3)의 NPV가 0 이상인 경우에는 경제성이 있고, NPV가 음수인 경우에는 경제성이 없는 것으로 평가할 수 있다. 또한 NPV가 클수록 우수한 대안으로 평가할 수 있다.

## 2.2 수소 제조가격

본 논문에서는 발효에 의한 수소 생산시스템의 수소 제조가격을 세금을 제외하고 NPV가 0이 되는 가격으로 정의한다. 이러한 수소 제조가격은 혐기발효 수소 생산시스템의 입장에서 투자한 자본에 대하여 할인율만큼의 수익을 얻을 수 있는 수소 제조가격이다.

수소 생산시스템의 수소 제조가격을 산출하기 위하여 수명기간동안의 수소가격, 연간 수소생산량, 연간 운영비 등이 매년 일정한 것으로 가정한다. 수소 생산시스템의 현재가인 NPV를 연간 비용으로 환산한 AE(annual equivalent)는 다음과 같다.<sup>(5)</sup>

$$AE = NPV \beta_2 \quad (5)$$

$$\text{여기서 } \beta_2 = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}$$

$\beta_2$ 는  $\beta_1$ 의 역수로서 시점 0에서의 초기투자비를 연간비용인 자본비용으로 환산해 주는 자본회수계수(capital recovery factor)이다. 식 (3)의 양변에  $\beta_2$ 를 곱하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$AE = \left\{ -I + \frac{S}{(1+i)^N} \right\} \beta_2 + (PQ + O - C)$$

$$= -(I - S)\beta_2 - iS - C + PQ + O \quad (6)$$

수소 생산시스템의 수소 제조가격을 나타내는 P는 NPV 또는 AE를 0으로 만드는 값이므로 P는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

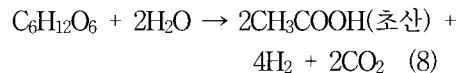
$$P = \frac{(I - S)\beta_2 + iS + C - O}{Q} \quad (7)$$

여기서  $(I - S)\beta_2 + iS$ 는 수소 생산시스템의 자본비용을 나타내며, 발효에 의한 수소 생산시스템의 경제성은 이러한 수소 제조가격 P를 대리변수로 하여 파악할 수 있다.

## 3. 포도당을 이용한 수소생산

### 3.1 암발효/광발효 2단계 수소생산

수소를 생산하는 세균 중에는 빛이 없는 혐기발효 조건에서 유기물을 이용하여 배양액에 각종 유기산과 유기용매를 축적하고, 동시에 수소와 이산화탄소를 발생하는 종류가 있다. Clostridium 속의 세균은 가장 잘 알려진 혐기발효 수소생성 세균이며, 포도당(C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, glucose) 1분자를 사용하여 혐기 세균이 갖는 자체 발효 mechanism에 의해 2분자의 초산(acetic acid)과 4분자의 수소를 생성하며, 화학 반응식은 다음과 같다.



포도당의 혐기발효에 의해 생성되는 수소양은 어떠한 유기산이 생성되는가에 따라 차이가 있으며, 초산 대신에 낙산(butyric acid)이 생성되는 경우에는 2분자의 수소가 발생한다. 광합성 세균은 대사적인 다양성을 갖고 있어서 산소의 유무에 관계없이 모두 성장할 수 있고, 광합성 작용으로 수소를 생산할 수 있다. 광합성 세균을 이용한 수소 생산은 단당류, 이당류, 유기산들을 모두 배양 기

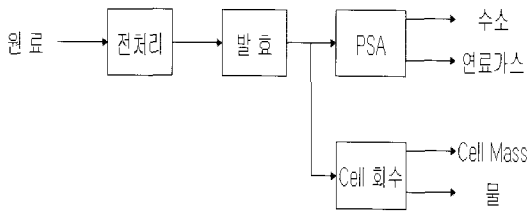
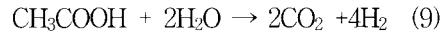


Fig. 2 Conceptual diagram of H<sub>2</sub> production by two stage fermentation

질로 사용할 수 있다. 광합성 세균 중에서 대표적으로 이용되는 홍색 비유황 세균(purple non-sulfur bacteria)은 유기산으로부터 최대 8분자의 수소를 생산할 수 있다.

혐기 발효 세균에 의한 수소생산량은 포도당 1 분자로부터 최대 4분자이지만, 동시에 생성되는 초산이나 낙산 등과 같은 유기산을 홍색 비유황 세균 등의 광합성 세균을 이용하여 발효시키면 다시 수소를 생산할 수 있다. 초산의 광합성 발효에

따른 화학 반응식은 다음과 같다.



1단계에서는 혐기발효에 의해 수소생산을 하고, 2단계에서는 광합성 발효에 의하여 유기산을 수소로 전환하는 2단계 발효 수소생산에 의하여 포도당 1분자로부터 최대 12 분자의 수소를 생산할 수 있다. Fig. 2에는 포도당을 원료로 하여 혐기발효 및 광발효의 2단계 발효에 의해 수소생산을 하는 공정을 나타냈다.

### 3.2 경제성 분석

수소 생산시스템의 경제성분석을 위해서는 적절한 분석기간 N의 선정이 필요하다. 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 주요 제조기기는 발효기, PSA, 컴프레서 등으로 구성되며, 본 논문에서는 N을 수소 제조장비들의 평균 수명기간의 추정치인 15년으로 설정하였다. 한편 N = 15년, i = 8%인 경우에 β<sub>1</sub> = 8.5595, β<sub>2</sub> = 0.1168이 된다.

2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 초기투자비는 크게 수소 제조기기 구입비용과 부대비용으로 구분할 수 있으며, 본 논문에서는 Eggeman(2004)의 연구에서 기준한 120 tonH<sub>2</sub>/day 수소 생산시스템의 초기투자비를 기준하여 추정하였다. Eggeman의 연구에서 사용한 금액은 2000년을 기준하였으며, 이를 미국 생산자물가지수를 이용하여 2006년

Table 1 Capital cost of H<sub>2</sub> production by two stage fermentation

구 분		초기 투자비	
		백만불(2000년)	억원(2006년)
제조 장비비	발효기	10.0	114.2
	컴프레서	11.3	129.1
	PSA	10.9	124.6
	기타 장비	22.2	253.7
	소계	54.4	621.6
부대 비용	엔지니어링/설계비용	4.4	50.3
	건설 비용	5.4	61.7
	기타비용	9.4	107.4
	소계	19.2	219.4
합계		73.6	841.0

주) 미국화폐는 2000년 기준이고, 한국화폐는 2006년과 1\$=920원을 기준

Table 2 Input and output of H<sub>2</sub> production by two stage fermentation

구 분	1시간	1년
수소 생산량	3,514kg	24,626ton
연료가스 생산량	45,889kg	321,590ton
원료(포도당) 투입량	52,802kg	370,036ton
전기 투입량	21,599kWh	151,365MWh
증기 투입량	84ton	588,672ton

Table 3 Operating cost and production price of H<sub>2</sub> by two stage fermentation

구 분	연간 비용 (억원)	수소 제조 가격(원/kgH <sub>2</sub> )	구성비(%)
1. 자본비용	98.21	398	7.46
- 발효기	13.34	54	1.01
- 컴프레서	15.08	61	1.15
- P S A	14.55	59	1.11
- 기타장비	29.63	120	2.25
- 부대비용	25.61	104	1.94
2. 연간 운영비	1,245.75	5,059	94.60
- 원료	976.90	3,967	74.18
- 전기	121.09	492	9.20
- 증기	75.11	305	5.70
- 인건비	11.73	48	0.89
- 보수유지비	32.22	131	2.45
- 기타 경비	28.70	116	2.18
3. 연료가스 판매 수입	- 27.11	- 110	-2.06
합 계	1,316.85	5,347	100.00

주) nutrient 비용은 제외

가격으로 환산하였다. 2000년의 생산자물가지수를 100으로 기준한 미국의 2006년 생산자물가지수는 124.2로, 미국의 2006년 생산자물가는 2000년과 비교하여 1.242배인 것을 의미한다.

수소 생산시스템의 수명기간으로 설정한 15년 후의 수소 생산시스템의 잔존가치는 없는 것으로 가정하였다. Table 1에는 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 항목별 초기 투자비를 수록하였다.

Eggeman은 포도당 1분자로부터 10분자의 수소를 생산할 수 있는 것으로 가정하였으며, 이러한 수소 생산수율은 미국의 DOE(Department of Energy)가 2015년 이후에 달성하고자 하는 기술 준비 목표이다.<sup>(6)</sup> 그러나 현재의 기술수준은 실험

실을 기준으로 2단계 발효에 의해 포도당 1분자로부터 약 7분자의 수소를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

본 논문에서는 포도당 1분자로부터 7분자의 수소를 생산할 수 있는 것으로 가정하고, 수소 생산시스템의 연간 가동률은 80%를 기준하였다. 따라서 Eggeman이 제시한 단위시간당 원료 투입량, 전기 투입량, 증기 투입량 등은 동일하며, 수소 생산수율을 감안하여 수소 생산량과 연료가스 생산량은 70% 수준인 것으로 설정하였다. 연료가스는 이산화탄소 98.3%, 수소 1.4%, 수증기 0.3% 등이 혼합된 가스로 수소 생산시스템의 연료로 사용하는 것으로 가정하였다. Table 2에는 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 단위시간당 투입량과 산출량을 수록하였다.

2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 연간 운영비는 원료비, nutrient 비용, 전력비, 증기비용, 인건비, 보수유지비, 기타 연간운영비 등으로 구분할 수 있다. Table 3에는 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 연간 운영비 및 수소 제조가격을 수록하였다.

2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 자본비용은 식 (5)에 의해 초기투자비에 자본회수계수인  $\beta_2$  (0.1168)를 곱하여 얻을 수 있다. Table 3을 보면 수소 생산시스템의 자본비용은 연간 약 98억 원으로 전체 연간비용의 7.46%에 불과하며, 원료비가 수소 제조가격에서 차지하는 비중은 74.18%로 원료비에 의하여 수소 제조가격이 거의 결정되는 것으로 나타났다.

2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 원료로 사용되는 국내 원당가격은 2007년 8월의 국제 현물가격인  $\$9.45/lb$ 에 운송비 및 기타비용  $\$3.55/lb$ 를 추가하여  $\$13/lb$ 를 기준하였다. 이러한 금액을 국내 화폐가치로 환산하면 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 원료비는 264원/kg이고 연간 원료비는 약 977억 원인 것으로 추정되었다.

전기는 산업용요금인 80원/kWh을 기준하여 연간 전력비를 약 121억 원으로 추정하였으며, 전력

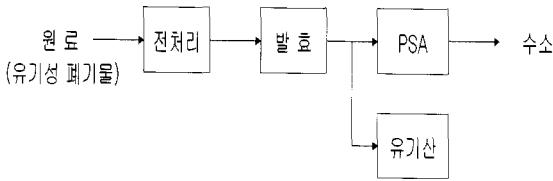


Fig. 3 Conceptual diagram of H<sub>2</sub> production by fermentation utilizing organic wastes

비가 수소 제조가격에서 차지하는 비중은 9.2%인 것으로 분석되었다. 증기 발생비용은 1,276원/ton을 기준하여 연간 증기비용은 약 75억 원이고, 증기비용이 수소 제조가격에서 차지하는 비중은 5.7%인 것으로 나타났다. PSA에서 부생으로 발생하는 연료가스는 증기 제조에 이용될 수도 있으나, 연료가스를 판매하여 수입을 얻을 수 있는 것으로 가정하였다.

보수유지비, 기타 경비, 인건비 등은 Eggeman의 추정치를 기준하여 추정하였다. 보수유지비는 초기투자비의 3.75%, 기타 경비는 초기투자비의 3.34%이고, 인건비는 동일한 금액으로 설정하였으며 nutrient 비용은 제외하였다. 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템의 연간 비용은 약 1,317억 원으로 추정되며, 이를 연간 수소생산량 24,626ton으로 나누면 2단계 발효에 의한 국내 수소 제조가격은 5,347원/kg으로 추정된다.

### 3.3 민감도 분석

수소 생산시스템의 수소 제조가격에 큰 영향을 줄 수 있는 요소로는 수소 생산수율, 원료 가격, 초기 투자비, 할인율 등이다. 2단계 발효에 의한 수소 생산시스템에서는 원료비의 비중이 크고 초기 투자비와 할인율이 수소 제조가격에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 이 들은 제외하고 수소 생산수율과 원료 가격을 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 수소 생산수율은 포도당 1mole로부터 각기 7mole의 수소와 10mole의 수소를 얻을 수 있는 경우를 가정하고, 원료 가격은 국내 원당가격을 기준으로 각기 ₩13/lb와 ₩6.5/lb인 경

Table 4 H<sub>2</sub> production prices by H<sub>2</sub> production rate and feedstock price

unit: won/kgH<sub>2</sub>

수소 생산수율 (포도당 1mole 기준)	국내 원료 가격	
	₩13/lb	₩6.5/lb
7 mole	5,347	3,364
10 mole	3,743	2,355

우를 조합하여 수소 제조가격을 산출한 결과를 Table 4에 수록하였다.

포도당의 국내 가격이 현재 가격의 절반 수준인 ₩6.50/lb으로 하락하면 수소 제조가격은 3,364원/kgH<sub>2</sub>로 감소하고, 포도당 1mole로부터의 수소 생산수율이 7mole에서 10mole으로 향상되면 수소 제조가격이 3,743원/kgH<sub>2</sub>로 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 포도당의 국내가격이 ₩6.50/lb으로 하락하고, 수소 생산수율이 10mole으로 향상되는 best scenario의 수소 제조가격은 2,355원/kgH<sub>2</sub>인 것으로 추정되었다.

## 4. 하수슬러지를 이용한 수소생산

### 4.1 혐기발효 수소생산

포도당을 사용하여 혐기 발효에 의해 수소를 생산하는 경우에는 수소 생산비용에서 원료비가 차지하는 비중이 매우 크다. 따라서 포도당을 저렴하게 구입하는 것이 어려운 우리나라와 일본 등의 나라에서는 포도당 대신에 유기물질이 다량 포함되어 있는 식품계 공장폐수, 하수 슬러지, 농수산 폐기물 등을 기질로 사용하고 혐기 및 광합성 세균을 이용하여 수소를 생산하는 방법에 대한 연구 개발을 진행하고 있다. 유기성 폐기물을 처리하여 에너지를 확보하는 기술은 에너지 생산과 환경개선을 동시에 할 수 있는 이점을 갖고 있어서 최근에 크게 주목을 받고 있다. Fig. 3에는 하수 슬러지 등의 유기성 폐기물을 이용하여 혐기발효에 의해 수소 생산을 하는 공정을 나타냈다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산 공정은 2단계

Table 5 Capital cost of H<sub>2</sub> production by fermentation of waste water

구 분		초기투자비	
		천유로 (2003년)	백만원 (2007년)
제조 장비비	발효기/펌프	311.6	405.1
	PSA	144.3	187.6
	Saran-Lock	14.2	18.4
	소 계	470.1	611.1
부대 비용		141.0	183.3
합 계		611.1	794.4

발효에 의한 수소 생산 공정과 유사하다. 수소 생산 공정의 첫 단계는 전처리이며 일반적으로 하수 슬러지의 생분해도를 증가시키기 위하여 열화학적 전처리 및 질소, 인 등의 영양분 공급을 병행한다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산 공정의 두 번째 단계는 발효이며, 유기성 폐기물을 이용하여 메탄 가스나 수소를 생산하는 발효기(bioreactor)에는 CSTR(continuous stirred tank reactor) 등의 suspended system과 packed-bed 및 TBR(trickling biofilter reactor) 등의 immobilized system으로 구분할 수 있다. 일반적으로 immobilized system은 suspended system보다 수소 생산율이 높고 pH, 온도, 유기물 부하 등의 생산 공정의 변화에 대응하는 안정성이 높은 장점을 갖고 있다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산공정의 마지막 단계는 PSA를 이용하여 수소와 이산화탄소 등의 혼합가스로부터 고순도의 수소를 생산하는 과정이다. 또한 발효 과정의 부산물로 alcohol이나 유기산이 생성된다. 이러한 유기산을 이용하여 수소나 메탄가스를 생산하는 2단계 수소/메탄 또는 수소/수소 생산 공정도 가능하다.

## 4.2 경제성 분석

본 연구에서는 하수슬러지를 이용하여 혐기발효에 의해 수소생산을 하는 1단계 수소생산시스템의 경제성 분석을 수행하였다. 수소 생산시스템의 규모는 100Nm<sup>3</sup>/hr이고, 연속으로 가동되는 시스템

을 기준하여 연간가동률을 94%로 설정하였다. 수소 생산수율은 포도당 1mole로부터 1.1mole<sup>(8)</sup>의 수소를 얻을 수 있는 것으로 가정하였으며, 이러한 수소 생산시스템의 연간 수소생산량은 73,521 kgH<sub>2</sub>가 된다. 하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 초기투자비는 발효기, PSA, Saran-Lock packing, 부대비용 등으로 구성되며, 발효기는 TBR을 기준하였다.

발효기와 PSA의 구입가격은 Vrije and Classen(2003)의 연구에서 제시된 가격을 기준하였고, Saran-Lock packing 구입가격은 오유관 외(2006)의 연구에서 제시된 구입가격을 기준하여 추정하였다. 또한 부대비용에는 엔지니어링 및 설계비용, 건설비용, 기타 비용 등이 포함되며 부대비용은 제조장비비의 30%를 기준하였다. Table 5에는 하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 초기투자비를 수록하였다.

Vrije and Classen은 2003년의 유로화를 기준으로 발효기와 PSA의 구입가격을 추정하였으며, 최근에 원화 대비 유로화의 가치가 많이 상승한 것을 감안하여 원화를 기준한 2007년 유로화의 실질가치와 2003년의 유로화의 가치는 동일한 것으로 설정하였다. 1유로는 2007년 10월의 환율인 1,300원으로 환산하였으며, 수소 생산시스템의 수명은 15년이고 수소 생산시스템의 잔존가치는 없는 것으로 설정하였다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 제조장비비는 약 611백만 원이고, 펌프를 포함한 발효기의 구입비용이 가장 큰 비중을 차지하여 약 405억 원이 소요되는 것으로 추정되었다. 부대비용은 약 219백만 원이며, 수소 생산규모가 100Nm<sup>3</sup>/hr인 수소 생산시스템의 전체 초기투자비는 약 8억 원인 것으로 추정되었다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 연간 운영비는 전처리 비용, 전력비, chemicals 비용, 인건비, 보수유지비, 기타 경비 등으로 구성된다. 일반적으로 바이오매스를 이용하여 수소를 생산하는 경우에는 전체 비용 중에서 원료비와 전처리 비용이 큰 비중을 차지하나, 본 논문에서는 하수슬러지



Table 6 Production price of H<sub>2</sub> by fermentation of waste water

구분	연간비용 (백만원)	수소제조가격 (원/kgH <sub>2</sub> )	구성비 (%)
1.자본비용	92.79	1,262	29.66
-발효기/펌프	47.32	644	15.14
-PSA	21.91	298	7.00
-Saran-Lock	2.15	29	0.68
-부대비용	21.41	291	6.84
2.연간운영비	220.07	2,993	70.34
-전기	59.59	811	19.06
-Chemicals	44.16	600	14.10
-인건비	60.00	816	19.18
-보수유지비	29.79	405	9.52
-기타경비	26.53	361	8.48
3.합계	312.86	4,255	100.00

를 원료로 하는 점을 감안하고 gate fee로 전처리 비용을 차감할 수 있는 것으로 가정하여 원료비와 전처리 비용이 발생하지 않는 것으로 가정하였다. Table 6에는 하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 연간 운영비 및 수소 제조가격을 수록하였다.

Table 6을 보면 하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 자본비용은 연간 약 93백만 원으로 전체 연간비용의 29.66%를 차지하는 것으로 분석되었다. 수소 생산시스템의 자본비용은 초기투자비에 자본회수계수인 0.1168을 곱하여 얻을 수 있다.

연간 운영비 중에서 전기와 chemicals 비용은 Vrije and Classen의 연구에서 제시된 소요량을 기준하여 연간 전력비는 약 59백만 원, 연간 chemicals 비용은 약 44백만 원으로 추정하였다. 보수유지비와 기타 경비는 Eggeman의 추정치를 기준하여 추정하였다. 보수유지비는 초기투자비의 3.75%인 약 30백만 원, 기타 경비는 초기투자비의 3.34%인 약 27백만 원, 인건비는 연봉이 3,000만 원인 2인을 기준하여 60백만 원으로 추정하였다.

하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템의 연간 운영비는 약 220백만 원으로 전체 연간비용의 70.34%를 차지하는 것으로 분석되었다. 전체 연간 비용인 약 313백만 원을 연간 수소생산량인 73,521kg으로 나누면 하수슬러지를 이용한 수소

Table 7 H<sub>2</sub> production prices by H<sub>2</sub> production rate and capital cost

unit: won/kgH<sub>2</sub>

수소생산수율 (포도당 1mole 기준)	초기 투자비	
	현재 수준	현재의 70% 수준
1.1 mole	4,255	3,887
1.5 mole	3,121	2,843

생산시스템의 수소 제조가격은 4,255원/kg으로 추정된다.

### 4.3 민감도 분석

하수슬러지를 이용한 수소 생산시스템에서 수소 제조가격에 대한 영향력이 큰 수소 생산수율과 초기투자비를 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 수소 생산수율은 포도당 1mole로부터 각기 1.1mole의 수소와 1.5mole의 수소를 얻을 수 있는 경우를 가정하고, 초기투자비는 각기 현재 수준과 제조장비가 대량으로 생산되어 현재의 70% 수준으로 감소되는 경우를 조합하여 수소 제조가격을 산출한 결과를 Table 7에 수록하였다.

제조장비의 대량생산에 의하여 초기 투자비가 현재 초기투자비의 70% 수준으로 하락하면 수소 제조가격은 3,887원/kgH<sub>2</sub>로 감소하고, 포도당 1mole로부터의 수소 생산수율이 1.5mole으로 향상되면 수소 제조가격이 3,121원/kgH<sub>2</sub>로 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 초기 투자비가 현재 초기 투자비의 70% 수준으로 하락하고, 포도당 1mole로부터의 수소 생산수율이 1.5mole으로 향상되는 best scenario의 수소 제조가격은 2,843원/kgH<sub>2</sub>인 것으로 추정되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 발효에 의한 국내 수소생산의 경제성 평가를 수행하였다. 포도당을 원료로 하여 암 발효와 광발효의 2단계 발효에 의해 3,514kg/hr 규모의 수소생산을 하는 시스템과 하수슬러지를 이

용하여 혐기발효에 의해 100Nm<sup>3</sup>/hr 규모의 수소 생산을 하는 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 발효에 의한 수소 생산시스템은 중앙집중형 수소생산에 적합한 대량 생산시스템으로서 포도당 1mole로부터 7mole의 수소를 얻을 수 있고 포도당의 가격이 \$0.13/lb인 전제 하에 수소 제조가격을 5,347원/kgH<sub>2</sub>로 산출하였다. 하수슬러지의 혐기발효에 의한 수소 생산시스템은 분산형 수소생산에 적합한 소량 생산시스템으로서 원료비가 소요되지 않고 포도당 1mole로부터 1.1mole의 수소를 얻을 수 있는 전제 하에 수소 제조가격을 4,255원/kgH<sub>2</sub>로 산출하였다.

2단계 발효의 수소 제조가격인 5,347원/kgH<sub>2</sub>는 규모의 경제효과를 감안하면 중앙집중형 수소생산 시스템의 수소 제조가격으로는 상당히 비싼 편이며, 하수슬러지 혐기발효의 수소 제조가격인 4,255원/kgH<sub>2</sub>는 분산형 수소생산시스템의 수소 제조가격임을 고려하면 상대적으로 비싸지 않은 수준인 것으로 판단된다. 또한 하수슬러지의 발효과정의 부산물을 이용하여 메탄이나 수소를 추가로 생산하는 경우에는 수소 제조가격을 더욱 낮출 수 있으며, 향후에 하수슬러지의 처리에 대한 법적규제가 시행된다면 하수슬러지의 경제성은 더욱 좋아질 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 하수슬러지만을 연구대상으로 하였으나 향후에는 식품계 폐기물과 농수산물 폐기물을 대상으로 혐기발효에 의한 수소생산의 경제성을 평가하는 것이 필요할 것이다. 또한 발효에 의한 수소 생산시스템의 기술발전에 따라 동태적으로 수소 생산시스템의 경제성을 평가하는 것이 바람직하며, 향후에는 광합성 물분해에 의해 수소 생산을 하는 광생물학적 수소생산의 경제성을 분석하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- 1) T. de Vrije and P.A.M. Claassen, "Dark Hydrogen Fermentations", in J.H. Reith, R.H. Wijttels, and H. Barten(Edi.), "Bio-methane & Bio- Hydrogen: Status and Perspectives of Biological Methane and Hydrogen Production", Dutch Biological hydrogen Foundation, The Netherlands, 2003, pp. 103-123.
- 2) S. Tanisho, "Feasibility Study of Biological Hydrogen Production from Sugar Cane by Fermentation", Proceedings of 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, 1996, pp. 2601-2606.
- 3) T. Eggeman, Boundary Analysis for H<sub>2</sub> Production by Fermentation, Neoterics International Inc., U.S.A, 2004
- 4) 오유관, 김유진, 김미선, 박성훈, "이단계 바이오 수소/메탄 생산공정의 경제성 평가", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제17권, 제1호, 2006, pp. 98-108.
- 5) 박찬석, 김규태, 최성호, 경제성공학, 영지문화사, 2004, pp. 58.
- 6) Department Of Energy, Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan, U.S.A, 2006
- 7) H. Yokoi, A.S. Saitsu, H. Uchida, J. Hirose, S. Hayashi, and Y. Takasaki, "Microbial Hydrogen Production from Sweet Potato Starch Residue", J. Biosci. Bioeng., Vol. 91, 2001, pp. 58-63.
- 8) Y.K. Oh, S.H. Kim, M.S. Kim, and S. Park,

"Thermophilic Biohydrogen Production with  
Trickling Biofilter", *Biotech. Bioeng.*, Vol. 88,  
2004, pp. 690-698.