

## 플라즈마트론을 이용한 바이오가스 개질로부터 수소생산

김성천 · 전영남<sup>†</sup>

조선대학교 환경공학부, BK21 바이오가스 기반 수소생산 사업팀  
501-759 광주시 동구 서석동 375  
(2005년 6월 27일 접수, 2006년 7월 3일 채택)

## Hydrogen Gas Production from Biogas Reforming using Plasmatron

Seong Cheon Kim and Young Nam Chun<sup>†</sup>

BK21 Team for Biohydrogen Production, Department Environmental Engineering, Chosun University,  
375, Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea  
(Received 27 June 2005; accepted 3 July 2006)

### 요 약

고온 플라즈마가 적용된 플라즈마트론을 이용하여 바이오가스 개질을 통해 수소를 생산하는데 있어서 최적 운전 조건에 대해 연구하였다. 음식물 쓰레기의 혐기성 발효조에서 생성된 바이오가스 구성비( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ )가 1.03, 1.28, 2.12 인 바이오가스로 개질실험을 수행하고, 수소 생산과 메탄 전환율을 향상시키기 위해 바이오가스 유량비, 수증기 유량비, 입력전력 변화와 같은 변수별 연구를 수행하였다. 바이오가스 유량비(biogas/TFR : total flow rate), 수증기 유량비( $\text{H}_2\text{O}/\text{TFR}$ : total flow rate), 입력전력이 각각 0.32~0.37, 0.36~0.42, 8 kW일 때 메탄의 전환율이 81.3~89.6%인 최적운전조건을 보였다. 이때 합성가스 중의 수소와 일산화탄소의 농도는 27.11~40.23%, 14.31~18.61%이며, 수소 수율은 40.6~61%, 에너지 전환율은 30.5~54.4%,  $\text{H}_2/\text{CO}$  비는 1.89~2.16이다.

**Abstract** – The purpose of this paper is to investigate the optimal operating condition for the hydrogen production by biogas reforming using the plasmatron induced thermal plasma. The component ratio of biogas( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ ) produced by anaerobic digestion reactor were 1.03, 1.28, 2.12, respectively. And the reforming experiment was performed. To improve hydrogen production and methane conversion rates, parametric screening studies were conducted, in which there are the variations of biogas flow ratio(biogas/TFR: total flow rate), vapor flow ratio( $\text{H}_2\text{O}/\text{TFR}$ : total flow rate) and input power. When the variations of biogas flow ratio, vapor flow ratio and input power were 0.32~0.37, 0.36~0.42, and 8 kW, respectively, the methane conversion reached its optimal operating condition, or 81.3~89.6 %. Under the condition mentioned above, the wet basis concentrations of the synthetic gas were  $\text{H}_2$  27.11~40.23 %,  $\text{CO}$  14.31~18.61 %. The hydrogen yield and the conversion rate of energy were 40.6~61 %, 30.5~54.4 %, respectively, the ratio of hydrogen to carbon monoxide( $\text{H}_2/\text{CO}$ ) was 1.89~2.16.

Key words: Biogas, Plasmatron, Thermal Plasma, SynGas, Hydrogen Production

### 1. 서 론

산업의 발전과 인구 증가에 따른 에너지 수요 급증에 따라 화석 연료 고갈의 문제로 대체에너지 개발에 대한 관심이 증가되고 있다. 현재 다양한 대체에너지 개발에 대한 연구가 진행되고 있는데 그 중 음식물 쓰레기의 혐기성 발효조, 폐기물 매립장, 폐수처리장 등에서 발생하는 바이오가스의 대체에너지 이용기술에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 하지만, Table 1의 음식물 쓰레기 혐기성 발효조에서 생성되는 바이오가스 조성에서 보는 것처럼 생성되는 바이오가스의 조성이 발효조의 안정화 정도에 따라 균일하지 않아 직접

연소시켜 폐열을 이용할 경우에는 보일러 변동(boiler fluctuation) 등의 문제로 인해 일정한 열 공급이 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 바이오가스를 직접 연소하기보다는 개질을 통해 고농도의 수소로 자원화하는 것이 효율적인 것이다. 바이오가스 개질을 통해 생성된 수소의 경우는 청정에너지라는 인식으로 전 세계가 환경문

Table 1. The composition of biogas from anaerobic digester for food waste

Sampling No.	Biogas composition (%)					$\text{CH}_4/\text{CO}_2$
	$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$	$\text{C}_3\text{H}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	Traces	
1	48.5	46.53	0.96	3.6	0.31	1.03
2	48.2	37.6	7.62	6.1	0.28	1.28
3	60.3	28.4	6.14	4.7	0.46	2.12

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: yunchun@chosun.ac.kr

제로 고심하고 있는 지금 차세대의 에너지원으로 기대가 되고 있다. 수소 에너지 기술개발 효과는 미래의 지속적인 에너지 공급에 대한 가능성을 제공해 주고 있다. 또한, 현재의 에너지 시스템에서 사용되는 거의 모든 분야에 이용될 수 있으며, 기존의 화석연료 에너지 시스템에 대체하여 사용할 수 있는 가장 적합한 에너지로서의 특성을 가지고 있다고 할 수 있다.

바이오가스의 개질을 통한 수소의 생산 방법으로는 Beckhaus 등[1]의 수증기 개질법(steam reforming), Lutz 등[2]의 부분산화 개질법(partial oxidation reforming), Wang 등[3]의 CO<sub>2</sub> 개질법(CO<sub>2</sub> reforming), Bromberg 등[4]의 고온 플라즈마 개질법(thermal plasma reforming) 등 여러 방법이 적용되고 있다. 그 중 수증기 개질법이 가스 처리량과 수소 생산수율 등의 장점으로 현재 가장 많이 사용되고 있지만 반응기가 크고 반응속도가 상대적으로 느리며 강한 흡열반응으로 높은 온도와 압력이 요구되어지며, 수소 전환율을 높이기 위해 촉매가 사용되는데 이는 황이나 질소에 의해 오염되어 수명이 짧아지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부분산화 개질이 적용된 Bromberg 등[4]의 고온 플라즈마 개질법은 개질시 자체 내부 반응열을 사용하고 수소의 빠른 시동 및 응답시간으로 넓은 범위의 유량과 가스 성상에 대해 적용이 가능하다.

현재 MIT(massachusetts institute of technology)에서 연구되어지고 있는 플라즈마트론(plasmatron)은 다양한 연료들을 수소가 풍부한 syngas로 변환시켜 주는 개질장치이다. 플라즈마트론 내부에서 공기와 연료혼합물을 전기아크로 발화시켜 고온의 플라즈마 상태를

유지하고 개질된 가스는 수소와 일산화탄소가 풍부한 syngas로 전환된다.

본 연구에서는 고온 플라즈마를 적용한 플라즈마트론을 이용하여 음식물 쓰레기의 혐기성 발효조에서 생성된 구성비가 불균일한 Table 1의 바이오가스 개질을 통해 양질의 저공해 대체에너지인 수소가스를 생성하였고, 수소 생성이 최대이고 바이오가스 전환율이 최대인 최적 운전 조건을 파악하였다. 또한, Table 1의 바이오가스를 사용하여 바이오가스 전환율에 영향을 미치는 바이오가스 유량비(biogas/TFR), 수증기 유량비(vapor/TFR), 입력 전력에 따른 개질 특성을 파악하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. 실험 장치

Fig. 1은 실험에 사용한 고온 플라즈마 개질 실험장치를 나타낸 것으로, 고온 플라즈마 개질기, 전원공급장치, 바이오가스 및 수증기 공급라인, 측정 및 분석 라인으로 구성되어 있다. 고온 플라즈마 개질기는 플라즈마트론, 혼합기 그리고 반응기로 구성되어 있다. 플라즈마트론 크기는 길이 180 mm 외경이 40 mm이며, 혼합기에서는 바이오가스 및 수증기가 접선방향으로 주입되고, 반응기는 길이 300 mm, 외경 80 mm인 스테인리스 관으로 구성되어 있다. 스테인리스 관 내부에는 15 mm의 두께로 단열을 위한 Castable(TC-100) 처리가 되어있다.

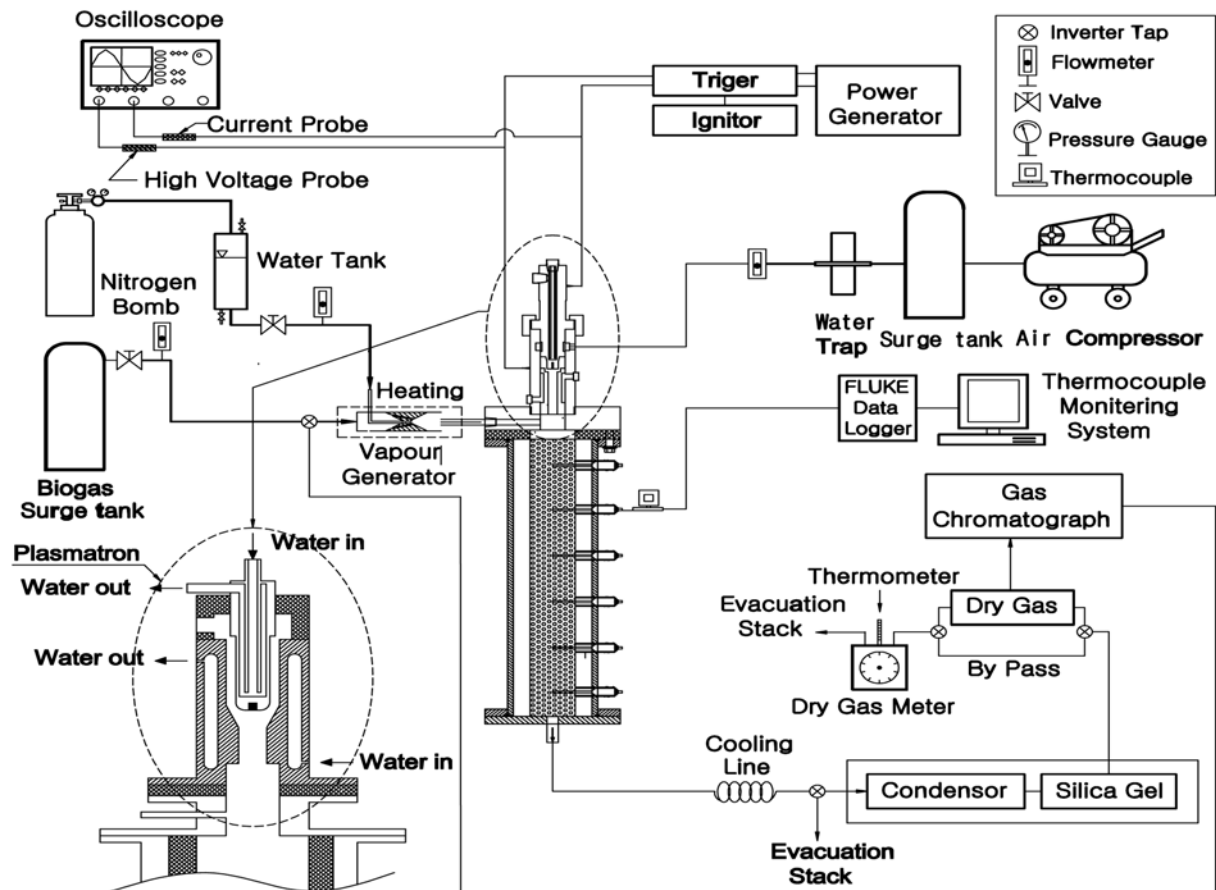


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus.

전원공급장치는 전원공급기와 점화기, 트리거 시스템으로 구성되어 있으며, 전원공급기는 최대 전류 50 A, 최대 전압 200 V로 10 kW의 전력을 공급할 수 있으며 점화기(ignitor)는 30 kV까지 고전압을 공급하며, 트리거(trigger) 시스템은 플라즈마 아크발생을 위한 점화 역할 및 전류제어를 하여 플라즈마를 지속적으로 유지한다.

바이오가스 및 수증기 공급라인에서 바이오가스는 일정 유량으로 조절되어 완전 기화된 수증기와 함께 기화기에서 완전 혼합되어 개질 반응기로 주입된다.

측정/분석라인은 전기특성 측정, 온도 측정, 가스 분석으로 구분된다. 전기특성은 고전압 프роб(Tektronix P6015A), 전류 프роб(Tektronix A6303)과 디지털 오실로스코프(Tektronix TDS 3052)에 의해 측정된다. 온도 측정은 직경이 0.3 mm인 R-type 열전대와 데이터 분석장치(fluke hydra data logger)로 구성되어 있다. 가스분석은 샘플링 라인과 가스크로마토그래프(SHIMADZU-14B)로 구성되어 있다.

## 2-2. 실험방법

실험은 공기를 주입하여 플라즈마를 안정하게 형성하면서 두 전극으로 냉각수를 공급하여 고온에 의해 전극이 침식되는 현상을 완화한다. Fig. 1의 좌측 하단에 전극으로 공급되는 냉각수의 유로를 나타냈다. 형성된 플라즈마에 의해 반응기 온도를 700 °C로 안정화시킨 후 바이오가스를 함께 주입하여 부분산화반응을 일으켜 반응 온도를 1,000 °C로 상승시켜 일정하게 유지하였다. 플라즈마 화염의 온도는 수 천에 이르기 때문에 열전대를 통한 직접적인 측정이 불가능하여 Fig. 1에 보는 것처럼 반응기의 입구에서 두 번째 지점에 열전대를 사용하여 온도를 연속 모니터링하였다. 본 개질 반응기의 시동 특성의 예는 Fig. 2와 같다.

전기적 특성인 입력 전압과 전류는 전원공급 장치에 의해 조절되며, 고전압 프роб과 전류 프роб 그리고 디지털 오실로스코프에 의해 전압 및 전류가 측정되었다. 저장조에 바이오가스는 유량계에서 유량이 조절되어 주입되고 수증기는 수증기 공급량으로 환산된 물의 양을 미세조절이 가능한 메터링 밸브에 의해 조절된 후 기화기에서 바이오가스와 함께 유입되어 완전 기화된 혼합기체 상태로 개질 반응기내로 주입된다. 합성가스의 채취는 반응기 출구에 설치된 샘플링 포트에서 이루어지며, 채취된 시료는 냉각장치를 통과하여 수분을 응축시켜 수분량을 측정하고 건가스의 상태로 가스크로마토그래프의 샘플링 루프로 연속적으로 유입되어 분석되었다. 분석은 TCD 검출기를 이용하였으며, 분석 칼럼은 H<sub>2</sub>는 Molecular Sieve

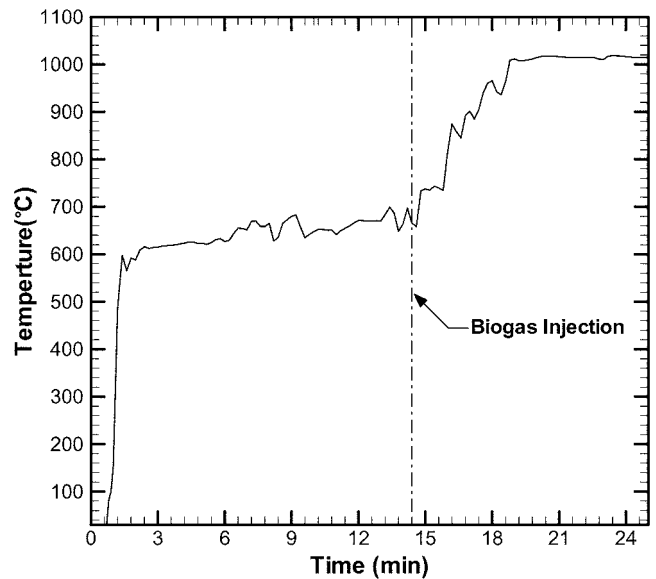


Fig. 2. Initial operating characteristic of the reformer.

5A(80/100 mesh)로 CO는 Molecular Sieve 13X(80/100 mesh)로 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>는 HayeSep R(100/120 mesh)을 사용하였다.

실험방법은 혐기성 발효조에서 생성되는 바이오가스의 조성이 시료 채취시마다 바이오가스 구성비(CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>)가 1.03~2.12로 차이를 보이고 있다(Table 1 참조). 따라서 바이오가스 구성비가 다른 경우에 대해 많은 반복 예비실험을 통해 수소의 생성이 최대이고 바이오가스 주성분인 메탄의 전환율이 최대인 조건을 각각의 기준조건(Table 2 참조)으로 정하였다. 또한, Table 1의 바이오가스를 사용하여 기준 조건을 기준으로 하여 개질 반응에 영향인자인 바이오가스 유량비(TFR/Air), 수증기 유량비(H<sub>2</sub>O/TFR), 입력전력 변화에 대한 변수별 연구를 수행하였으며, 각각의 변수에 대한 변화량은 0.17~0.46, 0.21~0.52, 6.5 kW~10 kW 범위이다.

## 3. 결과 및 고찰

고온 플라즈마를 이용한 바이오가스의 개질 특성을 반복 실험한 결과, 음식물 쓰레기의 혐기성 발효조에서 생성되는 바이오가스의

Table 2. Experimental conditions and data for the reference condition

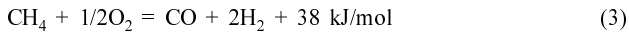
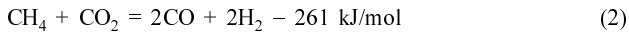
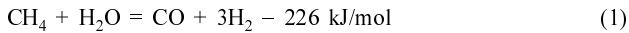
Experimental condition											
conditions		Component ratio (CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> )			Biogas flow ratio (Biogas/TFR <sup>1)</sup> )			Vapor flow ratio (H <sub>2</sub> O/TFR <sup>1)</sup> )		Input Power (kW)	
value		1.03			0.32			0.42		8	
		1.28			0.35			0.39		8	
		2.12			0.37			0.36		8	
Experimental data											
SynGas components(%)		Non-reaction gas				Syngas production efficiency(%) <sup>2)</sup>			H <sub>2</sub> /CO	H <sub>2</sub> yield (%) <sup>2)</sup>	Energy conversion (%) <sup>2)</sup>
H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O			
27.11	14.31	1.84	20.32	0.57	8.41	81.3	76	85.6	1.89	40.6	30.4
31.23	16.83	1.61	18.1	0.37	4.49	89.6	84.9	86.6	1.85	55	32.07
40.23	18.61	4.1	15.1	0.06	2.67	87.11	85	89.5	2.16	61	54.4

<sup>1)</sup>TFR : total flow rate(l/min), i.e., Biogas + Air + H<sub>2</sub>O

<sup>2)</sup>Calculated by Eq. (5)-(7)

구성비( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ )가 Table 1에서 보는 것처럼 불균일함으로 각각의 구성비에 대한 수소의 생성 및 메탄의 전환율을 높게 유지할 수 있는 조건을 각각의 기준 운전 조건으로 선택하였으며, 그때의 실험 조건 및 실험결과는 Table 2에 나타내었다.

반응 (1)식~(4)식은 바이오가스 중의 주성분인 메탄의 대표적인 개질반응으로 Hwang 등[5]의 수증기, 이산화탄소, 부분산화 개질반응과 CO 전환반응(CO shift reaction)을 나타낸 것이다.



고온 플라즈마 개질 반응기의 개질 효율을 파악하기 위하여 수소 수율( $\text{H}_2$  yield), 에너지 전환율, 바이오가스 전환율은 Kim 등[6]의 (5)식~(7)식에 의하여 계산되어진다.

$$\text{H}_2 \text{ 수율}(\%) = \frac{\text{개질가스에 포함된 H양}}{\text{연료에 포함된 H양}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{에너지 전환율}(\%) = \frac{\text{개질가스에 에너지 함량}}{\text{연료의 에너지 함량}} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{바이오가스 전환율}(\%) = \frac{\text{바이오가스 유입농도} - \text{바이오가스 유출농도}}{\text{바이오가스 유입농도}} \times 100 \quad (7)$$

기준 조건의 개질반응 결과로 바이오가스 구성비 변화에 따른 생성된 합성가스 중 수소와 일산화탄소의 농도 범위는 각각 27.11~40.23%, 14.31~18.61%이고, 메탄의 전환율은 81.3~89.6%의 범위를 보이고 있다. 이 농도 결과에서 알 수 있듯이 합성가스의 주성분이 수소이며,  $\text{H}_2/\text{CO}$  비는 1.89~2.16이다. 또한, 수소 수율( $\text{H}_2$  yield)과 에너지 전환율은 각각 40.6~61%, 30.4~54.4%의 범위로 바이오가스 구성비가 높을수록 개질성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 혐기성 발효조에서 생성된 바이오가스 구성비가 1.03~2.12

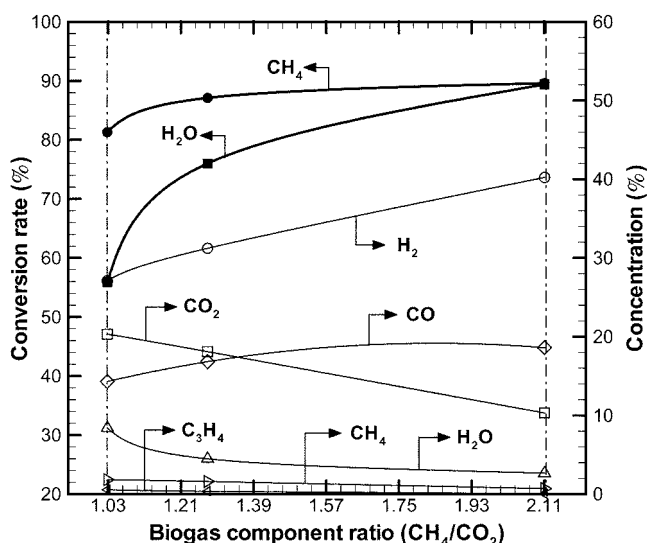


Fig. 3. Effect of the various biogas component ratios.

로 변화할 때에 각각의 구성비에서 수소 생성과 메탄의 전환율이 최대일 때의 결과를 비교한 것으로 메탄과 수증기의 전환율과 합성가스 중의 대표가스의 농도를 나타낸 것이다. 바이오가스의 구성비가 2.12일 때 메탄과 수증기의 전환율을 최대로 각각 89.6%, 89.5%이며, 수소와 일산화탄소의 농도도 각각 40.23%, 18.61%로 최대값을 나타내고 있다. 결과적으로 바이오가스의 구성비가 높아질수록 수소의 생성 농도가 높아지고 있는데 이는 개질을 통해 수소를 생성하는 주성분인 메탄의 양이 증가하였기 때문이다. 바이오가스 중의 주성분인 메탄의 개질반응은 (1)식의 수증기 개질반응이 우세하게 진행됨으로 인해 수증기의 농도가 점진적으로 감소하며 이때  $\text{CO}_2$  농도가 감소하는 것처럼 나타나는 것은 바이오가스 구성비 변화로  $\text{CO}_2$ 의 초기농도가 낮기 때문이다(Table 1 참조).

또한, 수소 생성률을 높이고 메탄의 전환율을 향상시키기 위해 개질 반응에 영향인자인 바이오가스 유량비( $\text{Biogas}/\text{TFR}$ ), 수증기 유량비( $\text{H}_2\text{O}/\text{TFR}$ ), 입력전력 변화에 대한 변수별 연구를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

### 3-1. 바이오가스 유량비

Fig. 4는 바이오가스 유량비 변화에 대한 바이오가스 구성비가 불균일한 바이오가스의 개질특성을 파악하기 위하여 바이오가스 유량비를 0.17~0.46까지 변화를 통해 개질특성을 파악한 것이다.

Fig. 4(a)는 합성가스 중 주요한 대표 가스인 수소와 일산화탄소의 농도를 나타낸 것이다. 바이오가스 구성비( $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ )가 각각 1.03, 1.28, 2.12인 바이오가스에 대해 바이오가스 유량비를 점차적으로 증가시킬 경우 합성가스의 주성분인 수소는 바이오가스의 유량비가 각각 0.32~0.37에서 최대인 27.11%~40.23%의 수소 농도를 보이고 바이오가스 유량비를 더 증가시키면 낮은 변화폭으로 감소하고 있다. 일산화탄소의 농도는 바이오가스 유량비가 증가할수록 점차적으로 증가하고 있는데 이는 주입되는 수증기량이 고정된 상태에서 바이오가스 유량비가 커짐으로 메탄 개질이 (2)식에 의한 반응이 우세하게 진행되기 때문으로 사료된다. Fig. 4(b)는 메탄의 전환율과  $\text{H}_2/\text{CO}$  비를 나타낸 것으로 각각의 바이오가스 구성비에서 메탄의 전환율이 최대일 때 수소의 생성률이 최대임을 확인할 수 있다[Fig. 4(a) 참조].  $\text{H}_2/\text{CO}$  비는 바이오가스의 구성비가 1.03일 때 수소와 일산화탄소의 생성량의 변화폭이 유사하여  $\text{H}_2/\text{CO}$  비가 거의 일정하다. Fig. 4(c)는 수소 수율( $\text{H}_2$  yield)을 나타낸 것으로 (5)식에 의해 계산되어진다. 수소 수율은 Fig. 4(a)의 개질가스 중의 주성분인 수소의 농도와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 바이오가스 유량비가 0.32~0.37에서 수소 수율이 40.6~61%로 최대값을 나타내고 있다.

### 3-2. 수증기 유량비

Fig. 5는 수증기 유량비 변화에 대한 바이오가스의 개질특성을 파악하기 위하여 수증기 유량비를 0.21~0.52까지 변화를 통해 개질특성을 파악한 것이다.

Fig. 5(a)는 메탄의 전환율과 합성가스의 대표가스인 수소의 농도를 나타낸 것이다. 수증기 유량비 변화에서 메탄의 전환율이 최대일 때 합성가스의 주성분인 수소의 생성농도는 최대값을 보이고 있지만 Fig. 5(b)의 일산화탄소는 수증기 유량비가 낮을수록 (2)식~(3)식의 반응이 우세하여 일산화탄소의 생성률이 높다. 수소의 농도가 바이오가스 유량비 0.32~0.37에서 최대값을 보이다가 낮아지는 것은

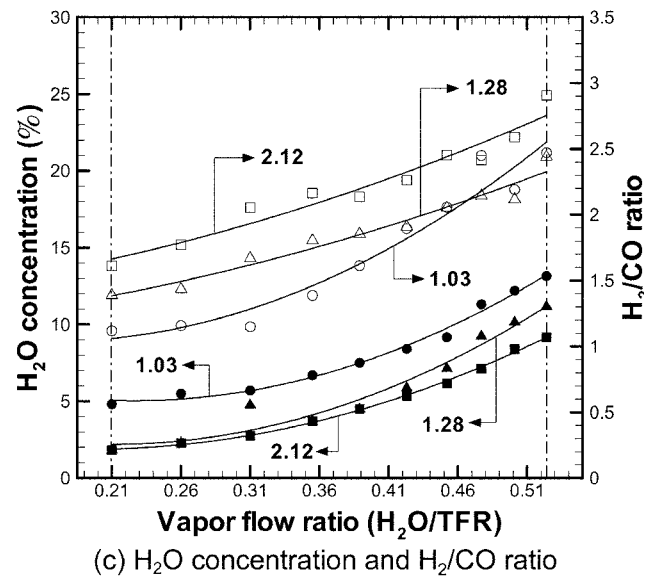
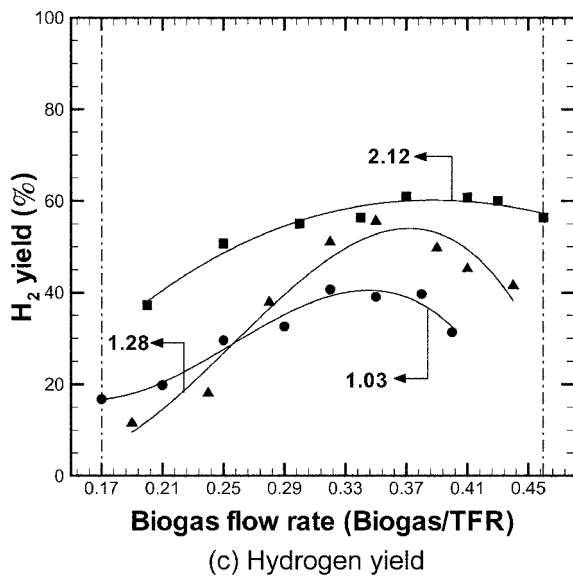
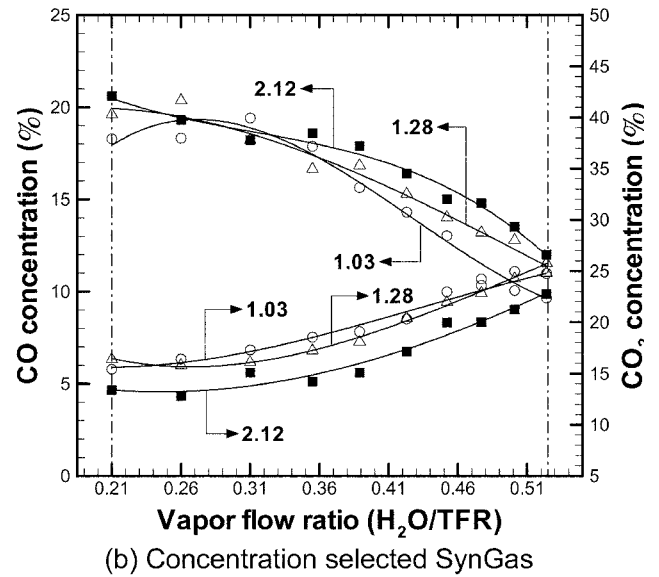
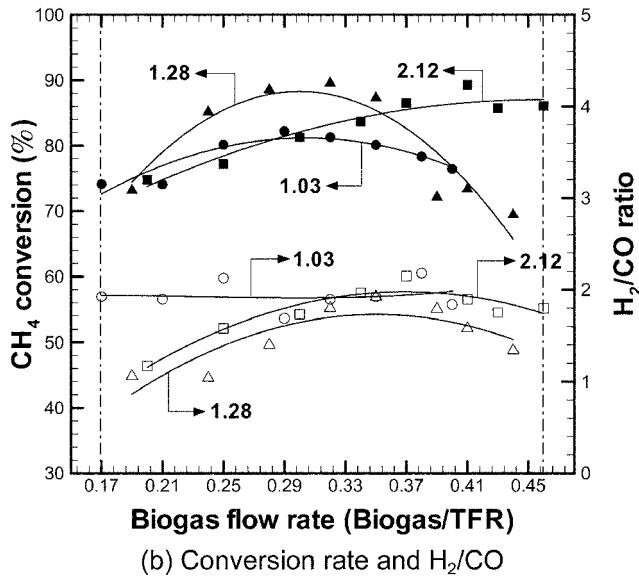
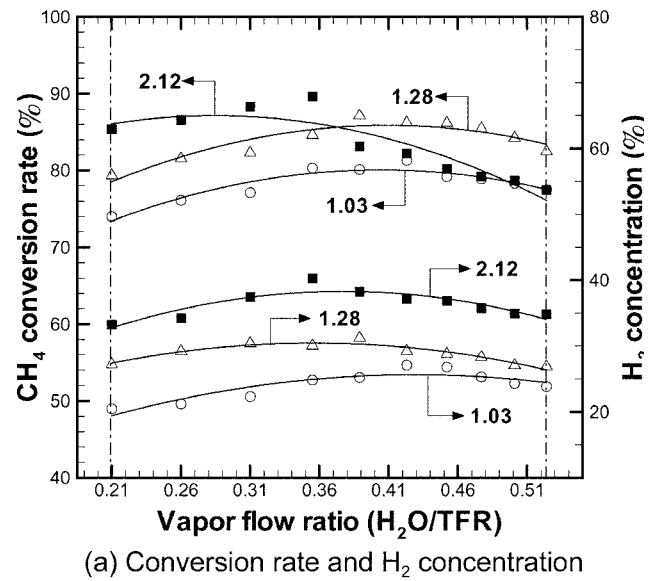
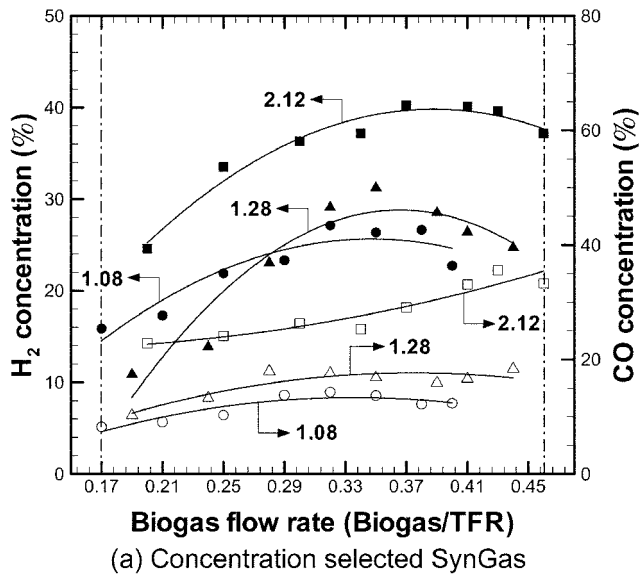
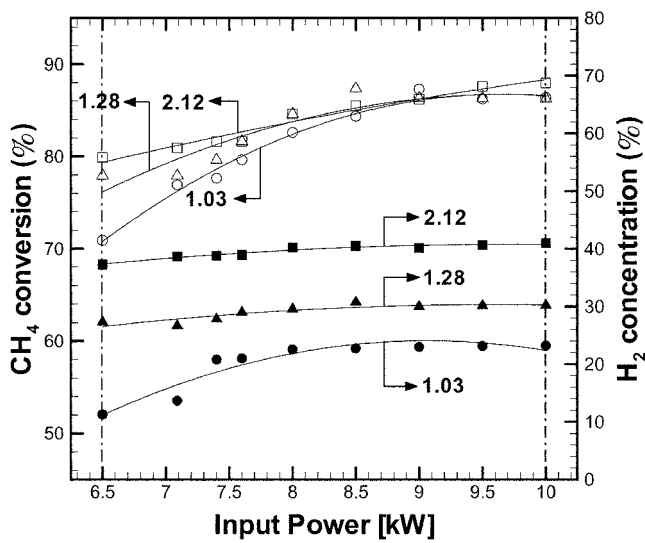
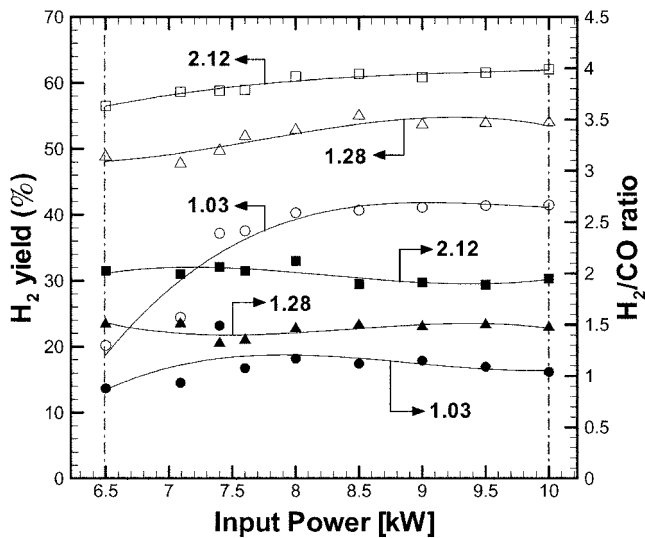


Fig. 4. Effect of the various biogas flow ratios.

Fig. 5. Effect of the various vapor flow ratios.

(a) Conversion rate and H<sub>2</sub> concentration

(b) Concentration selected SynGas

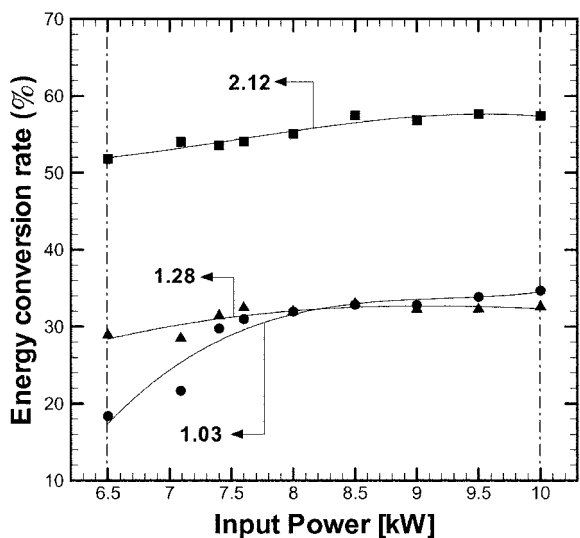
(c) H<sub>2</sub>O concentration and H<sub>2</sub>/CO ratio

Fig. 6. Effect of the various input powers.

개질반응의 주성분인 메탄의 농도밀도가 낮아졌기 때문이다. 바이오가스 구성비가 높을수록 수증기의 유량비가 낮은 범위에서 최대 메탄 전환율과 수소 생성량을 나타내고 있는데 이는 바이오가스 내의 메탄에 농도가 높을수록 메탄과 수증기의 개질반응인 (1)식의 반응이 우세하게 진행되기 때문이다.

Fig. 5(b)는 일산화탄소와 이산화탄소의 농도를 나타낸 것으로 바이오가스 구성비가 낮을수록 바이오가스내의 이산화탄소의 농도가 높아짐으로 개질을 통해 생성되는 일산화탄소의 농도가 높게 나타나며 수증기 유량비가 증가할수록 생성된 일산화탄소가 반응에 충분한 수증기에 의해 (4)식의 반응이 활발하게 진행됨으로 인하여 반응기 출구에서 이산화탄소의 농도가 점차적으로 증가하고 있다.

Fig. 5(c)는 수증기 농도와 H<sub>2</sub>/CO 비를 나타낸 것으로 수증기 유량비가 증가할수록 반응에 필요한 수증기 주입량 이상으로 주입됨으로 미반응 수증기량이 점차적으로 증가하고 있다. H<sub>2</sub>/CO 비는 수증기 유량비 증가에 따라 증가하고 있는데 이는 Fig. 5(b)에서 보는 것처럼 생성된 일산화탄소의 농도가 점차적으로 감소하기 때문이다.

### 3-3. 입력전력

Fig. 6은 모든 변수는 기준 조건과 동일하게 유지한 상태에서 입력 전력을 6.5 kW~10 kW로 변화시켰을 때의 실험결과이다.

Fig. 6(a)는 메탄의 전환율과 수소의 농도를 나타낸 것으로 입력 전력이 증가함에 따라 바이오가스의 주성분인 메탄의 전환율 점차적으로 증가하며 이때의 수소 생성량도 증가하고 있다. 이는 Supat 등[7]이 고온 플라즈마 방전 시 생성되는 각 전자의 에너지가 충분히 큰 전자만이 가스 분자를 활성화시켜 반응성 화학종이 생성되도록 하는데 입력전력량이 증가되면 충분한 에너지를 갖는 전자밀도가 증가하여 바이오가스와 산소의 라디칼화 또는 이온화가 더욱 용이하여 개질반응이 활성화되었기 때문이다.

Fig. 6(b)는 수소 수율(H<sub>2</sub> yield)과 H<sub>2</sub>/CO 비를 나타낸 것으로 수소 수율의 경우는 Fig. 6(a)의 수소의 농도변화와 유사한 특성을 나타내며, H<sub>2</sub>/CO 비는 입력전력의 변화에 따라 변화폭이 크지 못하는데 이것은 합성가스의 주성분인 수소와 일산화탄소의 농도가 입력전력 증가에 따라 비례적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 에너지 전환율을 나타낸 것으로 (6)식에 의하여 계산되어진다. 에너지 전환율은 입력전력이 8 kW 이상에서는 전력소비량의 증가에 비해 에너지 전환율의 증가량이 크지 못하다는 것은 불필요한 에너지의 소모가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 최적 입력전력 8 kW를 최적 운전조건으로 정하였다. Bromberg 등[8]은 플라즈마를 경쟁력있는 수소 생산 방법임을 나타냈다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 구성비가 불균일한 바이오가스의 개질에 관한 연구를 수행하여 수소 생성율과 메탄 전환율이 최대인 최적 운전조건을 도출한 결과는 다음과 같다.

기준조건의 개질반응 결과 바이오가스 구성비 변화에 따른 생성된 합성가스 중에 수소와 일산화탄소의 농도 범위는 각각 27.11~40.23%, 14.31~18.61%이고, 메탄의 전환율은 81.3~89.6%의 범위를 보였다. 이 농도 결과에서 알 수 있듯이 메탄의 전환율이 최대일 때 수소의 생성도 최대이며, H<sub>2</sub>/CO 비는 1.89~2.16이다. 또한, 수소 수율(H<sub>2</sub> yield)과 에너지 전환율은 각각 40.6~61%, 30.4~54.4%로 바이오가스

구성비가 높을수록 개질성능이 우수함을 확인할 수 있다.

개질 성능에 영향을 미치는 운전인자인 바이오가스 유량비, 수증기 유량비, 입력전력 변화에 대한 개질특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

(1) 주입되는 수증기량이 고정된 상태에서 바이오가스 유량비가 증가하므로 이산화탄소 개질 반응이 우세하게 진행됨으로 일산화탄소의 농도는 점차적으로 증가한다.

(2) 바이오가스 구성비가 높을수록 수증기 유량비가 낮은 조건에서 메탄 전환율이 최대이며 수증기 유량비가 증가할수록 일산화탄소가 이산화탄소로 전환되는 반응이 정반응이 우세하여 이산화탄소 농도가 점차적으로 증가하고 일산화탄소의 감소로 인해  $H_2/CO$  비는 계속적으로 증가한다.

(3) 입력 전력이 증가할수록 메탄의 전환율과 수소 생성이 점차적으로 증가하고 있지만 입력전력이 8 kW 이상에서는 전력소비량의 증가에 비해 에너지 전환율의 증가량이 크지 못함으로 입력전력 8 kW를 최적 운전조건으로 정하였다.

### 참고문헌

1. Beckhaus, P., Heinzl, A., Mathiak, J. and Roes, J., "Dynamic of  $H_2$  Production by Steam Reforming," *J. Power Sources*, **127**, 294-299(2004).
2. Lutz, A. E., Bradshaw, R. W., Bromberg, L. and Rabinovich, A., "Thermodynamic Analysis of Hydrogen Production by Partial Oxidation Reforming" *Int. J. Hydrogen Energy*, **29**, 809-816(2004).
3. Wang, S. G., Li, Y. W., Lu, J. X., He, M. Y. and Jiao, H., "A Detailed Mechanism of Thermal  $CO_2$  Reforming of  $CH_4$ ," *J. Molecular Structure*, **673**, 181-189(2004).
4. Bromberg, L., Rabinovich, A., Alexeev, N. and Cohn, D. R., "Plasma Reforming of Diesel Fuel," PSFC/JA-99-4(1999).
5. Hwang, B. B., Yeo, Y. K. and Na, B. K., "Conversion of  $CH_4$  and  $CO_2$  to Syngas and Higher Hydrocarbons Using Dielectric Barrier Discharge," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(4), 631-634(2003).
6. Kim, S. S., Chung, S. H. and Kim, J. G., "Nonthermal Plasma-assisted Diesel Reforming and Injection of the Reformed Gas into a Diesel Engine for Clean Combustion," *J. Korean Society Environmental Eng.*, **27**(4), 394-401(2005).
7. Supat, K., Chavadej, S., Lobban, L. L. and Mallison, R. G., "Combined Steam Reforming and Partial Oxidation of Methane to Synthesis Gas Under Electric Discharge," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **42**, 1654-1661(2003).
8. Bromberg, L., Cohn, D. R., Rabinovich, A., Alexeev, N., Samokhin, A., Ramprasad, R. and Tamhankar, S., "System Optimazation and Cost Analysis of Plasma Catalytic Reforming of Natural Gas," *Int. J. Hydrogen Energy*, **25**, 1157-1161(2000).
1. Beckhaus, P., Heinzl, A., Mathiak, J. and Roes, J., "Dynamic of  $H_2$  Production by Steam Reforming," *J. Power Sources*, **127**,