



## REVIEW PAPER

총설

## 생물학적인 방법을 통한 대체 에너지로서의 수소생산

조영화\*, 조병훈\*\*, 차형준<sup>†</sup>

포항공과대학교 화학공학과\*, 시스템생명공학부\*\*

(2011년 1월 10일 접수, 2011년 2월 1일 수정, 2011년 2월 7일 채택)

## Hydrogen Production in Biological Way as Alternative Energy

Younghwa Jo\*, Byung Hoon Jo\*\*, Hyung Joon Cha<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering\*, School of Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering\*\*, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

## ABSTRACT

Development of alternative energy is needed as the fossil is started to be exhausted. This alternative energy should be environmental friendly and renewable. Currently, the alternative energy which gets the most attraction is hydrogen. Hydrogen can be produced by a number of different processes. Among those methods, hydrogen production in biological way is considered as the most environmental friendly method. However, productivity of biological hydrogen production is not good enough to be commercialized yet. Thus, many researchers are trying to improve productivity and yield of biohydrogen production. Here, progress in the diverse developmental approaches on biological hydrogen production, is reviewed.

Keywords : Hydrogen, Biological Production, Alternative Energy, Renewable Energy

## 초 록

화석연료가 고갈되어 감에 따라 사람들은 이를 대처할 수 있는 대체에너지를 찾기 시작했다. 이 대체 에너지는 환경 친화적이며 재생 가능해야 된다는 단서가 붙는데 그 중 가장 많은 주목을 받은 것이 수소이다. 현재 수소는 다양한 방법으로 생산되고 있는데 생물학적으로 수소를 생산하는 방법이 가장 환경 친화적인 방법으로 인식되고 있다. 그러나 아직 생물학적으로 수소를 생산하는 방법은 아직 상업화하기엔 경쟁력이 많이 부족하기 때문에 많은 연구자들이 바이오 수소 생산 방법과 그 생산성 및 생산 수율을 높이기 위하여 노력하고 있다. 본 고에서는 생물학적 수소생산의 다양한 개발 접근방법들의 진

<sup>†</sup>Corresponding author : hjcha@postech.ac.kr

행 추이를 정리하였다.

핵심용어 : 수소, 생물학적 생산, 대체 에너지, 재생 에너지

## 1. 서론

에너지(energy)는 인류 역사 이래로 인류에게 가장 큰 화제가 되어왔다. 화석 연료가 여러 가지 문제를 일으키고 점점 고갈되어감에 따라 인류는 대체 연료(alternative energy)를 필요로 하게 되었다. 이러한 대체 연료는 환경적으로, 경제적으로 지속 가능한 연료여야 한다. 대체 연료로서 바이오 에탄올(bioethanol), 바이오 부탄올(biobutanol), 바이오 디젤(biodiesel) 등 여러 가지 대체 에너지가 거론되어 왔다. 그 중 바이오 수소(biohydrogen)는 유일하게 연소할 때에 이산화탄소를 배출하지 않는 연료로서 가장 탄소 중립적(carbon neutral)인 연료로 거론되어 왔다<sup>1)~3)</sup>. 현재까지 수소를 대체 연료로서 이용하는 많은 기술이 연구 되어왔지만 수소를 대체 연료로서 생산하는 기술은 아직 미숙한 수준에 머물러 있다. 수소를 생산하는 기술 중 생물학 적으로 수소를 생산하는 방법은 자연계의 탄소 순환계에 포함될 수 있으므로 가장 탄소 중립적인 방법이라 할 수 있다. 하지만 아직 실용화 가능할 정도로 생물학적인 방법으로 수소를 생산하는 기술은 많은 노력이 필요한 단계이다. 본 고에서 우리는 생물학적 수소생산에 대한 다양한 개발 접근방식의 추이를 정리하여 보고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 수소 에너지

화석 연료가 지구상에서 고갈되어감에 따라 화석 연료 기반의 산업이 흔들리기 시작하고 화석 연료가 연료로서 대기중 이산화탄소의 증가에 따른 온실효과와 같은 여러 가지 환경 문제를 일으키기 시작하자 많은 사람들이 화석 연료를 대체할 수 있는 에너지 원을 찾기 시작했다. 이중 수

소는 지구상에 가장 가볍고 풍부한 원소이다. 대기중의 수소의 농도는 0.07% 정도이며 지표상의 총 수소 농도는 0.14% 정도이다. 수소가 연소할 때의 최고 열량은 3042 cal/m<sup>3</sup>로서 연소시의 생산물은 물 뿐이다. 이러한 이유로 수소는 연료로서 가장 환경 친화적이고 안전한 연료로 여겨지고 있으며 실제로 많은 장점을 가지고 있다<sup>1),2)</sup>. 이러한 여러 장점으로 인하여 수소는 '가장 깨끗하고 지속 가능한 연료'로 인식되고 있다<sup>3)</sup>. 현재 수소를 생산하는 방법은, 천연가스 리포밍(steam reforming of natural gas), 천연가스 열분해(thermal cracking of natural gas), 고분자 탄화수소 부분 산화반응(partial oxidation of heavier than naphtha hydrocarbons), 석탄의 기화반응(coal gassication) 등 여러 가지 방법들이 있다. 그 중 수소 연소 반응의 생산물인 물로부터 수소를 생산할 수 있는 반응은 전기분해반응(electrolysis), 광분해반응(photolysis), 열역학적 반응(thermo chemical process), 생물학적 생산(biological production) 등이 있다<sup>2)</sup>.

현재 이용되는 수소생산 방법 중 아직 90%에 가까운 수소가 천연가스나 저 분자 기름의 높은 온도에서의 리포밍 방법에 의해 생산되고 있다. 또한 석탄의 기화반응이나 물의 전기분해 반응도 산업적으로 수소를 생산하는 방법으로 이용되고 있지만 이러한 방법들은 아직 화석연료를 이용한다는 한계점이 있다. 이러한 이유로 자연계에 존재하는 방법을 모방하는 생물학적인 수소 생산방법은 가장 친 환경적으로 여겨지고 있으며 다양한 연구가 이루어 지고 있다<sup>4)</sup>.

### 2.2 바이오 수소

생물학적인 방법으로 생산된 수소(바이오 수소)에 대한 관심은 90년대에 석유 연료의 사용이 전 지구적인 기후에 영향을 미친다는 사실이

밝혀지면서 시작되었다. 이후 많은 국가들이 국가적인 차원에서 바이오 수소에 대한 연구를 하게 되었다<sup>5)</sup>.

에너지원으로 이용될 수 있는 바이오 매스(biomass)로는 곡류, 곡류로부터 나온 버려지는 부산물, 목재와 목재의 부산물로부터 나오는 목질 섬유질(lignocellulosic product), 해양식물과 조류(algae), 사람의 생활에서 나오는 폐기물까지 매우 다양하다. 이러한 바이오 매스에 포함되어 있는 에너지는 주로 여러 가지 미생물들에 의해 회수(recovery)가 가능하다. 이때 적절한 사전 처리(pretreatment)를 통한다면 이런 여러 가지 바이오 매스가 화석연료 등을 대신해 미래의 인류 에너지 자원의 가장 큰 역할을 할 수 있을 것으로도 기대된다. 현재는 이런 바이오 매스로부터 생산되는 수소가 천연가스 리포밍 등에 의하여 생산되는 수소보다 가격측면에서 더욱 비싸다는 한계점이 있지만 바이오 매스로부터 생산되는 수소는 여러 가지 부산물 등의 가치가 낮은 물질로부터 생산된다는 점에서 미래에 바이오 수소를 생산하는 기술이 더욱 발전한다면 가격 경쟁력을 가질 수 있는 가능성 또한 가지고 있다<sup>4)</sup>.

자연계에서는 항상 수소를 에너지원으로 이용하는 미생물이 존재하여 왔다. 이들은 주로 수소화 효소(hydrogenase)라는 효소를 수소를 이용하는 데 사용해 왔는데 이는 생명체에서 수소를 생명활동에 필요한 전기에너지를 생산하는 반응에 도와준다. 이 수소화 효소는 미생물이 수소를 합성하는 반응을 하는 데에도 도움을 주기 때문에 이러한 수소화 효소를 가지고 있는 미생물들은 수소를 생산하는 데에도 이용할 수 있다.

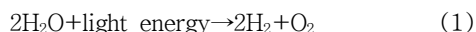
### 2.3 미생물을 이용한 수소 생산

이런 미생물을 가지고 수소를 생산하는 방법은 크게 두 가지로 나뉘는데 빛 에너지에 의해 일어나는 직접적인 광분해(direct photolysis), 간접적인 광분해(indirect photolysis), 수성가스 전환 반응(water-gas shift reaction), 광발효(photo fermentation) 그리고 빛 에너지와 관련되지 않은 대표적인 반응인 암발효(dark fermentation)

등이다<sup>4),6),7)</sup>.

#### 2.3.1 직접적인 광분해

직접적인 광분해란 생물학적 과정으로 인하여 물이 산소분자와 수소분자로 쪼개지고 이로 인하여 수소가 생산되는 반응을 말한다. 이 반응은 아래와 같이 표현된다.

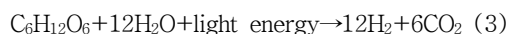


광분해를 통한 수소 생산반응은 수소를 생산하거나 수소를 이산화탄소 고정화를 위한 전자공여체로 이용하는

와 같은 녹조류에 의해 일어나게 된다. 녹조류가 물에서부터 산소 기체를 발생시키는 과정에서 빛 에너지가 광화학계 II(photosystem II)를 통해 흡수되고 이로 인해 전자가 발생하게 된다. 이 전자는 광화학계 I(photosystem I)에 의하여 페레독신(ferredoxin)에 전달되게 되고 이 전자를 받은 수소화 효소가 페레독신을 환원시키며 수소 분자를 발생하게 되는 것이다<sup>8),9)</sup>.

#### 2.3.2 간접적인 광분해

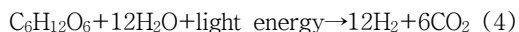
남조류(blue-green algae)라고도 알려진 시아노박테리아(cyanobacteria)는 아래의 반응을 통해서 바이오 수소의 생산이 가능하다.



시아노박테리아는 엽록소 a(chl a), 카로테노이드(carotenoids), 파이코빌리프로틴(phybiliproteins)과 같은 광합성 기구를 가지고 있어서 광합성이 가능하다<sup>2)</sup>. 또한 매우 기초적인 영양분인 공기(O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), 물, 미네랄, 그리고 빛 에너지만으로도 성장이 매우 다양한 생명체이다. 이러한 이유들로 매우 오랜 시간 시아노박테리아의 수소 생산에 대하여 연구가 되어 왔는데 시아노박테리아는 질소화 효소(nitrogenase), 수소화 효소 등의 여러 가지 효소를 이용하여 수소를 생산하며 그 수소를 생산할 수 있는 능력은 시아노박테리아의 종에 따라 매우 다양하다<sup>10)</sup>.

### 2.3.3 광발효

홍색무유황세균(purple non-sulfur bacteria)과 같은 광영양 세균들은 질소가 부족한 환경에서 질소화 효소를 이용하여 수소를 생산할 수 있다. 이 반응은 아래와 같이 표현된다.



홍색무유황세균(purple non-sulfur bacteria)과 같은 광영양 세균들은 질소가 부족한 환경에서 질소화 효소를 이용하여 수소를 생산할 수 있다. 광발효를 이용할 경우 높은 이론적 효율로 빛 에너지를 이용해서 다양한 저가치의 물질들로부터 수소를 생산해 낼 수 있다는 장점이 있어 많은 연구가 이루어 지고 있다<sup>11)</sup>.

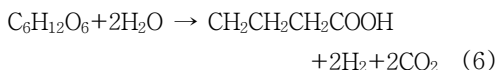
### 2.3.4 암발효

혐기성 배양이 가능한 여러 가지 박테리아들이 혐기 조건에서 자랄 때 유기물질로부터 수소를 생산하게 된다. 박테리아가 자라며 유기물질을 분해할 때 전자가 생겨나게 된다. 보통 산소가 있는 호기성 조건일 경우 산소가 이 전자의 최종 수용체 역할을 해 물이 되지만 산소가 없는 혐기성 조건일 경우 산소가 아닌 다른 물질이 전자를 최종적으로 수용하게 된다. 이때 최종 전자 수용체 중 한가지가 양성자일 경우 결과적으로 수소가 발생하게 된다.

암발효가 일어날 때에 최종 생산물이 어떤 물질이냐에 따라 다른 수소 생산 효율을 갖는다. 최종 생산물이 아세트산(acetic acid)일 경우 이론적 최고 수율은 포도당 1 mol당 4 mol의 수소가 된다.



최종 생산물이 뷰틸산(butyric acid)일 경우 이론적 최고 수율은 포도당 1 mol당 2 mol의 수소가 된다.



포도당으로부터 만들어지는 최종 생산물은 수소를 생산하는 균주가 혐기성 박테리아(anaerobic bacteria)이나 조건혐기성 박테리아(facultative anaerobic bacteria)임에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 혐기성 박테리아의 경우

포도당 1mol당 4mol의 수소를 생산하고 조건혐기성 박테리아의 경우 2mol의 수소를 생산한다. 그러나 혐기성 박테리아의 경우 산소에 매우 민감하여 산소에 노출될 경우 매우 쉽게 수소 생산 능력을 잃어버리게 되기 때문에 일반적으로 암발효 수소생산에는 조건혐기성 박테리아가 더욱 선호되는 경우가 많다<sup>7),12)</sup>.

암발효가 바이오 수소 생산에 있어서 가장 손쉽고 널리 이용되고 있는 방법이고 여러 가지 발효 경로(fermentative pathway)의 계량을 통해서 암발효의 최고 이론적 수율인 포도당 1mol당 4mol의 수소를 만들어 낸다고 해도 이 정도의 수율은 다른 수소 생산법을 대체하기엔 경제적인 경쟁력이 없다고 할 수 있다<sup>13)</sup>. 따라서 많은 연구자들이 암발효와 다른 반응을 결합하여 수소 생산공정을 계량 하는 등의 연구를 통해 수소 생산 수율을 끌어 올리는데 많은 노력을 하고 있다. 각 생물학적 수소 생산 프로세스에 따른 장점과 단점은 다음의 [Table 1]에 정리하였다.

### 2.3.5 암발효와 광발효가 결합된 시스템

암발효가 바이오 수소생산에 가장 손쉽고 빠르게 널리 쓰이고 연구되고 있는 방법이지만 그 최대 이론적 수율이 포도당 1mol당 4mol의 수소 밖에 되지 않아 경제적인 경쟁력이 매우 떨어진다는 단점을 가지고 있다. 이때 암발효와 광발효를 결합시킨 결합 시스템(hybrid system)을 통해 수소를 생산한다면 전체적인 수소 생산효율을 증가시킬 수 있다<sup>14),15)</sup>.

1단계 : 암발효(조건혐기 박테리아)



2단계 : 광발효(광합성 박테리아)



첫번째 단계인 암발효를 통해 포도당과 같은 바이오 매스는 수소, 이산화탄소와 중간 생성물인 아세트산 등으로 바뀐다. 두번째 단계에서 광발효를 통해 아세트산은 이산화탄소와 수소로 완전히 분해되게 되고 모든 반응이 완벽하게 일어난다면 이론적 최대 수율은 포도당 1mol당 4mol의 수소가 된다.

[Table 1] 바이오 수소 생산 프로세스에 따른 장점과 단점<sup>(2),1)</sup>

프로세스	장점	단점
직접적인 광분해 (direct photolysis)	태양 에너지를 이용하여 물로부터 수소를 바로 생산해 낼 수 있다. 나무, 작물 등의 다른 광합성 식물보다 광 에너지 전환 효율이 10배 이상 높다.	수소 생산을 위해 항상 빛 에너지를 필요로 한다. 광분해시 발생하는 산소가 직접적인 광분해 시스템에 악영향을 미칠 수 있다. 전체적인 광 에너지 사용 효율이 그리 높지 않다.
접적인 광분해 (indirect photolysis)	물로부터 수소를 생산해 낼 수 있다. 간접적인 광분해시 이용되는 질소화 효소로 인해 공기중의 질소를 고정화 할 수 있다.	반응 시 발생하는 기체의 약 30%를 산소가 차지한다. 산소가 광분해에 이용되는 수소화 효소와 질소화 효소의 활성을 감소시키는 역할을 한다.
광발효 (photo fermentation)	매우 넓은 파장의 빛들을 발효에 이용할 수 있다. 매우 여러 가지 물질들을 바이오 메스로 이용할 수 있다.	산소가 광발효에 이용되는 수소화 효소의 활성을 감소시킨다. 총 광 에너지 이용효율이 1-5%정도로 매우 낮은 편이다.
암발효 (dark fermentation)	빛의 유무와 상관없이 어느 때나 수소 생산이 가능하다. 여러 가지 물질들이 암발효의 탄소 원료로 이용 가능하다. 수소 생산 부산물로 아세트산, 뷰티라트등 추가적으로 이용 가능한 물질들이 만들어진다. 혐기조건에서 반응이 일어나기 때문에 산소에 의한 제한이 없다.	산소가 수소화 효소에 매우 강한 억제제로 작용한다. 상대적으로 수소 생산수율이 낮다. 최종적으로 만들어지는 생산 가스에 추가적인 분리작업이 필요한 이산화탄소가 섞여있다.

2.3.6 바이오 수소 생산에 관여하는 요인

바이오 수소 생산에 영향을 미치는 요인은 생산에 이용되는 시스템의 차이 뿐만이 아니라 다른 여러 가지가 있으며 그 요인들을 조절하고 계량함에 따라 바이오 수소 생산의 효율을 크게 증가시킬 수 있다. 가장 큰 요인중의 하나로는 바이오 수소 생산에 관여하는 미생물 종(species)이 있다. 이용되는 생산 시스템에 따라 비슷한 종들이 이용되기는 하지만 각 모든 종마다 수소 생산의 효율이 다르며 최고의 효율을 가지는 조건 또한 다르다<sup>(2),16)</sup>. 따라서 각 조건에서의 새로운 종을 찾고, 유전자 변형, 대사공학(metabolic engineering)적인 접근을 통하여 바이오 수소 생산을 증가시키려는 연구들이 진행되고 있다<sup>(17),18)</sup>. 그 외에도 배양 온도, pH, 빛의 강도와 같은 배양 시의 물리적인 조건들도 영향을 주게 된다<sup>(19)~21)</sup>. 바이오 수소의 경제적 경쟁력에는 생산에 이용되는 원재료의 가격 또한 큰 영향을 미치게 된다. 이때 원재료로 이용되는 바이오 매스에 따라 수소의 생산성 또한 큰 영향을 받기 때문에

다양한 원재료를 사용해 좀더 저렴한 바이오 수소를 효율적으로 생산하기 위한 연구도 진행되고 있다<sup>(19),22),23)</sup>.

3. 맺음말

화석연료가 점점 고갈되어 가고 있는 현 시점에서 수소 에너지는 연소 시 최종 생산물로 물밖에 만들지 않는다는 점에서 환경오염이 없는 가장 이상적인 대체 에너지 중 한가지로 여겨지고 있다. 현재 가장 활발히 수소를 생산하기 위해 이용되는 방법들의 대부분은 역설적으로 화석연료를 이용해야 한다는 한계점들을 가지고 있다. 생물학적으로 생산하는 바이오 수소는 이런 점을 극복할 수 있는 매우 매력적인 수소 생산 방식이라 할 수 있다. 하지만 바이오 수소를 상업적으로 이용하기에는 여러 가지 복잡한 공정과 낮은 효율 등으로 인하여 화석연료를 기반으로 생산되는 수소, 여러 다른 대체연료 등에 비해 아직 경제성이 떨어진다는 한계점이 있다. 그러나 바이오

오 수소생산을 위해 폐자원을 포함하는 가치가 낮은 바이오 매스들을 이용할 수 있다는 점, 궁극적으로 빛 에너지를 이용한다는 점 등의 여러 가지 장점들로 인하여 좀더 바이오 수소에 대해 연구하고 그 과정을 최적화 해 나간다면 미래에 인류의 에너지 문제를 해결하는 데에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사

본 논문은 국토해양부 한국해양과학기술진흥원의 해양에너지전문인력양성사업과 교육과학기술부 한국연구재단의 지원(NRF-2009-0093214)에 의해 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Suzuki Y., "On hydrogen as fuel gas", *International Journal of Hydrogen Energy*, 7, pp. 227~230 (1982).
2. Das D., Nejat Veziroglu T., "Hydrogen production by biological processes: a survey of literatures", *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, pp. 13~28 (2001).
3. Elam CC., Gregoire Padro CE., Sandrock G., Luzzi A Lindblad P., Hagen E-F., "Realizing the hydrogen future: the International Energy Agency's efforts to advance hydrogen energy technologies", *International Journal of Hydrogen Energy*, 28, pp. 601~607 (2003).
4. Meher Kotay S., Das D., "Biohydrogen as a renewable energy resource-Prospects and potentials", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp. 258~263 (2007).
5. Momirlan M., Veziroglu TN., "Current status of hydrogen energy", *Renewable Sustainable Energy Review*, 6, pp. 141~179 (2002).
6. B. Levin D., Pitt L., Love M., "Biohydrogen production: Prospects and limitation to practical application", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, pp. 173~185 (2004).
7. Das D., Veziroglu T. N., "Advances in biological hydrogen production processes", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp. 6046~6057 (2008).
8. Winkler M., Hemseheimer A., Gotor C., Melis A., Happe T., "[Fe]-hydrogenase in green algae: photo-fermentation and hydrogen evolution under sulfur deprivation", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, pp. 1432~1439 (2002).
9. Ghirardi ML., Zhang L., Lee JW., Flynn T., Seibert M., Greenbaum E., Melis A., "Microalgae: a green source of renewable H<sub>2</sub>", *Trends in Biotechnology*, 18, pp. 506~511 (2000).
10. Tamagnini P., Axelsson R., Lindberg P., Oxelfelt F., Wunschiers R., Lindblad P., "Hydrogenases and hydrogen metabolism of cyanobacteria", *Microbiology and Molecular Biology Review*, 66, pp. 1~20 (2002).
11. Tsygankove AA., Fedorov AS., Laurinavichene TV., Gogotov IN., Rao KK., Hall DO., "Actual and potential rates of hydrogen photoproduction by continuous culture of the purple non-sulphur bacteria *Rhodobacter capsulatus*", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 49, pp. 102~107 (1998).
12. Oh Y-K., Seol E-H., Yeol Lee E., Park S., "Fermentative hydrogen production by a new chemolithotrophic bacterium *Rhodospseudomonas palustris P4*", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, pp. 1373~1379 (2002).
13. Hellenbeck PC., Benemann JR., "Biological hydrogen production: fundamentals and limiting processes", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, pp. 1185~1193 (2002).
14. Hawkes FR., Dindale R., Hawkes DL., Hussy I., "Sustainable fermentative biohydrogen: challenges for process optimization", *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, pp. 173~185 (2004).

- Hydrogen Energy, 27, pp. 1339~1347 (2002).
15. Momirlan M., Veziroglu TN., "Recent directions of world hydrogen production", *Renewable and Sustainable Energy Review*, 3, pp. 219~231 (1999).
  16. Nandi R., Sengupta S., "Microbial production of hydrogen: an overview", *Critical Reviews in Microbiology*, 24, pp. 61~84 (1998).
  17. Kovac KL., Maroti G., Rakhely G., "A novel approach for biohydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, pp. 1478~1483 (2006).
  18. Vignais PM., Magnis JP., Willison JC., "Increasing biohydrogen production by metabolic engineering", *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, pp. 1478~1483 (2006).
  19. Yu H., Zhu Z., Hu W., Zhang H., "Hydrogen production rice winery wastewater in an upflow anaerobic reactor by using mixed anaerobic cultures", *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, pp. 1359~1365 (2002).
  20. Philips EJ., Mitsui A., "Role of light intensity and temperature in the regulation of hydrogen photoproduction by marine cyanobacteria *Oscillatoria* sp. Miami BG7", *Applied and Environmental Microbiology*, 45, pp. 1212~1220 (1983).
  21. Nath K., Das D., "Hydrogen production by *Rhodobacter sphaeroides* strain O.U. 001 using spent media of *Enterobacter cloacae* strain DM11", *Applied Microbiology and Biotechnology*, 68, pp. 533~541 (2005).
  22. Yokoi H., Maki R., Hirose J., Hayashi S., "Microbial production of hydrogen from starch-manufacturing wastes", *Biomass and Bioenergy*, 22, pp. 389~395 (2002).
  23. Ntaikou I., Gavala HN., Komaros M., Lyberatos G., "Hydrogen production from sugars and sweet sorghum biomass using *Ruminococcus albus*", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp. 1154~1163 (2008). 