

석탄 합성가스로부터 효율적인 생물학적 수소 생산에 관한 연구

†강 환 구 · 전 희 진
한남대학교 공과대학 화학공학과
(접수 : 2000. 5. 15., 게재승인 : 6. 21.)

The Study on Efficient Biological Hydrogen Production Scheme from Coal Synthetic Gas

†Whankoo Kang and Heejin Chun
Department of Chemical Engineering, Hannam University, Taejon 306-791, Korea
(Received : 5. 15., Accepted : 6. 21.)

A microbiological hydrogen production process was optimized. Anaerobic photosynthetic bacteria, like *Rhodospirillum rubrum* which is known to produce hydrogen from carbon monoxide efficiently and remove sulfur, was used. To evaluate the potential of this microorganism, the optimization of media, fermentation condition, light intensity and light requirement for CO conversion was tried in batch cultures and the continuous fermenter was also applied for this process. The gas residence time on CO conversion was sought out to get high conversion of carbon monoxide to hydrogen. Through this study, the possibility of microbial synthetics gas conversion process was proposed.

Key Words : carbon monoxide, conversion, hydrogen, *Rhodospirillum rubrum*

서 론

일산화탄소로부터 수소를 생산하는 미생물에 관하여는 상당한 기간동안 연구가 되어왔으나 그 연구의 대부분은 일산화탄소 전환원리 등 반응의 mechanism 및 CO dehydrogenase 등 관련 효소에 대한 기초적인 연구가 대부분이었다(1,2).

일산화탄소를 전환하는 미생물의 종류들과 반응 mechanism을 살펴보면 먼저 혐기적으로 일산화탄소는 메탄으로 바뀌어질 수 있으며 이러한 반응은 *Methanobacterium thermo autotrophicum* (3)에 의해서 이루어질 수 있고 *C. pasteurianum*과 *C. thermoacetium* 등에 의하여 일산화탄소가 이산화탄소로 산화되어 질 수 있다(4). 그러나 *C. thermoacetium*은 dextrose 존재하에서만 CO를 H₂로 바꾸는데(5) 이 경우에는 수소생산원가가 높아져 산업적으로 이용이 어려운 실정이다. 이들은 tertapyrroloe cofactor안에 nickel을 포함하고 있는 CO dehydrogenase라는 효소를 가지고 있다고 알려지나 이 미생물들의 일산화탄소 전환율은 낮은 편으로 알려져 있다.

또한 호기적으로 일산화탄소를 산화하는 carboxydobacteria(6)가 알려져 있는데 이들은 membrane associated CO oxidase를 가

지고 있으나 methylene blue 같은 electron acceptor 존재하에서만 CO를 산화하는데 이 CO oxidase는 molydenum을 포함하고 있으며 일산화탄소를 탄소 및 에너지원으로 쓸 수 있다고 알려지며(1,2,7) 혐기적으로 일산화탄소를 수소로 바꾸는 purple non-sulfur 박테리아로는 *Rhodospseudomonas gelatinosa*와 *Rhodospirillum rubrum*이 보고되어 있는데(2,8) 이들 박테리아는 광합성을 하고 빛의 존재하에서 여러 탄소를 이용하여 잘 자라는 것으로 알려져 있다.

우선 *R. gelatinosa*를 보면 혐기적 조건에서 빛이 있어야 일산화탄소를 수소로 전환하는 것으로 알려져 있고(9) doubling time은 약 7 hr, 최종 세포농도는 $1\sim 3\times 10^9$ cells/mL를 얻을 수 있는 것으로 알려지나(8) 이들 미생물은 빛이 없는 일산화탄소를 전혀 분해하지 않고(10) 이러한 activity가 안정적이지 않은 것으로 알려져 상업적 이용에는 어려움이 예상된다. 반면 *R. rubrum*은 어두운 곳에서도 CO dehydrogenase 효소를 이용하여 일산화탄소로부터 stoichiometric한 양의 수소를 생산하는 것으로 알려져 있다(11). 즉 이 cell들이 성장하는 데에는 일부 빛을 필요로 하나 실제 수소 생성단계에서는 빛을 필요로 하지 않는 것으로 알려져 상업적 이용이 기대되어진다. 또한 어떤 연구자는 *R. rubrum*에 의해 일산화탄소 고정화도 이루어진다고 보고하고(12) 이 경우는 ribulose biphosphate pathway를 사용하여 CO₂를 assimilation 한다고 발표하였고 이러한 부수효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 *R. rubrum*은 황(sulfur)에 대한 높은 tolerance를 가질 뿐 아니라 이를 제거하는 역할을 한다는 보고도

†Corresponding Author : Department of Chemical Engineering, Hannam University, Taejon 306-791, Korea
Tel : 042-629-7932, Fax : 042-623-9489
E-mail : wkang@eve.hannam.ac.kr

있어 이의 부수효과도 기대된다.

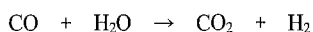
결국 여러 종류의 미생물이 일산화탄소를 수소로 전환하나 이들 중 *R. rubrum*이 제일 높은 일산화탄소로부터 수소로의 전환율을 가지고 있는 등 가능성이 있는 것으로 보여진다.

현재 우리나라는 석유 등 액체 연료의 생산량은 전무하나 석탄은 매우 많은 편이다. 그리하여 석탄으로부터 액체 연료를 만들려는 연구들이 계속 행하여져 직접적 석탄 액화나 Fisher Tropsh 반응에 의한 합성가스의 액화가 개발되었다(113,14). 그러나 생산된 액체 연료는 수소/탄소비가 2정도이나 수소/탄소비가 1정도 밖에 되지 않아 결과적으로 석탄으로부터 액체 연료 생산시는 50% 이상의 추가 수소를 넣어 주어야 한다. 그리고 석탄 액화물과 다른 화석자원(fossil resources)으로부터의 연료, 즉 tar sand로부터의 bitumen과 oil shale로부터의 kerogen은 많은 양의 황이나 질소 등의 heteroatom 화합물을 지니고 있어 이것이 refining 전에 반드시 제거되어야 하는데 이들 황이나 질소 등의 물질은 수소와의 반응으로 제거되어질 수 있다. 그러므로 수소는 석탄 및 화석자원의 이용에 있어서 꼭 필요한 성분이다. 현재 대부분의 수소는 합성가스로부터 만들어지고 있는데 이 합성가스는 천연가스를 개질하거나 석탄의 가스화에 의하여 만들어지고 이 합성가스 중 일산화탄소가 물과 반응하여 water-gas shift 반응에 의해 수소를 생산하게 된다. 그러나 이 공정은 chromium, cobalt 등의 촉매를 사용하게 되는데 이 과정 중에 황이나 탄소 침착 및 높은 온도 등에 의해 쉽게 촉매의 비활성화가 되어지며(15) 이러한 공정에 의해 생산된 수소의 비용은 높은 편이므로 이것이 많은 양의 수소를 써야 하는 대체 액체 연료개발을 어렵게 하고 있다. 결과적으로 많은 양의 수소 생산을 위한 경제적인 공정 개발이 대체 에너지 개발에 꼭 필요하게 된다.

반면 생물학적 방법에 의하여 water-gas shift 반응이 일어날 수 있는데, 이러한 반응은 몇 종류의 혐기성 박테리아에 의해 행해진다. 이들 박테리아에는 *Rhodospseudomonas gelatinosa* 및 *Rhodospirillum rubrum* 등이 있는데(9-11) 이들은 일산화탄소를 수소로 전환시키며 높은 전환율을 가지고 있어 일산화탄소를 매우 높은 생성수율로 수소로 바꿀 수 있다고 알려져 있다.

그러므로 이 연구에서는 이러한 높은 전환율을 가진 미생물을 사용하여 합성가스로부터 수소를 높은 수율로 생성되게 하는 조건확립에 목적이 있으며 이 경우에 생물 공정에서는 촉매 공정에서 보는 것과 같은 황이나 탄소 침착 같은 문제가 없고 오히려 황 등을 제거하는 일도 동시에 할 수 있을 것이다.

현재 일산화탄소를 전환할 수 있는 여러 미생물들이 알려져 있으나 이들 중 *Rhodospseudomonas gelatinosa*와 *Rhodospirillum rubrum*은(8) 혐기성 광합성 박테리아로서 가지고 있는 CO dehydrogenase 효소를 이용하여 일산화탄소와 물로부터 다음 식에 의해 일산화탄소와 수소를 만드는 것으로 알려져 있다.



본 논문에서는 이들 중 혐기성 광합성 박테리아인 *Rhodospirillum rubrum*을 이용하여 일산화탄소와 물로부터 수소를 생산할 때의 조건을 살펴보았다. 이 실험은 회분식 발효로 진행하였으며 pH, 온도, 기질인 CO 및 CO₂의 농도, 여러 탄소원과 질소원의 영향, *R. rubrum* 성장에 필요한 빛의 세기 및 빛의 요구성

등등의 영향을 실험하여 세포성장 및 수소 생산을 최적화하는 조건들을 구하였다.

또한 연속 생물반응기를 이용하여 수소 생산을 최적화하는 실험을 진행하였으며 이 chemostat 생물반응기를 이용하여 CO가스의 반응기내 체류시간의 영향을 실험하여 일산화탄소 전환율 및 수소생성수율을 최적화하였다.

재료 및 방법

균주 및 배양방법

ATCC로부터 구매한 *Rhodospirillum rubrum*을 이용하였으며 모든 조작은 strict anaerobic 상태에서 진행되어졌다. 실험은 혐기성 조건에서 진행되는데 이를 위해 serum bottle에 배지를 채우고 질소가스로 purging하면서 100℃에서 2~5분간 끓인 다음 상온에서 50℃까지 식힌 후 stopper를 이용하여 capping하고 이를 다시 autoclave하여 사용하였다. 특히 첫 번째 실험은 회분식 방법으로 150 mL짜리 serum bottle을 사용하였으며 이 serum bottle은 특별한 crimp seal이 되어 있다. 이 bottle에 45 mL media와 5 mL seed culture를 집어 넣고 나머지 100 mL 공간은 합성가스를 채워 사용하였으며 이때 합성가스는 약 60% 일산화탄소, 20% 이산화탄소, 20% 질소의 성분이 되게 세 가스를 섞어 만들었다. 이 이유는 질소는 일산화탄소 전환 계산을 위한 inert 가스로 포함되었고 일산화탄소의 전환 실험을 위한 관계로 실제 합성가스와 일부 조성의 차이가 있는 합성 가스를 사용하였다. 이렇게 채워진 합성가스의 최초 압력은 1atm으로 맞추어 지나 실험조건에 따라서 합성가스의 성분 및 압력은 변화되어 실험되었다. 사용할 배지는 PFN mineral 및 trace metal과 약간의 vitamin 그리고 NH₄Cl 등을 함유하고 있으며, 이들은 autoclave와 filtering을 통한 후 질소로 2분 정도 purge하게 된 후 각 serum bottle에 채워지고 질소 가스하에서 고무 stopper와 알루미늄 캡으로 seal된다. 그 후 종균 *R. rubrum*으로 접종되고 합성가스를 채우게 된다. 이때 실험 조건에 따라 media, pH, CO dehydrogenase cofactor 등을 정하게 되며 이 serum bottle들은 tungsten lamp가 장착된 lighted shaking incubator에 넣어져 규칙적으로 가스샘플이 채워져서 gas chromatography를 이용 소비된 일산화탄소의 양과 생성된 수소의 양을 분석하며 세포 농도는 480 nm에서 spectrophotometer에 의해 O.D.를 재었다. 이때 lighted shaking incubator의 빛의 세기는 바꾸어져 실험하게 되었다. 앞에서 언급한 배지 성분 최적화에는 후일 세포가 성장만의 단계에서의 탄소원에 관한 연구로 CO, CO₂, acetate 등을 폭넓게 실험하였으며 온도는 26℃에서 34℃사이, 빛의 세기는 1200~2400 Lux 정도를 실험하였다. 일산화탄소는 0.22 μm filter를 통해 주입하며 serum bottle은 진탕배양기(vision 과학)에 넣어 배양하였다. 또한 발효기에서의 실험은 배지가 준비된 발효기에 질소를 purging하고 이를 autoclave한 후 용존산소 수준이 0으로 떨어질 때까지 다시 질소를 흘려준다. 이와 같은 회분식 실험을 통하여 *R. rubrum* 세포 성장 및 수소생성의 최적화 조건을 구하게 되었다.

또한 CSTR을 위한 실험방법으로는 한국발효기(5L)를 생물반응기로 하여 실험하였으며 합성가스를 rotometer를 통과시켜 섞어 만들었다. 그리고 이 합성가스는 연속적으로 생물반응기를 통과하게 된다. 이때 합성가스의 생물반응기내 체류시간을 변화

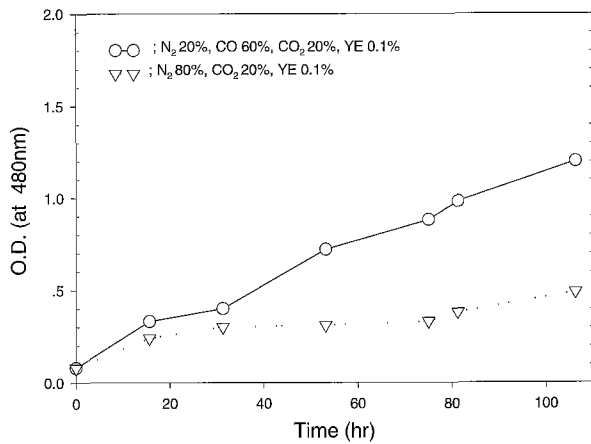


Figure 1. The Effect of CO on *R. rubrum* Cell Growth.

를 시켜 합성가스의 생물반응기내 체류시간 등에 따른 일산화탄소 전환율을 조사하였다. 배지는 간헐적으로 추가 공급되어졌다. 기체 및 세포 농도 측정 방법은 앞에 언급한 바와 동일하다.

분석방법

세포농도는 분광광도계(Milton roy, spectronic 21D) 482 nm에서 구한 흡광도로 나타내었다. 일산화탄소, 수소, 그리고 질소 분석은 가스크로마토그래피(Donam, DS6200)에서 수행하였다. 사용된 칼럼은 길이 6 ft의 녹슬지 않는 stainless steel이고 충전물질은 Molecular sieve 13x(CRS)이었으며 TCD detector를 이용하였다. 실험조건은 주입부 60℃, 오븐 35℃, 그리고 검출부 100℃ carrier gas로는 Ar gas를 30 mL/min로 흘려주었다.

결과 및 고찰

탄소원 및 질소원의 영향

본 연구에서는 gas substrate로서 일산화탄소, 이산화탄소, 그리고 액체 배지에 들어가는 탄소원으로서 아세테이트가 *R. rubrum* 성장에 미치는 영향을 확인하였다. 이 실험은 tungsten lamp가 장치된 illuminated shaking incubator에서 아V에서 언급한 기본 배지를 이용하여 30℃, 350 rpm, 1700 Lux의 빛의 세기 환경에서 진행하였다. *R. rubrum*은 빛 존재하에서 CO₂를 사용하여 광합성한다고 알려져 있으며 또한 CO를 전환하여 CO₂와 H₂를 생산한다고 보고되어진다. 따라서 이 실험에서는 일산화탄소를 60%, 이산화탄소 20%, 질소 20%를 포함한 합성가스와 이산화탄소 20%와 질소 80%를 포함한 gas substrate를 이용하여 *R. rubrum* 성장에 미치는 영향을 조사한바 Figure 1에 보여지는 바와 같이 이산화탄소만을 주입하였을 경우에는 *R. rubrum* 성장이 낮은 반면 일산화탄소를 포함한 합성가스를 주입하였을 경우는 세포생장이 매우 빨라지는 현상을 볼 수 있었고, 이때 0.1% yeast extract를 질소원으로 사용하는 경우 이산화탄소만 사용하였을 경우에 비해 일산화탄소를 포함하는 합성가스를 이용할 때 최종 세포농도가 3배 이상 증가됨을 볼 수 있다. 이는 *R. rubrum*의 강력한 CO dehydrogenase 효소 때문임을 알 수 있었고 *R. rubrum*의 경우는 CO농도 90% 이상에서도 자랄만큼 CO에 대한 내성이 크다고 알려져 있어 *R. rubrum*을 이용한 CO 전환에 전망을 밝게 해주고 있다. 또한 Figure 2에 보여지는 바와 같이

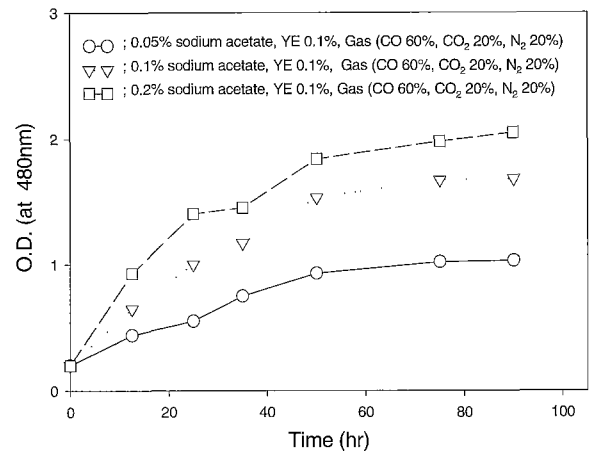


Figure 2. The effect of sodium acetate on *R. rubrum* cell growth.

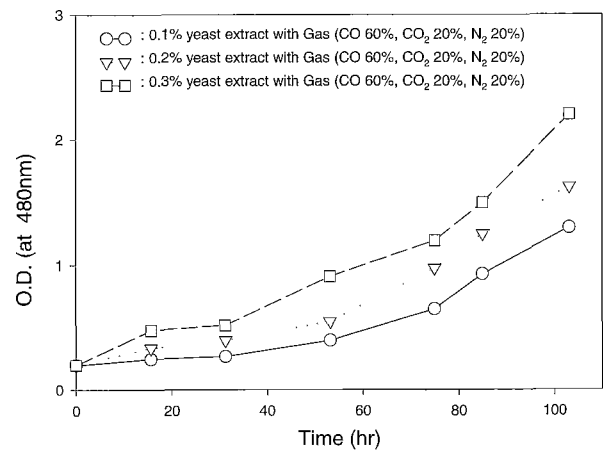


Figure 3. The effect of yeast extract on *R. rubrum* cell growth.

sodium acetate의 첨가가 *R. rubrum*의 성장에 미치는 영향을 조사해 보았는데 yeast extract 1 g/L가 함유된 배지에 sodium acetate양을 0.05%, 0.1%, 0.2%로 변화시키고 gas phase에 합성가스를 주입하였을 때 첨가된 acetate의 양에 따라 세포농도가 증가됨을 볼 수가 있었다. 따라서 향후 세포성장단계와 수소생성단계를 2 stage로 나누어 운영할 때 세포성장단계시 acetate의 이용은 충분히 고려되어질 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 또한 질소원으로의 yeast extract의 영향을 실험하였고 이는 Figure 3에 보여지는데 yeast extract의 양이 0.1%에서 0.3%로 증가되었을 때 세포성장도 2배 이상 증가됨을 알 수 있었다. 특히 본 실험 결과에는 보여지지는 않으나 yeast extract의 첨가에 의하여 CO의 H₂으로의 전환속도도 증가됨을 알 수 있었다. 본 실험에서 CO 1 mol이 소비되어지면 equivalent한 1 mol의 H₂가 만들어지는 것이 실험적으로도 확인되어졌다.

pH의 영향

*R. rubrum*의 성장 및 CO 전환에 미치는 pH의 영향을 조사하였다. 이 실험에서는 앞에서 언급한 기본 배지를 사용하고 합성가스를 gas space에 충전하여 illuminated shaking incubator에서 30℃, 350 rpm, 1700 Lux하에서 pH를 5.5에서 7.5까지 바꾸어 *R. rubrum*을 이용하여 CO 전환을 시도하였다. 이 결과는 Figure

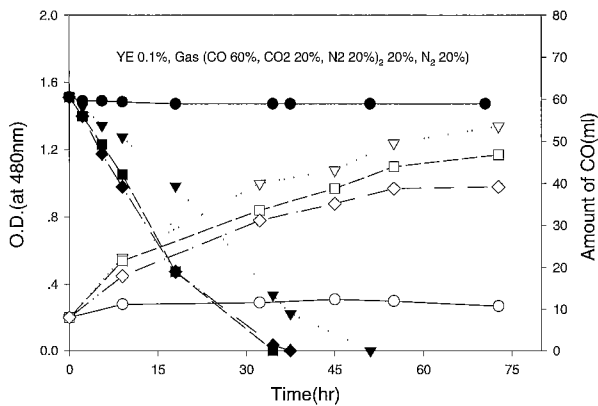


Figure 4. The effect of pH on cell growth and CO consumption with *R. rubrum*. ○—○ : pH 5.5 O.D., ▽—▽ : pH 6.0 O.D., □—□ : pH 7.0 O.D., ◇—◇ : pH 7.5 O.D., ●—● : pH 5.5 CO consumption, ▾—▾ : pH 6.0 CO consumption, ■—■ : pH 7.0 CO consumption, ◆—◆ : pH 7.5 CO consumption.

4에 나타나는데 *R. rubrum* 세포 성장에 미치는 pH의 영향을 보면 pH가 5.5에서는 세포 성장이 잘 되지 않음을 알 수 있고 pH가 6~7범위가 *R. rubrum* 세포 성장의 최적조건임을 알 수 있었고 pH가 7.5 정도가 되게 되면 세포 성장이 급격히 둔화되어 짐을 알 수 있었다. 반면 pH가 CO로부터 H₂로의 전환속도에 미치는 영향을 살펴보면 pH가 7~7.5 부근에서 최적값을 보이고 있고 pH 5.5의 경우에는 CO를 매우 천천히 소비하며 pH가 6에서도 CO 소비 속도가 약간 낮음을 알 수 있다. 이러한 *R. rubrum*에 의한 CO 전환 경우 CO 1 mol이 CO₂와 H₂ 각 1 mol씩으로 전환되어지며 여기서는 CO의 없어지는 양만큼 H₂와 CO₂로 전환됨을 확인하였다. 이 실험에서 pH 7 부근이 *R. rubrum* 세포 성장 및 CO 전환에 최적조건임을 알 수 있었다. 이때 pH 7 부근에서 *R. rubrum*에 의한 CO의 specific consumption rate는 60 mL CO/hr/cell O.D./L이었다.

온도의 영향

*R. rubrum*의 성장 및 CO 전환에 미치는 온도의 영향을 조사하였다. 본 실험에서는 illuminated shaking incubator에서 tungsten lamp를 이용하여 1700 Lux, 500 rpm 조건으로 앞에서 언급한 기본 배지와 합성가스를 이용하였고 온도를 26℃에서 34℃까지 변화시켜 실험하였다. 이 결과는 Figure 5에 나타나는데 온도가 세포 성장에 미치는 영향을 살펴보면 온도가 26℃에서 30℃로 증가될 때에는 세포 성장이 증가하나 온도가 34℃로 증가하면 세포 성장이 둔화되는 것을 알 수 있었다. 또한 온도가 CO 전환에 미치는 영향을 살펴보면 첫 40시간까지는 온도가 26℃, 30℃, 34℃로 증가할 때 CO 소비 속도도 증가되며 26℃에서 제일 낮은 CO 소비 속도로 보였지만 45시간째에 gas space를 새로운 합성가스로 충전하여 실험을 계속하였을 때 온도가 26℃에서 진행한 경우는 일정한 CO 소비속도를 보이나 34℃에서 진행한 경우는 CO 소비속도가 줄어들고 30℃ 온도에서 안정적으로 높은 CO 전환율을 보였다. 이 결과로써 30℃보다 높은 온도의 경우는 세포 성장이 멈추고 안정적인 CO 전환속도를 얻을 수 없으므로 30℃가 *R. rubrum* 균주 성장과 CO로부터 H₂ 생산에 최적 온도라 생각된다.

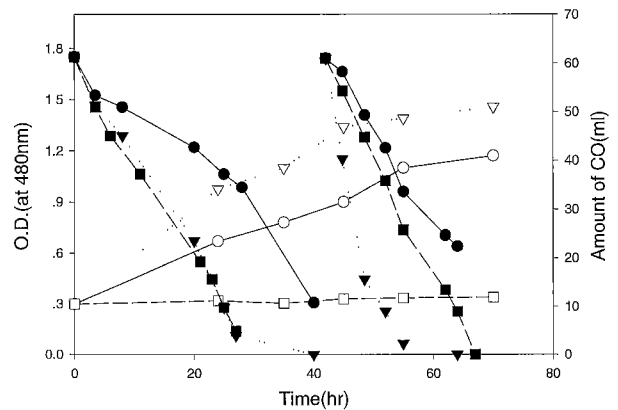


Figure 5. The effect of temperature on cell growth and CO consumption with *R. rubrum*. ○—○ : 26℃ O.D., ▽—▽ : 30℃ O.D., □—□ : 34℃ O.D., ●—● : 26℃ CO consumption, ▾—▾ : 30℃ CO consumption, ■—■ : 34℃ CO consumption.

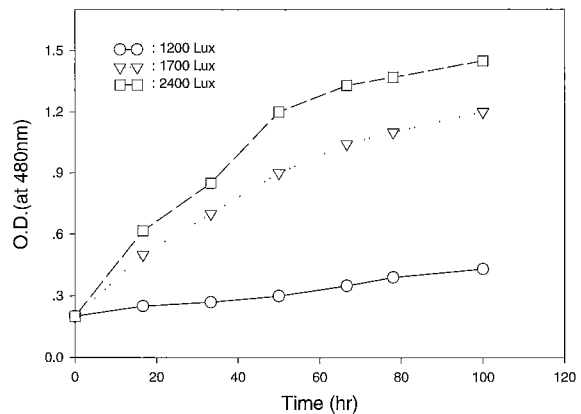


Figure 6. The effect of light intensity on *R. rubrum*.

빛의 세기의 영향

*R. rubrum*은 photosynthetic bacteria이며 CO와 H₂O로부터 CO₂와 H₂를 생산함에 있어서 실제 light가 필요하게 되어져 CO₂로부터 광합성을 하게 되어진다. 즉 어떤 정도의 빛의 세기가 photosynthetic apparatus를 saturate 시키기 위하여 필요하게 되어진다. 이와 같이 tungsten lamp를 사용하여 illuminated shaking incubator 안에서 30℃, 350 rpm에서 빛의 세기를 1200으로부터 2400 Lux까지 변화시키면서 이 빛의 세기가 세포 성장에 미치는 영향을 실험하였다. 이 결과는 Figure 6에 나타나는데 빛의 세기가 1200 Lux일 때 세포의 성장속도는 매우 낮고 빛의 세기가 1700, 2400 Lux로 올라갈 때 세포 성장속도도 증가됨을 알 수 있었다. 본 실험결과 약 1,700 Lux 이상의 빛의 세기에서 *R. rubrum*의 photosynthetic capacity가 saturate된다고 추론할 수 있었고 *R. rubrum* 세포 성장에 미치는 최적 빛의 세기는 1,700~2,400 Lux 정도임을 알 수 있었다.

CO전환에 미치는 빛의 유무의 영향

*R. rubrum*이 CO와 H₂O로부터 CO₂와 H₂를 생산함에 있어서 실제 light가 필요하게 되어져 CO₂로부터 광합성을 하게 되어진다. 따라서 *R. rubrum*을 이용하여 합성가스중의 CO로부터 H₂를 생산함에 있어서 문제가 되는 것은 광합성발효기의 설계이다.

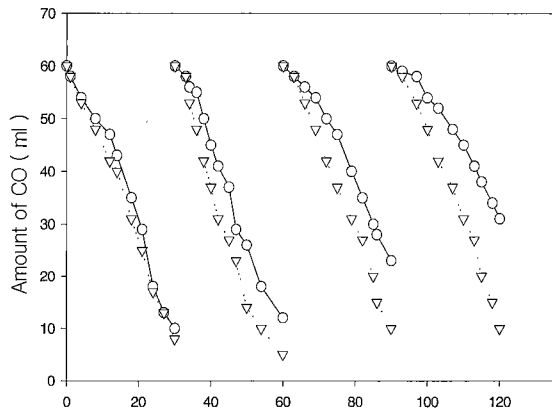


Figure 7. The effect of light presence on CO consumption. ○-○ : wrapped up with aluminum foil, ▽-▽ : exposed to light.

왜냐하면 큰 규모의 광합성 발효기는 경제적 규모의 H₂ 생산을 방해하기 때문이다. 따라서 *R. rubrum*을 이용한 CO로부터 H₂로의 전환시 빛의 요구성에 대해서 연구하였다. 이 실험을 위하여 tungsten lamp를 장착하고 빛의 세기가 1,700 Lux인 illuminated shaking incubator에서 cell O.D.가 2근치까지 자라게 한 후 이를 두 bottle로 나누어 한 bottle은 aluminum foil로 빛으로부터 완전히 차단하고 다른 bottle은 계속 light를 쬐어주면서 CO전환속도를 측정하였다. 이 결과가 Figure 7에 나타나는데 이러한 두 bottle에 CO를 함유한 합성가스를 계속 충전해 주면서 CO의 소비속도를 측정할때 gas space를 합성가스로 두 번 충전할 때까지는 빛의 유무에 상관없이 CO의 전환속도가 같았으나 그후부터는 빛이 존재할 때의 CO소비속도가 빛이 없을 때보다 현저히 빠른 것으로 나타났다. 이같은 결과를 종합할 때 CO전환용 발효기에 recycle loop을 하나 달아 그 recycle path중에 light를 설치하게 되면 짧은 시간동안의 빛에 expose 되는 것만으로도 계속적으로 CO를 전환하게 할 수 있지 않을까 생각되어진다.

CSTR을 이용한 CO conversion

*R. rubrum*을 이용한 CO로부터 H₂로의 전환시 CSTR 실험을 수행하였다. 한국발효기(5 L)를 생물반응기로 하여 실험하였으며 합성가스를 60% 일산화탄소, 20% 질소, 20% 이산화탄소 성분이 되게 세 가스를 각각 rotometer를 통과시켜 섞어 만들었다. 그리고 이 합성가스는 연속적으로 생물반응기를 통과하게 된다. 이때 합성가스의 생물반응기내 체류시간을 10분에서 2시간 정도까지 변화를 시켜 합성가스의 생물반응기내 체류시간 등에 따른 일산화탄소 전환율을 조사하였다. 합성가스(60% CO)는 연속적으로 흘러 들어갔으며 flow rate는 원하는 gas체류 시간을 갖도록 조정하였다. 액체배지로 nutrient를 주입하였으며 pH는 7에서 유지되었고 온도는 30℃에서 유지되었으며 agitation은 600 rpm으로 유지되었다.

이 결과는 Figure 8에 나타나는데 cell O.D.는 5.5에서 유지되었고 gas 체류시간이 50 min일 때 CO의 H₂로의 전환율은 약 32%이며 gas 체류시간이 증가할수록 CO전환율도 증가하여 체류시간 80분에서 CO의 H₂로의 전환율 약 46%를 체류시간 110분에서 CO전환율 약 53%를 얻을 수가 있었는데 bioreactor의 개량, high pressure이용 등을 통하여 짧은 gas 체류시간에서 매우 높은 CO 전환율을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

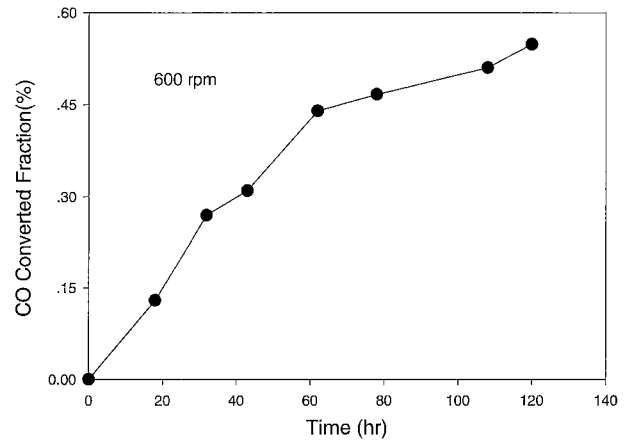


Figure 8. The CO converted fraction with different residence time in CSTR with *R. rubrum*.

요 약

본 연구에서는 *R. rubrum*을 이용한 석탄합성 가스로부터 수소 생산공정에 있어서의 세포성장 및 일산화탄소 전환을 최적화하는 여러 조건들을 조사하였다. 그 중 pH의 영향을 살펴보면 *R. rubrum* 세포성장에는 pH 6~7이 최적이었으며 수소생산에는 pH 7~7.5이 최적이었으며 pH가 5.5에서는 세포성장여거의 이루어지지 않았다. 또한 온도가 34℃ 이상 증가되었을 때 세포성장이 둔화되어 멈추고 안정적인 CO 전환속도를 얻을 수 없으므로 30℃가 *R. rubrum* 균주 성장과 CO 전환에 최적온도라 생각된다. 또한 *R. rubrum*은 photosynthetic bacteria인데 이 세포의 성장에는 빛의 세기가 1,700~2,400 Lux가 최적임을 알 수 있었고 CO 전환에는 계속적인 빛의 공급이 꼭 필요하지는 않고 간헐적인 빛의 노출만으로도 충분하다고 생각된다. 또한 연속반응기를 이용하여 600 rpm, 30℃, pH 7에서 합성가스 체류시간 110분시 CO 전환율 약 53%정도를 얻을 수 있었다. 이 연구가 계속 진행되어져서 photobioreactor의 개발, high pressure bioreactor의 이용, 균주의 mutation 및 전환능력 우수 균주 등의 selection을 수행한다면 매우 높은 합성가스 전환율을 갖는 생물반응기 공정개발도 가능하리라 생각된다.

감 사

이 논문은 1997년도 과학재단 핵심전문연구 과제 KOSEF(핵심 971-1105-030-1)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Hedgemann, G. (1980), Oxidation of Carbon Monoxide by bacteria, *Trends in Biochemical science*, **5**, 256-259.
2. Uffen, R. L. (1981), Metabolism of Carbon Monoxide, *Enzyme and Microbiol. Technol.*, **3**, 197-206.
3. Stupperich, E., K. E. Hammel (1983), Carbon Monoxide Fixation into the Carboxyl Group of Acetyl Coenzyme A During Autotrophic Growth of *Methanobacterium*, *FEBS Letter*, **152**, 21-23.

4. Diekert, G. and M. Ritter (1983), Carbon Monoxide Fixation into the Carboxyl Group of Acetate During Growth of *Acetobacteriu woodii* on H₂ and CO₂, *FEMS Microbiol. Letters*, **17**, 299-302.
5. Martin, D. R., L. L. Lundie. Curr. (1983) Carbon Monoxide Dependent Evolution of Hydrogen by the Homoacetate-Fermenting Bacterium *Clostridium thermoaceticum*, *Microbiol.*, **8**, 337-340.
6. Spratt, H. G. and J. S. Hubbard (1981), Carbon Monoxide Metabolism in Roadside Soils, *Appl. and Environ.*, 1192-1201.
7. Meyer, O. and H. G. Schlegel (1983), Biology of Aerobic Carbon Monoxide-Oxidizing Bacteria, *Annual Reviews of Microbiology*, **37**, 227-310.
8. M. P. Dushekviez, and R. L. Uffen (1979), *Int. J. Syst. Bacteriol.*, **29**, 145-149.
9. Uffen R. L. (1976), Anaerobic Growth of a Rhodoseudomonas Species in the Dark With Carbon moxide as sole carbon and Energy substrate, *Proc. Nat'l. Acad. Sci.*, **73**, 3298-3302.
10. Hansen T. A. (1983), Electron Donor Metabolism in Phototrophic Bacteria, in J. G. Ormerod(ed.), *The phototrophic Bacteria : Anaerbic Life in the Light*, 76-99.
11. Vega J. L., G. M. Antorrena (1988), Biological production of liquid from coal, ACS Symposium series.
12. Vega J. L., J. L. Gaddy (1988), Study of Gaseous Substrate Fermentations: Cabon Monoxide Conversion to Acetate, 1. Batch Culture, *Archives in Microbiology*.
13. Hessley, R. K., J. W. Reasoner, and J. T. Riley (1986), *Coal science*, wiley, NY.
14. Payne, K. R. (1987), *chemicals from coal*, wiley, NY.
15. Wender, I. (1987), Catalysts in conversion of synthesis Gas, in *Chemicals from coal*, K. R. Payne (ed.) Wiley, NY.