

미생물을 이용한 수소 생산 현황과 전망 1

박정진

GLBRC, Michigan State University

To whom correspondence should be addressed e-mail: jjpark@msu.edu

수소에너지는 화석연료와 다르게, 연소시 발생하는 부산물로 이산화탄소나 황산화물 또는 질산화물 등의 대기 오염 물질이 없다는 특징으로, 차세대 청정 에너지로 각광을 받고 있다. 자동차의 연료로 수소를 사용할 때에는 크게 수소 연료 자동차와 수소 연료 전지 자동차의 두 종류로 나눌 수 있다. 이중 수소 연료 자동차의 경우 BMW의 Hydrogen 7과 같이 수소를 직접 연소시킴으로써 발생하는 열에너지를 기계적인 에너지로 바꾸는 것이다. 그러므로 원리는 일반적인 휘발유 차량과 동일하다고 할 수 있다. 이때 문제점으로 지적되는 것은 액체 수소의 보관이 어렵다는 것과 연소 효율이 낮다는 것을 들 수 있다.

이에 반해 우리나라 뿐만 아니라 대부분의 자동차 회사에서 개발하고 있는 방식으로 수소 연료 전지 자동차를 들 수 있다. 이는 수소분자의 이온화 과정에서 발생하는 전자를 이용하는 방식으로 연료 효율이 높으나(가솔린 엔진의 경우 에너지 채굴로부터 차량 주행까지 효율이 14~16% 수준이지만 연료전지의 경우 42% 정도이다), 연료전지 자체의 가격이 아직 고가(혼다의 FCX Clarity의 경우 연료전지만 2억원을 넘는 것으로 알려져 있다)라는 단점이 있다.

하지만 유한하며 100% 수입에 의존해야 하는 가솔린을 대체할 수 있는 수소 에너지는 이러한 단점들을 감안하고라도 충분히 매력적이며, 또한 앞으로의 기술 혁신을 통해 단점들은 충분히 극복될 수 있을 것으로 보인다.

현재 미국의 수소 충전소에서 판매되고 있는 수소는 대부분 천연가스의 수증기 개질법에 의해 만들어지고 있다. 하지만 이때 이산화탄소가 그 부산물로 생성되므로 진정한 청정에너지인가라는 논란이 여전히 존재하고 있다.

이에 대한 대안으로 수소 생산 미생물을 이용한 연구가 현재 세계 곳곳에서 진행 중에 있다. 수소 생산 미생물은, 예전 암모니아와 메탄이 대부분이던 원시 대기를 이용하여 산소와

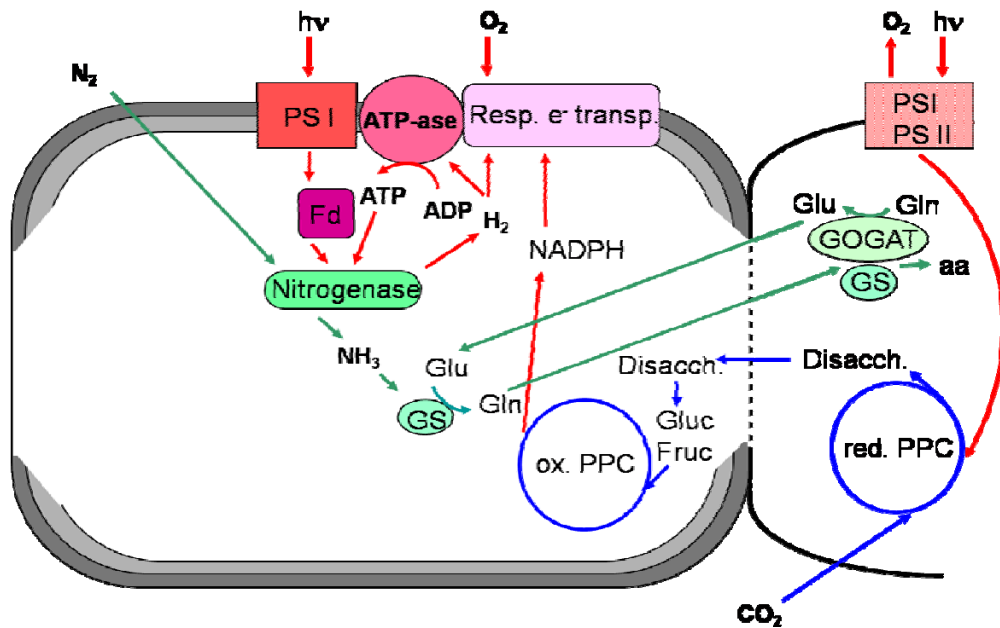
수소를 생산해 내었던 경력을 가지고 있으며, 현재 유전자 재조합 기술을 충분히 활용할 만한 기초 지식(유전자 지도, 관련 벡터 및 수소 생산 기작)이 쌓여있다.

<표 1> 제조방법에 따른 수소 제조 비용 비교

| 제조방법 | | 제조비용(US\$/kg) |
|---------|-------------|---------------|
| 화석연료 이용 | 천연가스 수증기 개질 | 0.62~1.35 |
| | 석탄 가스화 | 1.18~1.39 |
| 전기분해 | 태양광 발전 이용 | 5.02 |
| | 풍력 발전 이용 | 2.42 |

자료: 에너지관리공단 신재생에너지센터, 신재생에너지 R&D 전력 2030, 2008

수소를 생산하는 미생물 중 *Anabaena* spp 의 수소 생산 기작을 살펴보면 <그림 1>과 같다.



<그림 1> *Anabaena* spp 의 수소 생산 기작

화석연료에 대한 의존성과 이로 인한 환경 오염분제를 해결하고자, 차세대 청정 에너지인 수소에 대한 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 미국 역시 예외는 아니어서,

인구밀도가 높은 캘리포니아를 중심으로 수소 자동차 및 수소 충전소의 시운전이 행해지고 있다. 하지만 현재 수소는 대부분 천연가스의 수소 개질 공정을 통해 얻는 것이 대부분이어서, 화석연료에 대한 의존성 측면을 해결하지 못하고 있다. 또한, 이 공정의 결과로 주된 온실가스로 알려져 있는 이산화탄소가 만들어지게 되므로, 개선의 여지가 필요하다.

미생물을 이용한 수소 생산은 1970년대 오일쇼크를 겪으면서 주목을 받기 시작해 왔다. 남세균(cyanobacteria)이 질소원 확보를 위해 질소 고정화 과정을 수행할 때 부산물로 수소를 생산하게 되는 것이다. 하지만 이렇게 생산된 수소를 미생물이 hydrogen uptake 유전자를 이용하여 전자 공여체로 사용하게 되어, 실제 수소의 생산량은 극히 미미한 것으로 알려져 있다. 이를 해결하고자 여러 돌연변이가 제작되었으나, 수소 생산 최적 조건에서 170 $\mu\text{mol H}_2/\text{mg chl a/hr}$ 정도로, 여전히 산업화에 응용하기에는 어려운 수준인 것으로 알려져 있다.

특히 2009년 미국의 GLBRC Hydrogenase meeting에서 발표된 자료에 따르면, 현재 개발된 유전자 변형 미생물로 수소를 생산할 때, 그 생산 단가가 미화 100달러를 상회할 것이라는 전망도 있다.

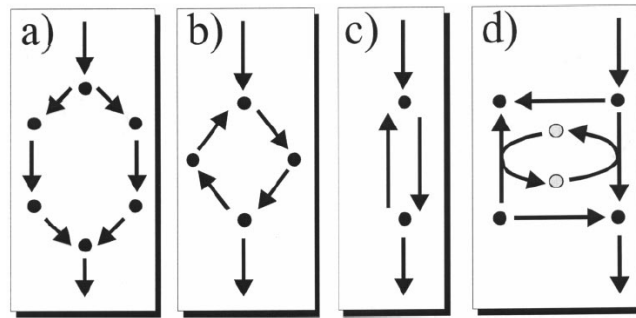
<표 2> 미생물을 이용한 수소 생산 단가 예상

| System Criteria | C-1 | C-3 | C-5 |
|---|---|-------------------------------------|-----------------|
| Organism Input Basis | B-1 or B-2 | B-3 | B-5 |
| Feedstock | Algal or <u>Cyanobacterium</u> O ₂ -tolerant <u>Hydrogenase</u> | Algal Sulfate <u>Permease</u> | PNS Bacteria |
| Feedstock Usage (kg/day) | 2,312 | 4,092 | 4,272 |
| Production (kg H ₂ /day) | 7 | 12 | 13 |
| Capital Cost (\$) | \$52,198 | \$80,351 | \$86,211 |
| Cost (\$/kg H ₂) | \$178.40 | \$103.45 | \$98.99 |
| Mass Conversion (kg H ₂ /kg feedstock) | 0.4% | 0.4% | 0.4% |

자료: GLBRC Hydrogenase Meeting, 2009

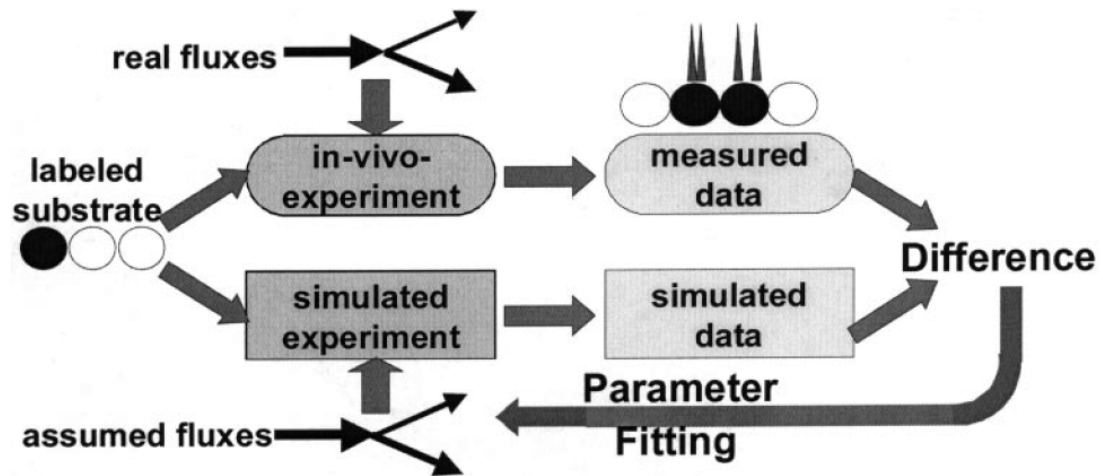
이러한 한계를 극복하기 위해서는 생명체의 대사회로 상에 있어서 전체 대사 흐름을 정량적으로 표현해 볼 필요가 있다. 즉 이와 같은 대사흐름 패턴의 분석을 통해 유전자 조작에 따른 결과를 예측하고, 새로운 유전자 조작 목표의 설정이 가능하기 때문에, 전사체나 단백질체 분석 결과와의 통합 분석을 통해 세포의 기능 분석을 비롯한 missing link의 해결 등이 가능하게 된다.

전통적인 대사흐름분석법으로는 생화학 반응식을 stoichiometric equation 을 이용하여 기술하는 수학적 모사법이 있으나, 이 방법만으로는 모든 대사산물을 정량적으로 분석하지 않는 한, <그림 2>와 같은 상황을 모사할 수 없다.



<그림 2> Stoichiometric 대사흐름분석법으로는 모사가 어려운 상황들

이를 해결하기 위한 방안으로 ^{13}C 가 labeling 되어 있는 탄소원의 사용을 들 수 있다. ^{13}C 가 labeling 되어 있는 탄소원(glucose, fructose 등이 주로 사용됨)은 탄소 동위 원소라는 성질을 이용하여, 그 대사 경로 파악이 용이하다. 즉 생물체의 대사회로 모델을 컴퓨터 프로그램으로 구축한 다음, ^{13}C 가 labeling 되어 있는 탄소원을 활용하여, NMR 과 GC/MS 를 통해 대사흐름을 측정하여 동위원소 실험 데이터의 수학적 해석 방법 제시가 가능하다(그림 3 참조).



<그림 3> 대사흐름분석을 위한 평가 알고리즘

이러한 탄소 동위 원소를 이용한 대사흐름분석은 미생물을 이용한 수소생산량 증대를 위한 새로운 유전자 조작 목표의 설정과 그 결과를 예측 가능케 해 줌으로서 결과적으로 산업화에 보다 가깝게 접근하도록 도와줄 수 있게 된다.

즉, Metabolic flux analysis 를 통해 다음과 같은 문제를 해결할 수 있다.

- Identification of branch point control in cellular pathway
- Identification of alternative pathways
- Calculation of nonmeasured extracellular fluxes
- Calculation of maximum theoretical yields
- Deciphering the complex mechanisms of metabolic flux control

다음 리포트에서는 수소 생산성 향상을 위한 구체적인 방안과 관련 기술의 현황에 대해 알아보고자 한다.

참고문헌

1. **Wiechert W** (2001) ^{13}C Metabolic Flux Analysis. *Metabolic Engineering* **3**: 195-206
2. 에너지관리공단 신재생에너지센터, 신재생에너지 R&D 전력 2030, 2008
3. GLBRC Hydrogenase meeting, 2009
4. 수소에너지 환상인가, 기회인가, 양성진, LGERI Report, LG Business Insight, 2009