

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.11.869

합성가스 생성을 위한 글라이딩 아크 플라즈마 개질기에서 프로판 개질

양 윤 철* · 전 영 남†

(2009년 4월 28일 접수, 2009년 10월 5일 수정, 2009년 10월 6일 심사완료)

Propane Reforming in Gliding Arc Plasma Reformer for SynGas Generation

Yoon Cheol Yang and Young Nam Chun

Key Words : Gliding Arc Plasma Reformer(글라이딩 아크 플라즈마 개질기), Hydrogen(수소), Propane(프로판), Reforming(개질), Synthesis Gas(합성가스)

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the optimal condition of the syngas production by reforming of propane using Gliding arc plasma reformer. The gliding arc plasma reformer in 3 phases has been newly designed and developed with a quick starting and fast response time. It can be applicable to the various types of fuels (Hydrocarbons C_xH_y), and it has a high conversion rate of fuels and high production of hydrogen. The parametric screening studies were carried out according to the changes of a steam feed amount i.e., steam/carbon ratio, total gas flow rate and input electric power. The optimum operating conditions were S/C ratio 2.8, total gas flow rate of 14 L/min and input electric power of 2.4 kW. The result of optimum operating conditions showed the 55 % H_2 , 14 % CO , 15 % CO_2 , 10 % C_3H_8 and 4 % CH_4 . Also, C_3H_8 conversion, H_2 yield and H_2 selectivity were 90 %, 42 %, 15 %, respectively. The energy efficiency and specific energy requirements were 37 % and 334 kJ/mol respectively.

1. 서 론

화석연료의 무분별한 사용으로 인한 에너지 고갈 문제 및 지구온난화 등의 환경오염이 발생되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 청정에너지 개발이 더욱 필요한 시점이다. 그 중 수소 에너지를 이용한 연료전지는 환경친화적이며, 청정에너지로 사용되며, 미래 에너지 대안으로 인식되고 있다. 그러나 자연 상태에서 수소는 존재하지 않으며, 대부분 물이나, 탄화수소 또는 다른 수소를 포함하는 물질 안에 들어있다.^(1,2)

탄화수소 계열 중 프로판은 많은 양의 수소를 포함하며, 쉽게 저장이 가능한 장점이 있어, 미래의

수소 생산에 높은 잠재성을 가지고 있다. 이러한 프로판 연료 개질 방법으로는 대표적으로 수증기 개질, 부분 산화 개질, 자열 개질 등이 있다.^(3,4) 이들 방법은 현재까지 많이 사용되어 왔으나 수증기 개질 경우 외부 열원이 필요하며, 초기시동 시간이 길고 장치가 큰 문제점이 있으며, 부분 산화 개질의 경우 수소 농도가 낮으며, 자열 개질의 경우, 조건이 한정되어 있어 운전이 어려운 단점이 있다. 이들 모두 촉매를 사용하기 때문에 촉매 가격 등에 대한 경제적 요인과 더불어 상업적 제한을 가지고 있다. 이러한 문제점을 개선할 새로운 대안인 플라즈마 개질은 각각의 제한을 극복할 수 있는 장점을 가지고 있다.

가스상 플라즈마는 고온에서 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리된 기체 상태에서 전자분리도가 상당히 높으면서도 전체적으로는 음과 양의 전하수가 같아서 중성을 띠는 기체들을 나타낸다. 일반적으로 플라즈마는 고압, 평형 플라즈마로 불리는 고온 플라즈마(thermal plasma)와

† 책임저자, 회원, 조선대학교 환경공학과 / BK21 바이오 가스 기반 수소생산 사업팀
E-mail : ynchun@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7156 FAX : (062)230-7872

저압, 비평형(non-equilibrium) 플라즈마로 불리는 저온 플라즈마(non-thermal plasma)의 두가지 형태로 분류된다.⁽¹⁾

고온 플라즈마(5,000-10,000 K)의 경우 개질 효율이 좋은 반면 에너지 소모가 큰 단점이 있어 실제 비용에 비하여 에너지 효율이 적은 특징이 있다. 저온 플라즈마(5,000 K 이하)의 경우 넓고 다양하게 적용되고 있으며, Glow 방전, 코로나 방전, DBD (dielectric barrier discharge), 마이크로 웨이브 방전은 특성상 유량이 소량이므로 학술적으로 연구로는 적당하나 상업화 가능성이 낮으며, 개질 반응에서 생성되는 생성물의 선택도를 조절하는 것이 어렵다.^(5,6) 반면 글라이딩 아크 방전(gliding arc discharge)은 반응 조절이 용이하고 전환율이 높으면서 에너지 효율도 높은 장점을 가지고 있어, 에너지 및 환경 친화적인 새로운 대안으로 발전하고 있다.⁽⁷⁾

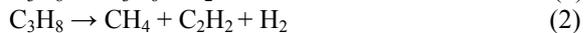
본 연구에서는 높은 전환율을 나타내며, 장치가 컴팩트하고, 수초의 빠른 시동특성 및 응답시간을 가지며, 고분자 탄화수소를 포함한 다양한 연료에 적용이 가능한 글라이딩 아크 플라즈마 개질기를 설계 및 제작하였다.

변수별 연구로는 프로판을 개질하여 최대 수소 생산을 위한 영향인자로 수증기 주입량 변화, 전체 가스량 변화, 입력전력 변화에 대하여 실험을 진행하였다.

2. 개질 반응 및 실험결과 데이터 처리

2.1 개질반응

① 플라즈마 개질 반응(Cracking)⁽¹⁾



② 수증기 전이 반응⁽¹⁾



2.2 실험결과 데이터 처리

① 프로판 전환율(C_3H_8 conversion rate)⁽⁸⁾

주입된 가스 중의 프로판이 전환되는 전환율은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{C}_3\text{H}_8 \text{ conversion rate (\%)} \\ = \frac{[\text{Input C}_3\text{H}_8] - [\text{Output C}_3\text{H}_8]}{[\text{Input C}_3\text{H}_8]} \times 100 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $[\text{Input C}_3\text{H}_8]$ 는 프로판의 유입량(L/min),

$[\text{Output C}_3\text{H}_8]$ 는 프로판의 유출량(L/min)이다.

② 수소 수율⁽⁹⁾ 과 선택도⁽¹⁰⁾

수소 수율(H_2 yield)과 수소 선택도(H_2 selectivity)는 각각 식 (9)과 식 (10)에 의해 계산한다.

$$\text{H}_2 \text{ yield (\%)} = \frac{[\text{H}_2]_{\text{syngas}}}{[\text{H}_2]_{\text{reaction gas}}} \times 100 \quad (9)$$

여기서, $[\text{H}_2]_{\text{syngas}}$ 는 합성가스 내의 수소량 (L/min), $[\text{H}_2]_{\text{reaction gas}}$ 는 반응가스 내의 수소량 (L/min)이다.

$$\text{H}_2 \text{ selectivity (\%)} = 0.25 \times \frac{[\text{H}_2]_{\text{syngas}}}{[\text{C}_3\text{H}_8]_{\text{conversion}}} \times 100 \quad (10)$$

여기서, $[\text{H}_2]_{\text{syngas}}$ 는 합성가스 내의 수소량 (mole), $[\text{C}_3\text{H}_8]_{\text{conversion}}$ 는 C_3H_8 전환율(mole)이다. 0.25는 C_3H_8 으로부터 생성될 수 있는 H_2 의 mole 수가 4 이므로 0.25 를 곱한다.

③ 에너지 효율(Energy efficiency)⁽¹¹⁾과 에너지 요구량(Specific energy requirement)⁽¹¹⁾

에너지 효율은 식 (11)에 의해 계산된다.

$$\eta (\%) = \frac{[\text{H}_2 + \text{CO}]_{\text{produced}} \times \text{LHV}(\text{H}_2)}{\text{Input plasma energy} + \text{Fuel injected} \times \text{LHV}(\text{C}_3\text{H}_8)} \quad (11)$$

여기서, $[\text{H}_2 + \text{CO}]_{\text{produced}}$ 는 합성가스의 생성량 (L/min), $\text{LHV}(\text{H}_2)$ 는 수소의 저위 발열량(kJ/Nm^3), $\text{Input plasma power}$ 는 플라즈마 입력 전력(W), Fuel injected 는 C_3H_8 유입량(L/min), $\text{LHV}(\text{C}_3\text{H}_8)$ 는 C_3H_8 의 저위 발열량(kJ/Nm^3)이다.

에너지요구량은 식(12)에 의해 계산된다.

$$v (\text{kJ/mol}) = \frac{\text{Input plasma power}}{[\text{H}_2 + \text{CO}]_{\text{produced}}} \quad (12)$$

여기서, $\text{Input plasma power}$ 는 플라즈마 입력전력 (W), $[\text{H}_2 + \text{CO}]_{\text{produced}}$ 는 합성가스 생성량(L/min)이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 1 은 실험에 사용한 글라이딩 아크 플라즈마 개질장치를 나타낸 것이다. 장치는 글라이딩 아크 플라즈마 개질기, 전원공급 장치, 가스/수증기 공급라인, 측정/분석 라인, 제어 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다.

글라이딩 아크 플라즈마 개질기는 3 개의 부채꼴 형태의 전극이 반응기 내부에 120 도 간격으로 위치되어 있으며, 세라믹(Al_2O_3 wt 96%)을 이용하여

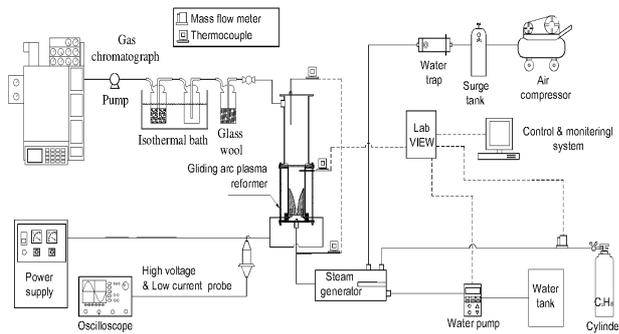


Fig.1 Experimental setup of gliding-arc plasma-reformer

반응기 절연 및 전극을 고정하였다. 이때의 전극 간격은 4 mm 이며, 노즐 직경은 3 mm 이다. 반응기 외벽은 절연 및 내부를 관찰할 수 있도록 석영관을 사용하였다.

전원공급 장치는 반응기 내부에 안정적인 플라즈마를 유지하기 위한 장치로 최대용량이 15 kW(교류전압 : 15 kV, 교류전류 : 1 A)인 Power supply(유니콘 테크, UAP-15K1A, Korea)를 사용하였다.

가스/수증기 공급 라인에 프로판은 MFC (BRONKHST, F201AC-FAC-22-V, Netherlands) 를 이용하여 가스 유량을 정밀하게 주입하였으며, 수증기는 물탱크 에서 공급된 물을 정량펌프(KNF, STEPDOS®03, Switzerland)를 사용하여 수증기 발생장치로 공급하였다.

측정장비으로는 플라즈마 방전을 고전압 probe (Tektronix, P6015, USA)와 전류 probe(Tektronix, A6303, USA)를 이용하여 오실로스코프(Tektronix, TDS 3052, USA)로 측정하였다. 온도측정은 K-type 열전대를 이용하였으며, LabVIEW(National Instrument, LabVIEW 8.6, USA)를 이용하여 실시간으로 측정하였다.

분석장비로는 샘플링 라인에서 가스 크로마토그래프 (SHIMADZU, GC-14B, Japan)와 마이크로 가스 로마토그래프 (VARIAN, CP-4900, Netherlands)를 이용하여 H₂, CO 및 C_nH_m 계열을 동시에 분석하였다.

제어 및 모니터링 시스템으로는 전체적인 제어는 LabVIEW 를 통하여 MFC 및 물펌프 제어를 하였으며, 온도의 변화 및 제어시 조건 변화를 연속적으로 모니터링을 실시하였다.

3.2 실험방법

글라이딩 아크 플라즈마 개질기 주입 전 기화 장치의 온도가 250 ± 5°C로 안정한 상태에서 프로판과 수증기를 주입하여 실험을 수행하였다.

프로판 MFC 에 의해서 유량이 정밀 조절되어 주입되고, 수증기는 수증기 공급량으로 환산된 물의 양을 미세조절이 가능한 펌프에 의해 조절된 후 기화기에서 연료와 함께 혼합 유입되어 완전 기화된 혼합기체 상태로 개질 반응기 내부로 주입된다.

개질 가스의 채취는 반응기 출구에 설치된 샘플링 포트에서 이루어지며, 채취된 시료는 냉각장치를 통과하여 수분을 응축시켜 건조가스의 상태로 각각 GC 및 Micro GC 의 샘플링 루프를 통하여 연속적으로 유입되어 분석되었다. 검출기는 TCD 를 이용하였고, 분석 컬럼으로 H₂ 는 Molecular Sieve 5A(SHIMAZU), CO, CH₄ 는 Molecular Sieve 5A(VARIAN), C₂H₄, C₂H₆, CO₂ 는 Porapak Q(VARIAN)를 사용하였다.

실험은 다른 반복실험을 통해 수소의 농도가 최대인 조건을 기준조건으로 분석하였다. 변수별 연구로는 수증기량을 변화하여 steam/carbon 비 변화, 전체 가스량 변화, 입력전력 변화를 각각 실험을 진행 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 기준조건 결과

기준조건에 대한 실험결과는 Table 1 와 같다. 기준조건은 프로판 주입량이 1.5 L/min 일 때, H₂ 농도가 최대값을 나타내는 조건으로 steam/carbon 비 2.8, 전체 가스량은 14 L/min 로 정하였으며, 입력전력은 2.4 kW 를 기준조건으로 정하였다. 이때의 농도는 H₂ 55 %, CO 14 %, CO₂ 15 %, C₃H₈ 10 %, CH₄ 4 %를 나타내었다. C₃H₈ 전환율은 90 %로 높은 전환율을 나타냈으며, H₂ 수율 42 %, H₂ 선택도 15%, 에너지 효율은 37 %, 에너지 요구량은 334 kJ/mol 을 나타냈다.

기존 연구 결과로서 단상 글라이딩 아크 플라즈마를 이용하여 프로판 개질시 전환율이 60~70%를 나타내었다. 하지만 이번 실험에서 개발된 글라이딩 아크 플라즈마 개질기는 약 90%를 나타내었다. 또한 합성가스 생성 및 전체 처리 가스량 및 운전조건 등에서 많은 부분 향상됨을 알 수 있었다.⁽¹⁾

4.2 변수별 연구

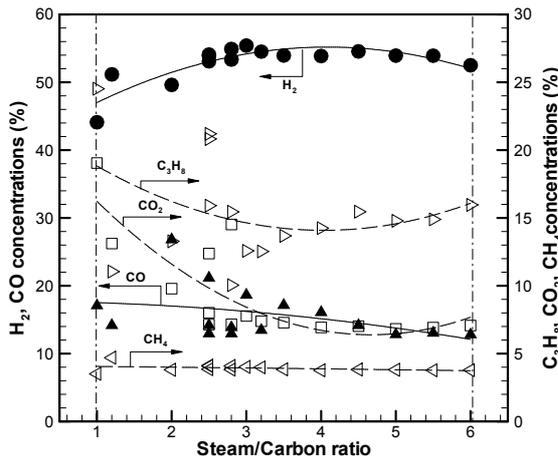
4.2.1 수증기 주입량 변화

Fig. 2 는 수증기 주입량 변화를 나타낸 것이다. 실험은 C₃H₈ 주입량 1.5 L/min, 전체 가스량 14 L/min, 입력전력 2.4 kW 로 고정한 후 실험을 진행 하였다. Steam/carbon 비 1 이하에서는 플라즈마 방전이 불안정하였으며, 플라즈마 내부에 카본블랙이 형성되었으며, 6 이상에서는 주입되는 물의 증가로 인한 기화장치의 온도감소 현상이 나타나 실험 범위를 1~6 으로 정하고 실험을 진행하였다.

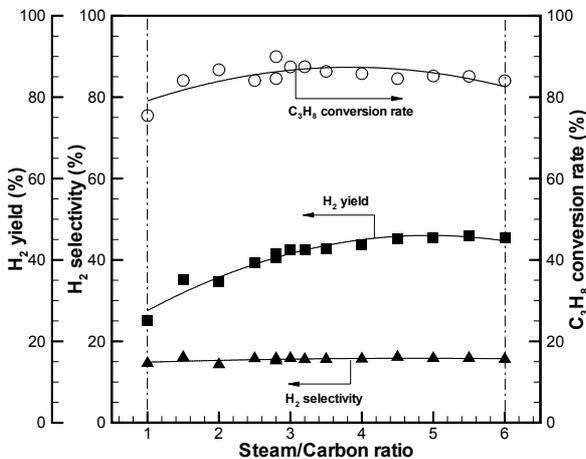
Fig. 2(a)는 수증기 주입량 변화에 따른 대표가스 농도를 나타내었다. H₂ 농도의 경우 수증기 주입량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하다가

Table 1 Optimum conditions and their results

Conditions		C ₃ H ₈ flow rate (L/min)	Steam (L/min)	Steam/carbon ratio	Total gas flow rate (L/min)	Input electric power (kW)			
Value		1.5	12.6	2.8	14	2.4			
Syngas Concentration (Dry vol. %)			C ₃ H ₈ conv. (%)	H ₂ yield (%)	H ₂ sel (%)	Energy efficiency (%)	Specific energy requirement (kJ/mol)		
H ₂	CO	CO ₂	C ₃ H ₈	CH ₄	90	42	15	37	334
55	14	15	10	4					



(a) Concentration of reformed gas



(b) Yield, selectivity and C₃H₈ conversion rate

Fig. 2 The effect of the various S/C ratio

steam/carbon 비 2.8 에서 최대 수소 농도인 55 %를 나타냈다. 또한 steam/carbon 비가 증가함에 따라 H₂ 증가 및 C₃H₈ 이 감소되는 이유로 수증기 주입량이 증가됨에 따라 식 (6)의 반응이 더 잘 일어나는 것으로 보여진다. 또한 수증기의 주입으로 인한 OH 라디칼의 형성으로 인한 개질효율이 증가증가된 것 보여진다. 일반적으로 연료 개질은 촉매를 사용하는데 촉매가 없는 경우에도 식 (6)의 반응이 잘 일어나는 이유는 플라즈마의 전기적

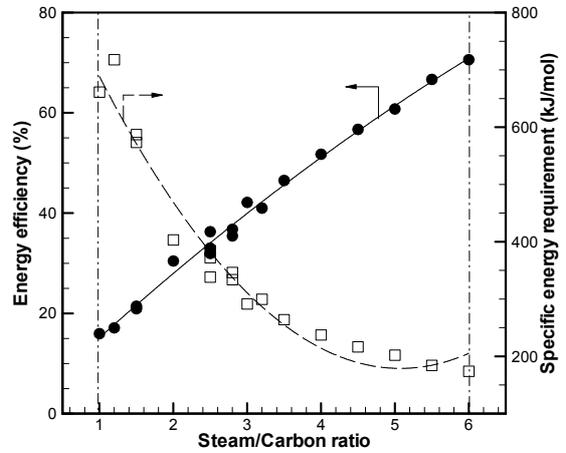


Fig. 3 Energy efficiency and specific energy requirement

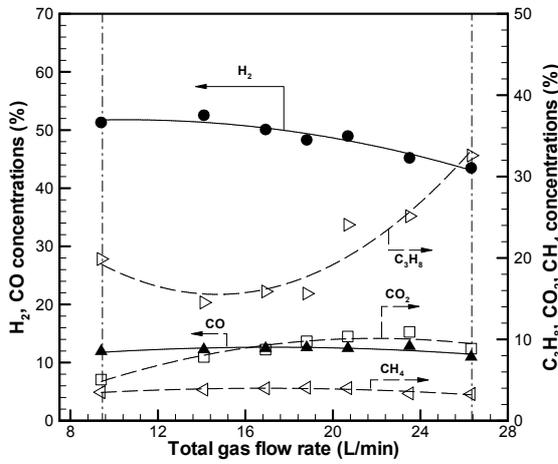
방전으로 인하여 순간적인 고온 형성 및 식 (1)~(5)의 반응인 크래킹 반응으로 인하여, 개질 잘 이루어지는 것으로 보여진다. CO, CH₄의 경우는 S/C 비가 증가함에 관계 없이 각각 13 %, 4 %로 비교적 안정된 모습을 나타내었다.

Fig. 2(b)는 수증기 주입량 변화에 따른 C₃H₈ 전환율, H₂ 수율, H₂ 선택도를 나타내고 있다. C₃H₈ 전환율은 식 (8)에 의해 구해지며, steam/carbon 비의 큰 영향이 없이 85 %를 유지하고 있으며, H₂ 선택도는 식 (10)에 의해 15 %로 안정적인 것을 알 수 있다. H₂ 수율은 식 (9)에 의해 steam/carbon 비가 증가함에 따라 증가하다가 2.8 때부터 55 %로 안정되었다.

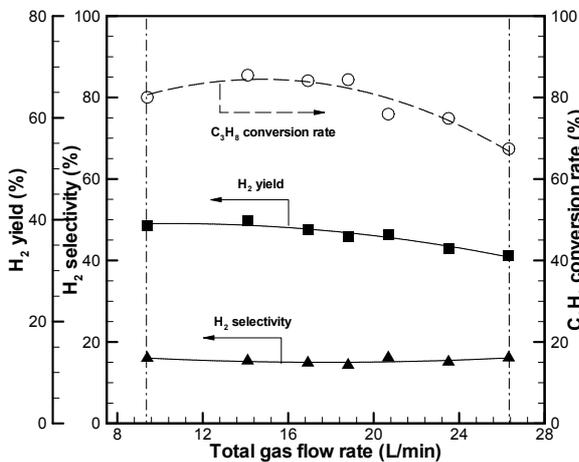
Fig. 3 은 수증기 주입량에 따른 에너지 효율과 에너지 요구량을 나타냈다. 에너지 효율은 식 (11)에 의해 steam/carbon 비가 증가함에 따라 효율이 증가하는데, 이는 수증기 주입량이 증가함에 따라 합성가스 생산량이 증가하기 때문에 효율이 증가됨을 알 수 있다. 에너지 요구량은 식 (12)에 의해 steam/carbon 비가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 최적 조건인 steam/carbon 비 2.8 에서 에너지 효율은 37 %이며, 에너지 요구량은 334 kJ/mol 을 나타냈다.

4.2.2 전체 가스량 변화

Fig. 4 는 전체 가스량 변화에 따른 실험 결과이다. C₃H₈ 주입량 1.5 L/min, steam/carbon 비 2.8, 입력전력 2.4 kW 을 고정한 후, 전체 가스량을 9 ~ 26 L/min 으로 조절하여 실험을 진행하였다. 전체 가스량 9 L/min 이하에서는 플라즈마 방전이 불안정적으로 형성되었으며, 14 L/min 부터 안정적으로 형성되었다.



(a) Concentration of reformed gas



(b) Yield, selectivity and C₃H₈ conversion rate

Fig. 4 The effect of the various total gas flow rate

Fig. 4(a)는 전체 가스량 변화에 따른 대표가스 농도를 나타냈다. 14 L/min 에서 최대의 H₂ 농도인 53 %를 나타내고 있는데, 전체 가스량이 증가함에 따라 26 L/min 에서 43 %까지 감소함을 알 수 있다. 또한 C₃H₈ 농도의 경우 초기 19 %이며, 14 L/min 에서 최저 15 %을 나타낸 후 전체 가스량이 증가함에 따라 증가됨 알 수 있는데, 14 L/min 이하의 범위에서는 방전이 불안정적으로 형성되어 개질이 잘 이루어지지 않았으며, 14 L/min 이후의 범위에서는 전체 가스량의 증가로 인한 동일 직경인 노즐 통과 시 유속이 증가되어, 체류시간이 감소하게 되어, 이로 인해 개질 효율이 감소된 것으로 보여진다. CO, CO₂, CH₄는 각각 12 %, 9 %, 4 %로 안정적이었다.

Fig. 4(b)는 전체 가스량 변화에 따른 C₃H₈ 전환율, H₂ 수율, H₂ 선택도를 나타내었다. C₃H₈ 전환율은 체류시간의 감소에 따라 84 %에서 64 %까지 감소하였으며, H₂ 수율 또한 전체 가스량이 감소함

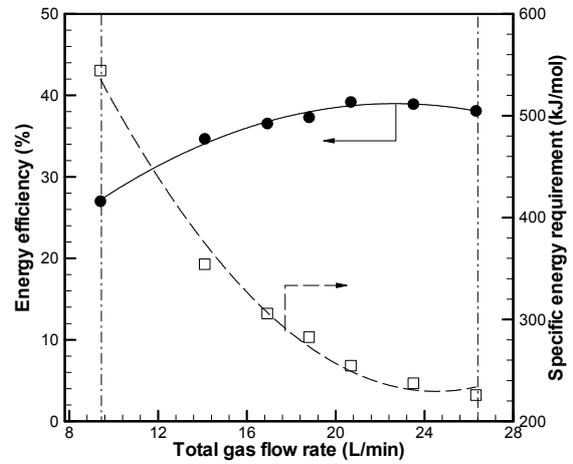


Fig. 5 Energy efficiency and specific energy requirement

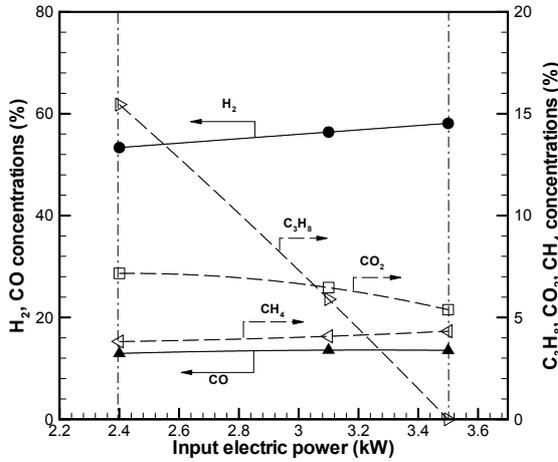
에 따라 40 %에서 33 %까지 감소됨을 알 수 있다. C₃H₈ 전환율에 대한 H₂ 농도를 나타내는 H₂ 선택도는 15 %로 일정하게 나오는 것으로부터 방전으로부터 C₃H₈ 개질이 일정하게 유지되면서, H₂ 가 일정하게 생성되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 는 전체 가스량 변화에 따른 에너지 효율과 에너지 요구량을 나타냈다. 에너지 효율은 전체 가스량이 증가함에 따라 27 %에서 39 %까지 변화한다. 이는 전체 가스량이 증가함에 따라 합성가스의 생산량이 증가함에 따라 효율이 증가 되는 것으로 보여지며, 20 L/min 이상에서는 안정적인데, 이는 체류시간의 감소로 인한 개질 효율의 감소로, 합성가스 생산과 입력전력이 일정해지기 때문이다. 에너지 요구량의 경우는 544 kJ/mol 에서 226 kJ/mol 까지 감소함을 알 수 있다. 최적 조건인 14 L/min 에서의 에너지 효율과 에너지 요구는 35 %, 354 kJ/mol 을 나타냈다.

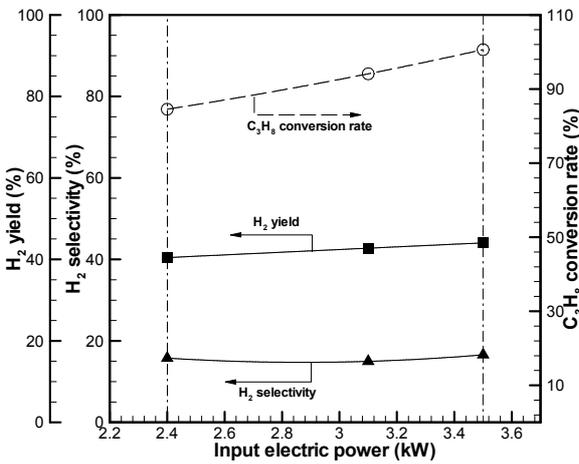
4.2.3 입력전력 변화

Fig. 6 은 입력전력에 따른 영향을 나타내고 있다. C₃H₈ 주입량은 1.5 L/min, steam/carbon 비는 2.8, 전체 가스량을 14 L/min 으로, 고정한 후 입력전력을 변화하여 실험을 진행하였다. 실험은 전력 2.4~3.5 kW 으로 진행하였으며, 2.4 kW 이하에서는 플라즈마 반응기 방전이 불안정적으로 형성되었다.

Fig. 6(a)는 입력전력 변화에 따른 대표가스 농도를 나타내고 있다. H₂ 농도의 경우 입력 전력이 증가하면서, 53 %에서 58 %까지 증가됨을 알 수 있었으며, C₃H₈의 경우에도 15 %에서 0 %까지 저감되어 입력전력이 증가함에 따라 C₃H₈ 개질이 더 잘되는 것을 알 수 있다. CO, CH₄ 경우 각각 13 %, 4 %를 유지하였으며, CO₂ 경우 2 % 감소됨을



(a) Concentration of reformed gas



(b) Yield, selectivity and C₃H₈ conversion rate
Fig. 6 The effect of the various input electric power

알 수 있었다.

Fig. 6(b)는 입력전력 변화에 따른 C₃H₈ 전환율, H₂ 수율, H₂ 선택도를 나타내었다. C₃H₈ 전환율은 입력전력이 증가함에 따라 85 %에서 100 %로 증가되어 개질 효율이 증가 됨을 알 수 있었으며, H₂ 수율, H₂ 선택도 또한 각각 4 %, 2 %로 증가되어 전체적으로 입력전력이 증가함으로써, 개질 효율이 증가됨을 알 수 있다. Fig. 7 는 입력 전력 변화에 따른 에너지 효율과 에너지 요구량을 나타냈다. 입력전력이 증가 함에 따라 에너지 효율은 35 %에서 31 %로 감소되었으며, 에너지 요구량의 경우 346 kJ/mol 에서 467 kJ/mol 로 증가됨을 알 수 있다. 이는 입력전력이 증가하여 개질은 더욱 잘 이루어지나, 증가한 입력 전력에 비하여 개질이 증가되지 않아 에너지 효율의 감소가 이루어 진 것으로 보여진다.

결과적으로 입력 전력이 증가함에 따라 개질이 잘 이루어지는 것을 알 수 있으나, 방전이 안정적

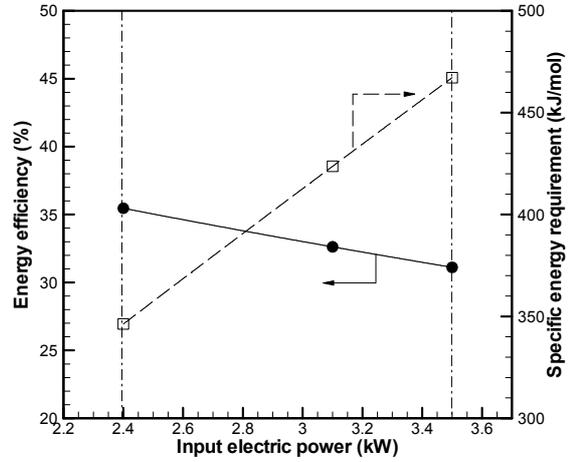


Fig. 7 Energy efficiency and specific energy requirement

으로 형성되며, 에너지 효율과 요구량 부분을 고려 하였을 때, 입력전력 2.4 kW 에서 최적 조건임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 프로판을 개질하기 위한 글라이딩 아크 플라즈마 개질기를 설계 및 제작하여, 고농도 수소를 포함한 합성가스 생성에 대한 특성을 파악하였다.

기준조건에 대한 프로판 개질 결과 합성가스의 농도는 H₂ 55 %, CO 14 %, CO₂ 15 %, C₃H₈ 10 %, CH₄ 4 %를 나타내었다. 이때의 H₂ 수율, H₂ 선택도, C₃H₈ 전환율은 각각 42 %, 15 %, 90 %을 나타내었으며, 에너지 효율은 37 %이며, 에너지 요구량은 334 kJ/mol 이다.

개질 성능에 미치는 변수별 연구로는 수증기 주입량 변화는 steam/carbon 비 2.8 에서 최적 조건이었으며, 이 이상의 steam/carbon 비에서는 H₂ 농도 55 %로 비교적 안정적으로 나타났다. 또한 빠른 시동 특성과 전기적인 방전만으로도 높은 합성가스가 생산됨을 알 수 있었다. 전체 가스량 변화 경우 전체 가스량이 증가함에 따라 14 L/min 에서 최적 조건이었으며, 저유량에서는 방전이 불안정적으로 형성되어 개질이 잘 이루어지지 않은 것으로 보여지며, 고유량에서는 유속의 증가로 인한 체류시간 감소로 개질이 잘 이루어지지 않는 것으로 보여진다. 입력전력은 증가할수록 개질이 더 잘 이루어져 합성가스 생산이 증가 되는 것을 알 수 있다. 그러나 방전이 안정적으로 형성되면서, 에너지 효율 및 에너지 요구량 부분을 고려하여 입력 전력 2.4 kW 에서 최적조건으로 선정하였다.

참고문헌

- (1) Chun, Y. N., Song, H. O., 2008, "Syngas Production Using Gliding Arc Plasma," *Energy Sources*, Vol. 30, pp. 1202~1212.
- (2) Silberova, B. Venvik, H. J., Holmen, A., 2005, "Production of Hydrogen by Short Contact Time Partial Oxidation and Oxidative Steam Reforming of Propane," *Catalysis Today*, Vol. 99, No 1-2, pp. 69~76.
- (3) Kolb, G., Zapf, R., Hessel, Löwe, H., 2004, "Propane Steam Reforming in Micro-Channels-Results from Catalyst Screening and Optimisation," *Applied Catalysis A: General*, Vol 277, No.1-2, pp.155-166.
- (4) Chun, Y. N., Kim, S.C., 2007, "Study on Characteristic of Methane Reforming and Production of Hydrogen using GlidArc Plasma," *The Korean Society of Mechanical Engineers (B)*, Vol. 31, No. 11, pp, 942-948.
- (5) Indarto, A., Choi, J.-W., Lee, H., Song, H. K., 2006, "Effect of Additive Gases on Methane Conversion Using Gliding Arc Discharge," *Energy*, Vol. 31, No. 14, pp. 2986-2995.
- (6) Paulmier, T., Fulcheri, L., 2005, "Use of Non-Thermal Plasma for Hydrocarbon Reforming," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 106, No.1, pp. 59~71.
- (7) Sreethawong, T., Thakonpatthanakun, P., Chavadej, S., 2007, "Partial Oxidation of Methane with Air for Synthesis Gas Production in a Multistage Gliding Arc Discharge System," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 8, pp. 1067~1079.
- (8) Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., 2006 "Hydrogen Production from Steam and Autothermal Reforming of LPG over High Surface Area Ceria," *Journal of Power Sources*, Vol. 158, No.2, pp. 1348~1357.
- (9) Kabashima, H., Einaga, H., Futamura, S., 2003, "Hydrogen Generation From Water, Methane, and Methanol With Nonthermal Plasma," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 2, pp. 340~345.
- (10) Lee, D. H., Kim, K. T., Cha, M. S., Song, Y. H., 2007, "Optimization Scheme of a Rotating Gliding Arc Reactor for Partial Oxidation of Methane," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No.2, pp. 3343~3351.
- (11) Petitpas, G., Rollier, J. D., Darmon, A., Gonzalez-Aguilar, J., Metkemeijer, R., Fulcheri, L., 2007, "A Comparative Study of Non-Thermal Plasma Assisted Reforming Technologies," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No.14, pp. 2848~2867.