

## 바이오 수소를 이용한 이산화탄소의 메탄 전환 연구

이준철 · 김재형 · 최광근\* · 박대원†

서울산업대학교 에너지환경대학원 · \*(주)지앤지인텍 중앙연구소

(2008년 4월 23일 접수, 2008년 8월 22일 채택)

## CO<sub>2</sub> Conversion to Methane using Bio-hydrogen

JunCheol Lee · JaeHyung Kim · KwangKeun Choi\* · DaeWon Pak†

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Technology

\*Central Research Center Green and Global In Tech Co. Ltd.

**ABSTRACT** : In the present study, carbon dioxide was converted to methane, using bio-hydrogen. Here, the bio-hydrogen was produced from organic waste. The anaerobic microorganism was cultured using only carbon dioxide and hydrogen for duration of 3 months. Therefore methane was not produced with acetogenotrophs. During methane production, carbon dioxide and hydrogen are taken in different ratios; among which 1 : 5 ratio has shown the highest methane yield. Carbon dioxide and hydrogen were introduced into the reactor at the rate of 8 mL/min and 40 mL/min, respectively. In this case, 92% of carbon dioxide was reduced and 2.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> day amount of methane was produced. Thus, the process has been successful in conversion of carbon dioxide into methane by purging it into methane fermentation reactor with bio-hydrogen using batch process.

**Key Words** : Carbon Dioxide, Bio-hydrogen, Methane

**요약** : 유기성 폐기물을 이용하여 생산된 수소를 환원제로 활용하여 이산화탄소를 유용한 에너지원인 메탄으로 전환시키고자 하였다. 3 개월 동안 혐기성 미생물을 이산화탄소와 수소만을 이용하여 배양하였으며, 그 결과 acetogenotrophs의 영향에 의한 메탄의 생성은 없었고, 이산화탄소를 8 mL/min으로 주입하였을 때 이산화탄소와 수소의 주입비가 1:5에서 메탄의 생성량이 2.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>day로 가장 많았으며, 이때의 이산화탄소 저감률 또한 92%로 가장 우수하였다. 회분형태로 수소 생산과 메탄발효조와의 연계실험을 통하여, 연속적으로 수소를 생산하면서 이산화탄소를 같이 메탄발효조에 주입하여, 이산화탄소의 메탄으로의 전환을 확인하였다.

**주제어** : 이산화탄소, 바이오수소, 메탄

### 1. 서론

지구온난화가스 배출규제를 위한 기후변화 협약이 1992년 에 채택된 이후 소위 부속서 I에 포함된 선진국들은 1990년 수준으로 이산화탄소 배출량을 감축해야 하는 의무를 지니게 되었다. 또한 온실가스 감축을 위한 구체적 이행방안을 규정한 교토의정서는 미국의 비준 탈퇴에도 불구하고, 러시아가 지난 2004년 11월 18일 비준서를 유엔사무국에 제출함으로써 2005년 2월 16일부터 정식 발효되었다. 한국은 1993년 12월 12월 기후변화협약에는 가입하였으나, 기후변화 협약상 개발도상국으로 분류되어 있어 아직까지는 기후온난화가스 배출저감 의무 대상국은 아니다. 그러나 한국은 OECD국가이며 1인당 에너지 소비량에서 현재 일본, 독일, 이탈리아 등의 선진국 수준을 능가하고, 세계 10위의 이산화탄소 배출국임을 감안한다면 계속 비부속

서 I 국가 지위를 주장할 수 없는 상황이다. 전문가들은 한국이 2013~2017년의 제 2차 공약기간 중 어떤 형태로든지 배출 감축 의무부담을 지게 될 것으로 예상하고 있다.<sup>1)</sup>

현재 우리나라도 이산화탄소를 처리 및 전환시키는 기술은 다양하게 연구가 진행되고 있으나, 혐기성 미생물을 이용하여 이산화탄소를 저감시킴과 동시에 메탄을 생성한 연구 사례는 드물다. 이산화탄소를 메탄으로 전환시키기 위해서는 수소가 환원제 역할을 하며, 본 연구에서는 수소 생산을 위해 생물학적으로 수소를 생산하는 방법 중 혐기 발효에 의한 수소 생산을 택하였으며, 그 이유는 유기성 폐기물을 동시에 처리할 수 있으며 단위 질량당 에너지 밀도가 높고 비교적 일정한 수소를 효과적으로 생산한다는 특징이 있기 때문이다.<sup>2~5)</sup>

따라서 본 연구에서는 유기성 폐기물을 활용하여 수소를 생산하여 이를 환원제로 사용하였으며, 메탄발효조에서 이산화탄소와 수소가 반응하여 메탄이 생성되기 위한 이 두 가스의 적절한 혼합 비율과, 수소발효조와 메탄발효조를 회분형태로 실험하여, 향후 연계실험에 대한 기초자료로 삼고자 하였다.

† Corresponding author

E-mail: daewon@snut.ac.kr

Tel: 02-970-6595

Fax: 02-970-8609

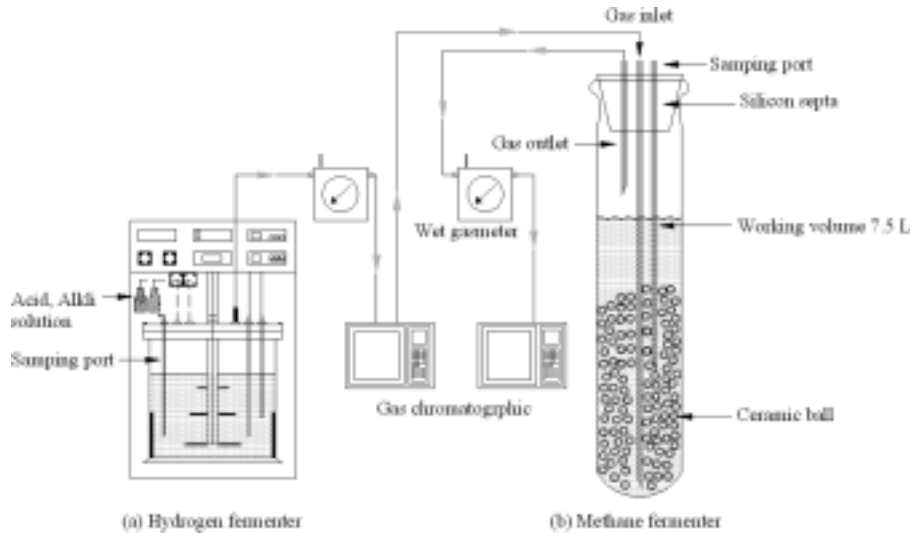


Fig. 1. Schematic diagram of experiment apparatus (a) Hydrogen fermenter (b) Methane fermenter.

Table 1. Characteristic of waste activated sludge and food waste

|     | pH          | TS (mg/L)           | VS (mg/L)           | TCOD <sub>Cr</sub> (mg/L) | SCOD <sub>Cr</sub> (mg/L) |
|-----|-------------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| WAS | 7.5<br>~7.9 | 11,000<br>~16,000   | 9,000<br>~10,000    | 8,500<br>~12,000          | 300<br>~500               |
| FW  | 4.3<br>~4.8 | 180,000<br>~200,000 | 125,000<br>~145,000 | 150,000<br>~190,000       | 70,000<br>~95,000         |

## 2. 실험 재료 및 방법

서울시 J 물재생센터에서 채취한 반송슬러지를 중력침강 후에 상등액을 분리하여 제거하고 남은 슬러지를 폐활성슬러지(Waste activated sludge)로 사용하였고, 음식물쓰레기(Food wastes)는 학교 내 구내식당으로부터 채취하여 가정용 믹서기로 파쇄하여 사용하였다. 이때 사용된 폐활성슬러지와 음식물쓰레기의 특성은 다음 Table 1과 같다.

메탄발효조에서 사용된 식중시료는 서울시 J물재생센터에서 채취한 혐기성 소화슬러지를 식중시료로 사용하였으며, Fig. 1의 (b)와 같은 유리반응기를 제작하여 메탄발효조로 사용하였고, 혐기성 슬러지는 이산화탄소만을 유일탄소원 및 에너지원으로 사용하는 혐기성 미생물을 고농도로 배양하기 위해, 시판되는 이산화탄소(8 mL/min), 수소(32 mL/min)를 1:4의 비율로 주입하여 약 3개월간 배양 후 실험을 진행하였다. 메탄발효조는 가스의 원활한 혼합을 위해 지름 2~2.5 mm의 세라믹 볼을 충전하였으며, 총 부피는 8.5 L, 유효부피는 7.5 L이었다. 이때 반응기 조건은 pH 6.8~7.2, 온도는 36°C로 유지하였다.

### 2.1. Acetogenotrophs의 영향에 따른 메탄 생성 실험

초산의 영향에 의한 메탄생성 여부를 확인하기 위해, 수소발효조와 연계 실험을 하지 않고, 메탄발효조에서 실험을 진행하였다. 이때 이산화탄소와 수소의 주입량은 8, 32 mL/min이었고, 초산의 주입량은 200 mg/L가 되도록 주입한 후, 24시간 동안 발생하는 가스를 분석하였다.

### 2.2. 수소 여부에 따른 메탄 생성 실험

메탄발효조에 시판되는 이산화탄소(8 mL/min)와 수소(32 mL/min)를 1:4의 비율로 연속 주입해 주다가, 이산화탄소의 주입량은 고정시키고 수소의 주입량을 단계적으로 천천히 줄여주었다. 약 80시간 실험을 진행하였으며, pH 측정은 12시간 간격으로 샘플링하여 실시하였고 메탄발효조 안으로 공기가 들어가는 것을 방지하기 위해, 미리 연결해둔 정량펌프를 이용하였다.

### 2.3. 이산화탄소와 수소의 혼합비율에 따른 메탄생성

본 실험을 위해 메탄발효조에 주입되는 이산화탄소와 수소는 시판되는 가스를 구매하여 사용하였으며, 이산화탄소의 양은 8 mL/min으로 일정하게 고정시킨 후 수소의 주입량을 늘려가며 실험하였다. 이산화탄소와 수소의 주입비는 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6, 1:7, 그리고 1:8까지 변화시켰다. 각 실험 항목에서 7일 동안 실험을 진행하였으며, 이산화탄소 및 수소의 주입량과 메탄 생성량을 서로 비교하여 경향을 분석하였다.

### 2.4. 바이오 수소를 이용한 이산화탄소의 메탄 전환 실험

선행 연구 결과를 바탕으로 수소발효조에서 수소를 생산하였다.<sup>6)</sup> 수소발효조의 조건은 음식물 쓰레기와 알갈리 및 초음파로 전처리된 폐활성 슬러지를 2:1(v/v) 비율의 기질과, 혐기성 슬러지를 90°C에서 20분간 열처리 후 식중균으로 사용하였고, 기질과 식중균은 1:1(v/v)로 혼합하여 실험하였다. 이때 pH는 5.5, 온도 36°C, 150 rpm에서 48시간 동안 회분형태로 실험하였다. 이산화탄소를 직접 수소발효조에 연속 주입해 주어서, 이산화탄소가 수소발효조를 거쳐 메탄발효조로 주입되고 있을 때, 수소발효조안에서 수소가 생성되어지면, 이산화탄소와 수소가 메탄발효조로 동시에 들어가게 되어, 이에 따른 이산화탄소의 저장량과 생성되는 메탄의 양을 보고자 하였다. 이때 이산화탄소의 주

입량은 40 mL/min이었고, 수소발효조에서 메탄발효조로 들어가는 이산화탄소의 압력은 0.09 bar이었다.

2.5. 분석방법

수소발효조에서 생성된 가스량은 분압에 의한 수소 생성 효율에 영향을 미치지 않도록 wet gas-meter(Model W-NK-0.5, SHINAGAWA, Japan)을 이용하여 기체가 발생할 때 바로 배출과 동시에 측정이 가능하도록 하였다.<sup>7,8)</sup> 시판되는 이산화탄소와 수소를 메탄발효조에 주입시, 유량계(bubble flow meter)를 이용하여 주입속도를 결정하였다. 일정한 간격으로 시료를 채취하여 TS, VS, CODcr 등을 분석하였으며, 이 항목들은 Standard Method에 준하여 측정하였다.

가스 성분은 TCD가 장착된 Gas Chromatograph(GC 6000 series, Younglin, Korea)를 이용하여 측정하였고 분석조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Gas chromatographic conditions for gas analysis

| Detector         | TCD(Thermal Conductivity Detector)                      |
|------------------|---|
| Column           | Carboxen-1000 (Supelco, 15 ft×1/8 inch, SS, 60/80 mesh) |
| Carrier gas      | Argon(30 mL/min)  |
| Oven temp.       | 35 ~ 210 °C(20 °C/min)                                  |
| Detector temp.   | 220 °C  |
| Injector temp.   | 220 °C  |
| Injection volume | 250 µL  |

3. 결과 및 고찰

3.1. Acetogenotrophs의 영향에 따른 메탄 생성 실험

혐기성 반응은 산생성균과 메탄생성균으로 분류되는 혐기성 미생물에 의해 유기물이 최종 메탄과 이산화탄소로 분해되는 반응으로 그 반응기작은 여러 가지 복잡한 경로를 거치게 되는데, 일반적인 혐기발효 과정에서 메탄이 생성되어질 때 acetogenotrophs로부터 약 70%, 나머지는 hydro-

genotrophs가 약 30%에 의해 메탄이 생성되어진다고 알려져 있다. 따라서 acetogenotrophs의 영향이 없는 것을 먼저 확인 후, hydrogenotrophs에 의해 메탄이 생성되는 과정을 연구하였다.

Fig. 2는 이산화탄소와 수소를 연속 주입하면서 3개월 동안 배양된 시료가, acetogenotrophs가 아닌 hydrogenotrophs의 영향으로 메탄이 생성되어짐을 보여주는 결과이다. 먼저 실험에 따른 메탄의 함량이 약 35%까지 증가하는 것으로 보아 실험 전에 배양한 혐기성 슬러지에는 메탄을 생성할 수 있는 혐기성 미생물 군집이 고농도로 배양되어 있음을 알 수 있다. 임의로 주입한 아세트산의 양을 살펴보면 시간 경과에 따른 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 메탄의 생성이 acetogenotrophs가 아닌 hydrogenotrophs의 활성화에 의해 생성된 것이라는 간접적이 지표로 판단되어지며, 이산화탄소와 수소의 함량 변화 또한 시간이 경과함에 따라 이산화탄소와 수소가 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 배양한 혐기성 슬러지는 대부분 hydrogenotrophs 종이 배양되어 있는 것으로 사료된다. 식 (1)은 화학양론적으로 이산화탄소와 수소가 반응하여 메탄이 생성되는 반응으로, 이산화탄소와 수소가 반응하여 메탄이 생성되기 위해서는 이산화탄소 : 수소 = 1 : 4가 반응하여 메탄 1몰이 생성된다. Fig. 2의 결과에서 이산화탄소와 수소의 시간대별 반응률(이산화탄소/수소)은 3.2 ~ 3.9사이로 이론상으로 계산한 값인 4에 매우 근접한 값을 알 수 있었다.



3.2. 수소 여부에 따른 메탄 생성 실험

이산화탄소와 수소를 일정하게 주입하다가, 수소의 주입량을 천천히 줄이면서 수소가 식 (1)에서와 같이 메탄발효조에서의 환원제 역할에 대한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 메탄은 수소의 주입량이 천천히 줄어들어 이산화탄소와

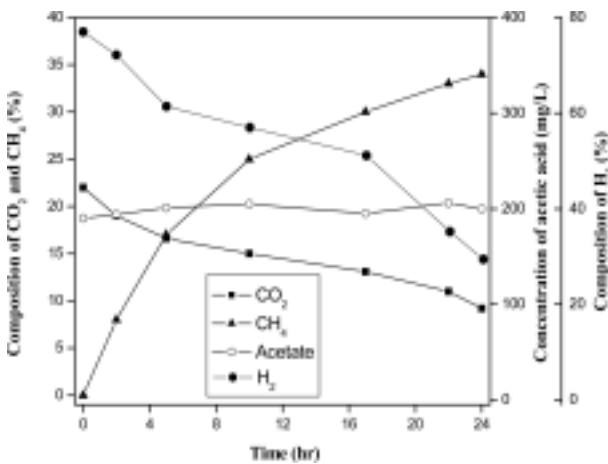


Fig. 2. CO<sub>2</sub> conversion to CH<sub>4</sub> using hydrogenotrophs.

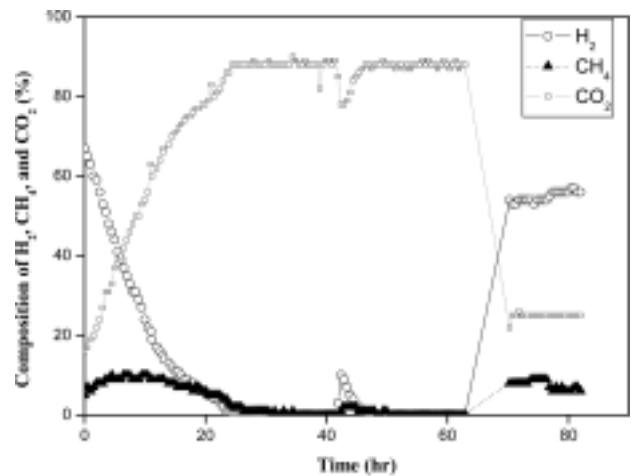


Fig. 3. CO<sub>2</sub> reduction and CH<sub>4</sub> production using H<sub>2</sub>.

수소의 혼합비율이 1:1(v/v)이 될 때까지 생성되어지다가, 수소의 주입이 완전히 배제된 경우(약 21~61시간)에는 메탄의 생성은 이루어지지 않았다. 즉 수소의 주입량이 줄어들면서 메탄의 생성량도 감소된다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 실험 초기에는 혐기성 슬러지를 대상으로 배양한 식종 시료에는 메탄생성균 중에서 수소를 사용할 수 있는 균주, 즉 hydrogenotrophs가 존재하고 있는 것으로 판단되어지며, 수소 주입을 완전히 배제한 경우에는 메탄이 전혀 발생하지 않았으며, 이로 인해 이산화탄소의 저감도 일어나지 않음을 알 수 있었다. 약 61시간 경과 후 다시 수소를 주입하게 되면 이산화탄소가 수소를 환원제로 소비하게 되면서 메탄이 생성되어짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, 본 연구에서 사용한 메탄발효조 안에는 hydrogenotrophs가 주종을 이루고 있음을 간접적으로 나타내는 것으로 판단된다.

또한, 수소의 유무에 따른 메탄발효조 안에서의 pH 변화를 살펴보면 Fig. 4와 같다. 수소가 계속적으로 주입되는 경우에는 메탄발효조 내부의 pH가 7.1~7.3으로 유지되는 반면 환원제가 존재하지 않는 경우에는 pH가 6.5 이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 계속적으로 주입된 수소는 hydrogenotrophs에 의해 이용되어 메탄으로 전환되어서 제거되기 때문에 pH가 변화하지 않지만, 수소를 주입하지 않는 경우에는 메탄발효조 내부에 이산화탄소가 계속해서 녹아들어가기 때문에,  $[H^+]$ 의 증가로 pH가 떨어지는 것으로 사료된다. 하지만 다시 수소를 주입하면 pH는 다시 7.1~7.3을 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 이산화탄소를 생물학적으로 저감시키기 위해서는 수소가 환원제로써 역할이 중요하며 환원제가 존재하지 않는다면 이산화탄소의 메탄으로 전환에 따른, 메탄의 생성 및 이산화탄소의 저감 또한 이루어지지 않음을 의미하므로, 수소의 연속적인 주입은 반드시 필요하다고 판단되며, 수소가 주입되지 않는다면 메탄발효조의 pH가 내려가면서 메탄생성균의 최적 pH가 변하게 되어, 메탄 생성의 효율 및 이산화탄소 저감 효율에도 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

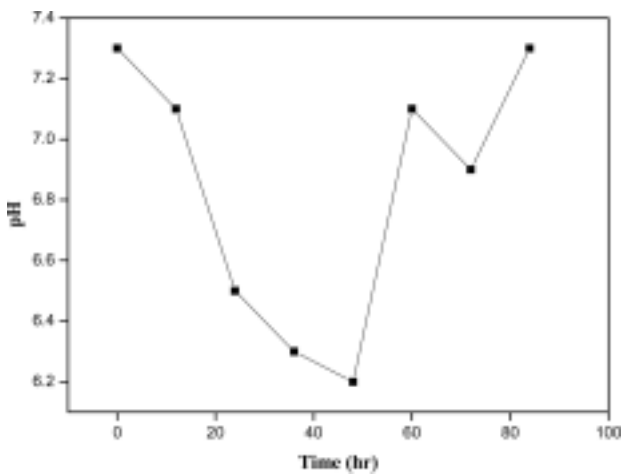


Fig. 4. Change to pH value by H<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> fermenter.

### 3.3. 이산화탄소와 수소의 혼합비율에 따른 메탄생성

상기와 같은 실험의 결과로 이산화탄소를 생물학적으로 저감시키기 위해서는 환원제로써 수소가 반드시 필요한 것으로 나타났다. 이에 이산화탄소와 수소의 주입량을 달리하여 최적 수소 주입율을 살펴볼 수 있는 결과를 Fig. 5에 보였다. 실험 전 예측으로는 이산화탄소와 수소의 혼합비율이 식 (1)과 같이 1:4인 경우에 메탄의 생성량이 가장 효율성이 높을 것 유추하였다. 즉 화학양론적으로 계산하였을 때 4몰의 수소와 1몰의 이산화탄소가 반응하여 1몰의 메탄이 생성되므로, 실험 시 이산화탄소와 수소의 비율이 1:4로 조정하는 경우 가장 높은 반응 속도를 보일 것이며 이때 가장 많은 메탄의 생성량을 얻을 수 있기 때문이다. 결과적으로 수소의 주입비율이 증가함에 따라 메탄의 생성량도 증가하다가 수소의 주입비율이 1:6보다 증가하게 되면 메탄 생성량이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 이산화탄소와 수소의 혼합비율이 1:5에서 이산화탄소의 메탄 전환 효율이 가장 높게 나왔는데, 이는 실험 전 예측과는 다르게 나타난 결과이다. 이산화탄소와 수소의 비율이 1:4에서 이산화탄소 전환 효율이 가장 높을 것으로 예측하였으나, 실험 결과에서는 1:4보다 높은 1:5에서 메탄이 더 많이 생성되었다. 이러한 이유는 수소의 용해도 측면에서 이해 할 수 있다. 수소는 물에 대한 용해도가 매우 낮은 것으로 알려져 있으며, 0°C 1기압 하에서 100 g의 물에 대해서 약 0.0002 g이 용해된다. 만일 수소의 용해도가 높아서 주입된 수소가 모두 용해된다면 이산화탄소와 수소를 메탄생성균이 쉽게 이용할 수 있으므로, 식 (1)과 같은 반응이 일어나게 되고, 이산화탄소와 수소의 반응비율 1:4에서 메탄이 최대 생성되어 질 수 있을 것이다. 하지만, 수소의 낮은 용해도로 인해 물에 전부 용해되지 않아서 수소가 모두 메탄생성균에 의해 사용되지 못하기 때문에, 1:4 이하에서는 메탄의 생성이 적었으며, 1:5 이상으로 주입했을 경우에는 상대적으로 물에 용해되는 수소의 양이 많아짐으로, 메탄생성균에 의해 수소의 소모량이 많아져 1:5 이상의 주입비율에서 메탄의 생성이

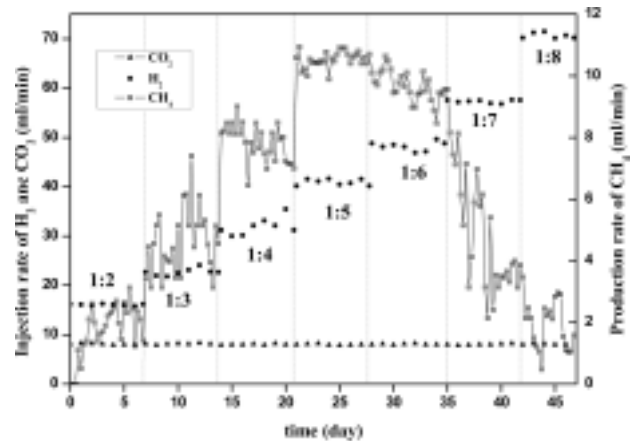


Fig. 5. Production of CH<sub>4</sub> at various ratios of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>.

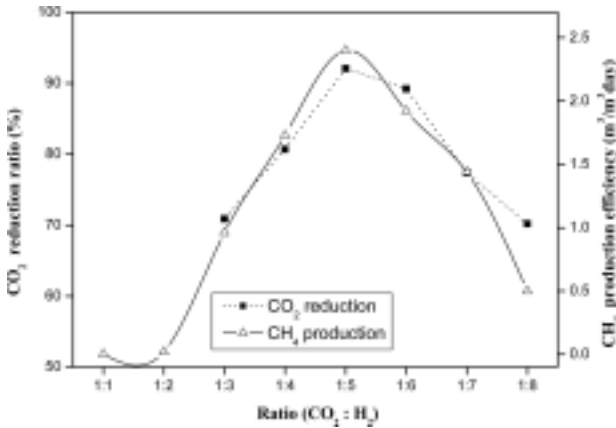


Fig. 6. Methane production efficiency at various ratios of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>.

높은 것을 사료된다. 하지만 이산화탄소와 수소의 혼합비율이 1 : 7 이상이 되면 수소의 분압이 낮아지므로 상대적으로 용해가 적게되어 메탄의 생성량이 적어진 것으로 판단된다. 따라서 본 실험 결과에서는 주입하는 수소의 양에 따라 이산화탄소의 사용량이 제한되는 것으로 판단되며, 이산화탄소와 수소의 혼합비율은 1 : 5 또는 1 : 6에서 최적의 메탄 생성 효율을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6은 이산화탄소와 수소의 혼합비율에 따른 메탄생성량과 이산화탄소의 저감효율 나타낸 결과이다. 이산화탄소의 저감 효율은 식 (2)와 같이 메탄발효조에 초기에 주입된 이산화탄소의 량과 메탄생성균에 의해 소모되고 남은 이산화탄소의 량을 비교하여 계산하였다.

$$CO_2 \text{ reduction rate}(\%) = \frac{CO_2^{(inlet-outlet)}}{CO_2^{inlet}} \times 100 \quad (2)$$

또한 메탄의 생성 효율은 단위시간과 단위부피 당 생성되는 메탄의 양으로 정의하였으며, 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$CH_4 \text{ production rate}(m^3/m^3 \cdot \text{day}) = \frac{\text{production of } CH_4 (m^3)}{(\text{volume of reactor; } m^3) \times (\text{time; day})} \quad (3)$$

이와 같은 식으로 계산하면, 이산화탄소와 수소의 혼합비율이 1 : 5에서 메탄의 생성량이 2.3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>·day로 가장 많았고, 이때의 이산화탄소 저감률 또한 92%로 가장 높게 나타났다. 따라서 식 (1)과 같은 이론상의 이산화탄소와 수소의 혼합비율보다, 조금 높은 이산화탄소와 수소의 비율인 1 : 5로 조정하여 실험하는 경우 최적의 메탄생성을 이룰 수 있음을 알 수 있었다.

또한 이산화탄소와 수소가 1:5로 주입 되어질 때, 반응기안에서 두 가스가 머무름 시간은 50~60분이었고, 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{Retention time}(\text{min}) = \frac{\text{working volume}(L) \times \text{porosity}(40\%)}{\text{flow of outlet}(ml / \text{min})} \quad (4)$$

### 3.4. 바이오 수소를 이용한 이산화탄소의 메탄 전환 실험

먼저, 생물학적 수소 생성 실험은 선행 연구 결과를 바탕으로 이루어졌으며,<sup>6)</sup> 결과는 Fig. 7과 같다. 운전 중 발생하는 가스의 성분은 수소와 이산화탄소가 주를 이루었으며, 메탄의 생성은 이루어지지 않음을 미리 확인하였다. 수소의 생성 비율은 6시간 전까지 20~50%를 차지하였고, 수소의 생성량은, 최대 5.0 L H<sub>2</sub>/L/d의 수소가 생성되었다. 본 연구의 초기 실험 방법은 Fig. 1과 같이 (a)의 수소발효조에서 생산되는 수소와 이산화탄소를 각각 따로 연결한 후, (b)의 메탄발효조에 주입하여, 이에 따른 메탄의 생성여부를 보기 위함이었다. 하지만, 앞선 실험 결과 이산화탄소와 수소가 메탄발효조에 주입되기 위해서는 최소 0.09 bar 이상의 압력이 필요하였으나, 수소발효조에서 생성되어 나오는 수소의 압력은 0.04 bar 이하였다. 이에 수소발효조에서 배출되는 가스의 압력을 높이고자, 이산화탄소를 메탄발효조로 따로 주입하지 않고, 수소발효조로 직접 연속 주입해주었다.

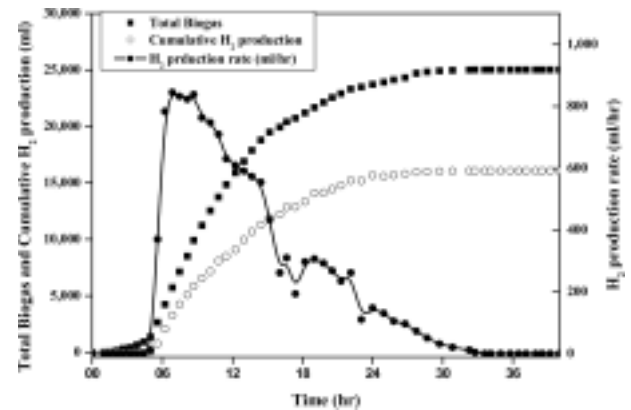


Fig. 7. Bio-hydrogen production in hydrogen fermenter.

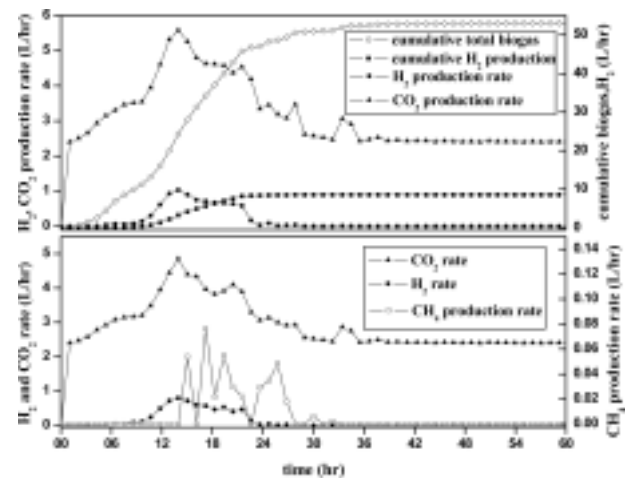


Fig. 8. Results in hydrogen and methane fermenter.

수소발효조에서 생성된 바이오가스와 시판되는 이산화탄소를 메탄발효조에 동시에 주입하였을 때의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이산화탄소가 주입됨에 따라 전체 바이오가스의 량도 증가하여 선행 연구와 비교하였을 때 약 2배 정도 많은 양의 수소가 생산되었다. 이는 수소발효조로 주입하고 있는 이산화탄소에 의해 생성되는 수소의 분압을 낮추어 효율이 높아진 것으로 사료된다. 초기 메탄발효조에서 발생하는 가스 성분 중 메탄은 없고, 이산화탄소가 주를 이루었으나, 수소발효조에서 수소가 생성되어지면서 메탄발효조에서의 수소의 농도가 서서히 증가되어 이산화탄소가 메탄으로 전환되어짐을 알 수 있었다. 메탄의 생성량이 일정하지 않은 이유는, 이산화탄소와 수소의 부피비가 시간에 따라 다르게 나타나는데, 수소발효조에서는 수소와 함께 이산화탄소도 같이 생성되고, 이 두 가스의 생성되는 속도가 다르기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

생물학적 수소를 이용한 이산화탄소의 메탄 전환 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

이산화탄소와 수소로만 3개월 동안 배양된 메탄발효조의 시료에는 acetogenotrophs에 의한 메탄의 생성은 이루어지지 않았으며, 수소를 배제한 이산화탄소만을 주입할 경우에도 메탄이 생성되지 않아 메탄발효조 안에는 hydrogenotrophs가 주종을 이루고 있음을 간접적으로 알 수 있었다.

이산화탄소를 8 mL/min으로 고정하고 수소 주입량만을 변화하여 실험한 결과 이산화탄소 : 수소 = 1 : 5에서 메탄의 생성량이 2.2 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>day로 가장 많았으며, 이때의 이산화탄소 저감률 또한 92%로 가장 우수하였다.

또한 생물학적 수소 생산에 대한 경제적인 비용과, 메탄 생성과 이산화탄소의 저감에 따른 경제성 관계는 앞으로 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 하지만, 버려지는 유기성 폐기물을 이용하여 수소를 생산하고 이를 환원제로 하여, 향후 이산화탄소를 저감시킴과 동시에 메탄을 생성시킬 수 있다는 측면에서는 큰 의의를 가질 수 있다.

#### 사 사

본 연구는 2007년도 에너지관리공단 에너지자원기술개발사업(폐기물활용 CO<sub>2</sub>의 고효율 메탄전환을 위한 혐기반응 시스템개발)의 지원을 받아 시행하였으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 정현식, 이성욱, "SGM\_Korea 모형을 이용한 탄소세의 이산화탄소 배출저감 효과분석," 자원환경경제연구, **16**, 129~169(2007).
2. Fascetti, E. and Todini, O., "Rhodobater sphaeroides RV cultivation and hydrogen production in a one-and two-stage chemostat," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **44**, 300~305(1995).
3. Markov, T., Miura, Y., Fukatsu, K., Miyasaka, H., Ikuta, Y., Matsumoto, H., Hamasaki, A., Shioji, N., Mizoguchi, T., Yagi, K., and Meada, I., "Hydrogen production by photosynthetic microorganisms," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **63**, 577~584(1997).
4. Fedorov, A. S., Tsygankov, A. A., Rao, K. K., and Hall, D. O., "Hydrogen photoproduction by Rhodobacter spaeroies immobilized on polyurethane foam," *Biotechnol., Lett.*, **20**, 1009~1009(1998).
5. Das, D. and Veziroglu, T. N., "Hydrogen production by biological process : a survey of literature," *Int. J. Hydrogen Energ.*, **26**, 13~28(2001).
6. 이준철, 김재형, 최광근, 박대원, "음식물쓰레기와 전처리한 폐활성슬러지의 혼합비율에 따른 생물학적 수소생산," 대한환경공학회지, **29**, 1044~1050(2007).
7. Mizuno, O., Dinsdale, R., Hawkes, F. R., Hawkes, D. L., and Noike, T., "Enhancement of hydrogen production from glucose by nitrogen gas sparging," *Bioresour. Technol.*, **73**, 59~65(2000).
8. Hawkes, F. R., Dinsdale, R., Hawkes, D. L., and Hussy, I., "Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimization," *Int. J. Hydrogen Energy*, **27**, 1339~1347(2002).