

플라즈마 산화분해-탄화물 가스화 전환에 의한 태양연료 생산

송희관, 전영남*

조선대학교 환경공학과
61452 광주광역시 동구 필문대로 309

(2020년 1월 22일 접수; 2020년 3월 3일 수정본 접수; 2020년 3월 4일 채택)

Production of Solar Fuel by Plasma Oxidation Destruction-Carbon Material Gasification Conversion

Hee Gaen Song, and Young Nam Chun*

Department of Environmental Engineering, Chosun University
#309, Pilmundaero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Rep. of Korea

(Received for review January 22, 2020; Revision received March 3, 2020; Accepted March 4, 2020)

요 약

화석연료의 사용과 바이오가스 생산 과정에서 공기오염과 기후변화문제가 발생된다. 기후변화 주요 원인물질인 이산화탄소와 메탄을 양질의 에너지원으로 전환하는데 연구가 지속되고 있다. 본 연구에서는 바이오가스를 양질의 에너지로 전환하고 태양광과 풍력과 같은 연속생산의 문제가 있는 재생에너지와 연계된 태양연료를 생산하기 위해 플라즈마-탄화물 전환 장치를 제안하였다. 그리고 이에 대한 가능성을 제시하기 위해 바이오가스 전환에 영향을 미치는 O_2/C 비, 전체가스공급량, CO_2/CH_4 공급비의 변화에 따른 전환 및 생성가스 특성 파악하였으며 그 결과는 다음과 같다. O_2/C 비가 높아질수록 메탄과 이산화탄소의 전환이 증가하였다. 전체가스공급량은 임의 특정 값에서 최대의 전환을 보였다. CO_2/CH_4 비 감소할 때 전환율이 증가되었다. 이상의 결과로 볼 때 본 연구에서 새로이 제안된 플라즈마 산화분해-탄화물 가스화 전환에 의한 태양연료 생산의 가능성이 확인되었다. 그리고 O_2/C 비가 0.8이고 CO_2/CH_4 를 0.67로 하여 전체가스공급량을 $40 L min^{-1}$ (VHSV = 1.37)로 공급할 경우 이산화탄소와 메탄 전환이 최대가 되어 생성가스 중 양질의 연료인 수소와 일산화탄소로의 전환이 최대를 보였다.

주제어 : 플라즈마, 온실가스, 바이오가스, 합성가스

Abstract : The use of fossil fuel and biogas production causes air pollution and climate change problems. Research endeavors continue to focus on converting methane and carbon dioxide, which are the major causes of climate change, into quality energy sources. In this study, a novel plasma-carbon converter was proposed to convert biogas into high quality gas, which is linked to photovoltaic and wind power and which poses a problem on generating electric power continuously. The characteristics of conversion and gas production were investigated to find a possibility for biogas conversion, involving parametric tests according to the change in the main influence variables, such as O_2/C ratio, total gas feed rate, and CO_2/CH_4 ratio. A higher O_2/C ratio gave higher conversions of methane and carbon dioxide. Total gas feed rate showed maximum conversion at a certain specified value. When CO_2/CH_4 feed ratio was decreased, both conversions increased. As a result, the production of solar fuel by plasma oxidation destruction-carbon material gasification conversion, which was newly suggested in this study, could be known as a possibly useful technology. When O_2/C ratio was 0.8 and CO_2/CH_4 was 0.67 while the total gas supply was at $40 L min^{-1}$ (VHSV = 1.37), the maximum conversions of carbon dioxide and methane were achieved. The results gave the highest production for hydrogen and carbon dioxide which were high-quality fuel.

Keywords : Plasma, Greenhouse gas, Biogas, Syngas

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ynchun@chosun.ac.kr; Tel: +82-62-230-7156; Fax: +82-62-608-5402

doi: 10.7464/ksct.2020.26.1.72 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

화석에너지의 사용으로 인한 기후변화와 공기오염 문제로 인해 대체에너지인 재생에너지로의 전환이 이루어지고 있다. 특히, 이 중 태양광과 풍력을 이용한 전기생산이 주류를 이루고 있으나 전기생산이 연속적으로 이루어지지 못해 이를 효과적으로 이용하기 위해서는 에너지 저장이 중요하다. 그러나 현재 에너지 저장방식이 한정적이고 저장용량 및 안정적 이용에 대한 기술적 한계를 가지고 있어 이에 대한 다양한 기술개발이 필요한 실정이다[1]. 화석연료 연소 시 발생하는 주요 기후변화 원인물질은 이산화탄소로 이를 포집한 후 에너지로 전환하여 이용하는 기술인 P2G-CCU (Power to Gas-Carbon Capture Utilization)는 21세기 주요 도전과제 중의 하나로 알려져 있다[2]. 또한, 폐수처리장, 음식물처리, 축사 분뇨 혐기 발효처리 등에서 발생하는 온실가스인 메탄과 이산화탄소를 주성분으로 하는 바이오 가스를 청정에너지로 사용하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다[3].

온실가스인 이산화탄소와 메탄의 에너지 전환은 기존의 촉매 적용 열적전환(thermal conversion)기술과 그 외 대체기술로 전기화학(electro-chemical), 태양 열화학(solar thermochemical), 광-화학(photo-chemical), 바이오-화학(bio-chemical)적 방법이 있다. 이 들 방법 중 전기화학(electro-chemical)적 방법인 플라즈마 방전에 근거한 새로운 형태(novel approach)의 기술이 많은 잠재력을 가지고 있다고 보고되었다[4-6].

플라즈마는 고온플라즈마(thermal plasma)와 저온플라즈마(non-thermal plasma: NTP)가 있다. 고온 플라즈마는 고온이 형성되어 전환효율이 높으나 에너지 비용이 많이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 저온플라즈마는 저온과 저압의 마일드 조건(mild condition)에서 운전이 가능하므로 에너지 비용이 기존의 열적전환 방식에 비해 저감이 가능하기 때문에 이산화탄소 이용(CO₂ utilization)을 위한 유망기술 중 하나로 점차 인식되고 있다[7]. 이산화탄소 활성화(CO₂ activation)에 사용된 여러가지 플라즈마 중 글라이딩 아크 방전(gliding arc discharge (GAD))이 저온(non-thermal)과 고온플라즈마(thermal plasma)의 두 가지 장점인 높은 공급전압, 선택도, 에너지 효율이 동시에 가능한 특징이 있어 특별한 관심의 대상이 되고 있다[8]. GAD는 전극 선단에서 아크가 발생되어 열 플라즈마를 생성하고 이는 점차확대되는 전극 사이를 거쳐가며 에너지가 손실되어 저온 플라즈마로 전환된 후 소멸되며 이러한 과정을 지속적으로 반복된다[9]. GAD는 상대적으로 전자밀도(electron density)가 높고 이 전자의 온도가 10,000~23,000 K로 가스 온도보다 5~10배 더 높다[10]. 플라즈마 내에서 CO₂의 촉매칭 진동모드의 여기(excitation)는 CO₂활성화의 가장 효과적인 방법이다. GAD플라즈마의 적절한 전자온도와 상대적으로 높은 전자밀도는 높은 진동여기(vibrational excitation)상태가 되어 CO₂ 전환에 효과적으로 기여할 수 있다[11]. 그리고 플라즈마 적용 연소(plasma assisted combustion: PAC)는 가연 범위 확장, 점화특성 향상, 화염 안정성 확보 등의 우수성으로 인해 다양한 분야에 적용 가능한 유망한 기술로 알려져

있다[12].

기존의 촉매적용 열적전환 기술은 고정과 유동 반응기 촉매층에서의 이산화탄소 전환에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 이때 메탈 촉매층 온도는 800에서 1,500 K정도에서 유지되었으며 이산화탄소 전환의 활성도(activity)과 선택도(selectivity)은 우수한 것으로 나타났다. 그러나 촉매 비용 등 산업에 적용하기 위한 유용성에는 문제가 있는 것으로 보고되었다[13]. 니켈함유촉매(nickel-based catalysts)는 백금과 같은 귀금속 촉매보다 상대적으로 가격이 저렴하고 높은 활성을 가지고 있어 광범위하게 이용되고 있다[14]. 하지만 니켈은 귀금속에 비해 코킹(coking)과 탈활성화(deactivation)에 더 민감하다고 알려져 있다. 이로 인해 최근에 이러한 단점이 보완된 새로운 촉매 개발이 필요한데 그중 석탄 칩(coal char)과 같은 탄화물(carbon materials)이 상당한 잠재력을 가지고 있다고 보고되었다[15].

따라서 본 연구에서는 상기에 언급된 저렴하고 활성도가 높은 탄화물을 이산화탄소/메탄 전환에 활용하고자 탄화물 베드층 전단에 플라즈마 방전에 부부산화를 적용한 새로운 형태의 플라즈마-탄화물 전환기를 제안하였다. 그리고 이산화탄소 전환에 영향을 미치는 주요 영향변수에 대해 플라즈마 산화와 탄화물 가스화에 대해 각각의 전환특성을 규명하고 이를 근거로 하여 새로이 제안된 이산화탄소 전환기의 최적운전 조건제시와 그 가능성을 보였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

Figure 1은 이산화탄소/메탄 전환특성 실험을 위한 플라즈마-탄화물 전환장치 구성도이다. 실험장치 구성은 플라즈마-탄화물 전환기(plasma-carbon material convertor), 전원공급장치(power supply equipment), 가스 및 공기 공급라인(gas & air feed line), 측정 및 분석라인(measuring & analysis line)으로 구성되었다.

플라즈마-탄화물 전환기는 플라즈마 연소기와 탄화물 베드층(carbon material bed; CM bed)로 구성되었다. 플라즈마 연소기는 3상 글라이딩 아크 플라즈마가 발생하는 형식으로 칼날형태(폭 25 mm, 높이 127 mm, 두께 2 mm)로 된 3개 전극은 지지체에 각각 120°로 배치하였으며 전극 간격은 3.5 mm로 유지하였다. 지지체는 전극과의 절연을 위해 세라믹으로 제작되었다. 반응기는 세라믹 재질로 된 관(직경 100 mm, 길이 155 mm)으로 제작하였다. 가스분사 노즐(내경 3 mm)은 전극상부 중심에 위치한 상태에서 지지체에 고정되었다. 반응기 상부로부터 60 mm에 지점에 탄화물 베드층(직경 85 mm, 길이 60 mm)을 설치하였다.

전원공급장치는 전기를 공급하는 파워서플라이(Model: UAP-15K1A, Unicon tech., Korea)와 전기적 특성을 측정하는 고전압 프루브(probe)(Model P6015, Tektronix, USA), 전류 프루브(Model: A6303, Tektronix, USA), 전류 증폭기(amplifier)(Model TM502A, Tektronix, USA) 그리고 오실로스코프(Model

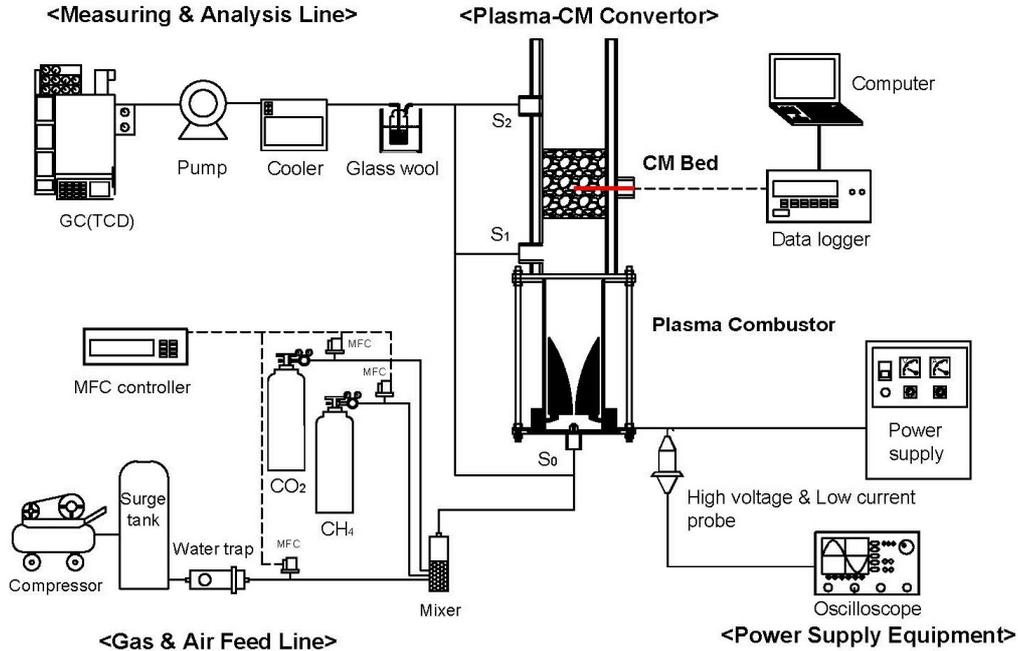


Figure 1. Schematic diagram of plasma-carbon material conversion experiment setup.

TDS-3052, Tektronix, USA)로 구성되어 있다. 파워서플라이는 3상 교류를 최대 15 kW (전압: 15 kV, 교류전류: 1 A)까지 3상 글라이딩 아크 플라즈마 연소기로 공급할 수 있다.

가스 및 공기 공급라인에서 공급 가스는 이산화탄소실린더, 메탄실린더에서 각각 공급된다. 공기공급은 압축기에서 압축된 공기가 7 kg cm²로 공급되어 유체의 맥동(fluctuation)을 방지하여 균일한 압을 유지하기 위해 서지탱크 그리고 응축수분을 제거하기 위해 워터트랩을 통과한 후 공급된다. 처리가스와 연소용 공기는 각각 MFC (mass flow controller)에 의해 유량이 조절된다.

측정 및 분석라인은 플라즈마 연소기 전·후 벽면에 각각 설치되어 있는 샘플링 포트(S0, S1)와 탄화물 베드층 후반부에 설치된 샘플링 포트(S2)에서 가스가 샘플링 된다. 이 가스는 수트를 제거하기 위해 글래스 울(glass wool)을 거친 후 가스를 냉각시켜 수분을 응축시키기 위해 -20 °C로 작동되는 냉각기 (Model: JELO TECH HC-30, USA)를 거쳐 흡입펌프(Model: N-820.3FT 18 KNF, Switzerland)에 의해 샘플링 된다. 샘플링된 가스는 분석장비인 GC-TCD (Model CP-4900, Varian, Netherland)에서 주요 가스인 이산화탄소, 메탄, 일산화탄소, 수소 등이 분석된다. 탄화물 베드층의 온도는 CM Bed층 내로 삽입된 열전대(k-type, ϕ 0.3 mm)와 데이터로거(Model: FLUKE 2625A HYDRA, Japan)에 의해 측정하였다.

2.2. 실험 및 해석

이산화탄소/메탄 분해 및 가스화 전환 특성을 파악하고자 실험적 연구를 진행하였으며, 각 변수별 실험범위는 Table 1과 같다. 기준조건(reference condition)은 각 실험 변수의 기준이 되는 조건이다.

실험 방법은 플라즈마 연소기로 태양연료 원료가스인 이산

Table 1. Test conditions and ranges of experiment parameters

Variables	O ₂ /C ratio	Total gas feed rate (L min ⁻¹)	CO ₂ /CH ₄ ratio
Test ranges	0.5 ~ 0.8	20 ~ 60	0.67 ~ 4
Reference conditions	0.8	40	0.67

화탄소-메탄과 플라즈마 부분산화 대상가스인 메탄과 공기가 일부가 각각 설정된 유량으로 혼합기에서 혼합되어 공급된다. 탄화물은 상용 활성탄(commercial activated carbon)이 사용되고 평균직경을 3 mm로 하여 일정량(175 g)을 탄화물 베드층에 넣고 실험의 재연성을 확보하기 위해 매 실험마다 교체하였다. 플라즈마 공급 전력은 0.75 kW로 일정하게 공급되었다.

생성가스는 흡입 펌프로 2 L min⁻¹으로 유량을 일정하게 유지하여 냉각기를 거쳐 수분 제거한 후 분석기기로 보내진다. 가스 분석은 GC가 이용되었으며, Molecular Sieve 5A capillary column (Model MS 5A, Varian, Netherland)에서 H₂, CO, O₂, N₂, CH₄를 분석하고 PoraPLOT Q capillary column (Model PPQ, Varian, Netherland)으로 CO₂, C₂H₄, C₂H₂, C₂H₆ 및 C₃H₈을 분석하였다.

플라즈마-탄화물 전환기(Plasma-CM Converter)의 성능을 표현하기 위해 이산화탄소 전환(CO₂ Conversion)과 메탄 전환(CH₄ Conversion)으로 나타내었으며, Equation (1)과 같이 계산되었다.

$$CO_2, CH_4 \text{ Conversion}(\%) = \frac{[PG]_{input} - [PG]_{output}}{[PG]_{input}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, [PG]_{input}는 주입된 이산화탄소, 메탄 유량(L min⁻¹), [PG]_{output}는 배출된 이산화탄소, 메탄 유량(L min⁻¹)이다.

3. 결과 및 고찰

온실가스 에너지 전환이용 기후기술(climate technology)의 개발을 위해 본 연구에서 새로이 제안된 플라즈마 산화분해-탄화물 가스화 전환에 의한 태양연료 생산에 대한 연구를 수행하였다(태양연료는 태양광이나 풍력발전에 의해 만들어진 전기를 이용하여 만들어진 화학에너지임; 본 연구에서는 태양연료 생산 전체 시스템 중 주요 구성요소인 전환장치 개발에 대해 진행된 연구임).

이산화탄소와 메탄 전환과 생성가스에 영향을 미치는 주요 인자인 O₂/C비, 가스 공급량, CO₂/CH₄ 공급비에 대해 변수별 연구를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.1. O₂/C비 영향(Effect of O₂/C molar ratio)

Figure 2는 CO₂/CH₄ = 0.67로 전체가스공급량은 40 L min⁻¹으로 하고, O₂/C비를 0.5 ~ 0.8까지 변화시켜 전환 및 가스생

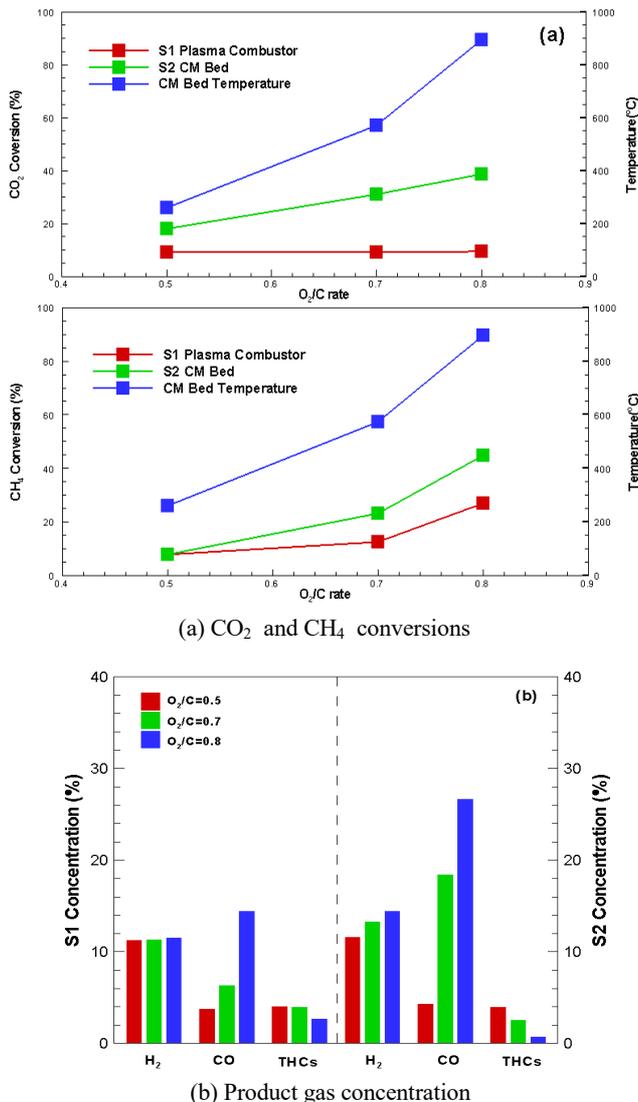


Figure 2. Effect of O₂/C ratio on CO₂ and CH₄ conversions and product gas concentration.

성 특성을 파악하였다.

Figure 2(a)는 플라즈마 연소기와 탄화물 베드층을 거친 이산화탄소와 메탄의 전환율과 탄화물 베드층 내 온도를 나타내었다.

이산화탄소와 메탄의 전환은 O₂/C비가 증가됨에 따라 증가되었으며 그 정도는 산소의 양이 증가될수록 컸다. 그리고 이산화탄소와 메탄이 플라즈마 버너(S1 plasma burner)서 일부 전환되고 그 후 탄화물 베드층(S2 CM bed)에서 생성된 가스가 2차 전환된 것을 알 수 있다.

플라즈마 연소(plasma assisted combustion)는 기존의 연소 방식에 비해 저온과 저공해의 안정된 희박 혼합기연소가 가능하다. 그리고 플라즈마 발생으로 인해 반응성이 우수한 원자, 이온, 전자 등이 다량 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 특성은 플라즈마 버너에서 유입되는 처리가스의 초희박 상태에서 연소가 가능하고 전환반응이 우수해 지므로 기존의 버너에서 부분산화 개질보다 더 우수한 특성을 가질 수 있다[16].

플라즈마 버너 후단부에 설치된 탄화물 베드층은 고체탄소(solid carbon)로 구성된 활성탄이 위치하고 있는데 이는 1차 생성가스 중에 잔류하고 있는 CO₂ 가스화와 CH₄의 개질이 이루어진다[17].

플라즈마 연소기에서는 메탄이 부분산화 개질(Equations (2))이 되고 온도가 높아지기 때문에 O₂/C비가 높아질수록 메탄 전환율이 높아졌다. 이때 이산화탄소도 개질(Equations (3))되지만 상대적으로 높은 에너지가 필요하기 때문에 메탄에 비해 전환율이 낮았다.



플라즈마 개질 생성가스는 플라즈마 연소에 의해 고온이 유지되어 탄화물 베드층을 가열하여 Equation (4)와 같은 탄소 가스화 반응(carbon gasification reaction)을 가능하게 하여 이산화탄소 전환이 증가되었다. 또한 탄화물 베드층에서 Equations (3)의 건식개질(dry reforming)이 추가적으로 진행되어 메탄전환이 1차 플라즈마 버너 개질보다 높은 값을 보였다[18].

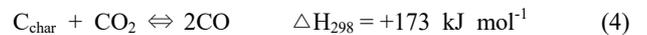


Figure 2(b)의 플라즈마 연소기와 탄화물 베드층을 거친 후 각각의 생성가스의 농도를 나타낸 것이다. 생성가스 중 THCs는 소량 생성된 탄소수소의 총합을 의미한다.

이미 언급된 바와 같이 플라즈마 버너에서는 부분산화(Equations (2))와 건식개질(Equations (3))에 의해 H₂와 CO가 주로 생성되고 소량의 탄화수소가 생성되었다. 그 후 탄화물 베드층에서는 탄소 가스화 반응(Equation (4))이 주로 일어났으며 O₂/C의 증가 시 탄화물 베드층 온도가 증가로 인해 반응이 활발하여 CO량이 급격히 증가되었다. 이와 함께 건식개질이 진행되었지만 가스량과 증가폭은 상대적으로 크지 않았

다. 탄화물 베드층의 생성가스는 플라즈마 버너에서 개질이 1차적으로 진행된 후 추가적으로 진행된 상태로 상대적으로 탄화물 베드층 후류 생성가스의 양이 큰 것을 알 수 있다.

3.2. 전체 가스공급량 영향(Effect of total gas feed rate)

Figure 3은 CO₂/CH₄=0.67로 O₂/C비를 0.8로 고정하고, 전체가스공급량을 20~60 L min⁻¹으로 변화시켰을 때 전환 및 생성가스 특성이다.

Figure 3은 총가스의 공급량을 각각 20, 40, 60 L min⁻¹으로 공급하였을 때 이산화탄소, 메탄전환과 생성가스의 특성을 나타낸 것이다. 이때 탄화물 베드층의 공간속도(VHSV: Volumetric hourly space velocity)는 각각 0.69, 1.37, 2.06 L g⁻¹h⁻¹이다.

Figure 3(a)는 이산화탄소와 메탄의 전환율을 나타내었다. 전체가스공급량이 높아질수록 상대적으로 메탄의 양이 증가

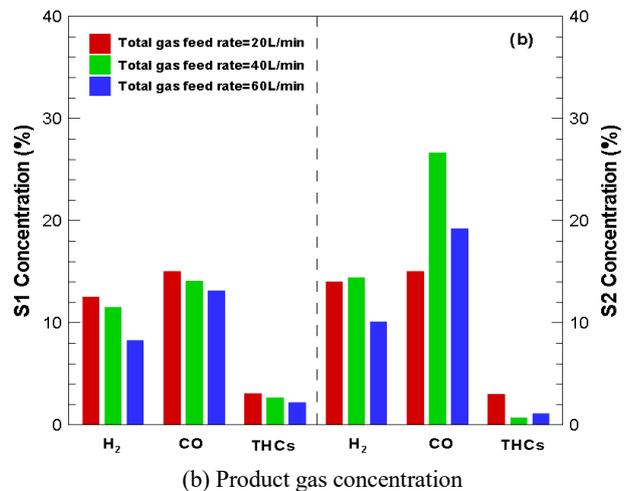
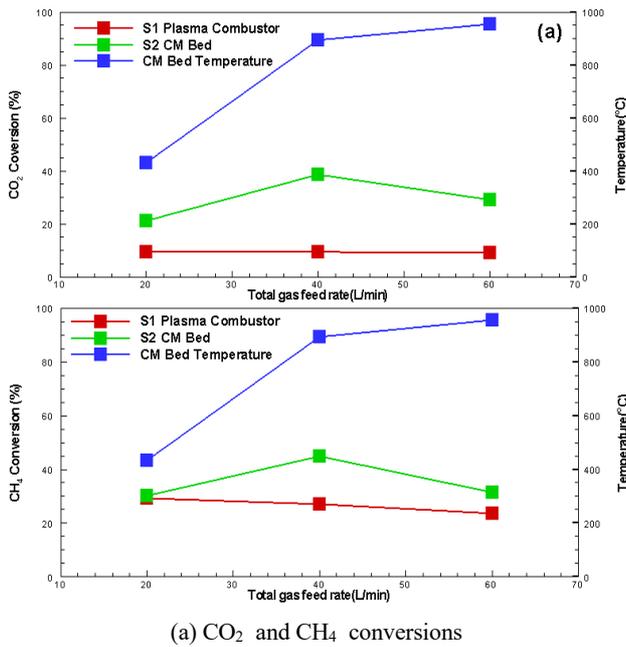


Figure 3. Effect of the amount of gas feed on CO₂ and CH₄ conversions and product gas concentration.

하여 부분산화결과 온도가 높아진다. 하지만 플라즈마 영역에서 체류시간 감소로 인해 메탄과 이산화탄소의 전환은 약간 감소하였으나 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 탄화물 베드층에서는 전체가스공급량(또는, 공간속도)가 증가됨에 따라 온도가 증가됨에도 불구하고 전체가스량이 40 L min⁻¹ (VHSV = 1.37)로 공급할 때 최대값을 가졌다. 이는 이산화탄소와 메탄 전환이 탄화물 베드층의 온도보다 공간속도가 더 중요하다는 것을 알 수 있다[19]. 이는 Figure 3(b)의 생성가스 농도에에 볼 수 있듯이 탄화물 베드층의 후류의 가스농도가 전체가스량이 40 L min⁻¹일 때 H₂, CO 상대적으로 큰 값을 보였다.

3.3. CO₂/CH₄ 공급비 영향(Effect of CO₂/CH₄ feed ratio)

Figure 4는 전체가스 공급량을 40 L min⁻¹으로 O₂/C비를 0.8

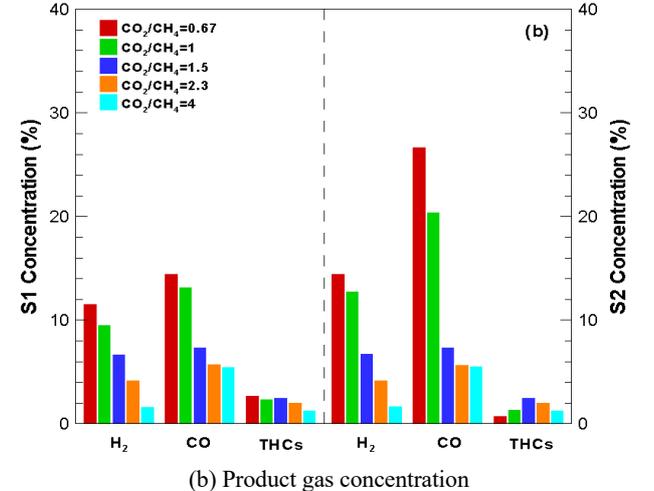
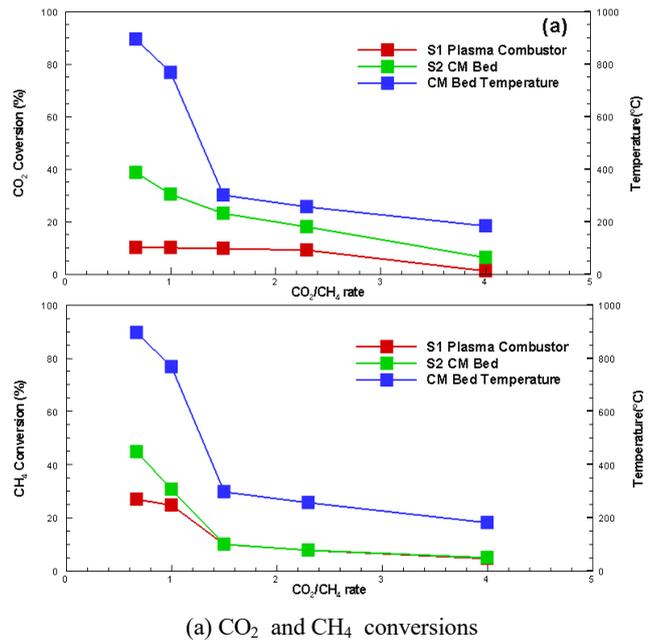


Figure 4. Effect of CO₂/CH₄ ratio and CH₄ conversions and product gas concentration.

로 고정하고, CO_2/CH_4 비를 0.67~4까지 변화시키면서 실험한 결과값을 나타냈다.

Figure 4(a)의 경우 온도가 CO_2/CH_4 비가 0.67일 때 894 °C에서 CO_2/CH_4 비가 4일 때 182 °C까지 낮아졌는데 이는 메탄의 양이 상대적으로 작아지면서 플라즈마 연소기에서 부분산화 시에 화염이 짧아져 탄화물의 온도가 낮아졌기 때문이다. 메탄 전환의 경우 플라즈마 연소기에서 27%에서 4.9%까지 감소하였고, 탄화물 베드층에서 44.7%에서 5%까지 낮아짐을 보였다. 상대적으로 온도가 낮았을 때 탄화물 베드층에서 메탄의 전환이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 이산화탄소 전환의 경우 플라즈마 연소기에서 9.9%에서 1%까지 낮아졌고, 탄화물 베드층에서 38%에서 6.1%까지 변화하였다. Figure 4(b) 생성가스 농도에서 볼 수 있듯이 CO_2/CH_4 비가 증가할 때 탄화물 베드층의 온도감소로 생성가스 농도가 크게 증가되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 플라즈마 산화분해-탄화물 가스화에 의해 바이오가스 전환에 관한 연구를 수행하여 이산화탄소, 메탄 전환 및 생성가스 특성을 규명하였다.

O_2/C 비가 높아질수록 탄화물 베드층의 온도가 높아짐을 보였고, 이에 따라 메탄과 이산화탄소의 전환이 증가하고 수소와 일산화탄소 생성가스의 양도 증가하였다. 전체가스공급량이 증가하였을 때 이산화탄소와 메탄의 전환은 플라즈마 버너에서 큰 변화를 보이지 않았으나 탄소층 베드에서는 특정 공간속소에서 최대값을 보였으며 생성가스의 양도 유사한 패턴을 보였다. CO_2/CH_4 비가 증가됨에 따라 상대적으로 연소에 관여하는 메탄의 공급량이 적어지게 되어 탄화물 베드층의 온도가 낮아지게 되어 메탄과 이산화탄소의 전환과 생성가스의 양이 급격히 감소하였다.

이상의 결과로 볼 때 O_2/C 비가 0.8이고 CO_2/CH_4 를 0.67로 하여 전체가스공급량을 40 L min^{-1} ($\text{VHSV} = 1.37$)로 공급할 경우 이산화탄소와 메탄 전환이 최대가 되어 생성가스 중 양질의 태양연료인 수소와 일산화탄소로의 전환이 최대를 보였다.

감사

이 논문은 2019학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- Goede, A. P. H., Bongers, W. A., Graswinckel, M. F., van de Sanden R. M. C. M., Leins, M., Kopecki, J., Schulz, A., and Walker, M., "Production of Solar Fuels by CO_2 Plasmolysis," *In EPJ web of conferences*, **79**, 01005 (2014).
- Pachauri, R. K., and Meyer, L. A., "Climate Change 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Geneva, Switzerland. IPCC., (2014).
- Tippayawrong, N., Chaiya, E., Thanompongchart, P., and Khongkrapan, P., "Sustainable Energy from Biogas Reforming in a Microwave Discharge Reactor," *Procedia Engineering*, **118**, 120-127 (2015).
- Snoeckx, R., and Bogaerts, A., "Plasma Technology - a Novel Solution for CO_2 conversion," *Chem. Soc. Rev.*, **46**(19), 5805-5863 (2017).
- Song, H. S., Kwon, S. J., Epling, W., and Crosiet, E., "Synthesis Gas Production via Partial Oxidation, CO_2 Reforming, and Oxidative CO_2 Reforming of CH_4 over a Ni/Mg-Ai Hydrotalcite-type Catalyst," *Clean Technol.*, **20**(2), 189-201 (2014).
- Hong, J. H., Ha H. J., and Han J. D., "The Promotion Effects on Partial Oxidation for Methane for Hydrogen Production over $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Catalysts," *Clean Technol.*, **18**(1), 95-101 (2012).
- Zhang, H., Li, X. D., Zhu, F. S., Cen, K. F., Du, C. M., and Tu, X., "Plasma Assisted Dry Reforming of Methanol for Clean Syngas Production and High-efficiency CO_2 conversion," *Chem. Eng. J.*, **310**, 144-199 (2017).
- Fridman, A., Nester, S., Kennedy, L. A., Saveliev, A., and Yardimci, O. M., "Gliding Arc Gas Discharge," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**(2), 211-231 (1999).
- Zhu, J. J., Gao, J. L., Li, Z. S., Ehn, A., Aldén, M., Larsson, A., and Kusano, Y., "Sustained Diffusive Alternating Current Gliding Arc Discharge in Atmospheric Pressure Air," *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 234102 (2014).
- Zhu, J. J., Ehn, A., Gao, J. L., Kong, C. D., Aldén, M., Salewski, M., Leipold, F., Kusano, Y., and Li, Z. S., "Translational, Rotational, Vibrational and Electron Temperatures of a Gliding arc Discharge," *Opt. Express.*, **25**(17), 20243-20257 (2017).
- Zhu, J. J., Gao, J. L., Ehn, A., Aldén, M., Li, Z. S., Mosecc, D., Kusano, Y., Salewski, M., Alpers, A., Gritzmann, P., and Schwenk, M., "Measurements of 3D Slip Velocities and Plasma Column Lengths of a Gliding arc Discharge," *Appl. Phys. Lett.*, **106**, 044101 (2015).
- Ju, Y., and Sun, W., "Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **48**, 21-83 (2015).
- Rostrupnielsen, J. R., and Hansen, J. H. B., " CO_2 -Reforming of Methane over Transition Metals," *J. Catal.*, **144**(1), 38-49 (1993).
- Zhang, Z., and Verykios, X. E., "Carbon Dioxide Reforming of Methane to Synthesis Gas over $\text{Ni}/\text{La}_2\text{O}_3$ Catalysts," *Appl. Catal. A-Gen.*, **138**(1), 109-133 (1996).
- Wu, J., Fang, Y., Wang, Y., and Zhang, D. K., "Combined Coal Gasification and Methane Reforming for Production of

- Syngas in a Fluidized-Bed Reactor,” *Energ. Fuel.*, **19**(2), 512-516 (2005).
16. Ju, Y., and Sun. W., “Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry,” *Prog. Energy Combst. Sci.*, **48**, 21-83 (2015).
17. Song, H. G., and Chun, Y. N., “Microwave Gasification and Oxy-steam Combustion the Biomass Char,” *J. Mater. Cycles Waste.*, **22**(1), 176-186 (2020).
18. Dominguez, A., Fernandez, Y., Fidalgo, B., Pis, J. J., and Menendez, J. A., “Biogas to Syngas by Microwave-Assisted Dry Reforming in the Presence of Char,” *Energ. Fuel.*, **21**, 2066-2071 (2007).
19. Chun, Y. N., and Song, H. G., “Mirowave-induced Carbon-CO₂ Gasification Conversion,” *Energy*, **190**, 1-9 (2020).