

## 3D-IR Matrix 버너 개질기를 활용한 모사 바이오가스 수증기 개질 연구

임문섭\*, 전영남\*<sup>†</sup>

\*조선대학교 공과대학 환경공학과·BK21 바이오가스기반수소생산 사업팀

## The Study of Steam Reforming for Model Bioigas using 3D-IR Matrix Burner Reformer

MUNSUP LIM\*, YOUNGNAM CHUN\*<sup>†</sup>

*\*BK21 Team for Hydrogen Production·Department of Environmental Engineering,  
Chosun University 375 Seoseok-dong Dong-gu, Gwagnju, 501-759, Korea*

### ABSTRACT

The use of biogas as an energy source reduces the chance of possible emission of two greenhouse gases, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>, into the atmosphere at the same time. Its nature of being a reproducible energy source makes its use even more attractive. This research is for the hydrogen production through the steam reforming of the biogas. The biogas utilized 3D-IR matrix burner in which the surface combustion is applied. The nickel catalyst was used inside a reformer. Parametric screening studies were achieved as Steam/Carbon ratio, biogas component ratio, Space velocity and Reformer temperature. When the condition of Steam/Carbon ratio, CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratio, Space velocity and Reformer temperature were 3.25, 60%:40%, 19.32L/g·hr and 700°C respectively, the hydrogen concentration and methane conversion rate were showed maximum values. Under the condition mentioned above, H<sub>2</sub> concentration was 73.9% and methane conversion rate was 98.9%.

**KEY WORDS** : 3D-IR matrix burner(3D-IR 매트릭스 버너), Biogas(바이오가스), Steam reforming(수증기 개질), Ni catalyst(니켈 촉매), Hydrogen(수소)

### 1. 서 론

화석연료의 연소에 의해 주로 배출되는 이산화탄소는 지구온난화를 일으키는 가장 큰 원인 물질이므로, 이산화탄소를 줄이기 위한 여러 연구들이 진행되고 있다. 가축분뇨 처리장, 하수종말처리장, 음

식물 처리장, 매립지 등에서 발생하는 바이오가스에도 메탄이 40~70%, 이산화탄소 30~60%와 미량의 황화수소와 암모니아로 구성되어 있어<sup>1)</sup>, 대기 중으로 그대로 방출시 지구온난화 문제를 가중시킬 수 있다.

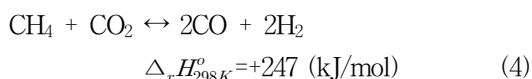
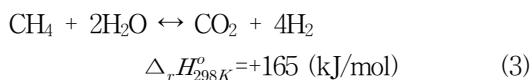
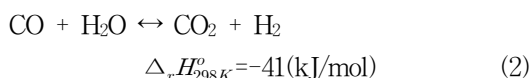
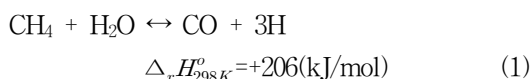
바이오가스는 화석연료와는 달리 대기 중의 이산화탄소를 증가시키지 않고 순환되는 탄소중립형 연료이기 때문에 이산화탄소를 저감하고 새로운 에너

<sup>†</sup>Corresponding author : ynchun@chosun.ac.kr

[ 접수일 : 2011.1.21 수정일 : 2011.2.11 게재확정일 : 2011.2.18 ]

지원으로도 활용할 수 있는 신재생에너지원이다. 하지만 바이오가스는 낮은 발열량에 의해 연소장치나 가스 엔진에 직접 이용 시 운전의 안정성과 엔진 가동에 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서, 개질을 통해 바이오가스를 합성가스로 전환 후 수소 함량이 많은 가스로 이용하게 되면, 가스 엔진의 효율 향상과 NOx 발생량을 저감시킬 수 있어, 바이오가스 이용면에서 유익한 과정이라고 할 수 있다<sup>2)</sup>. 바이오가스의 개질에 의한 수소 생산 방법으로 수증기 개질법(steam reforming)<sup>3)</sup>, CO<sub>2</sub> 개질법(CO<sub>2</sub> reforming)<sup>4)</sup>, 그리고 부분산화 개질법(partial oxidation reforming)<sup>5)</sup>, 플라즈마 개질법(plasma reforming)<sup>1,6)</sup> 등이 적용되고 있다.

수증기 개질 메카니즘에는 반응식 (1), (3)은 메탄 수증기 개질(methane steam reforming)이며, 반응식 (2)는 수성가스 전환반응(water gas shift reaction), 반응식 (4)는 이산화탄소 개질(methane carbon dioxide reforming) 반응이 있다.



이산화탄소가 포함된 바이오가스를 개질 반응에 필요한 외부 열원으로 활용하기 위해서는 저발열량 가스를 안정하게 연소시킬 수 있는 연소장치가 필요하다. 표면연소기술은 에너지 이용효율 향상, 질소산화물 배출 저감, 신속 균일한 가열 성능 등의 장점을 지니고 있다. 표면연소는 고온의 표면모체(다공성 매질)에서 발생하는 복사열을 이용하여 피열물을 가열하는 연소기술이다. 다공성 재료를 통하

여 유입되는 예혼합 연료-공기가 반응 영역을 통과 하면서 연소되고, 연소열의 일부는 다공체에 축적되어 고 에너지 환경에서 연속 연소가 가능하게 한다<sup>7,8)</sup>. 다공성 매체로 최근에는 일정한 압력으로 적층한 고온 내열 메탈 화이버(metal fiber)를 이용하여 그 표면으로부터 발생하는 강력하고 균일한 고체 복사 에너지(연소가스 엔탈피의 약 35%)와 고온 연소 가스의 대류 가열 효과를 동시에 이용하고자 하는 방법이 널리 이용되고 있다. 이것은 일반 피가열물의 가열시간 단축 등 에너지 이용 효율이 높고, 화염 온도의 불균일성에 따른 피가열물의 국부 과열 현상을 근본적으로 해결할 수 있다. 표면화염은 다공물질의 표면에 형성되는 것으로 표면 전체에서 적색을 이루면서 발광하고 주입에너지를 적열방사하는 적열방사모드와 혼합기의 유속이 빨라질수록 화염이 다공물질 표면을 떨어져 나가 청염화염(blue flame)형태로 존재하는 특성을 보이는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 적열방사모드를 활용한 3D-IR 매트릭스 버너 개질기를 개발을 위한 기초 연구로 바이오가스를 합성가스로의 전환을 위한 실험을 진행하였다. 고농도의 합성가스 생산을 위해 영향을 미치는 S/C ratio, CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratio, space velocity(SV), reformer temperature 변화에 따른 개질 특성을 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

3D-IR 매트릭스 버너 개질기의 실험장치는 Fig. 1과 같다. 3D-IR 매트릭스 버너 개질기, 가스 공급 라인, 수증기 공급 라인, 컨트롤 및 모니터링 시스템, 분석라인으로 구성된다.

3D-IR 매트릭스 버너 개질기는 3D-IR 매트릭스 버너와 촉매 개질기로 구성된다. 직육면체 형태로 만들어진 버너 내부로 개질 반응기가 삽입되어 있다. 바이오가스 연소를 위한 버너는 inward metal fiber burner(ACOD, 80×40×115mm<sup>3</sup>)로 용량은 10,000

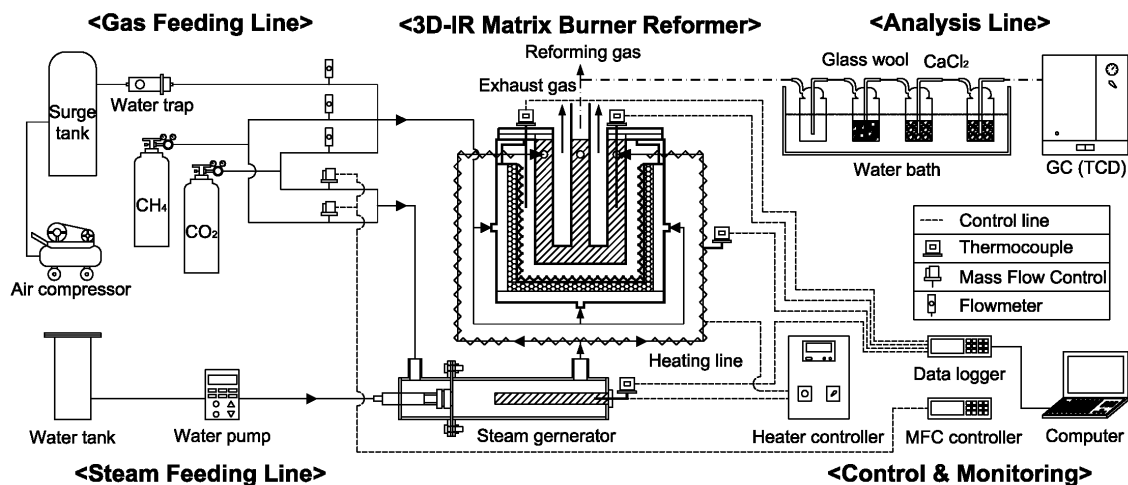


Fig. 1 Schematic of the experimental setup for 3D-IR matrix burner reformer.

kcal/hr이다. 버너는 직육면체 형태로 표면연소를 위해 다공성 메탈 화이버(metal fiber)가 밀면과 옆면으로 둘러싸여 있다. 다공성 메탈 화이버는 금속 섬유(fine metallic fiber)를 소결 혹은 직조공정을 거쳐 니트형 재료 형태로 되어 있다. 모사 바이오가스와 공기의 혼합가스를 일정하게 공급하기 위하여 밀면과 옆면 두 곳으로 공급된다. 개질 반응기는 삼지창 형태로 니켈 촉매(sud-chemie, FCR-4, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12.8wt%, 2mm)를 사용하였다. 개질 반응기 양쪽으로 바이오가스와 수증기가 공급되며, 가운데로 배출된다<sup>10)</sup>.

가스 공급 라인인 주성분이 메탄인 압축천연가스(CNG, compress natural gas)와 이산화탄소, 공기로 구성된다. 개질 반응기에는 MFC로 조절하여 압축천연가스와 이산화탄소가 공급되며, 3D-IR 매트릭스 버너에는 유량계를 통해 압축천연가스, 이산화탄소, 공기가 공급된다. 공기의 수분을 제거하기 위해 워터 트랩을 설치하였다.

수증기 공급 라인인 물 저장 탱크와 정량 펌프(STEPDOS03, KNF, Switzerland), 수증기 발생장치로 구성된다. 컨트롤 및 모니터링 시스템은 유량을 조절하기 위한 MFC Control과 수증기 발생장치 및 heating 라인의 온도를 조절하기 위해 컨트롤 박

스를 설치하였다. 3D-IR 매트릭스 버너, 촉매 개질기, 수증기 발생장치 및 공급 라인에 K-type 열전대를 설치하고, 데이터 로거(model hydra data logger 2625A, Fluke, USA)를 이용하여 온도를 연속적으로 모니터링 할 수 있도록 구성하였다.

분석라인은 개질가스의 입자상 물질과 수분을 제거하기 위해 Water bath에 임핀저를 설치하였고, 가스 분석을 위해 가스크로마토 그래프(CP-4900, Varian, Netherland)를 설치하였다.

## 2.2 실험방법

촉매 활성화 온도를 유지하기 위해 3D-IR 매트릭스 버너에 모사 바이오가스와 공기를 주입하였다. 모사 바이오가스는 메탄과 이산화탄소를 60%:40%의 조성비로, 공기와 혼합하여 3D-IR 매트릭스 버너의 밀면과 옆면으로 균일하게 주입하였다. 표면연소의 화염안정화 영역은 강한 복사열을 방사하는 적열연소이다. 따라서 이산화탄소를 주입하여도 적열연소가 안정적으로 유지될 수 있는 공기비를 설정하였으며, 이 때 공기비는 1.18이다. 이 연소를 통해 3D-IR 매트릭스 버너를 730°C로 유지시켰다.

개질 반응기에는 메탄과 이산화탄소, 수증기를 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>와 S/C ratio에 따라 각각 주입하여, 니켈

Table 1 Experimental conditions and range

Conditions	Range
S/C ratio	1.5 ~ 4.5
CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> ratio	40%:60% ~ 70%:30%
Space velocity (L/g-hr)	6.43 ~ 35.41
Reformer temperature (°C)	550 ~ 700

촉매의 최적 활성온도인 700~710°C를 유지시켰다. 수증기는 수증기 공급량으로 환산된 물의 양을 미세조절이 가능한 정량 펌프에 의해 조절되었다. 그 후 기화기에서 연료와 함께 혼합 유입되어, 완전 기화된 혼합기체 상태로 촉매 반응기 내부로 주입하였다. 기화기 온도는 450°C, 기화기 이후 주입라인은 예열된 가스의 냉각을 방지하기 위해 250°C로 유지하였다.

개질된 가스는 반응기 출구에 설치된 샘플링 포트에서 채취하였다. 채취된 시료는 임핀저를 통하여 입자상 물질과 수분을 제거한 후 건조가스 상태로 가스크로마토그래프의 샘플링 루프를 통하여 연속적으로 분석하였으며, GC-TCD(CP-4900, Varian, Netherland)를 사용하였다. 컬럼은 MolSieve 5A PLOT으로 H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>을 분석하였고, PoraPLOT Q로 CO<sub>2</sub>을 동시에 분석하였다.

본 연구에서는 S/C ratio, CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> ratio, space velocity(SV), reformer temperature를 변수로 하여, 바이오가스 개질 특성을 파악하였으며, 각 변수별 실험 범위는 Table 1과 같다.

실험 결과에 나타난 CH<sub>4</sub> 및 CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield, Energy efficiency는 다음과 같이 나타낸다.

- CH<sub>4</sub> 및 CO<sub>2</sub> conversion

$$conversion(x) = \frac{\dot{N}_{x,BG} - \dot{N}_{x,SG}}{\dot{N}_{x,BG}} (\%) \quad (5)^1$$

여기서,  $\dot{N}_{x,BG}$ 는 바이오가스 내 CH<sub>4</sub> 또는 CO<sub>2</sub> 유량(L/min),  $\dot{N}_{x,SG}$ 는 개질가스 내 CH<sub>4</sub> 또는 CO<sub>2</sub> 유량(L/min)를 나타낸다.

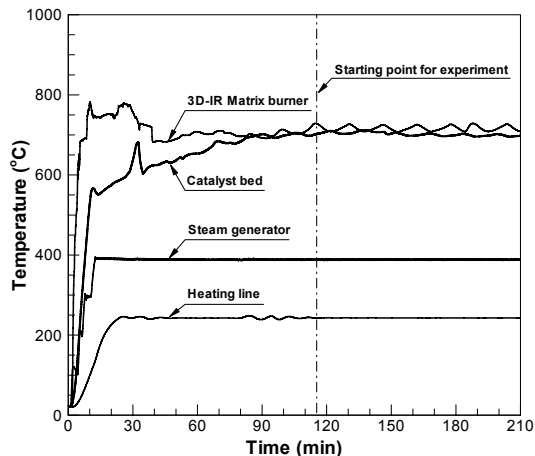


Fig. 2 Initial operating characteristics of the reactor.

- H<sub>2</sub> yield

$$H_2 \text{ yield} = \frac{\dot{N}_{H_2,SG}}{\dot{N}_{CH_4,BG}} \frac{1}{4} \quad (6)^1$$

여기서,  $\dot{N}_{H_2,SG}$ 는 합성가스 내 H<sub>2</sub> 유량(L/min),  $\dot{N}_{CH_4,BG}$ 는 바이오가스 내 CH<sub>4</sub> 유량(L/min),  $\frac{1}{4}$ 은 1mol CH<sub>4</sub>의 최대 4mol 수소 생산량을 나타낸다.

- Energy efficiency

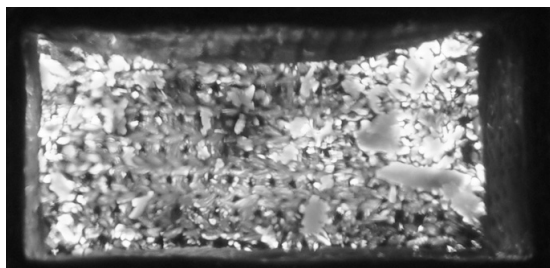
$$\eta (\%) = \frac{H_{2,SG} \times LHV + CO_{SG} \times LHV}{CH_{4,BG(Burner + Reformer)} \times LHV} \quad (7)^9$$

여기서,  $H_{2,SG}$ 는 합성가스 내 H<sub>2</sub> 유량(L/min),  $CO_{SG}$ 는 합성가스 내 CO 유량(L/min),  $CH_{4,BG(Burner + Reformer)}$ 는 3D-IR 매트릭스 버너와 개질기에 들어가는 바이오가스 내 메탄의 유량(L/min)을 나타낸다.

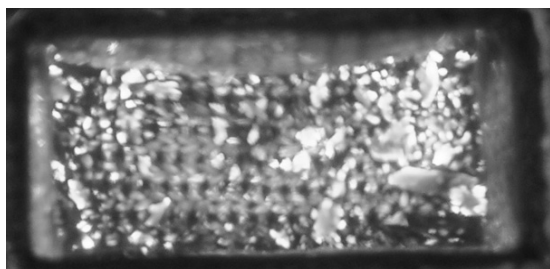
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 반응기 안정화

Fig. 2는 반응기 안정화시 시동특성이다. 3D-IR 매트릭스 버너를 730°C, 개질 반응기는 700~710°C, 수증기 기화장치는 450°C, 혼합기 주입라인은 250°C를 유지하였다. Fig. 3은 3D-IR 매트릭스 버너 화염



(a) CH<sub>4</sub> = 100%



(b) CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> = 60%:40%

Fig. 3 Photo of 3D-IR matrix burner flame.

사진으로 공기비가 1.18에서 메탄 100%일 때(Fig. 3(a))와 메탄:이산화탄소 비율이 60%:40% 일 때(Fig. 3(b))를 비교하였다.

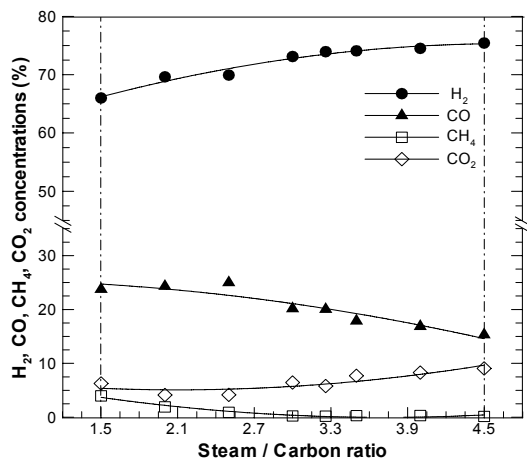
Table 2는 실험 기준 조건에서의 실험 결과를 나타내었다.

### 3.2 수증기/탄소 비 변화

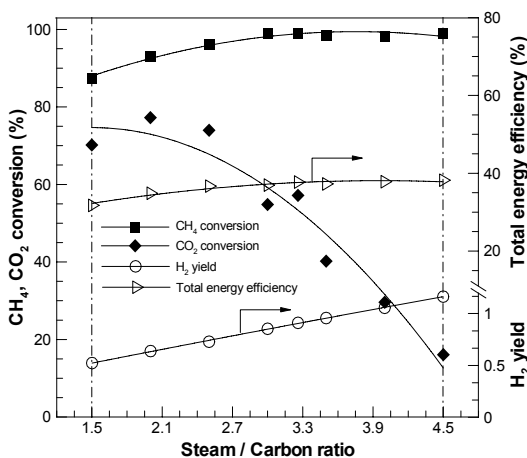
Fig. 4는 steam/carbon ratio 변화에 따른 결과로 Fig. 4(a)는 수소, 일산화탄소, 메탄, 이산화탄소 농도를 나타내었고, Fig. 4(b) 메탄 및 이산화탄소 전환율, 수소 수율, 총 에너지 효율을 나타내었다. 메

Table 2 Experimental conditions and data for standard conditions

S/C ratio	CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> ratio	Space velocity	Reformer temperature
3.25	60%:40%	19.3 L/g-hr	700°C
CH <sub>4</sub> conversion	CO <sub>2</sub> conversion	H <sub>2</sub> yield	Energy efficiency
98.8%	57.1%	0.91	37.73%



(a) Gas concentrations

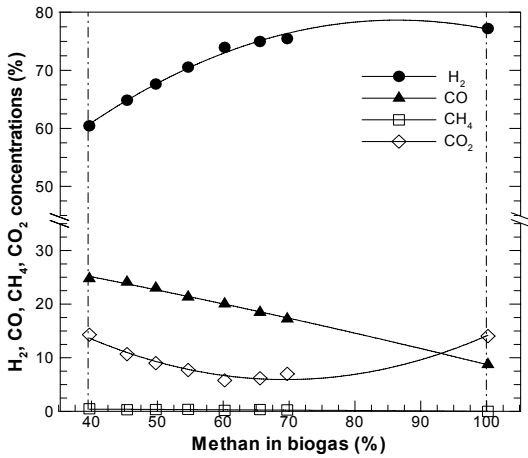


(b) CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield, total energy efficiency

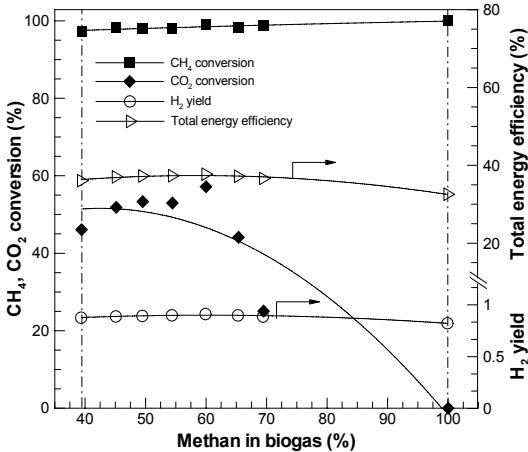
Fig. 4 The effect of the various S/C ratio.

탄 수증기 개질반응(반응식 (1))과 수성가스 전환반응(반응식 (2))에 의해 이론적인 S/C ratio는 2를 요구하지만, 탄소 침착에 의한 촉매 불활성을 유도하게 되므로, 과량의 steam양을 주입하게 된다. 따라서, S/C ratio를 1.5~4.5로 범위를 설정하였으며, 모사 바이오가스는 CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> = 60%:40%으로 하고, 개질 반응기 온도 700°C, SV는 19.3L/g·hr로 고정하였다.

Fig. 4(a)에서 S/C ratio가 증가할수록 수소와 이산화탄소는 증가하고, 일산화탄소와 메탄은 감소하였다. Fig. 4(b)에서 S/C ratio가 증가할수록 메탄 전환



(a) Gas concentrations



(b) CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield, total energy efficiency

Fig. 5 The effect of the various methane in biogas.

율이 증가하는데, S/C ratio가 3이상에서 최대 99%로 메탄 수증기 개질 반응이 활발히 진행됨을 알 수 있다. 반면, 이산화탄소 전환율은 S/C ratio가 클수록 반응식 (3)의 지배를 받게 됨에 따라, 이산화탄소가 생성되어 전환율은 감소하게 된다. 3D-IR 매트릭스 버너와 개질 반응기에 주입되는 바이오가스 대비 전체 에너지 효율은 31.7%에서 38.2%로 소폭 증가하였다.

### 3.3 모사 바이오가스 성분비 변화

Fig. 5는 바이오가스 성분비 변화에 따른 결과를

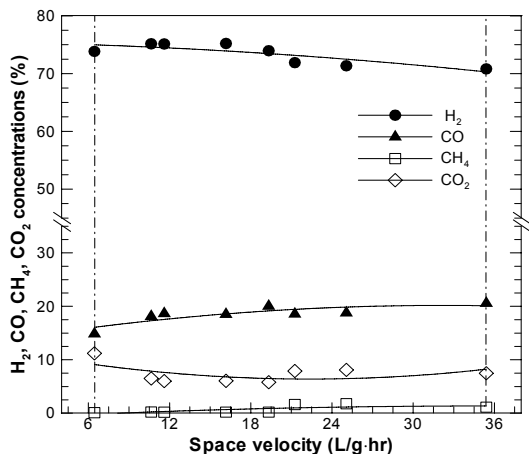
나타내었다. 메탄 성분이 40~70% 포함된 모사 바이오가스를 제조하여 실험을 진행하였다. S/C ratio가 커질수록, 수증기 생산을 위한 에너지가 많이 필요하게 된다. 따라서, 이전 변수 실험에 의해 S/C ratio가 3.25 이 후로는 메탄 전환율이 99%로 거의 변화가 없으므로, S/C ratio는 3.25, SV 19.3L/g·hr, 개질 반응기 온도는 700°C 고정하였다.

모든 변수 범위내에서 메탄 전환율이 97% 이상이 되어, 주입된 모사 바이오가스 내 메탄은 수소와 일산화탄소로 전환됨을 알 수 있다. 메탄 함량이 40%일 때, 메탄만 100% 주입한 경우에 비해 수소 농도가 21%가 저감 되었고, 일산화탄소는 83%가 증가되었다. 이는 모사바이오가스 내 이산화탄소의 영향으로, 이산화탄소 개질인 반응식 (3)의 반응이 우세해진다. 따라서, 수증기 개질보다는 탄소 함유량이 크기 때문에 이산화탄소의 생성량이 많아지는 결과를 얻게 된다<sup>11)</sup>. 메탄 함량이 40~70%로 증가시킬 경우, H<sub>2</sub>/CO 비는 2.4~4.3 범위로 증가하는데, 이는 혼합기의 H/C의 양이 증가하기 때문이다. 전형적인 LFG, Biogas의 메탄 함량이 50~60%으로 볼 때, 이 범위에서는 3~3.6을 나타내었다. 바이오가스 대비 전체 에너지 효율은 31.7%에서 38.2%로 소폭 증가하였다.

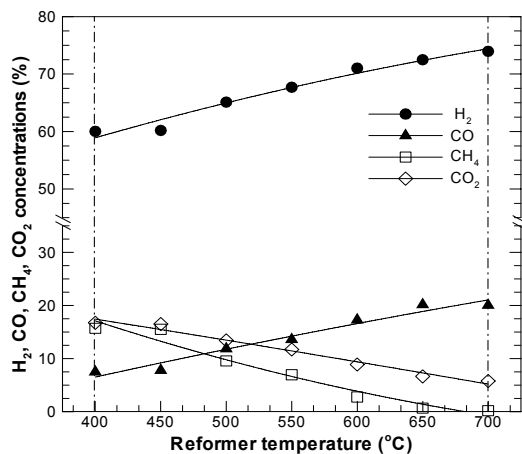
### 3.4 공간 속도 변화

Fig. 6은 공간속도 변화에 따른 결과를 나타내었다. 공급되는 가스속도를 나타내며, 혼합기의 체류 시간은 반응기의 크기 설계에 있어서 매우 중요한 변수이기 때문에, 공간속도 변화에 대해 실험을 진행하였다. 공간속도가 클 경우에는 반응기의 크기를 작게 유도할 수 있어, 촉매의 양을 줄일 수 있다<sup>12)</sup>. 공간속도를 6.43~35.41L/g·hr를 범위로 하며, S/C ratio는 3.25, CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 비는 60%:40%, 개질 반응기의 온도는 700°C로 고정하였다.

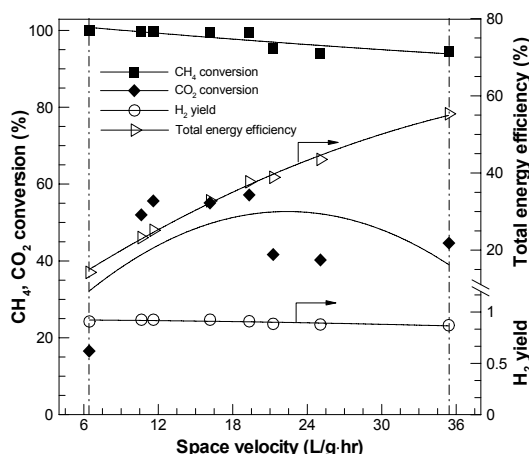
Fig. 6(b)에서 공간속도가 증가할수록 메탄 전환율은 99.9%에서 94.6%로 감소하였다. 공간속도변화에 따른 메탄 전환율은 S/C ratio나 반응기 온도 변화에 따른 메탄 전환율보다 변화에 큰 영향을 미



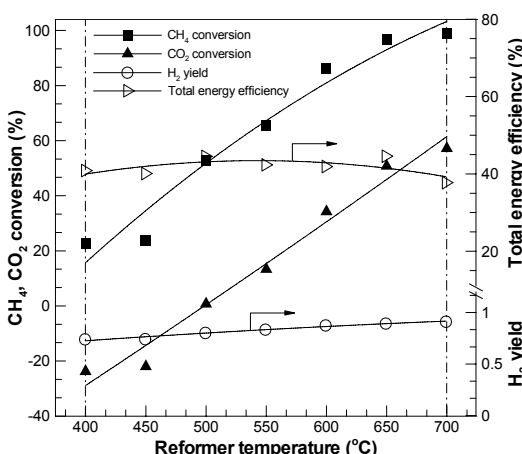
(a) Gas concentrations



(a) Gas concentrations



(b) CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield, total energy efficiency



(b) CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> conversion, H<sub>2</sub> yield, total energy efficiency

Fig. 6 The effect of the various space velocity.

Fig. 7 The effect of the various reformer temperature.

치지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 촉매반응에 있어서 반응물이 촉매 표면으로 확산되는 물질전달이 촉매 표면에서의 반응보다 반응의 속도결정단계이기 때문인 것으로 여겨진다. 메탄 전환율이 감소함에 따라, Fig. 6(a)에서 수소 농도는 감소하였고, 일산화탄소는 거의 일정하게 나타났다. 반면 이산화탄소와 메탄의 양은 소폭 증가하였다. 이는 반응기 내의 가스속도 증가로 인하여 체류시간이 감소하게 되어 미반응 된 메탄의 농도가 증가하면서 수소 농도가 감소됨을 알 수 있다.

### 3.5 개질 반응기 온도 변화

Fig. 7은 개질 반응기 온도변화에 따른 결과를 나타내었다. 촉매 활성화와 관련된 변수로 온도는 400~700°C 범위로 실험을 진행하다. S/C ratio는 3.25, CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 비는 60%:40%, SV는 19.32L/g·hr로 고정하였다. 반응기의 온도가 증가할수록 메탄 전환율과 수소 농도는 증가하였다. 메탄 전환율은 650°C에서 96.7%를 보였으며, 이 후에는 증가율이 완만해졌다. 수소 농도도 점진적으로 증가하여 700°C에서 73.9%까지 생성되었다. 이는 높은 온도에서는

강한 흡열 반응인 수증기 개질 반응이 우세해져, 반응식 (1), (3)에 의한 결과임을 알 수 있어, 수증기 개질에서 충분한 수소 양을 얻기 위해서 높은 온도가 필요함을 확인 할 수 있었다<sup>1)</sup>. CO 농도 역시 반응기 온도가 증가할수록 증가하는데, 이는 높은 온도에서는 수성가스 전환반응이 우세하지 않음을 알 수 있다. 이산화탄소 전환율은 반응기 온도가 증가함에 따라 증가하는데, 반응식 (4)에 의한 이산화탄소 개질에 기인하게 되므로, 높은 온도에서 강한 흡열반응이 우세해져 이산화탄소가 소비되기 때문이다. 3D-IR 매트릭스 버너와 개질 반응기에 주입되는 바이오가스 대비 전체 에너지 효율은 40.8%에서 37.7%로 소폭 감소하는데, 3D-IR 매트릭스 버너에 주입되는 혼합기의 메탄양이 증가하기 때문이다.

#### 4. 결 론

바이오가스를 이용한 수소생산을 위한 개질 연구로, 효과적인 바이오가스 연소를 위해 3D-IR 매트릭스 버너를 사용하였고, 그 열로 촉매 활성온도를 유지하여 수증기 개질 실험을 진행하였다. 3D-IR 매트릭스 버너는 메탄:이산화탄소 비가 60%:40%인 모사 바이오가스를 연소시켰을 때, 공기비 1.18에서 적열복사모드를 형성되었으며, 안정적인 화염을 형성을 통해 촉매 활성화에 필요한 온도를 유지할 수 있어, 저발열량 가스인 바이오가스 연소에 유용한 버너형태임을 확인하였다.

개질 성능에 영향을 미치는 변수인 수증기/탄소비, 바이오가스 성분비, 공간속도, 개질 반응기 온도에 대한 실험을 통해 영향을 파악하였다. 메탄:이산화탄소 비가 60%:40%인 모사 바이오가스를 사용하였을 때, S/C ratio는 3.25, SV는 19.32 L/g·hr, 반응기 온도는 700°C에서 메탄 전환율이 99%였으며, 수소는 73.9%까지 생성되었다. S/C ratio와 반응기 온도가 증가할수록 메탄 전환율은 증가하였으며, SV는 증가할수록 메탄 전환율은 감소되었다. 3D-IR 매트릭스 버너 개질기는 바이오가스를 연소를 위한 연료와 개질을 위한 연료로 동시에 사용할 수 있는 장치임을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2010-616-D00047).

## 참 고 문 헌

- 1) Y. N. Chun, Y. C. Yang, K. Yoshikawa, "Hydrogen generation from biogas reforming using a gliding arc plasma-catalyst reformer", *Catalysis today*, Vol. 148, 2009, pp. 283-289.
- 2) M. Ashrafi, T. Pröll, C. Pfeifer, and H. Hofbauer, "Experimental study of model biogas catalytic steam reforming: 1. Thermodynamic optimization", *Energy & Fuels*, Vol. 22, 2008, pp. 4182-4189.
- 3) P. Beckhaus, A. Heinzl, J. Mathiak, and J. Roes, "Dynamic of H<sub>2</sub> production by steam reforming", *J. Power Sources*, Vol. 127, 2004, pp. 294-299.
- 4) S. G. Wang, Y. W. Li, J. X. Lu, M. Y. He, and H. Jiao, "A detailed mechanism of thermal CO<sub>2</sub> reforming of CH<sub>4</sub>", *J. Molecular Structure*, Vol. 673, 2004, pp. 181-189.
- 5) A. E. Lutz, R. W. Bradshaw, L. Bromberg, and A. Rabinovich, "Thermodynamic analysis of hydrogen production by partial oxidation reforming", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 29, 2004, pp. 809-816.
- 6) 김성천, 전영남, "3상 교류 부채꼴 방전을 이용한 메탄으로부터 수소 생산", *한국수소 및 신에너지학회*, Vol. 18, No. 2, 2007, pp. 132-139.
- 7) T. Takeno, K. Sato, "An excess enthalpy flame theory", *Combustion Science and Technology*, Vol. 20, 1979, pp. 73-84.
- 8) A. I. Bakry, "Stabilized Premixed Combustion within Atmospheric Gas Porous Inert Medium (PIM) Burner", *International Conference on Energy and Environment 2006*, 28-30 August 2006, pp. 1-9.



- 9) G. Petitpas, J. D. Rollier, A. Darmon, J. Gonzalez-Aguilar, R. Metkemeijer, L. Fulcheri, "A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 14, 2007, pp. 2848-2867.
- 10) G. Kolios, A. Gritsch, A. Morillo, U. Tuttlies, J. Bernnat, F. Opferkuch, G. Eigenberger, "Heat-integrated reactor concepts for catalytic reforming and automotive exhaust purification", *Applied catalysis B*, Vol. 70, 2007, pp. 16-30.
- 11) D. G. Avraam, T. I. Halkides, D. K. Liguras, O. A. Bereketidou, M. A. Goula, "An experimental and theoretical approach for the biogas steam reforming reaction", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 9818-9827.
- 12) P. Kolbitsch, C. Pfeifer, H. Hofbauer, "Catalytic steam reforming of model biogas", *Fuel*, Vol. 87, 2008, pp. 701-706.