

미생물을 이용한 수소 생산 현황과 전망 2

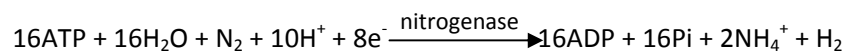
박정진

GLBRC, Michigan State University

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

남세균류와 녹조류는 공기중의 이산화탄소를 흡수하여 균체가 성장하고, 이와 같이 생성된 균체는 일정 조건에서 태양에너지를 이용하여, hydrogenase 나 nitrogenase 와 같은 효소들이 활성화되어 수소가스를 발생하게 된다.

남조류균은 수소 기체 발생을 위해 다음의 2 가지 효소를 사용한다. 그 첫번째로는 nitrogenase 로서 남조류가 질소원 부족한 환경에서 자랄 때 만들어지는 heterocyst 내부에 존재하는 것으로 알려져 있다. 공기중의 질소를 암모니아로 고정화 시킬 때 부산물로서 수소 만들어지는 것이다. 이러한 반응은 다음의 반응식에서와 같이 ATP 를 소비하면서 일어나게 된다.



Nitrogenase 효소는 dinitrogenase (MoFe Protein, *nifD* 와 *nifK* 에 의해 만들어짐)와 dinitrogenase reductase (Fe Protein, *nifH* 에 의해 만들어짐)의 두가지 부분으로 이루어진다.

그리고 두번째로는 hydrogenase 효소를 들 수 있다. Hydrogenase 는 uptake hydrogenase(*hupSL* 에 의해 만들어짐)라는 수소 산화 반응에 사용되는 효소와 수소를 소비할 수도 있으며 생산할 수도 있는 양방향성 hydrogenase(*hoxFUYH* 에 의해 만들어짐)로 나눌 수 있다. 많은 연구진들은 수소 생산성을 높이기 위해 uptake hydrogenase 의 활성을 제거하는 것과 동시에 양방향성 hydrogenase 의 방향성을 조절하는 연구와 다른 종의 hydrogenase 로 대체하는 연구가 진행중에 있다.

탄소 동위 원소를 이용한 대사흐름분석은 2000 년에 들어서 NMR 과 GC/MS 를 이용한 분석법과 함께 데이터 처리를 위한 컴퓨터 소프트웨어의 개발과 더불어 발전하기 시작하였다. 이러한 대사흐름분석법을 실제 생체 시스템에 대한 적용은 처음엔, 효모나

대장균 등의 모델 생명체부터 시작되었으나, 현재에는 실제 산업화에 사용되는 미생물이나 식물과 같은 고등 생명체에 이르기까지 폭넓게 연구되고 있다.

이러한 수소 생산에 이용되는 미생물로는 대표적으로, *Anabaena* spp 또는 *Chlamydomonas* spp 를 들 수 있다.

이 중 *Chlamydomonas* 는 광합성 작용에 의해 물로부터 양성자와 전자를 공급받아 수소를 생산하는 직접 물 분해(direct biophotolysis) 방법을 이용하고 있다. 이러한 직접 물 분해 공정에 관련되는 중요한 효소는 hydrogenase 이며 이 효소는 산소에 매우 민감하다는 단점을 가지고 있다. 즉 광합성 과정에서 발생하는 산소가 hydrogenase 의 활성에 영향을 주어 수소생산을 저해시킨다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 황이 없는 배지에서 배양하는 공정이 개발되었으며, 이는 광합성과정에서 발생하는 산소를 점차 감소시켜 혐기상태로 변화시키는 기술이다.

그리고 *Anabaena* 속은 광합성에 의해 물을 분해하여 산소를 발생하고, 동시에 공기 중의 이산화탄소를 고정하여 고분자 저장물질로 균체 내에 합성한 후 혐기발효 또는 광합성 발효에 의해 수소를 생산하는 간접 물 분해(indirect biophotolysis) 방법을 사용한다. 이러한 수소생산 공정의 핵심 효소는 질소 고정화 효소인 nitrogenase 로써 이는 산소와 질소가 없는 조건에서 수소를 생산한다. 하지만 nitrogenase 는 수소를 생산하는 데 ATP 를 이용하기 때문에 hydrogenase 에 비해 덜 효율적이다. 또한 이러한 공정에서는 수소를 소비하는 효소인 uptake hydrogenase 가 존재하기 때문에 수소생산량이 낮아진다. 또한 nitrogenase 는 hydrogenase 와 마찬가지로 산소 농도에 민감하다. 즉 물을 분해하는 과정에서 생기는 산소에 의해 nitrogenase 의 활성이 저해되어 수소생성계가 self limitation 을 받는다. 이는 실험적으로 발생하는 산소를 흡착하여 제거하거나, 산소에 민감하지 않은 hydrogenase 를 개발하여 수소생산을 향상시킬 수는 있지만, 아직까지 괄목할만한 성과는 이루어지지 않았다.

이러한 현상은 생물체란 유전체, 전사체, 단백질체, 및 흐름체 등이 생화학반응으로 복잡한 네트워크로 연결되어 있기 때문에 유전자 변형에 따른 결과의 예측이 어려울 수 밖에 없는 것이다. 따라서 미생물의 수소생산 기작을 종합적으로 이해하기 위해서는 이 복잡한 네트워크의 구성원들에 대한 정보를 확보하고, 이를 효과적으로 연계하여 상호작용과 같은 특성을 분석하는 절차가 필수적으로 요구된다.

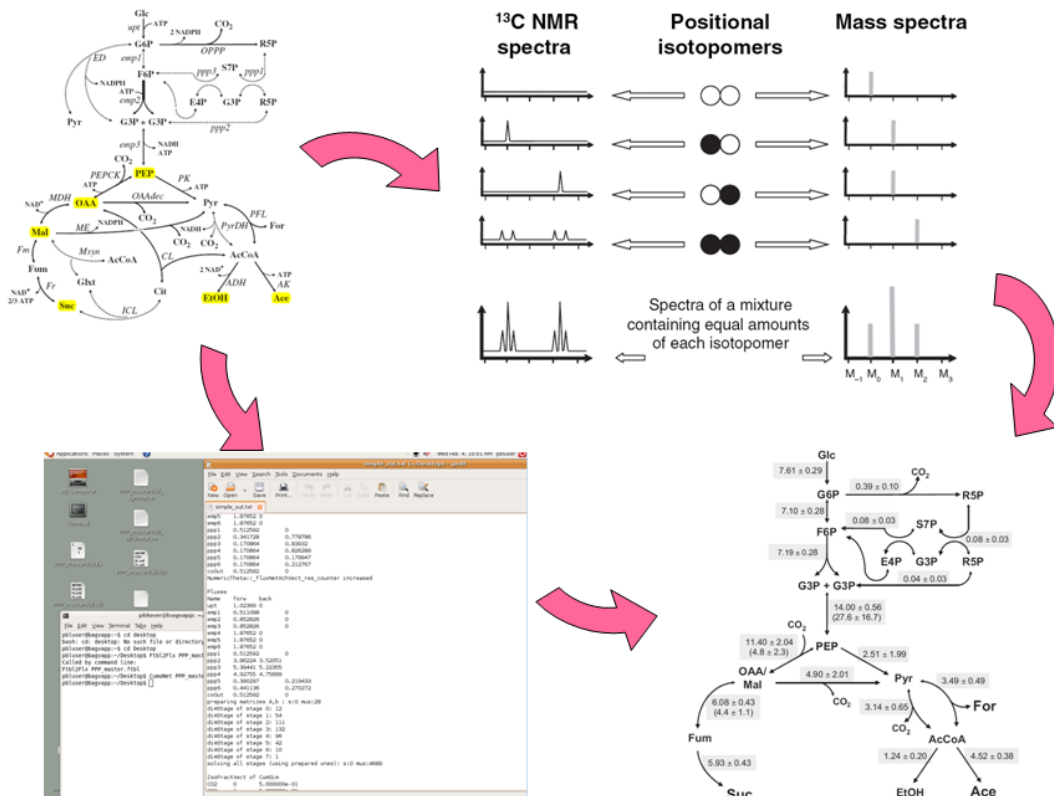
이를 위해서는 우선 대사회로상에 존재하는 대사물질들에 관련된 물질의 흐름을 정량적으로 분석하는 대사흐름분석을 행해야 할 것이다. 탄소 동위 원소를 사용한 대사흐름분석은 다음과 같은 순서로 진행될 예정이다(그림 1 참조).

- A. Biosynthetic Pathway Model Construction
- B. Isotope detection by NMR and GC/MS
- C. Stoichiometric and steady-state flux analysis
- D. Flux map of central carbon metabolism of steady-state ^{13}C labeling experiments

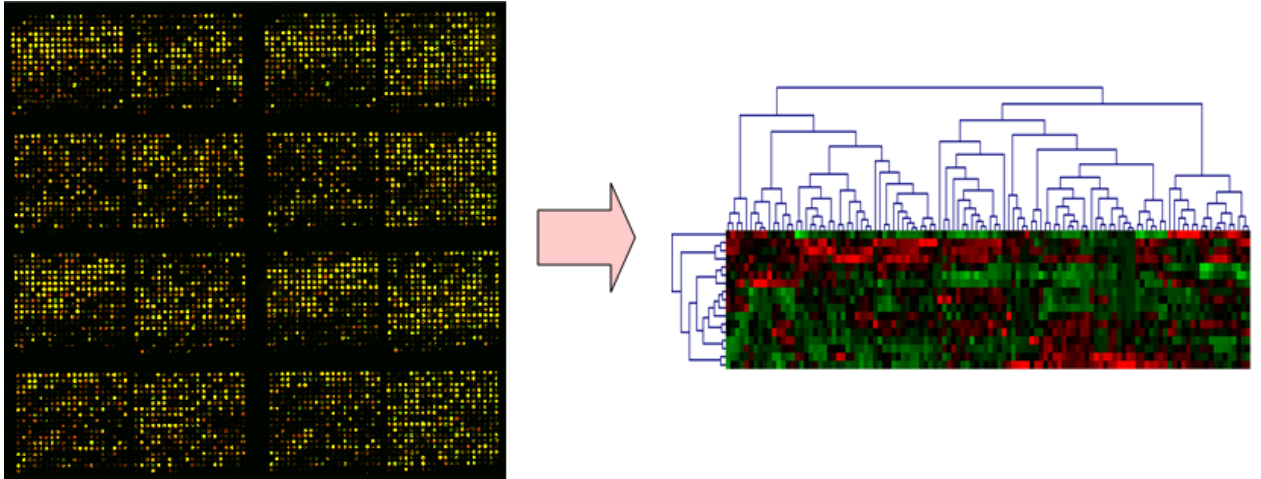
이러한 대사흐름분석과 함께, 전사체 분석 역시 수행할 예정이다.

유전자의 발현에 의해 만들어지는 mRNA는 생명체 주변의 환경변화 또는 생명체 내의 요구 조건에 따라서 그 발현량이 현격하게 변화하는 특징을 가지고 있다(그림 2 참조). 즉 수소 생산과 연관지어, 생명체의 mRNA 발현량을 측정하고 분석함으로써, 수소 생산 기작에 대해 이해하는 데 큰 도움을 줄 수 있다. 이를 위해 수소 생산이 이루어지고 있는 세포와 그렇지 않은 세포의 mRNA 발현량을 DNA microarray를 이용하여 비교함으로써, 수소생산에 따른 세포내 조절 기작과 대사회로간의 새로운 상관관계를 밝혀낼 수 있을 것으로 전망되며, 새로운 유전자 조작에 관한 설계 전략을 수립하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

<그림 1> Schematic diagram of Metabolic Flux Analysis



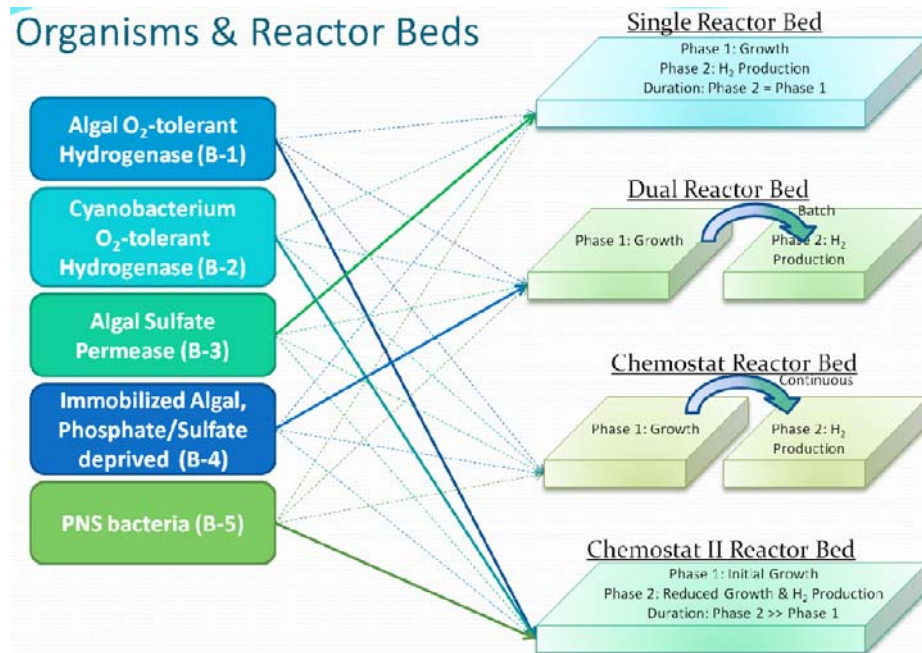
<그림 2> cDNA Microarray 를 이용한 mRNA 발현 분석



이러한 다양한 기술의 활용을 통해 대사흐름분석과 전사체에 관한 데이터 확보 및 분석이 가능할 것이며, 이를 통해 미생물의 수소 생산성 향상과 관련된 정보를 얻어낼 수 있을 것이다. 특히 이와 같은 포괄적인 데이터의 확보와 분석은 복잡한 생명체의 조절 기작에 관한 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 일반적으로 수소 생산에 사용되는 미생물의 종류와 그에 따른 생산 공정을 살펴보면 <그림 3>과 같다.

<그림 3> 미생물에 따른 생산 공정의 종류



<그림 3>을 살펴보면, 미생물의 생산성 향상 뿐만 아니라, 생물 공정의 최적화 또한 중요한 요소인 것을 알 수 있으며, 이를 바탕으로 수소 생산 단가를 계산해 본 결과는 <표 1>에서와 같이 수소 1kg 당 \$2.41~\$5.67 사이에 생산이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 이 결과는 모든 조건이 최적화 되었을 때의 결과이며, 현재의 기술 수준과 미생물의 생산성으로는 수소 1kg 당 \$100 가량이 드는 것으로 알려져 있다.

<표 1> 공정 조건에 따른 단가 계산

	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5
Bed Type	Chemostat II	Chemostat II	Single Bed	Dual Bed	Chemostat II
Total Bed Area (m ²)	809,680	809,680	1,433,230	2,493,830	1,496,300
Solar to H ₂ Efficiency (%)	9.2%*	9.2%*	5.2%*	3.0%	5.0%
Production (kg H ₂ /day)	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Capital Cost (\$M)	21.73	21.73	32.84	43.43	33.92
Cost (\$/kgH₂)	2.41	2.41	3.47	5.67	4.41
Product Mix	2 mol H ₂ + 1 mol O ₂ (Potential Combustion Issues)		2 mol H ₂ : 1 mol CO ₂		

참고문헌

1. **Wiechert W** (2001) ¹³C 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