Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2014. 12), Vol. 25, No. 6, pp. 586~593
DOI: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2014.25.6.586
ISSN 1738-7264
eISSN 2288-7407

합성가스 생산을 위한 플라즈마-덤프 개질기 개발

임문섭 · 김은혁 · 전영남†
조선대학교 환경공학과

Development of a Plasma-Dump Reformer for Syngas Production

MUN SUP LIM, EUN HYUK KIM, YOUNG NAM CHUN†
Department of Environmental Engineering. Chosun University, 375 Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

Abstract >> Limited sources of fossil fuels and also global climate changes caused by CO_2 emissions are currently discussed around the world. As a renewable, carbon neutral and widely available energy source, biogas is regarded as a promising alternative to fossil fuels. In this study, a plasma dump reformer was proposed to produce H_2-rich synthesis gas by a model biogas. The three-phase gliding arc plasma and dump combustor were combined. Screening studies were carried out with the parameter of a dump injector flow rate, water feeding flow rate, air ratio, biogas component ratio and input power. As the results, methane conversion rate, carbon dioxide conversion rate, hydrogen selectivity, carbon monoxide yield at the optimum conditions were achieved to 98%, 69%, 42%, 24.7%, respectively.

Key words : Plasma dump(플라즈마 덤프), Reformer(개질기), Biogas(바이오가스), Syngas(합성가스), Conversion rate(전환율)

1. 서 론

바이오가스는 대기 중의 이산화탄소를 증가시키지 않고 순환되는 탄소중립형 연료이기 때문에 이산화탄소를 저감시키고, 새로운 에너지원으로도 활용할 수 있는 청정하고 환경친화적인 연료이다. 유기성 폐기물, 낙엽, 식물, 나무 등 다양한 종류의 바이오매스를 혐기성 소화에 의해 가축분뇨 처리장, 하수종말처리장, 음식물 처리장, 매립지에서 발생된다. 바이오가스는 메탄 55~65%, 이산화탄소 30~45%와 미량의 황화수소, 할로겐, 실록산, 그리고 수증기로 구성되며, 주로 열원, 내연기관의 연료 그리고 합성가스 생산을 위해 다양한 개질 방법으로 활용되고 있다[1]. 주 성분인 메탄과 이산화탄소는 대표적인 온실가스이므로, 대기 증으로 방출할 경우 지구온난화를 가중시킬 수 있다[2].

하지만 바이오가스는 낮은 발열량에 의해 연소장치에 직접 이용 시 운전의 안정성에 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서, 바이오가스 성분인 이산화탄소의 의한 개질과정을 통해 수소 및 합성가스로 이용하게 되면, 수소의 빠른 화염속도와 넓은 가연범위가로 인해 열설비의 운전 안정성 향상과 NOx 배출량을 저감시킬 수 있어, 바이오가스 활용면에서 유용하다고 볼 수 있다[3]. 바이오가스의 개질에 의한 수소 생산 방법으로 수증기 개질법(steam reforming)[4], CO_2

†Corresponding author : ynchun@chosun.ac.kr
[접수일 : 2014.11.18 수정일 : 2014.12.23 게재확정일 : 2014.12.31]
Copyright ⓒ 2014 KHNES

개질법(CO_2 reforming)[5], 부분산화 개질법(partial oxidation reforming)[6], 그리고 플라즈마 개질법(plasma reforming)[7,8] 등이 적용되고 있다.

개질 방법 중에서 종래의 수증기-촉매 개질 방법은 고온과 촉매의 주기적인 교체를 요구하는 단점이 있다. 대안으로 알려진 비열 플라즈마 개질 방법은 촉매 없이 낮은 온도에 높은 바이오가스를 전환시키며, 매우 높은 전자 온도와 상대적은 낮은 가스 온도를 특징으로 하지만, 강한 흡열 건식 반응으로 에너지 비용이 요구된다. 상기 문제를 해결하기 위해, 부분 산화반응과 바이오가스의 CO_2혼합 개질은 효과적인 접근법으로 인식된다. 메탄 부분 산화 반응을 통해 직접적으로 합성가스(H_2+CO)를 전환시키며, 부분산화 반응의 발열 반응으로 에너지 비용 부분을 감소시킬 수 있다[9].

대안으로 제시된 플라즈마와 부분산화 반응을 적용하여 높은 분해율과 경제성 그리고 처리 용량을 증가시키기 위해 플라즈마-덤프 개질기를 제안하였다. 특히, 덤프 연소기는 고온에서의 체류시간이 충분하고 연소기 자체 연소 유지를 위한 열보유 능력이 우수한 특성을 가지고 있다. 플라즈마-덤프 개질기에서 플라즈마는 연소기 점화기(ignitor)와 화염 홀더(flame hloder)의 기능으로, 대유량의 공급가스에서도 안정적인 화염 유지할 수 있으며, 1차적인 개질 반응으로 합성가스를 생성한다. 덤프 연소기에서는 다공성 매질인 세라믹 3D 매트릭스(ceramic 3D matrix)에 의한 축열 기능과 덤프 내부의 연소공동에 의한 화염 재순환에 의해 덤프 개질기의 고온 유지가 가능하여 저 발열량의 이산화탄소를 포함한 바이오가스를 개질하는데 유용하다. 그리고 세라믹은 고온에서 열에너지를 복사에너지로 방사하기 때문에 배출가스 중 유해성분을 저감 시킬 수 도 있다.

새롭게 제안한 플라즈마 덤프 개질기를 이용하여 바이오가스 개질 특성을 파악하기 위하여, 덤프인젝터 가스 공급량, 물 공급 유량, 공기비, 바이오가스 성분비, 공급 전력량에 대한 변수별 연구를 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

바이오가스 개질을 위한 플라즈마 덤프 개질기 실험 장치 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 플라즈마 덤프 개질기, 가스공급 라인, 전원공급장치, 측정 및 분석 라인으로 구성되어 있다. 플라즈마 덤프 개질기는 3상 글라이딩 아크 플라즈마와 덤프 반응기로 구성된다. 3상 글라이딩 아크 플라즈마는 칼날형태(밑면 폭 12.6mm, 높이 120mm, 두께 2mm)로 된 3개 전극을 120°, 방전사이 간격을 3mm로 유지시켜, 세라믹(Al_2O_3, wt 96%)지지체에 고정하였다[10]. 보조연료(CNG, Compress Natural Gas) 분사를 위한 노즐(내경 1.6mm)은 전극 사이 중심에 위치되도록 플랜지형 지지체를 고안하여 플라즈마에 고정하였다. 플라즈마 하단으로 공급되는 바이오가스를 플라즈마 방전영역으로 집중시키기 위해 빗면 각도 45°로 된 내통을 설치하였다. 덤프 반응기는 좌우의 화염 순환을 위해 직육면체 형태(400×70×220mm^3)로 제작하였다. 하부는 플라즈마와 연결되어 일체형으로 구성되며, 상부에는 바이오가스 주입구가 설치되어, 덤프 반응기로 공급한다. 내부에는 축열을 위해 다공성 매질인 세라믹으로 3D 매트릭스("ㄷ" 형태)를 설치하여, 연소가스가 매트릭스를 통과 후 최종 배출되도록 하였다. 덤프 연소기 전면부는 내부 관찰을 위해 석영 재질로 제작하였으며, 내부의 온도 측정을 위해

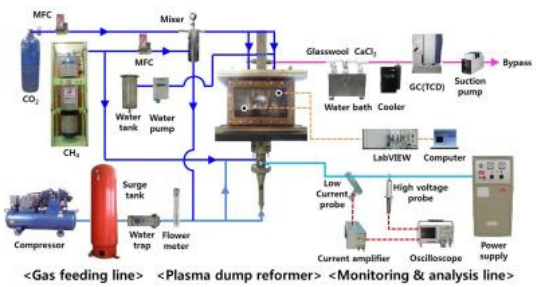

Fig. 1 Diagram of the plasma-dump reformer

열전대(K-type)를 설치하였다.

가스공급 라인은 바이오가스 제조를 위한 CNG, 이산화탄소와 공기 그리고 물공급 라인으로 구성된다. 각 가스의 유량을 조절하기 위하여 MFC와 유량계를 설치하였으며, 혼합을 위해 믹서기를 설치하였다. 소량의 물을 안정적으로 공급하기 위하여 소형 물펌프(Model STEPDOS03; KNF, Switzerland)와 물탱크를 설치하였다.

전원공급장치는 3상 교류전원을 공급하는 공급기(Model UAP-15K1A, Unicon tech., Korea)로 최대 15kW 전압: 15kV, 교류전류: 1A)까지 3상 글라이딩 아크 플라즈마로 공급할 수 있다.

측정 및 분석라인은 온도 측정, 전류/전압 측정, 가스분석으로 구성된다. 장치 제어 및 온도 측정을 위해 LabVIEW(Model LabVIEW 8.6, National Instrument, USA)와 열전대를 연결하여 제어 및 모니터링 하였다. 전류/전압 측정은 전기적 특성을 측정할 수 있는 고전압 프루브(probe) Model P6015, Tektronix, USA), 전류 프루브(Model A6303, Tektronix, USA), 전류 증폭기(amplifier) (Model TM502A, Tektronix, USA) 그리고 오실로스코프(Model TDS-3052, Tektronix, USA)로 구성되어 있다. 분석라인은 개질가스의 입자상 물질과 수분을 제거하기 위해 Water bath와 쿨러를 설치하였고, 가스크로마토 그래프(CP-4900, Varian, Netherland)를 이용하여 가스를 분석하였다.

2.2 실험 및 분석 방법

실험을 통해 플라즈마 덤프 개질기에서 안정적으로 방전이 형성되는 조건을 설정하여, 반응기 내부의 온도 안정화시킨 후 진행하였다. 실험은 공기와 함께 노즐로 주입되는 연료에 의해 플라즈마 버너가 운전되고, 덤프 내부에 설치된 세라믹 매트릭스가 축열되어, 온도가 안정화 된 후, 플라즈마 하단과 덤프 상단의 주입구로 바이오가스가 주입된다. 개질가스의 분석은 입자상 물질과 수분을 제거한 후 건조가스 상태로 분석하였으며, GC-TCD(CP-4900, Varian, Netherland)를 사용하였다. 컬럼은 MolSieve 5A PLOT으로 H_2, CO, O_2, N_2, CH_4을 분석하였고, PoraPLOT Q로 CO_2와 탄화수소류인 C_2H_2, C_2H_4, C_3H_8을 동시에 분석하였다.

Table 1 Test range condition by parameter

Description	Range
Dump injector flow rate [L/min]	3~20
Water flow rate [mL/min]	0~24
Air ratio	0.39~0.66
Biogas component ratio [CH_4:CO_2]	1:0~0.5:0.5
Plasma input power [kW]	0.78~1.19

플라즈마 덤프 개질기를 이용한 바이오가스 개질 특성을 파악하기 위하여, 변수별 실험을 진행하였으며, 각 변수별 실험 범위를 Table 1에 나타내었다.

2.3 실험 데이터 분석

실험 결과에 나타낸 메탄 및 이산화탄소 전환율[1], 수소 선택도[11], 일산화탄소 수율[1], 에너지 효율[12] 그리고 메탄 및 이산화탄소 전력효율[13]은 식 (1)~(7)에 의해 구해진다.

- 전환율(Conversion rate)

$$X_{CH_4}[\%] = \frac{[CH_4]_{inlet} - [CH_4]_{outlet}}{[CH_4]_{inlet}} \times 100 \quad (1)$$

$$X_{CO_2}[\%] = \frac{[CO_2]_{inlet} - [CO_2]_{outlet}}{[CO_2]_{inlet}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, $[CH_4]_{inlet}$은 공급된 메탄 유량(L/min), $[CH_4]_{outlet}$은 개질 후 배출된 메탄유량(L/min)이다.

- 수소 선택도(H_2 selectivity)

$$S_{H_2}[\%] = \frac{[H_2]_{producted}}{2([CH_4]_{inlet} - [CH_4]_{outlet})} \times 100 \quad (3)$$

여기서, $[CH_4]_{inlet}$은 공급된 메탄 유량(L/min), $[CH_4]_{outlet}$은 개질 후 배출된 메탄 유량(L/min), $[H_2]_{producted}$은 생성된 수소 유량(L/min)이다.

- 일산화탄소 수율(CO yield)

$$Y_{CO}[\%] = \frac{[CO]_{producted}}{[CH_4]_{inlet} + [CO_2]_{inlet}} \times 100 \quad (4)$$

여기서, $[CH_4]_{inlet}$은 공급된 메탄 유량(L/min), $[CO_2]_{inlet}$은 공급된 이산화탄소 유량(L/min), $[CO]_{producted}$은 생성된 일산화탄소 유량(L/min)이다.

- 에너지 효율(Energy efficiency)

$$EE[\%] = \frac{[H_2]_{producted} \times LHV_{H_2} + [CO]_{producted} \times LHV_{CO}}{power\,input + [CH_4]_{input} \times LHV_{CH_4}} \quad (5)$$

여기서, $power\,input$은 플라즈마에 공급된 전력[W], $[CH_4]_{inlet}$은 공급된 메탄 유량(L/min), $[H_2]_{producted}$은 생성된 수소유량(L/min), $[CO]_{producted}$은 생성된 일산화탄소 유량(L/min), LHV는 각 성분의 저위발열량(kJ/Nm^3)이다.

- 전력 효율(Conversion efficiency)

$$X_{CH_4}[\%/W] = \frac{[CH_4]_{conversion}}{power\,input} \times 100 \quad (6)$$

$$X_{CO_2}[\%/W] = \frac{[CO_2]_{conversion}}{power\,input} \times 100 \quad (7)$$

여기서, $power\,input$은 플라즈마에 공급된 전력(W), $[CH_4]_{conversion}$과 $[CO_2]_{conversion}$은 전환된 메탄과 이산화탄소 유량(L/min)이다.

3. 결과 및 토의

3.1 덤프 공급가스 유량 영향

플라즈마 덤프 개질기의 처리용량을 파악하기 위하여, 덤프 주입구의 바이오가스 유량 변화 실험을 진행하였다. 플라즈마 버너를 안정적으로 유지하기 위해 노즐로 보조연료와 공기를 12L/min 공급하고, 0.94kW 전력을 공급하였다. 공급된 바이오가스는 메탄과 이산화탄소의 비를 60% : 40%로 하여 3~20L/min를 공급하였다. 가스 유량 변화에 따른 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

가스 주입량이 증가할수록 체류시간이 짧아지고,

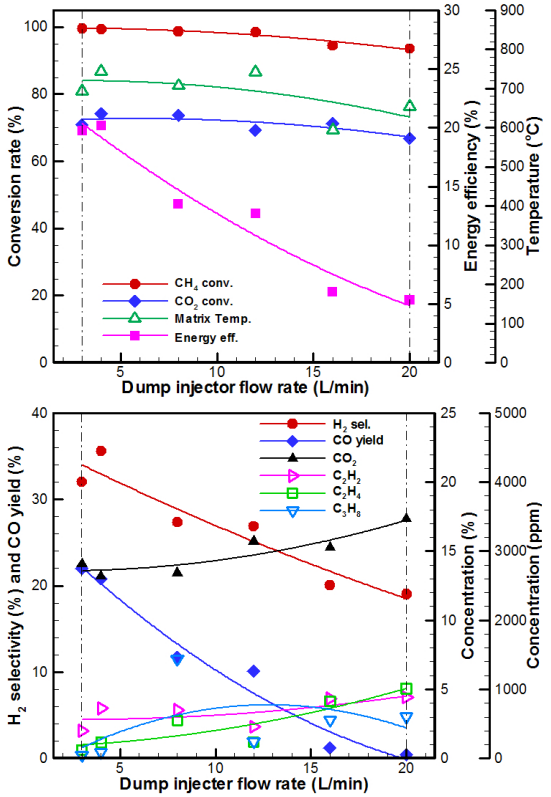

Fig. 2 Thfe effect of the various dump injector flow rate

냉각현상으로 미반응된 바이오가스가 많아지므로, 에너지 효율의 경우, 개질 반응기의 온도가 697°C에서 20%로 가장 높게 나타났으며, 개질기에 공급되는 메탄 주입량이 증가하여 에너지 효율이 감소되는 경향을 나타내었다. 바이오가스 연소에 의해 발생되는 이산화탄소에 의해 14%에서 17.3%로 증가하였으며, 유량이 증가할수록 중간 생성물인 아세틸렌과 에틸렌은 증가함을 나타내었다.

3.2 물 공급 유량 영향

플라즈마 덤프 개질시 물 공급 유량에 따른 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. 수증기 발생장치를 별도로 설치하지 않고, 플라즈마 덤프 개질기에서 생성된 열원을 이용하기 위하여 개질기 내부로 0~24mL/min의 물을 주입하였다. 플라즈마 전력은 0.94kW를 공급하였으며, 바이오가스는 메탄과 이산화탄소의 비를 60 % : 40%로 공급하였다.

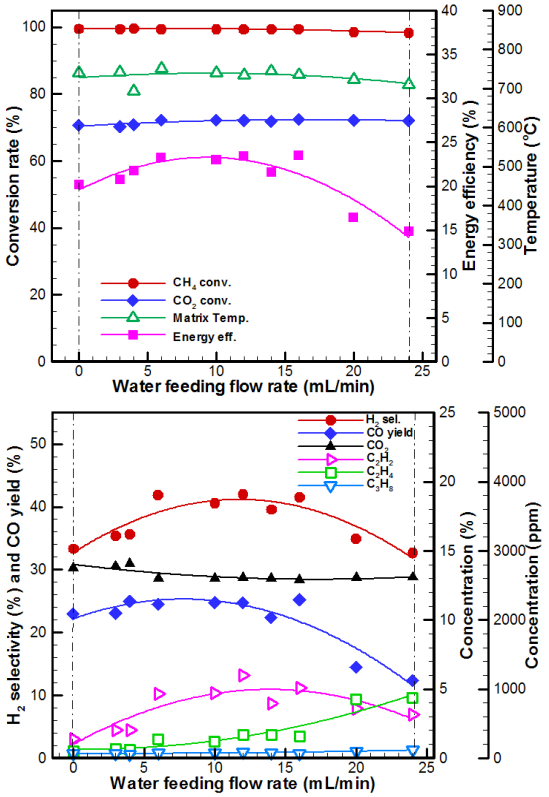

Fig. 3 The effect of the various water feeding flow rate

바이오가스 중 메탄과 이산화탄소는 물 공급 유량이 증가하더라도, 메탄 전환율 98% 이상, 이산화탄소 전환율 70%를 유지하였으며, 플라즈마 덤프 개질기 내부 온도는 740°C에서 700°C로 조금 낮아졌으나, 매트릭스 축열기에 의해 온도에 큰 변화를 보이지 않았다. 수소 선택도와 일산화탄소 수율은 물 공급 유량이 증가할수록 증가하다가 12mL/min의 물이 주입되었을 때, 각각 42%, 24.7% 최대값을 나타내었으며, 12mL/min 이상의 물이 주입되었을 때, 감소하는 경향을 보였으며, 반응식 (8)에 의한 결과이다.

$$CH_4+H_2O \leftrightarrow CO+3H_2,\ \triangle H^o_{298K}=+206(kJ/mol) \quad (8)$$

에너지 효율은 역시 물 유량 12mL/min에서 23.3%의 최대값을 보이고, 그 이후에서는 합성가스 생성율이 감소함으로써, 에너지 효율도 감소하였다. 이산화탄소는 13%에서 변화 없이 유지되어, 증가된 물에 의한 플라즈마 덤프 연소에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

3.3 공기비 영향

공기비는 부분산화 개질시 가장 중요한 영향 인자로서, 메탄의 완전 산화와 부분 산화 반응식은 반응식 (9), (10)과 같다.

$$CH_4+2O_2 \leftrightarrow CO_2+2H_2O,\ \triangle H^o_{298K}=-802.6(kJ/mol) \quad (9)$$

$$CH_4+0.5O_2 \leftrightarrow CO+2H_2,\ \triangle H^o_{298K}=-35(kJ/mol) \quad (10)$$

공기비 1인 경우 완전 연소에 의해 H_2, CO의 생성은 없고 최종 생산물로 단지 H_2O와 CO_2만 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 부분산화를 위해 공기량

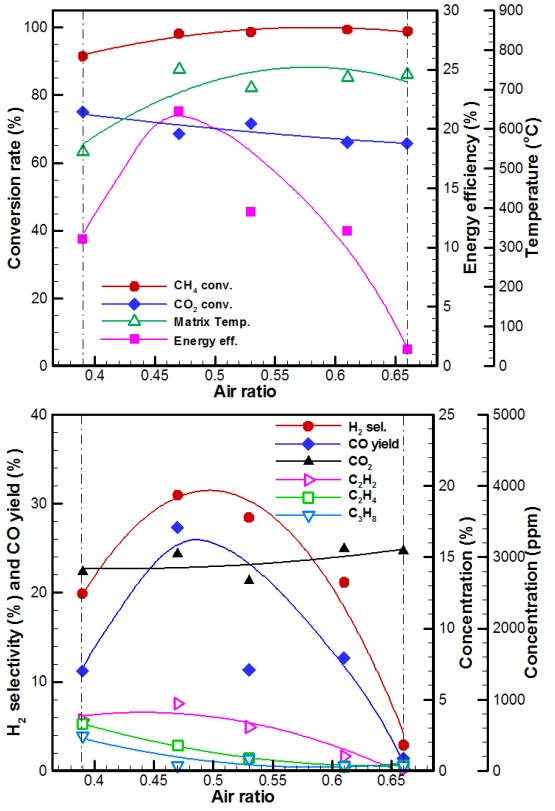

Fig. 4 The effect of the various air ratio

을 조절하여, 공기비 0.39~0.66 범위 안에서 실험을 진행하였다. 플라즈마 전력은 0.94kW를 공급하였으며, 바이오가스는 메탄과 이산화탄소의 비를 60% : 40%로 공급하였다. 공기비에 변화에 따른 개질 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 공기비가 증가할수록 메탄 전환율은 91%에서 99%로 증가하였으며, 이산화탄소 전환율은 75%에서 65%로 감소함을 보였다.

공기비가 증가할수록 플라즈마 덤프 개질기 내부 온도는 증가하고 있지만, 수소 선택도와 일산화탄소 수율은 공기비 0.47에서 31%와 27%로 최대를 보이다가 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 연료로 주입된 바이오가스 중 메탄은 개질반응 보다 연소반응에 우선 지배를 받아 산화현상이 나타나기 때문이다. 이산화탄소 전환율 감소도 연소현상에 의해 생성된 이산화탄소로 감소하게 된다.

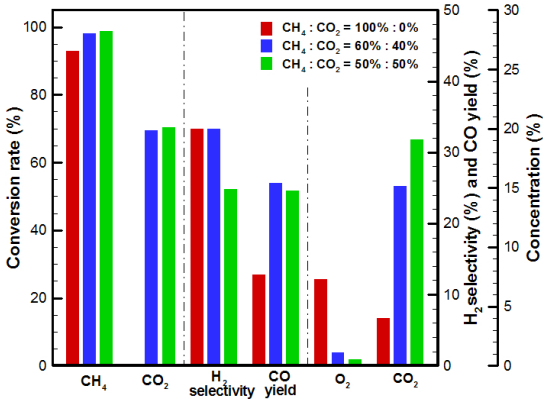

Fig. 5 The effect of the various biogas component ratio

3.4 바이오가스 성분비 영향

바이오가스의 메탄과 이산화탄소의 성분비에 따른 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 바이오가스 공급 유량을 유지하고, 메탄 성분을 50~100% 로 증가시켜, 메탄과 이산화탄소의 다른 비율의 가스를 공급하여 진행하였다. 플라즈마 전력은 0.94kW를 공급하였다. 바이오가스 내 감소되는 이산화탄소의 영향으로, 메탄 개질 반응식(Eq. (10))의 반응이 우세해지기 때문이다. 바이오가스 중 이산화탄소 비율이 0%에서 50%로 증가할수록, 이산화탄소 개질 반응식(Eq. (11))에 의해서 일산화탄소 발생량이 증가되므로, 일산화탄소 수율이 증가하게 된다.

$$CH_4+CO_2 \leftrightarrow 2CO+2H_2,\ \triangle H^{o}_{298K}=+247(kJ/mol) \quad (11)$$

3.5 공급 전력 영향

플라즈마 덤프 개질기의 공급 전력에 따른 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 바이오가스는 메탄과 이산화탄소의 비를 60% : 40%로 공급하고, 공기비는 0.47로 고정하였다. 공급 전력은 0.78~1.19kW로 실험을 진행하였다.

플라즈마 공급 전력이 증가하더라도 메탄 전환율

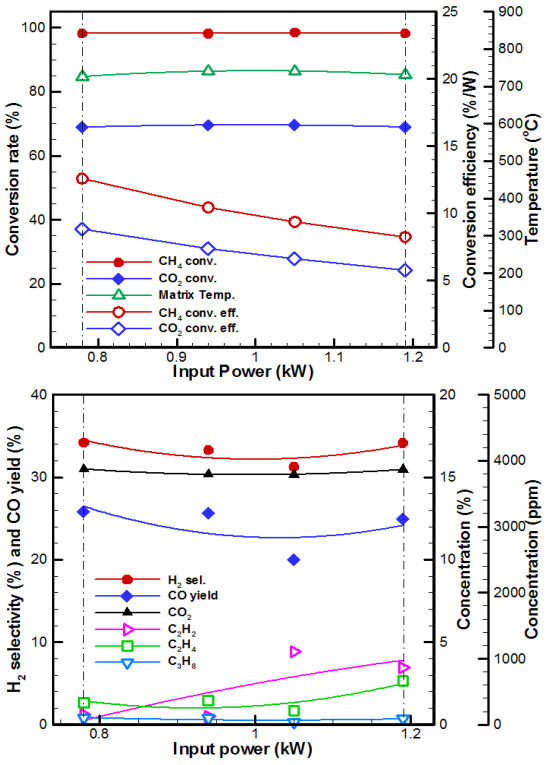

Fig. 6 The effect of the various input power

98%와 이산화탄소 전환율 69%를 유지하고 있으나, 공급 전력에 따른 가스 전환 효율을 보면 메탄 전환 효율은 14.6%에서 8.2%로 감소하고 있으며, 이산화탄소 전환 효율 역시 10.2% 5.7%로 감소하고 있다.

전력 효율면에서 보면 최적은 공급 전력은 0.78kW로 나타나고 있다. 메탄 전력 효율이 이산화탄소 전력 효율보다 높게 형성되는 것은 메탄의 해리 에너지는 4.5eV이고, 이산화탄소의 해리 에너지는 5.5eV로 메탄이 이산화탄소보다 해리 에너지가 작기 때문에 좀 더 쉽게 분해됨을 알 수 있다[13]. 수소 선택도는 33~35%, 일산화탄소 수율은 20~25%로 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서 제안된 플라즈마 덤프 개질기를 이용하여 바이오가스 개질을 통해 합성가스를 생산이 목적으로, 덤프 인젝터 가스 공급량, 물 공급 유량, 공기비, 바이오가스 성분비, 공급 전력량을 변수별 실험을 통해 개질 특성을 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

인젝터 가스 공급량에 따라 메탄 전환율은 93% 이상, 이산화탄소 전환율은 70%를 유지하였으며, 수소 선택도와 일산화탄소 수율은 감소하였다.

물 공급량이 증가할수록 수소 선택도와 일산화탄소 수율은 증가하다가, 12mL/min에서 수소 선택도 42%, 일산화탄소 수율 24.7%로 최대값을 나타내었다.

공기비 0.47에서 수소 선택도와 일산화탄소 수율은 각각 31%와 27%로 최대를 보였으며, 공기비가 증가할수록 연소반응에 의해 플라즈마-덤프 개질기 내부 온도는 증가하였다.

바이오가스 성분비에서는 메탄 구성비가 50%에서 100%로 증가할수록, 메탄 전환율은 98%에서 93%로 낮아졌지만, 수소 선택도는 24%에서 33%로 증가하였다.

플라즈마 공급 전력이 증가하더라도 메탄 전환율과 이산화탄소 전환율은 일정하게 유지되었으나, 메탄과 이산화탄소 전력 효율을 비교 하였을 때, 최적 공급 전력은 0.78kW이다.

후 기

이 논문은 2014학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

1. M. H. Rafiq, and J. E. Hustad, “Experimental and thermodynamic studies of the catalytic partial oxidation of model biogas using a plasma-assisted gliding arc reactor”, Renewable Energy, Vol. 36, pp. 2878-2887, 2011.
2. A. Effendi, Z.-G. Zhang, K. Hellgardt, K. Honda,

and T. Yoshida, “Steam reforming of a clean model biogas over Ni/Al_2O_3 influidized-andfixed-bedreactors,” Catalysis. Today, Vol. 77, 2002, pp. 181-189.

3. M. Ashrafi, T. Pröll, C. Pfeifer, and H. Hofbauer, “Experimental study of model biogas catalytic steam reforming: 1. Thermodynamic optimization,” Energy & Fuels, Vol. 22, No. 6, 2008, pp. 4182-4189.
4. S. Appari, V. M. Janardhanan, R. Bauri, and S. Jayanti, “Deactivation and regeneration of Ni catalyst during steam reforming of model biogas: An experimental investigation”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, 2014, pp. 297-304.
5. W. Nimwattanakul, A. Luengnaruemitchai, and S. Jitkarnka, “Potential of Ni supported on clinoptilolite catalysts for carbon dioxide reforming of methane,” International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 31, No. 1, 2006, pp. 93-100.
6. J. Zhua, D. Zhang, K. and D. King, “Reforming of CH4by partial oxidation : thermodynamic and kinetic analyses,” Fuel, Vol. 80, 2001, pp. 899-905.
7. X. Tu, and J. C. Whitehead, “Plasma dry reforming of methane in an atmospheric pressure AC gliding arc discharge: Cogeneration of syngas and carbon nanomaterials”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, 2014, pp. 9658-9969.
8. Y. N. Chun, Y. C. Yang, and K. Yoshikawa, “Hydrogen generation from biogas reforming using a gliding arc plasma-catalyst reformer”, Catalysis Today, Vol. 148, 2009, pp. 283-289.
9. B. Zhu, X.-S. Li, J.-L. Liu, and A.-M. Zhu, “Optimized mixed reforming of biogas with O2 addition in spark-discharge plasma”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, 2012, pp. 16916-16924.
10. Y. N. Chun, S. C. Kim, and K. Yoshikawa, “Decomposition of Benzene as a Surrogate Tar in a Gliding Arc Plasma”, Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 32, No. 3, 2013, pp. 837-845.
11. O. A. Bereketidou, and M. A. Goula, “Biogas reforming for syngas production over nickel supported on ceria-alumina catalysts”, Catalysis Today, Vol. 195, 2012, pp. 93-100.
12. Y. Xu, Q. Wei, H. Long, X. Zhang, S. Shang, X. Dai, and Y. Yin, “CO reforming of CH_4 by synergies of binode thermal plasma and catalysts”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 1384-1390.
13. V. Goujard, J.-M. Tatibouët, and C. Batiot-Dupeyrat, “Use of a non-thermal plasma for the production of synthesis gas from biogas”, Applied Catalysis A: General, Vol. 253, 2009, pp. 228-235.