

수소 생성을 위한 플라즈마트론 개발

김성천 · 전영남[†]

조선대학교 환경공학부

(2005년 11월 23일 접수, 2006년 1월 11일 채택)

Plasmatron Development for a Hydrogen Production

Seong Cheon Kim · Young Nam Chun[†]

Department of Environmental Engineering, Chosun University

ABSTRACT : The purpose of this paper is to investigate the optimal condition of the SynGas production by reforming of propane using plasmatron. Plasma was generated by air and arc discharge. The effects of applied steam, CO₂ or Ni-catalyst on propane conversion, yield of hydrogen and H₂/CO ratio as well as correlation of syngas were studied. When the variations of O₂/C₃H₈ flow ratio, H₂O/C₃H₈ flow ratio and CO₂/C₃H₈ flow ratio were 0.94~1.48, 4.3~10 and 0.8~3.05 respectively, Under the condition mentioned above, result of H₂O/C₃H₈ flow ratio was maximum H₂ concentration, or 28.2~31.6%, and result of H₂O/C₃H₈ flow ratio with catalyst was minimum CO concentration or 6.6~7.1%. and the ratio of hydrogen to carbon monoxide(H₂/CO) were 3.89~4.86.

Key Words : Plasmatron, Reforming, SynGas, Hydrogen Production, Correlation

요약 : 본 논문에서는 plasmatron을 사용하여 프로판의 개질에 의해 SynGas 생산의 최적의 조건을 연구하였다. 플라즈마는 공기와 아크 방전에 의해 생성되며 합성 가스의 상관 관계뿐만 아니라 수증기, CO₂ 또는 반응기에 촉매를 추가하여 프로판 전환에 미치는 영향과 수소의 수율, H₂/CO 비에 대해 연구하였다. O₂/C₃H₈ 유량비, H₂O/C₃H₈ 유량비와 CO₂/C₃H₈ 유량비를 각각 0.94~1.48, 4.3~10과 0.8~3.05로 변화하였을 때, H₂O/C₃H₈ 유량비의 변화 결과가 최대 28.2~31.6%의 H₂ 농도를 나타냈으며, 촉매를 추가하고 H₂O/C₃H₈ 유량비의 변화결과 6.6~7.1%의 최소 CO 농도를 나타냈다. 그리고 H₂/CO 비는 3.89~4.86을 나타냈다.

주제어 : 플라즈마트론, 개질, 합성 가스, 수소 생산, 상관 관계

1. 서론

전 세계적으로 에너지 자원은 한정되어 있으며, 에너지 수요 급증으로 화석 연료 고갈의 문제에 대해서 에너지를 효율적으로 이용하는 것은 매우 중요한 과제이다. 많은 대체에너지 개발 연구 중 탄화수소계열의 연료를 개질 하여 SynGas로 전환하거나 고농도의 수소를 생산하는 기술에 대한 연구가 진행되어 왔다. 수소에너지는 청정에너지라는 인식으로 차세대 에너지원으로 기대가 되고 있다. 또한 대부분의 에너지 시스템에서 이용될 수 있으므로, 기존의 화석연료 에너지 시스템에 대체하여 사용할 수 있는 가장 적합한 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. 연료의 개질을 통한 수소의 생산 방법으로는 오랜 기간동안 연구되어져 왔으며 방법으로는 수증기 개질법(steam reforming),¹⁾ 부분산화 개질법(partial oxidation reforming),²⁾ CO₂ 개질법(CO₂ reforming)³⁾ 등이 있다. 최근 저온 및 고온 플라즈마 기술에 대한 관심이 높아지면서 플라즈마트론(Thermal plasma reforming),⁴⁾ Glid Arc Plasma,

DBD등 다양한 플라즈마 기술이 개질에 적용되고 있다. 개질방법 중 수증기 개질법이 가스 처리량과 수소 생산수율 등의 장점으로 현재 가장 많이 사용되고 있지만 반응기가 크고 반응속도가 상대적으로 느리며 강한 흡열반응으로 높은 온도와 압력이 요구되어진다. 플라즈마트론(Plasmatron)은 부분산화 개질을 적용하여 다양한 연료들을 수소가 풍부한 Syngas로 변환시켜 주는 개질장치이다. 플라즈마트론 내부에서 공기를 전기아크로 발화시켜 고온의 플라즈마 상태를 유지하여 탄화수소계열의 연료에서 수소와 일산화탄소가 풍부한 Syn-Gas로 전환된다. 개질시 플라즈마의 자체 열과 부분산화에 따른 내부 반응열을 사용하고 수초의 빠른 시동 및 응답시간으로 넓은 범위의 유량과 가스 성상에 대해 적용이 가능하다.

본 연구에서는 플라즈마트론을 이용하여 프로판(C₃H₈) 개질을 통해 수소가스를 생성하였고, 수소 생성이 최대이고 프로판의 전환율이 최대인 최적 운전 조건을 파악하였다. 또한 개질시 수증기, 이산화탄소 그리고 반응기에 Ni 촉매를 첨가하여 개질특성을 파악 및 비교 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 실험 장치

[†] Corresponding author

E-mail: ynchun@chosun.ac.kr

Tel: 062-230-7156

Fax: 062-230-7156

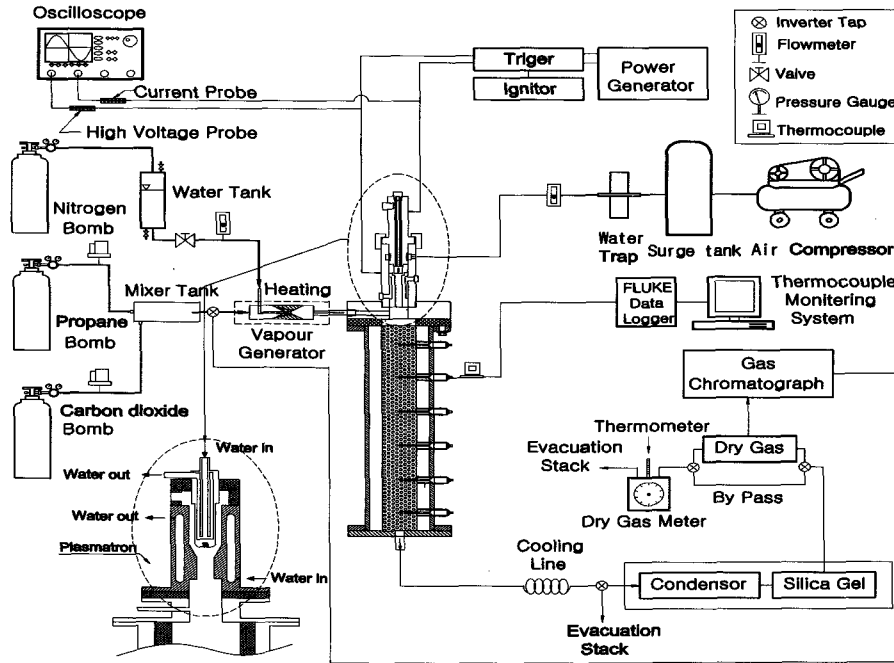


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus.

Fig. 1은 실험에 사용한 플라즈마트론 개질 실험장치를 나타낸 것으로, 플라즈마트론, 전원공급장치, 바이오가스 및 수증기 공급라인, 측정 및 분석 라인으로 구성되어 있다. 플라즈마트론은 공기를 사용하여 플라즈마를 형성하고 고온에 의한 전극의 침식 현상을 완화하기 위해 두 전극에 냉각수를 공급한다.

혼합기, 그리고 반응기로 연결되며, 반응기에 추가되는 촉매는 합침법으로 제조한 니켈 담지 촉매를 사용하였다. 혼합기에서는 실험조건에 따라 수증기 혹은 예열된 CO₂가 프로판과 함께 혼합되어 접선방향으로 개질 반응기로 주입되며 반응기 내부에는 15 mm의 두께로 단열 처리가 되어있다.

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.

측정/분석라인은 전기특성 측정, 온도 측정, 가스 분석으로 구분된다. 전기특성은 고전압 프르브(Tektronix P6015A), 전류 프르브(Tektronix A6303)와 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 가스 크로마토그래프(Shimadzu - 14B)로 구성되어 있다.

2.2. 실험방법

공기를 주입하여 형성된 플라즈마에 의해 반응기 온도를 대략 700℃로 안정화 시킨 후 프로판을 함께 주입하여 반응 온도를 1,000℃ 이상으로 상승시켜 유지하였다. 플라즈마 중

심의 온도는 수 천℃에 이르기 때문에 열전대를 통한 직접적인 측정이 불가능하여 Fig. 1에 보는 것처럼 반응기의 입구에서 두 번째 지점에 열전대를 사용하여 내부의 온도를 연속 모니터링 하였다. 본 실험 조건에 따른 반응기의 시동 특성은 Fig. 2와 같다. 프로판, 공기 그리고 CO₂는 MFC(F201AC-FA-22-V)에 의해서 유량이 조절되어 주입되고 수증기는 미세 조절이 가능한 메터링 밸브에 의해 물을 주입하고 기화기에서 프로판과 함께 유입되어 기화된 혼합기체 상태로 반응기내로 주입된다. 합성가스의 채취는 반응기 출구에 설치된 샘플링 포트에서 이루어지며, 채취된 시료는 임핀저에서 수분량을 측정하고 건가스의 상태로 GC의 샘플링 루프로 유입되어 분석하였다. 분석은 TCD를 이용하였으며, 분석 컬럼은 Molecular Sieve 5A, Molecular Sieve 13X 그리고 HayeSep R을 사용하였다.

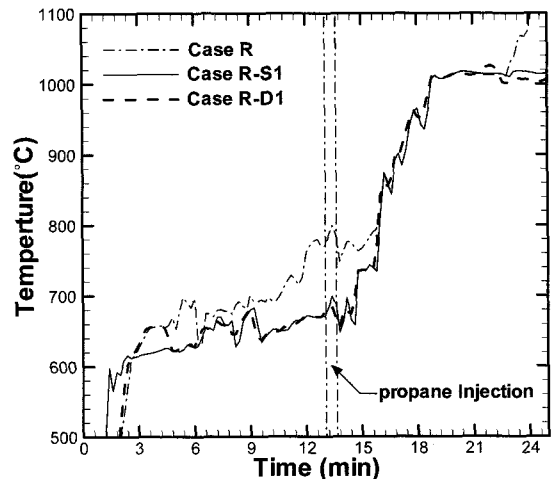


Fig. 2. Initial operating characteristic of the reformer.

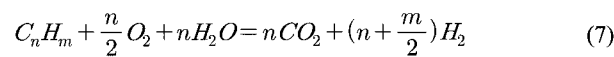
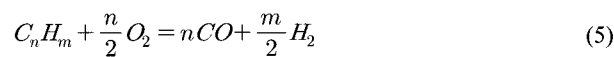
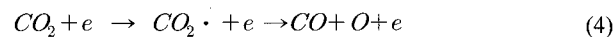
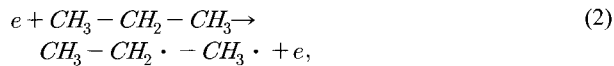
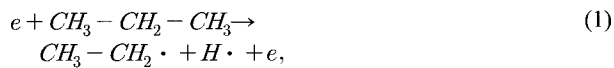
O₂/C₃H₈ 비의 변화에 따른 실험을 거쳐 수소의 농도가 가장 높게 나온 조건을 분석하였다. 조건에 따른 O₂/C₃H₈ 비를 고정한 상태에서 수증기(H₂O)를 추가하여 H₂O/C₃H₈ 비의 변화에 따른 실험을 진행하고 Ni 촉매를 반응기에 추가하여 결과를 비교 분석하였다. 또한 이산화탄소(CO₂)를 추가하여 CO₂/C₃H₈ 비의 변화에 따른 실험과 Ni 촉매를 반응기에 추가하여 결과를 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

반응 식 (1)~(4)는 플라즈마에 의한 크래킹(Cracking) 반응으로 (1)~(3)은 C₃H₈(propane)⁵⁾에 대해 나타냈으며, (4)는 CO₂⁶⁾에 대해 나타냈다.

반응 식 (5)~(7)는 C_nH_m의 대표적인 개질반응으로 부분산화 개질반응(Partial Oxidation)과 CO 전환반응(CO shift reaction) 그리고 자열 개질 반응(Auto thermal)⁴⁾을 나타낸 것이다.

고온 플라즈마 개질 반응기의 개질 효율을 파악하기 위하여 수소 수율(H₂ yield), 에너지 전환율, 전환율⁷⁾은 (8)~(10)에 의하여 계산되어진다.



$$H_2 \text{ 수율}(\%) = \frac{\text{개질가스 } H_2 \text{ 양}}{\text{연료 } H_2 \text{ 양}} \times 100 \quad (8)$$

$$\text{에너지 전환율}(\%) = \frac{\text{개질가스의 에너지함량}}{\text{연료의 에너지함량}} \times 100 \quad (9)$$

$$\text{전환율}(\%) = \frac{\text{유입농도} - \text{유출농도}}{\text{유입농도}} \times 100 \quad (10)$$

Table 1. Experimental conditions and range

conditions	O ₂ /C ₃ H ₈ ratio		H ₂ O/C ₃ H ₈ ratio		CO ₂ /C ₃ H ₈ ratio		Input Power (kW)
	Without Cat. ¹⁾	With Cat.	Without Cat.	With Cat.	Without Cat.	With Cat.	
	Case R	Case R-S1	Case R-S2	Case R-D1	Case R-D2		
range	0.94 ~ 1.48	4.3 ~ 10	0.8 ~ 3.05			8	

¹⁾ Cat.: Catalyst

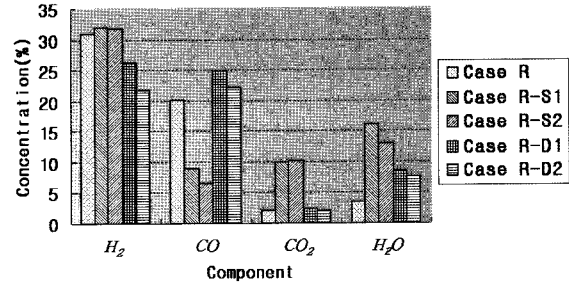


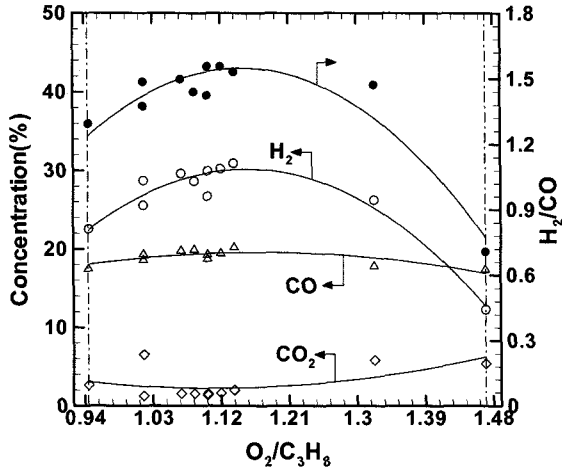
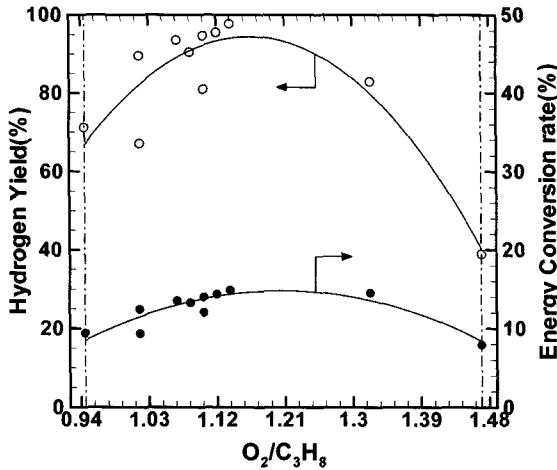
Fig. 3. Concentration of major component in reformed gas according to maximum H₂.

본 연구의 실험조건은 Table 1에 실험조건을 나타냈으며, Fig. 3에 O₂/C₃H₈ 실험결과와 H₂O, CO₂, Ni 촉매를 반응에 추가한 결과 중 최고치의 수소 농도를 기준으로 비교하여 나타냈다.

Case R-S1의 경우 수소의 농도가 32.5%로 가장 높게 나타났다. CO는 Case R-S2에서 가장 낮게 나타났으며 CO₂는 가장 높게 나타났다. 이는 Ni 촉매에 의한 반응과 식 (6)에 나타낸 CO 정반응에 의해 CO는 감소하고 CO₂는 증가함을 알 수 있다. CO의 농도는 Ni 촉매에 의한 영향이 약하게 나타났으며, 수소 농도에 대한 영향은 크게 나타나지 않았다. Case R-D1과 Case R-D2의 경우, Case R-S1, Case R-S2보다 상대적으로 수소의 농도가 낮게 나타났으며 CO의 농도는 매우 높게 나타났다. 이는 식 (7)의 플라즈마에 의한 크래킹 반응으로 CO로 전환 되어 CO의 농도가 증가됨을 알 수 있다.

3.1. C₃H₈ 유량비

Fig. 4는 기준 실험인 O₂/C₃H₈ 개질반응 결과를 나타냈다. Fig. 4(a)는 O₂/C₃H₈ 비의 변화에 따른 생성된 합성가스 중 H₂와 CO의 농도 범위를 나타낸 것으로 각각 15.12%~30.13%, 17.5%~20.1%의 범위를 보이고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 합성가스의 주성분이 H₂이며, H₂/CO 비는 최대 1.62를 타나냈다. 또한 Fig. 4(b)는 수소 수율(H₂ yield)과 에너지 전환율을 나타낸 것으로 각각 20.6%~98%, 8.2%~16.4%의 범위로 O₂/C₃H₈ 비가 1.13인 경우 최대의 수소 수율(H₂ yield)과 에너지 전환율을 나타냈다. 부분산화에 의한 개질 반응인 식 (5)에 의해서 산소와 탄소의 비가 0.5인 경우에 가장 이상적인 SynGas가 생성됨을 알 수 있다. 본 실험의 결과를 통해서도 O₂/C₃H₈ 비가 증가하면 완전 산화 반응에 가까워져서 CO₂ 농도가 증가하고 H₂와 CO의 농도는 감소됨을 알

(a) Concentration and H₂/CO ratio

(b) Yield and Energy Conversion rate

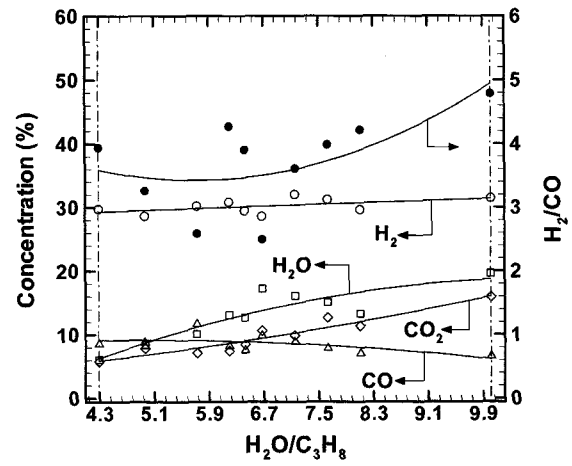
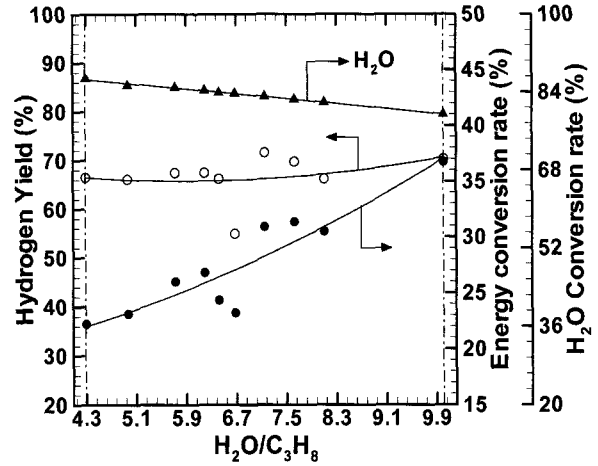
Fig. 4. Effect of the O₂/C₃H₈ ratios.

수 있다. 따라서 O₂/C₃H₈ 비에서 최대인 조건을 기준조건으로 하여 H₂O/C₃H₈, CO₂/C₃H₈ 비의 변화에 따른 실험을 진행하였다.

3.2. H₂O 유량비

Fig. 5는 Case R의 기준 실험 조건에서 수증기를 추가하여 나타난 개질 반응의 결과이다. Fig. 5(a)에서 H₂와 CO 농도는 각각 31.6%, 12.1%가 최대값이며 H₂ 농도는 H₂O/C₃H₈ 비의 변화에 대해 큰 영향을 나타내질 않았다. 반면 CO의 경우 Case R보다 약 50% 정도가 감소하였으며 H₂O/C₃H₈ 비의 증가에 따라 감소하고 있다. 부분산화개질 반응에 수증기를 추가한 경우 식 (6)와 자열개질반응인(Autothermal) 식 (7)에 의해서 CO가 CO₂로 전환되어 H₂/CO의 비가 2.3~4.8의 범위를 나타내는 SynGas로 전환됨을 알 수 있다.

Fig. 5(b)에서 H₂ yield는 66.3~71.2%, 에너지 전환율은 23.3~36.9%의 범위로 나타났다. H₂O의 전환율은 최대 88%를 나타냈으며 주입량이 증가함에 따라 전환율은 낮아진다. 이는 식 (8)에 의한 수소수를 계산 시 수증기에 포함된 수소를 함께 계산하여 높은 값을 나타냈으며 에너지 전환율은 수증기 주입에 따라 개질가스의 주성분인 H₂의 생성이 높아졌기 때문이다.

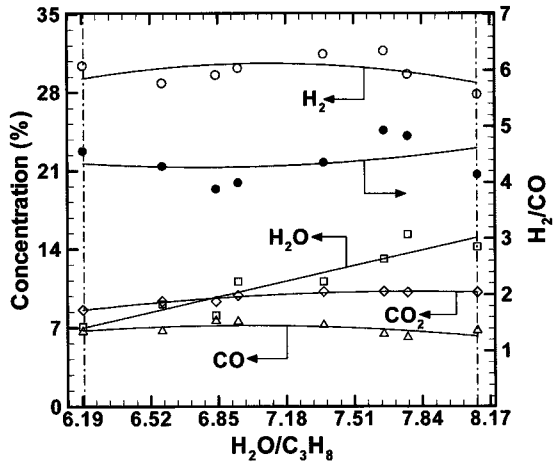
(a) Concentration and H₂/CO ratio(b) Yield, Energy and H₂O Conversion rateFig. 5. Effect of the H₂O/C₃H₈ ratios.

3.3. 촉매 첨가한 H₂O 유량비

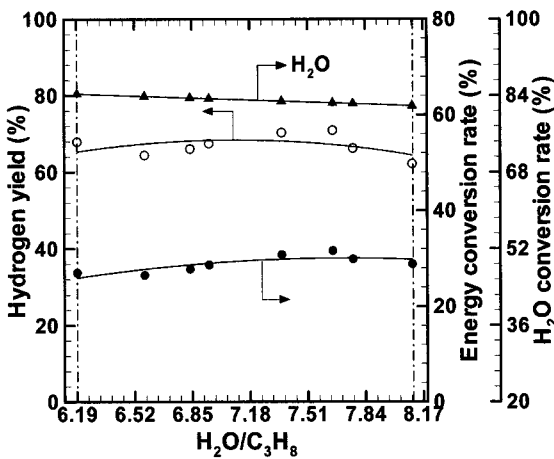
Fig. 6은 Case R-S1의 실험 조건에서 반응기에 Ni 촉매를 추가하여 나타난 개질 반응의 결과이다. Fig. 6(a)에서 H₂와 CO의 농도는 각각 30.5%, 7.1%가 최대값이며 H₂의 농도는 Ni 촉매에 대해 크게 영향 받지 않았다. 반면 CO의 경우 Case R-S2보다 약 25% 정도, CO₂는 50% 정도가 감소되었으며 Case R-S1에 비해 거의 일정하게 나타났다. 이는 Ni 촉매에서 CO와 CO₂가 반응하여 서로 준평형 상태가 도달될 때까지 반응하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서 H₂ yield는 62.1~72.1%, 에너지 전환율은 32.1~38.8%의 범위로 나타났다. H₂O의 최대 전환율은 Case R-S1보다 작은 80.4%를 나타냈으며 주입량이 증가함에 따라 전환율은 떨어진다. Case R-S2의 경우 Case R-S1보다 높은 H₂/CO의 비가 생성됨을 알 수 있다.

3.4. CO₂ 유량비

Fig. 7은 Case R의 기준 실험 조건에서 CO₂를 추가하여 나타난 개질 반응의 결과이다. Fig. 7(a)에서 H₂와 CO의 농도는 각각 26.3%, 31.9%가 최대값이며 CO₂의 주입량이 증가할수록 H₂의 농도는 감소하였다. 반면 CO의 경우 플라즈



(a) Concentration and H₂/CO ratio



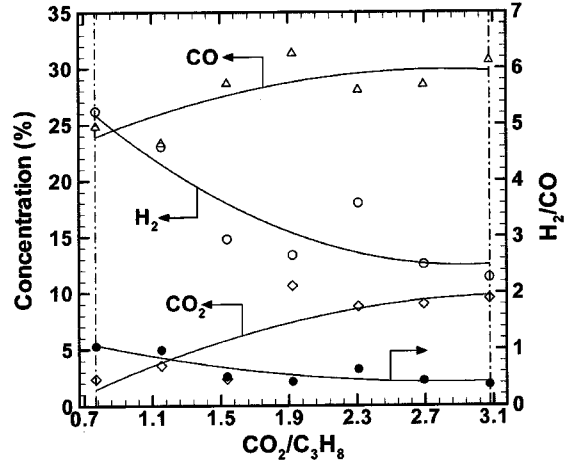
(b) Yield, Energy and H₂O Conversion rate

Fig. 6. Effect of the H₂O/C₃H₈ ratios with Ni Catalyst.

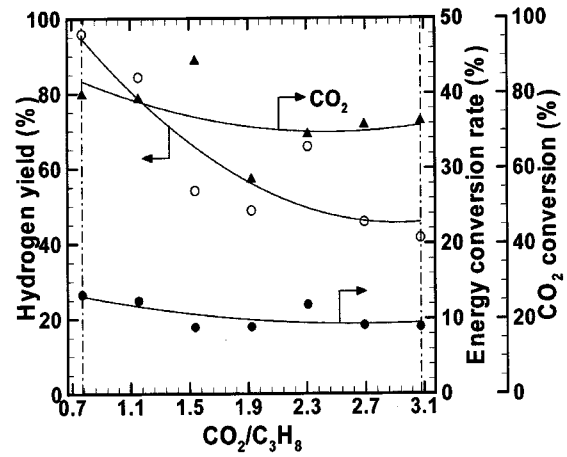
마에 의한 CO₂의 크래킹 반응인 식 (4)에 의해 농도가 증가함을 알 수 있다. H₂/CO의 비는 1이하를 나타냈다. Fig. 7(b)에서 H₂ yield는 42~96%의 범위를 보이고 있다. CO₂의 유량이 처음 주입되는 경우 상대적으로 수소 수율은 높게 나타났지만 증가할수록 50% 이하에 그쳤다. 에너지 전환율과 CO₂의 전환율은 9.1~12.5%, 70.3~90.1% 범위를 보이고 있다. 주입되는 CO₂의 경우 CO로 높은 전환율을 보이나 CO가 H₂의 발열량에 비해 상대적으로 작아 에너지 전환율은 낮게 나타났다.

3.5. 촉매 첨가한 CO₂ 유량비

Fig. 8은 Case R-D1의 실험 조건에서 반응기에 Ni 촉매를 추가하여 나타난 개질 반응의 결과이다. Fig. 8(a)에서 H₂와 CO 농도는 13.5~21.4%, 21.6~35.3%를 보이고 있다. Case R-D1에 비해 CO 농도만 더 높게 나타났고 다른 개질가스의 농도는 비슷한 경향을 보이고 있다. Case R-S2의 경우 촉매에 의해 CO와 CO₂ 농도가 Case R-S1보다 낮게 나타났으며, Case R-D2는 Case R-D1에 비해 CO 농도는 높게 나타났다. 이는 Ni 촉매에서 반응할 수 있는 CO의 양 보다 플라즈마에 의한 cracking 반응으로 생성된 CO가 많음을 알 수 있다. Fig.



(a) Concentration and H₂/CO ratio



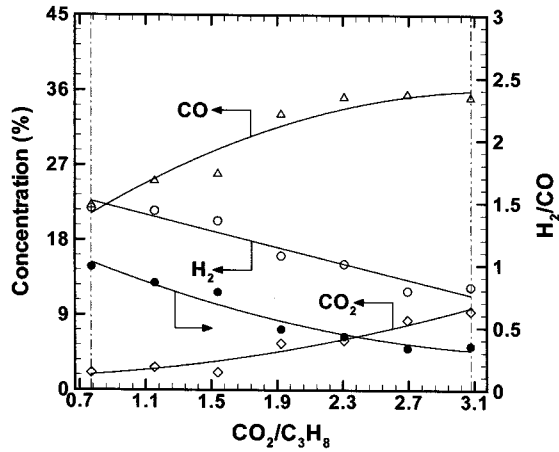
(b) Yield, Energy and CO₂ Conversion rate

Fig. 7. Effect of the CO₂/C₃H₈ ratios.

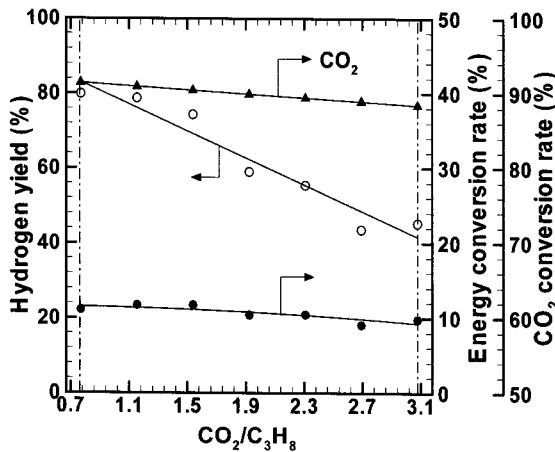
8(b)에서 수소 수율과 에너지 전환율은 9.7~11%, 44~80%의 범위를 보이고 있다. CO₂의 전환율은 79~83.1% 범위를 보이고 있다.

3.6. 상관관계 분석 (Correlation analysis)

실험조건에 따른 합성가스의 분석결과 H₂, CO, CO₂ 농도의 상관성을 파악하기 위해 MathCAD 2000i 프로그램을 이용하여 상관관계를 분석하였다. 분석된 상관계수의 값은 Table 2에 나타났다. 0의 값에 가까울수록 Peak점을 갖는 2차 함수를 나타냈으며, 1과 -1의 값에 가까울수록 1차 함수의 경향을 나타냈다. Case R에서 H₂의 상관계수는 -0.266으로서 약한 음의 상관관계를 나타내며, CO₂ 상관계수는 0.385로서 약한 양의 상관관계를, CO 상관관계는 극히 낮음을 알 수 있다. Case R S-1, S-2에서 CO는 약한 음의 상관관계를 나타내며 CO₂ 경우에 강한 양의 상관관계를 나타낸다. 수증기 공급량이 증가할수록 CO 농도가 낮아지는 경향을 나타냈으며 반응에 촉매를 추가한 경우 CO 농도는 보다 높은 값의 상관관계를 나타냈지만 CO₂ 경우 강한 양의 상관관계에 의해 플라즈마와 촉매에 의한 CO 영향을 알 수 있다.



(a) Concentration and H₂/CO ratio



(b) Yield, Energy and CO₂ Conversion rate

Fig. 8. Effect of the CO₂/C₃H₈ ratios with Ni Catalyst.

Table 2. Pearson's correlation coefficient for the result of Experiment

Case	H ₂	CO	CO ₂
Case R	-0.266	0.082	0.385
Case R S-1	0.001121	-0.398	0.486
Case R S-2	-0.124	-0.393	0.892
Case R D-1	-0.85	0.723	0.815
Case R D-2	-0.967	0.934	0.956

4. 결론

본 연구에서는 부분산화 개질법으로 플라즈마트론을 이용하여 프로판(C₃H₈)의 개질 연구를 수행하여 수소 생성율이 최대한 최적 운전조건을 도출하고 H₂O, CO₂ 그리고 Ni 촉매를 반응에 추가하여 실험한 결과는 다음과 같다.

기준조건의 개질반응 결과 합성가스 중에 H₂와 CO 농도 범위는 각각 15.12~30.13%, 17.5~20.1%의 범위를 보였다. 이 농도 결과에서 알 수 있듯이 프로판의 전환율이 최대일 때 수소의 생성도 최대이며, H₂/CO 비는 0.7~1.62이다. 또한 수소 수율과 에너지 전환율은 각각 20.6~98%, 8.2~16.4%의

범위를 나타냈으며, O₂/C₃H₈의 비가 1.13인 경우 개질성능이 가장 우수함을 확인할 수 있다.

개질 성능에 영향을 미치는 운전인자인 H₂O/C₃H₈, CO₂/C₃H₈ 그리고 반응기에 Ni 촉매를 추가하여 개질특성을 파악한 결과는 다음과 같다.

첫째, 주입되는 기준조건의 O₂/C₃H₈ 비가 고정된 상태에서 H₂O 유량비가 증가하면 CO 전환반응(CO shift reaction)중 정반응인 CO가 CO₂로 전환반응과 자열 개질 반응(Auto thermal)이 우세하게 진행됨으로 CO 농도는 점차적으로 감소한다.

둘째, CO₂의 유량비가 높을수록 플라즈마에 의한 CO₂의 크랙킹 반응이 진행되어 CO의 농도는 증가하고 수소의 농도는 감소하게 되어 H₂/CO 비는 감소한다.

셋째, 반응기에 Ni 촉매를 추가한 결과 수증기 유량비에서는 CO와 CO₂가 저감되고 일정 농도를 유지한다. 반면 CO₂ 유량비에서는 Ni 촉매에 대한 영향이 거의 나타나지 않았다.

넷째, 데이터의 상관분석을 통해 개질 조건에 따른 SynGas의 특성을 나타낸 결과, 개질 가스중의 수소 농도를 높이기 위해서는 H₂O와 Ni 촉매를 추가하는 방법이 적합함을 알 수 있다. 그리고 지구 온난화 물질로 알려진 CO₂를 플라즈마 개질에 사용함으로써 개질 가스 생산과 처리기술에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Beckhaus, P., Heinzl, A., Mathiak, J. J., and Roes, J., "Dynamic of H₂ production by steam reforming," *J. Power Sources*, **127**, 294~299(2004).
2. Andrew, E. L., Robert, W. B., Bromberg, L., and Alex, R., "Thermodynamic analysis of hydrogen production by partial oxidation reforming," *International Journal of 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 CO₂ reforming of CH₄," *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. Rosocha, L. A., Coates, D. M., Platts, D., and Stange, S., "Plasma-enhanced combustion of propand using a silent discharge," *Physics of Plasmas*, **11**(5), 2950~2956(2004).
6. Liu, C. J., Xu, G. H., and Wang, T., "Non-thermal plasma approaches in CO₂ utilization," *Fuel Processing Technology*, **58**, 119~134(1999).
7. 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).