

수소 발효에 의한 폐수처리 및 바이오가스 생산(I): 최적 수소 생산 조건

*선 용 호 · 한 정 우 · **박 돈 희 · 조 영 일

*한국과학기술연구원 폐기물연구실

연세대학교 공과대학 화학공학과

**전남대학교 공과대학 화학공학과

Wastewater Treatment and Biogas Production by Hydrogen Fermentation(I): Optimum Condition for Hydrogen Production

Yong-Ho Seon*, Jeong-Woo Han, Don-Hee Park** and Yung-Il Joe

*Waste Control Lab. Korea Institute of Science and Technology

Department of Chemical Engineering, Yonsei University

**Department of Chemical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

This study is on the investigation of hydrogen production and substrate removal by photosynthetic bacteria. After using of *Rhodospirillum rubrum* KS-301 and IFO 3986 which are photosynthetic bacteria as strains, *R. rubrum* KS-301 was turned out a better strain. And result of experiment in which glucose and sodium lactate, components of wastewater, were used limiting substrates, showed that the productivity of hydrogen was indifferent with the kind of substrates. In batch experiments using free cells and immobilized whole cells, the decrease in hydrogen productivity was observed in the latter case. From the results of these experiments, specific growth rate of cells, specific utilization rate of glucose, and specific production rate of hydrogen were calculated. And each rate was expressed in the form of Monod equation of which parameters were estimated. Also the optimum condition of hydrogen production for free cells was 30°C, pH 7, and 12,000 Lux, and the optimum immobilized condition was as follows: initial immobilized cell concentration 1.0 g/L, sodium alginate concentration 2% and light intensity 12,000 Lux.

서 론

최근 산업이 발전함에 따라 환경오염이 심각해 지고 있으며 국민보건을 위해서는 긴급히 해결되어야 할 문제로 대두되고 있다. 이를 해결할 수 있는 폐수처리와 부산물인 대체 에너지의 생산에 관한 연구가 다방면에서 활발하게 진행되고 있다(1-7). 이 중에서 수소는 이른바 Clean energy로 현재 석유 정제, 로켓 연료 등에 쓰이

고, 장래에는 항공기, 자동차, 연료전지 등에는 물론 가정용 연료로서도 사용될 것으로 전망되고 있는 수소가 큰 에너지원이다(1, 5).

장차 석유자원 고갈로 인하여 이러한 수소 생산은 감소하게 될 것이며 따라서 폐자원을 이용하는 생물학적 방법이 각광을 받을 것이다. 이 방법에 의한 수소 생산에는 광합성 및 혐기성 박테리아, 조류 등이 연구 대상이 되고 있다(8-10). 이 중 효율 면에서 유리하고 수소

생산성이 큰 광합성 박테리아로서 *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodospseudomonas capsulata*, *Rhodospseudomonas sphaeroides* 등이 많이 연구되고 있다(11).

*Rhodospirillum rubrum*이 빛의 존재 하에서 수소를 생성한다는 사실을 Gest 등(12-14)이 보고한 이래 여러가지가 연구되었는데, Zürer 등(15)은 유기성 폐수의 이용도 고찰하였다. 한편 Hillmer 등(16)은 *Rhodospseudomonas capsulata*에 관하여 연구하였다.

그러나, 이러한 연구는 주로 유리 균체를 사용하여 수행되었다. 최근에는 고정화 균체의 이용이 여러 장점 때문에 많이 시도되고 있다.

그러나, 박테리아를 고정화하면 물질전달 저항이 증가하는데 이러한 현상은 반응 조작 조건에 따라 다른 특성을 나타내므로 일률적 해석이 곤란하다(1, 18). 또 담체 입자 내부에 있는 미생물의 생리적 상태를 조절하기 어렵고, 공정 시작 시간이 길어진다는 등의 단점이 생긴다(17).

현재 고정화 효소의 경우에는 속도론과 물질전달 효과에 관한 이론적 해석이 상당한 진전을 보이고 있으나, 고정화 미생물에서는 고정화에 따른 여러 현상의 해석이 아직 체계화되어 있지 못하다.

본 연구에서는 먼저 균을 바꿔 여러 조건에서 실험을 수행하여 우수 균종을 선정할 후 이 유리 균체의 수소

생성 최적 조건을 확정하고, 알긴산칼슘 담체에 의한 포괄 고정화의 최적 조건을 규명하였다. 또한 주정폐수, 낙농공업 폐수, 발효공업 폐수 중에 다량 함유되어 있는 글루코오스와 락트산나트륨의 변화를 보기 위해 이를 제한 기질로 실험을 수행하여 수소 생산성과 기질 제거율을 비교하였다.

이어서, 유리 균체와 고정화 균체를 사용한 회분 실험을 통하여 수소 생산성을 비교하고, 실험 결과로부터 발효속도식을 평가하였다.

재료 및 방법

균 배양 및 배지

실험에 사용한 박테리아는 *Rhodospirillum rubrum* KS-301과 IFO 3986 두가지이다. 이 균주들의 배양 및 배지는 전보(2)에서와 같다.

실험장치 및 방법

1) 균체 및 기질 비교실험(유리균체)

회분 실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 것과 같다. 반응기로는 용량이 1.5L(밑면적 12cm×5.6cm, 높이 22.3cm)인 유리체를 사용하였다. 배양액을 높이 15cm까지 채우고

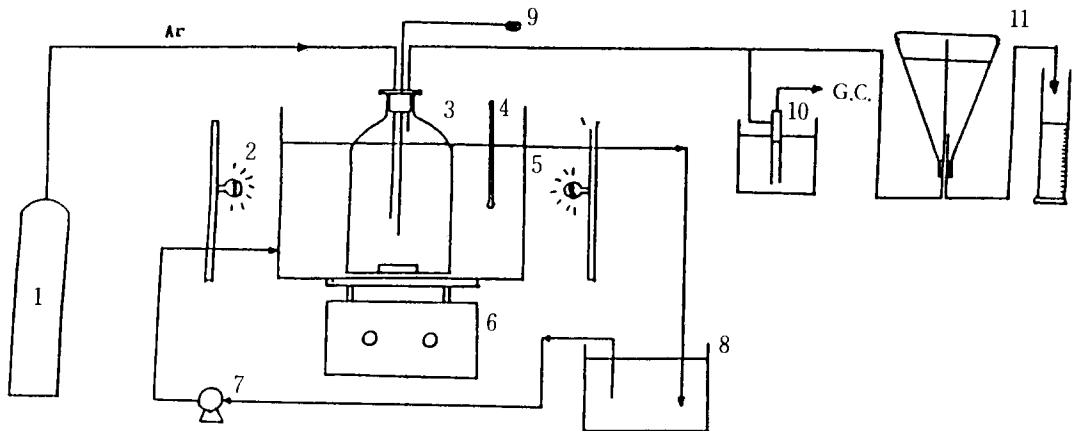


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for optimum condition and batch reactor.

- | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------|
| 1. Ar Tank | 5. Water Jacket | 9. Sample Port |
| 2. 100 Watt Incandescent Lamp | 6. Magnetic Stirrer | 10. Gas Sample Tap |
| 3. Reactor | 7. Water Circulation Pump | 11. Gas Collector |
| 4. Thermometer | 8. Water Bath | |

100 watt 전구를 양쪽에 설치하여 광도를 12,000 Lux로 하였다. 배양액을 혐기성 상태로 유지하기 위해 배양액 표면을 파라핀으로 덮고 여기에 아르곤 가스를 5분간 흘려 보냈으며 자석 교반기로 내용물을 혼합하는 한편 물 재킷을 설치하여 반응온도를 30℃로 유지하였다(16). 분석 시료는 주사기로 채취하고, 발생된 기체는 수상 치환법으로 포집하였다.

먼저 보존 배양액으로부터 균체를 취하여 broth 배지에 접종하여 2-3일씩 계대 배양한 배양액 10mL를 다시 전 배양액 1L에 접종하여 균체를 증식시켰다. 이 배양액의 OD(optical density)가 0.6이 되었을때 이 중 800mL를 취하여 10,000rpm에서 10분 동안 원심분리한 것을 반응기에 주입하여 실험을 행하였다.

실험에서는 제한 기질로 폐수 중에 다량 함유되어 있는 성분인 글루코오스와 락트산나트륨을 사용하였으며 초기 농도를 Table 1과 같이 변화시키고 시간 경과에 따른 균체량, 잔류 기질 농도, 수소 생성속도 등을 측정하였다.

2) 고정화 균체

고정화하기 위한 *R. rubrum* KS-301 균체를 지수증식에 있는 균체 농도 0.7 g / L인 배양액 860mL을 채취하여 10,000rpm에서 10분간 원심분리한 것이다. 이 농축된 균체를 전보(2)에 나타낸 방법에 의하여 고정화하였다.

생성된 고정화 입자는 완전히 건조시키기 위해 1시간 동안 천천히 교반해 주었다. 이러한 고정화 입자의 평균

반경은 약 1.5mm, 공극율은 0.318이었다. 이 입자는 24시간 배양(incubation)한 후 사용하였다. 배양액에 깬 안정제로 CaCl₂ 1 g / L를 첨가하였고 균체량을 측정하기 위해 담체 입자는 스테인레스 스틸망으로 만든 스펀을 사용하여 채취하였다.

기질로서는 글루코오스 만을 사용하였는데, 초기 농도를 0.54, 1.0, 3.0, 5.4 g / L로 변화시키고, 시간 경과에 따른 균체량, 잔류 기질 농도, 수소 생성속도 등을 측정하였다.

3) 유리 균체의 수소 생성 최적 조건

최적 조건을 찾기 위한 실험 장치는 Fig. 1과 같으며 단지 반응기만 250mL의 유리 용기로 대체하였다. 이 최적 조건 실험은 회분 실험으로 반응 조건은 균체 및 기질 비교 실험과 같으며 단지 이 배양액의 OD(optical density)가 0.6이 되었을때 이 중 800mL를 취하여 10,000 rpm에서 10분 동안 원심분리한 것을 4개의 반응기에 나누어 주입하여 실험을 행하였다. 이 실험에서는 온도, pH, 광도의 최적 조건을 찾기 위하여 Table 2의 조건에서 실험하였다.

4) 최적 고정화 균체

고정화 균체는 *R. rubrum* KS-301로서, 앞에서와 같은 방법으로 고정화하여 사용하였으며 입자 반경은 0.15cm이었다. 실험 조건은 유리 균체와 같다.

이 실험에서는 기질로 글루코오스 만을 사용하였는데 고정화 입자 중의 초기 균체 농도(0.5-4.0 g / L), 알긴

Table 1. Variation of substrate concentration in batch experiments

		Limit Substrate Concentration			
Glucose (g / L)	0.54	1.00	2.00	5.40	
	(mmol / L)	3.0	5.6	11.1	30.0
Sodium Lactate (g / L)	0.62	1.12	3.36	5.60	
	(mmol / L)	5.6	11.1	30.0	50.0

Table 2. Experimental Conditions for optimum hydrogen production by free cells of *R. rubrum* KS-301

	Experiment 1 (Temperature)	Experiment 2 (pH)	Experiment 3 (Light Intensity)
Initial Cell Conc. (g / L)	0.3	0.3	0.3
Temperature (°C)	20-40	30	30
pH	7	6-9	7
Light Intensity(Lux)	12,000	12,000	1,000-12,000

산나트륨 농도(1.0-8.0%)와 광도(1,000-12,000 Lux)를 변화시켜서 실험하고 그 영향을 고찰하였다.

발효 속도식 연구

Monod(22)는 다음과 같은 미생물의 비증식 속도식을 발표하였다.

$$\mu = \frac{\mu_{max} S}{K_s + S} \tag{1}$$

광합성 박테리아에 의한 수소 생성의 경우, 생성물인 수소가 증식 방해제로 작용하지 않으므로(23) 이 식을 사용할 수 있을 것이다.

또한 수소의 비생성속도와 기질의 비소비속도는 각각 다음식으로 나타낼 수 있을 것이다.

$$\nu_p = \frac{\nu_{max,p} S}{K_{sp} + S} \tag{2}$$

$$\nu_s = \frac{\nu_{max,s} S}{K_{ss} + S} \tag{3}$$

이러한 식에서 속도식 매개변수는 Lineweaver-Burk plot을 이용하여 구할 수 있을 것이다(Fig. 2).

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{max}} + \frac{K_s}{\mu_{max}} \frac{1}{S} \tag{4}$$

$$\frac{1}{\nu_p} = \frac{1}{\nu_{max,p}} + \frac{K_{sp}}{\nu_{max,p}} \frac{1}{S} \tag{5}$$

$$\frac{1}{\nu_s} = \frac{1}{\nu_{max,s}} + \frac{K_{ss}}{\nu_{max,s}} \frac{1}{S} \tag{6}$$

결과 및 고찰

균주의 영향

R. rubrum KS-301 균주를 사용하여 글루코오스의 초기 농도를 0.54, 1.0, 2.0, 5.4 g/L (3, 5.6, 11.1, 30

mmol/L)로 하였을때의 시간 경과에 따른 균체량의 변화, 수소 생성량, 잔류 글루코오스 농도 변화를 Fig. 3-5에 나타내었다.

균체량 곡선을 보면 전형적인 S형 곡선으로 글루코오스의 초기 농도가 0.54, 1.0, 2.0, 5.4 g/L 일때 균체의 최대 농도는 각각 1.7, 2.0, 2.2, 2.5 g/L 이었으며 각각 40, 48, 52, 66 시간 경과 후에 증식의 정체기에 도달하였다. 총 수소 생성량은 글루코오스 초기 농도 0.54, 1.0, 2.0, 5.4 g/L에 대해 각각 280, 370, 680, 1800ml 이었고 이를 최대 균체량을 기준으로 하면 각각 165, 181, 308, 720 ml./g dry wt. cell 이었다. 한편 잔류 글루코오스 농도는 각각 0.092, 0.17, 0.37, 0.92 g/L 이었다.

Fig. 6-8은 앞에서와 같은 조건에서 균주를 *R. rubrum* IFO 3986 균주로 바꾸었을때의 결과를 나타낸 것으로 균체의 최대 농도는 글루코오스 초기 농도가 0.54, 1.0, 2.0, 5.4 g/L 일때 각각 1.6, 2.2, 2.9, 4.6 g/L 이었으며 각각 22, 28, 40, 55 시간이 경과한 후에 증식의 정체기에 도달하였다. 이는 *R. rubrum* KS-301 보다 *R. rubrum* IFO 3986이 더 증식 속도가 빠름을 나타내 주고 있다. 따라서 슬러시 처리 분체에서 *R. rubrum* KS-301이 훨씬 유리함을 알 수 있다. 총 수소 생성량은 글루코오스 초기 농도 0.54, 1.0, 2.0, 5.4 g/L에 대해 각각 210, 360, 680, 1800 ml. 이었고 이를 최대 균체량을 기준으로 하면 각각 134, 164, 233, 388 ml./g dry wt. cell 이었다. 이것으로 *R. rubrum* KS-301이 *R. rubrum* IFO 3986 보다 단위 균체량 당 수소 생산성이 훨씬 큼을 알 수 있다. 한편 잔류 글루코오스 농도는 각각 0.081, 0.15, 0.35, 0.90 g/L 이었다. 잔류 글루코오스 농도에 서는 두 균주가 거의 비슷한 양상을 보여주고 있다. 이상의 결과로 *R. rubrum* KS-301을 균주로 선택하는 것이 바람직 할 것이다.

기질의 영향

R. rubrum KS-301 균주를 사용하여 기질을 락트산 나트륨으로 변화시켰을때의 실험 결과를 Fig. 9-11에 나타내었다.

락트산 나트륨 초기 농도가 0.62, 1.1, 3.4, 5.6 g/L (5.6, 11.1, 30, 50mmol/L) 일때 균체의 최대 농도는 각각 1.3, 1.5, 2.7, 3.7 g/L 이었으며 각각 50, 60, 75, 80 시간 경과 후에 증식의 정체기에 도달하였다. 이는 글루코오스를 기질로 사용한 경우와 비교하면 거의 비슷한 양상을 보여주고 있다. 총 수소 생성량은 락트산 나트륨 초기 농도 0.62, 1.1, 3.4, 5.6 g/L에 대해 각각 160, 290, 570, 850 ml. 이었고 이를 최대 균체량을 기준

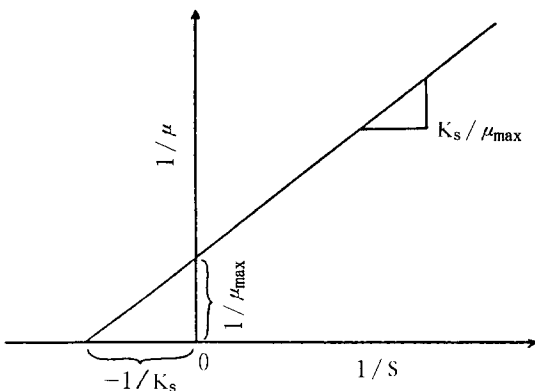


Fig. 2. Lineweaver-Burk plot of specific growth rate equation.

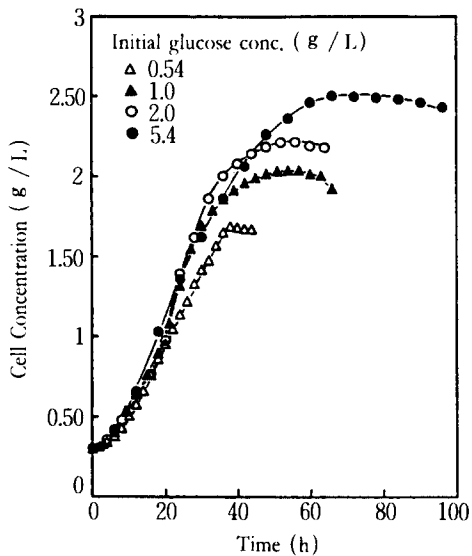


Fig. 3. Effect of initial glucose concentration on free cells concentration of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

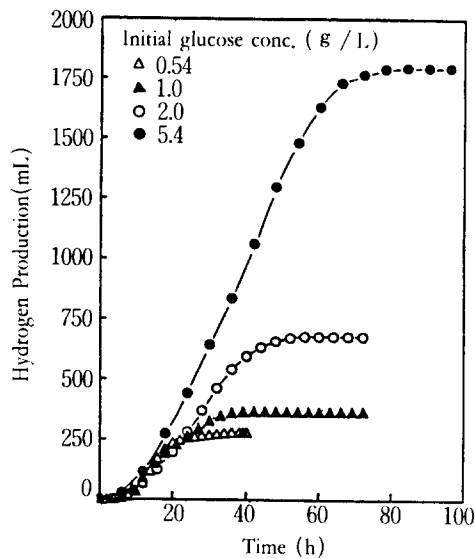


Fig. 4. Effect of initial glucose concentration on total hydrogen production by free cells of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

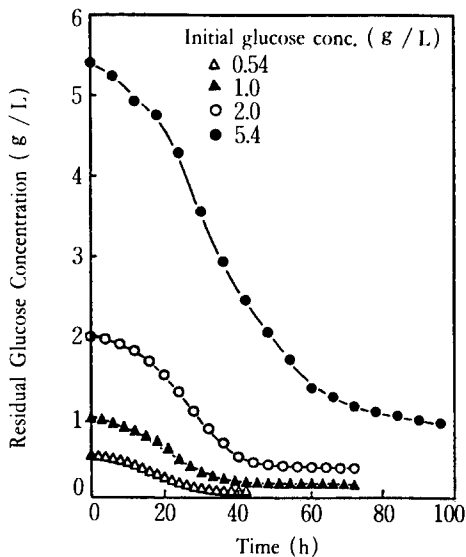


Fig. 5. Effect of initial glucose concentration on residual glucose concentration in the medium using free cells of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

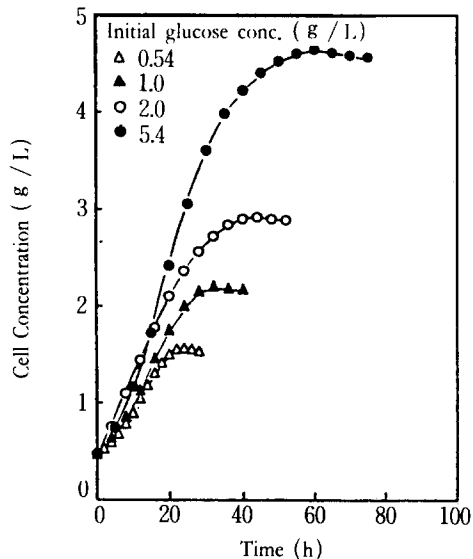


Fig. 6. Effect of initial glucose concentration on free cells concentration of *R. rubrum* IFO 3986. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

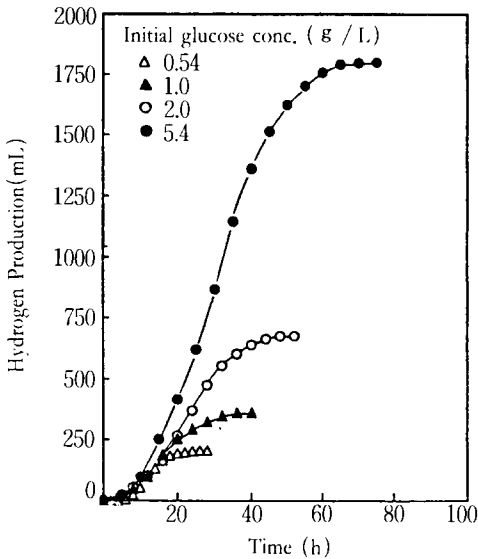


Fig. 7. Effect of initial glucose concentration on total hydrogen production by free cells of *R. rubrum* IFO 3986. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

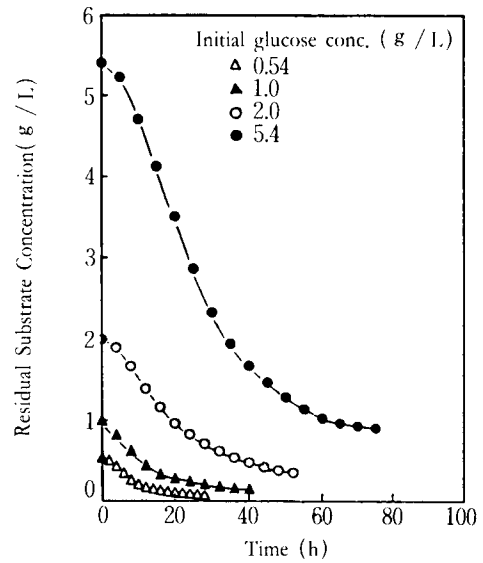


Fig. 8. Effect of initial glucose concentration on residual glucose concentration in the medium using free cells of *R. rubrum* IFO 3986. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

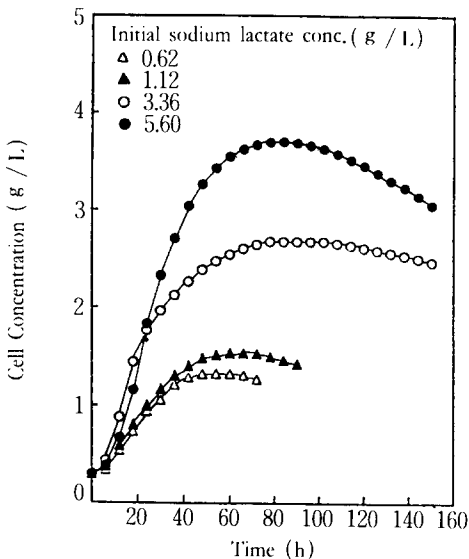


Fig. 9. Effect of initial sodium lactate concentration on free cells concentration of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

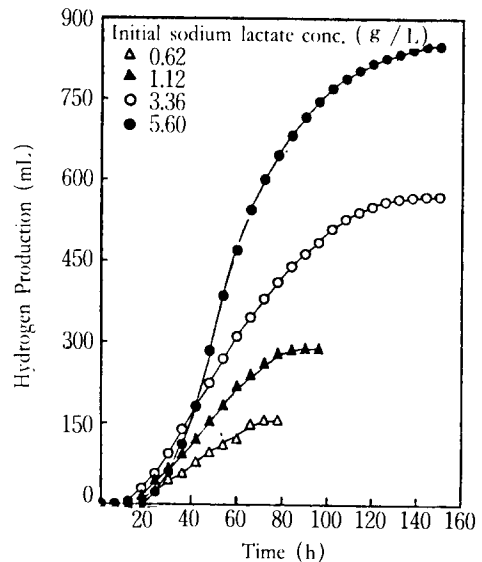


Fig. 10. Effect of initial sodium lactate concentration on total hydrogen production by free cells of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

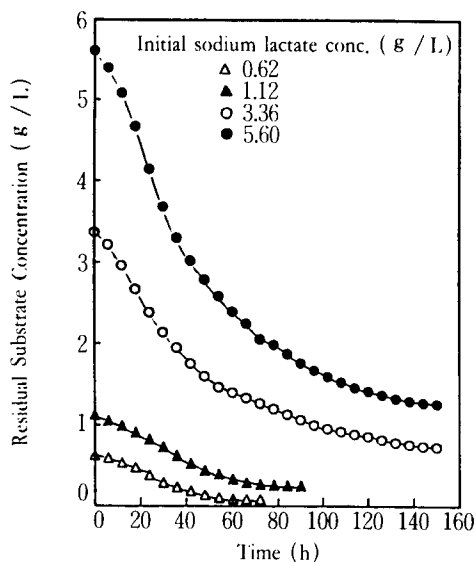


Fig. 11. Effect of initial sodium lactate concentration on residual sodium lactate concentration in the medium using free cells of *R. rubrum* KS-301. ($X_{bo}=0.3$ g / L, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$)

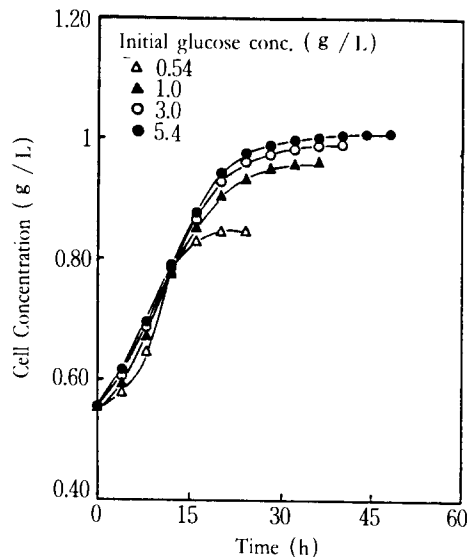


Fig. 12. Effect of initial glucose concentration on cell concentration in the immobilized *R. rubrum* KS-301 bead. ($X_{bo}=1.0$ g / L-bead, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$, $R=0.15$ cm, $A=2\%$)

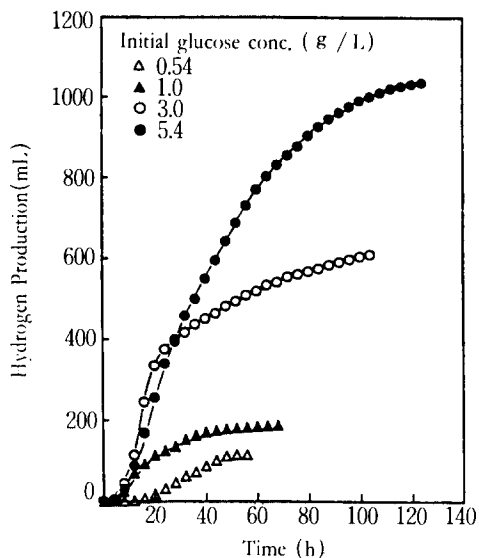


Fig. 13. Effect of initial glucose concentration on total hydrogen production by immobilized *R. rubrum* KS-301 bead. ($X_{bo}=1.0$ g / L-bead, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$, $R=0.15$ cm, $A=2\%$)

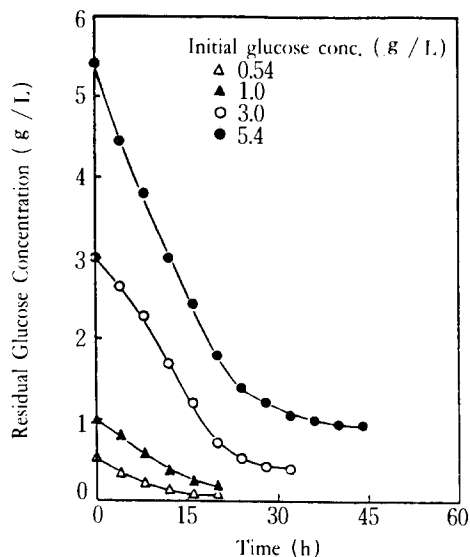


Fig. 14. Effect of initial glucose concentration on residual glucose concentration in the medium using immobilized *R. rubrum* KS-301 bead. ($X_{bo}=1.0$ g / L-bead, $I=12,000$ Lux, $pH=7.0$, $T=30^{\circ}C$, $R=0.15$ cm, $A=2\%$)

으로 하면 각각 120, 190, 213, 230 ml./g dry wt. cell 이었다. 글루코오스가 락트산 나트륨 보다 mol 기준으로 이론적으로 2배의 수소가 발생함을 감안하면 글루코오스를 사용한 경우와 비슷한 경향을 보여준다. 한편 잔류 락트산 나트륨 농도는 각각 0.083, 0.24, 0.73, 1.26 g/l 이었다. 이상의 결과에서 *R. rubrum* KS-301은 기질로 글루코오스나 락트산 나트륨을 사용해도 별 문제가 없을 것으로 생각되며 고분자 물질을 저분자 물질로 분해만 시킬 수 있다면 어느 다당류 폐수에도 사용할 수 있을 것이다.

유리 균체와 고정화 균체의 비교

R. rubrum KS-301의 고정화 입자를 사용하여 글루코오스 초기 농도를 0.54, 1.0, 3.0, 5.4 g/l로 변화시켰을 때의 시간에 따른 균체 농도, 수소 생성량, 잔류 글루코오스 농도 변화를 Fig. 12-14에 나타내었다.

이러한 결과에서 보면, 고정화 입자 내부의 최대 균체 농도는 유리 균체의 경우와 비슷한 경향이다. 그러나 수소 생산성은 Fig. 15에서 보는 바와 같이 고정화하였을 때 감소하였는데, 이는 고정화에 의한 물질전달 저항에 기인한 것이다.

한편 균체의 비증식속도는 글루코오스 초기 농도의

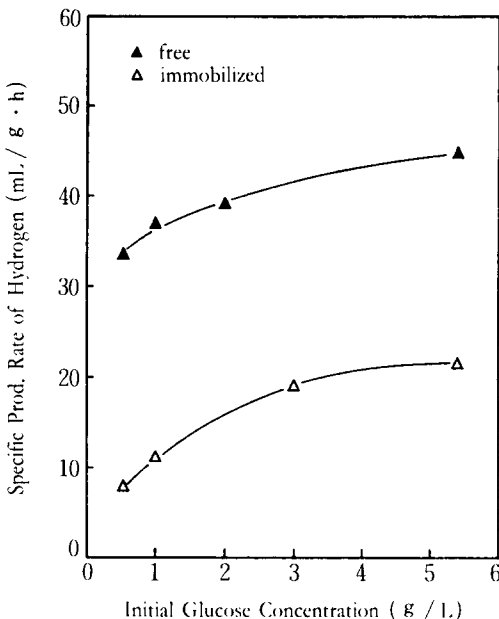


Fig. 15. Effect of initial glucose concentration on specific production rate of hydrogen.

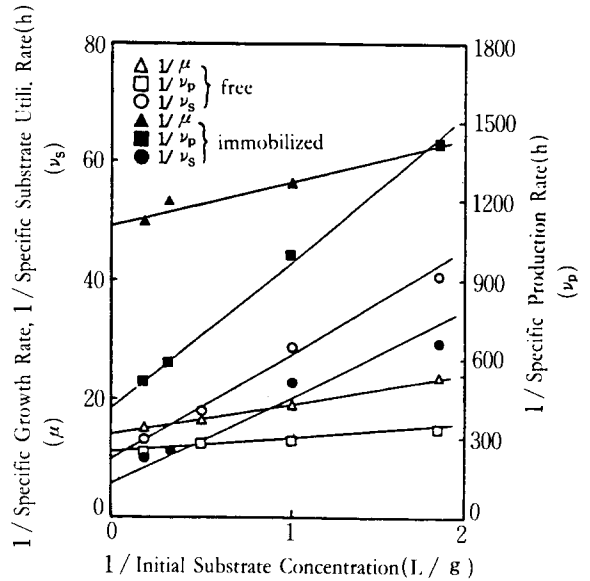


Fig. 16. Plot of $1/\mu$ vs. $1/S_0$, $1/v_p$ vs. $1/S_0$ and $1/v_s$ vs. $1/S_0$ for free and immobilized cells of *R. rubrum* KS-301.

증가에 따라 0.016-0.020 h⁻¹로서 고정화한 경우보다 유리 균체의 경우가 비증식 속도가 큰 것으로 나타났다. 또한 수소 비증식속도는 고정화한 경우보다 유리 균체의 경우가 2.0-4.2배 크고 글루코오스 비소비속도는 1.3-1.6배 크다. 세포 수량은 고정화 균체의 경우가 작고 수소수량, 이론적인 수소 전환율, 글루코오스 전환율도 작다.

이 속도는 전형적인 Monod 형을 나타내므로, Lineweaver-Burk plot 하면 Fig. 16과 같이 된다. 여기서 μ_m , $v_{max,p}$, $v_{max,s}$, K_s , K_{sp} , K_{ss} 의 값을 구하여 고정화 균체의 길보기 비증식속도, 수소의 비증식속도, 글루코오스 비소비속도를 나타내면 다음과 같다.

$$\text{유리 균체: } \mu = \frac{0.0758 S}{0.424 + S}, \quad v_p = \frac{0.00336 S}{0.232 + S},$$

$$v_s = \frac{0.0972 S}{1.642 + S}$$

$$\text{고정화 균체: } \mu = \frac{0.0203 S}{0.228 + S}, \quad v_p = \frac{0.00246 S}{1.312 + S},$$

$$v_s = \frac{0.114 S}{1.25 + S}$$

유리 균체의 최적 수소 생성 조건

R. rubrum KS-301의 유리 균체 최적 조건을 확립하기 위해 온도, pH, 광도의 영향을 실험하여 최적 수소 생성 조건을 검토하였다.

1) 온도의 영향

초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 초기 균체 농도 0.3 g / L, pH 7, 광도 12,000 Lux 이었을 때, 온도를 20, 30, 40℃에서 실험한 결과(Table 3), 수소 생성속도는 30℃에서 2.39mg / L · h로 가장 크고, 40℃일 때는 수소가 거의 생성되지 않았다. 이 값은 문헌(19-20)에 보고된 최대값 2.90mg / L · h와 거의 비슷하다. 따라서 최적 온도가 30℃임을 알 수 있다.

Table 3. Effect of reaction temperature on the hydrogen production rate by free cells of *R. rubrum* KS-301*

Reaction Temperature (°C)	Hydrogen Production Rate (mg / L · h)
20	1.11
30	2.39
40	0

*S_i=5.4 g / L, X_{bo}=0.3 g / L, pH=7.0, I=12,000 Lux

2) pH의 영향

초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 초기 균체 농도 0.3 g / L, 온도 30℃, 광도 12,000 Lux 이었을 때, pH 6, 7, 8, 9로 하여 실험한 결과(Table 4), pH 7에서 수소

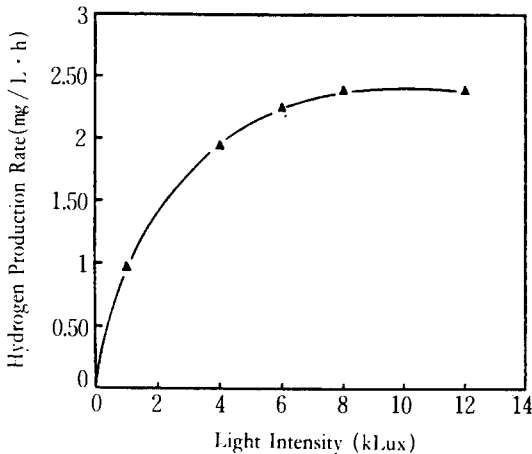


Fig. 17. Influence of light intensity on the hydrogen production rate by free cells of *R. rubrum* KS-301.

(S_i=5.4 g / L, X_{bo}=0.3 g / L, pH=7.0, T=30℃)

Table 4. Effect of pH on the hydrogen production rate by free cells of *R. rubrum* KS-301*

pH	Hydrogen Production Rate (mg / L · h)
6	1.65
7	2.39
8	1.33
9	0

*S_i=5.4 g / L, X_{bo}=0.3 g / L, T=30℃, I=12,000 Lux

생성속도가 제일 컸다. 이는 다른 결과(19-20)와 비슷한 경향이다. 따라서 최적 pH는 7.0 이었다.

3) 광도의 영향

초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 초기 균체 농도 0.3 g / L, pH 7, 온도 30℃일 때 광도의 영향을 실험한 결과(Fig. 17), 8,000 Lux에서 광 포화 현상을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 최적 실험 조건은 광도를 충분히 하여 12,000 Lux로 유지하는 것이다.

최적 고정화 조건

고정화 입자 중의 초기 균체 농도, 알긴산나트륨 농도의 영향을 실험하여 고정화 균체의 최적 수소 생성 조건을 검토하였다.

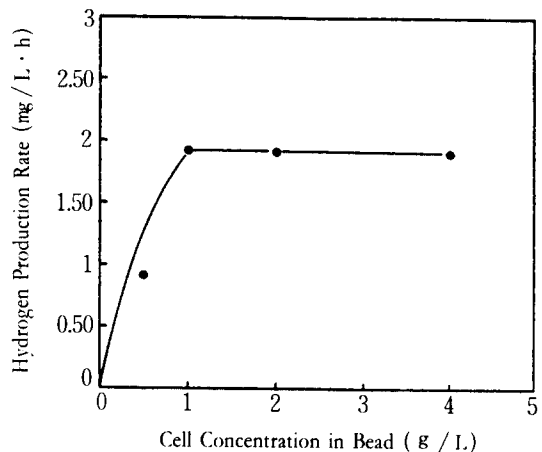


Fig. 18. Effect of cell concentration in bead on the hydrogen production rate by immobilized cells of *R. rubrum* KS-301.

(S_i=5.4 g / L, I=12,000 Lux, pH=7.0, T=30℃, R=0.15cm, A=2%)

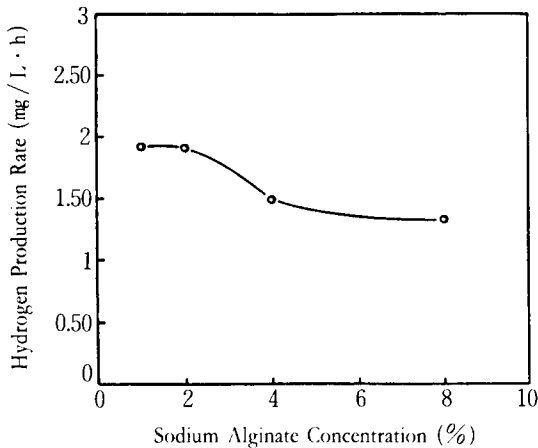


Fig. 19. Effect of alginate concentration on the hydrogen production rate by immobilized cells of *R. rubrum* KS-301.

($S_1=5.4$ g / L, $X_{bo}=1.0$ g / L-bead, $I=1$ 2,000 Lux, pH=7.0, $T=30^\circ\text{C}$, $R=0.15$ cm)

1) 초기 균체 농도의 영향

알긴산칼슘 고정화 입자 내에 포괄된 균체 농도가 수소 생성속도에 미치는 영향을 Fig. 18에 나타내었다. 초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 온도 30°C, pH 7, 광도 12,000 Lux, 알긴산나트륨 농도 2%, 입자반경 0.15cm로 정하고, 균체 농도를 0.5-4.0 g / L로 변화시켰다. 실험 결과, 수소 생성속도는 균체 농도 1.0 g / L 이상에서는 거의 변화가 없었다. 이는 다른 실험 결과(21)와도 비슷한 현상이다.

2) 알긴산나트륨 농도의 영향

알긴산나트륨 농도가 수소 생성속도에 미치는 영향을 Fig. 19에 나타내었다. 초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 온도 30°C, pH 7, 광도 12,000 Lux, 입자 내 균체 농도 1.0 g / L, 입자 반경 0.15cm 일 때 알긴산나트륨 최적 농도는 대략 1%이다. 그러나 이 값은 강도가 너무 약하여 사용할 수 없었기 때문에, 실험에서는 알긴산 나트륨 농도를 2%로 하는 것이 바람직 할 것이다.

3) 광도의 영향

고정화 입자에 의한 수소 생성속도와 광도의 관계를 실험한 결과를 Fig. 20에 나타내었다. 실험 조건은 초기 글루코오스 농도 5.4 g / L, 온도 30°C, pH 7, 광도 1 2,000 Lux, 입자 내 균체 농도 1.0 g / L, 입자 반경 0

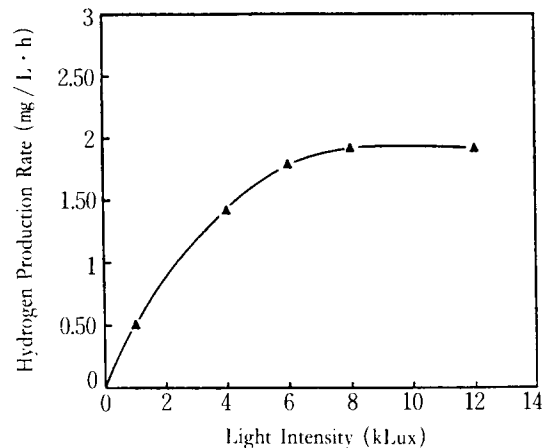


Fig. 20. Influence of light intensity on the hydrogen production rate by immobilized cells of *R. rubrum* KS-301.

($S_1=5.4$ g / L, $X_{bo}=1.0$ g / L-bead, pH=7.0, $T=30^\circ\text{C}$, $R=0.15$ cm, $A=2\%$)

.15cm이다. 고정화 입자에서도 유리 균체와 같은 양상을 나타낸다. 그러나 그림이 오른쪽으로 약간 이동하였는데, 이는 고정화 입자를 투과하는 빛의 감소를 뜻한다.

요 약

본 연구는 광합성 미생물을 이용한 수소 생산과 기질 제거에 관한 연구로서, 광합성 박테리아의 일종인 *R. rubrum* KS-301과 IFO 3986의 두 균주를 비교한 결과, *R. rubrum* KS-301이 더 우수한 균주로 밝혀졌으며 폐수내의 성분인 글루코오스와 락트산나트륨을 제한 기질로 실험을 수행한 결과, *R. rubrum* KS-301 경우 수소 생산성은 기질에 무관하였다. 유리 균체와 고정화 균체를 사용한 회분 실험 결과, 수소 생산성은 고정화의 경우가 더 작았으며 이러한 실험 결과로부터 균체 비증식속도, 수소 비생성속도, 기질 비소비속도를 구하여 각각의 Monod형의 속도식으로 나타내고 속도식 매개변수를 평가하였다. 또한 유리 균체의 수소 생산 최적 조건 및 알긴산칼슘, 담체에 의한 포괄 고정화의 최적 조건을 규명한 바, 유리 균체의 경우, 온도 30°C, pH 7, 광도 12,000 Lux이었고, 고정화의 경우는 균체 초기 농도 1.0 g / L, 알긴산나트륨 농도 2%, 광도 12,000 Lux 이었다.

감 사

이 논문은 1990년도 연세대학교 학술연구비에 의하여 작성된 것임

기 호 설 명

A	: Na alginate concentration (%)
I	: Light intensity (Lux)
K_s	: Saturation constant of Monod kinetics (g / l.)
K_{sp}	: Kinetic constant for product saturation (g / l.)
K_{ss}	: Kinetic constant for substrate saturation (g / l.)
S	: Substrate concentration (g / l.)
T	: Temperature (°C)
μ	: Specific growth rate (h^{-1})
μ_{max}	: Maximum specific growth rate (h^{-1})
$\nu_{max,p}$: Maximum specific hydrogen production rate (h^{-1})
$\nu_{max,s}$: Maximum specific substrate utilization rate (h^{-1})
ν_p	: Specific hydrogen production rate (h^{-1})
ν_s	: Specific substrate utilization rate (h^{-1})

참 고 문 헌

1. 박돈희, 조영일(1984), *화학공업과 기술*, **1**(2), 13.
2. 선용호, 백남준, 조영일(1987), *한국생물공학회지*, **1**(2), 25.
3. 이명재, 선용호, 한정우, 조영일(1988), *산업미생물학회지*, **16**(6), 510.
4. D. Pimental et al. (1983), *Solar Energy*, **30**, 1.
5. P. F. Weaver, S. Lien, and M. Seibert(1980), *Solar Energy*, **24**, 3.
6. I. Karube, T. Matsunaga, S. Tsuru, and S. Suzuki(1976), *Biochim. Biophys. Acta*, **444**, 338.
7. J. D. Brosseau, and J. E. Zajic (1981), *Adv. in Bio-*

technol., **2**, 281.

8. E. N. Kondratieva, and I. V. Gogotov (1983), *Advances in Biochemical Engineering*, Vol. **28**, p. 139, Springer-Verlag.
9. 三宅淳(1987), *微生物*, **3**(6), 594.
10. S. Suzuki and I. Karube (1983), *Applied Biochemistry and Bioengineering*, Vol. **4**, p. 281, Academic Press.
11. I. Karube and S. Suzuki (1988), *Methods Enzymol.*, **137**, 668.
12. H. Gest and M. D. Kamen (1949), *Science*, **109**, 558.
13. M. D. Kamen and H. Gest (1949), *Science*, **109**, 560.
14. H. Gest and M. D. Kamen (1949), *J. Bacteriol.*, **5**(2), 239.
15. H. Zurrer, and R. Bachofen (1979), *Appl. Environ. Microbiol.*, **37**(5), 789.
16. P. Hillmer and H. Gest (1977), *J. Bacteriol.*, **129**(2), 724.
17. J. G. Boersma et al. (1979), *Biotechnol. Bioeng.*, **2**(1), 1711.
18. K. Miyamoto and Y. Miura (1980), *Proc. Biochem.*, **6**(5), 23.
19. J. S. Kim, K. Ito, and H. Takahashi (1981), *J. Ferment. Technol.*, **59**(3), 1985.
20. J. S. Kim, H. Yamauchi, and K. Ito (1982), *Agric. Biol. Chem.*, **46**(6), 1469.
21. I. Karube et al. (1984), *Ann N. Y. Acad. Sci.*, **43**(Enzyme Eng.), 427.
22. S. Aiba and A. E. Humphrey (1973), *Biochemical Engineering*, 2nd ed., Academic Press, Inc.
23. H. Gest, M. D. Kamen, and H. M. Bregoff (1950), *J. Biol. Chem.* **182**, 153.

(Received; October 10, 1991, Revised; October 20, 1991,

Accepted; November 29, 1991)