

글라이딩 아크 플라즈마 방전에 의한 이산화탄소 저감 특성

임문섭 · 김승호* · 전영남[†]

조선대학교 환경공학과, *광주광역시 보건환경연구원
(2015년 1월 30일 접수, 2015년 3월 5일 심사, 2015년 3월 10일 채택)

Characteristics of Carbon Dioxide Reduction in the Gliding Arc Plasma Discharge

Mun sup Lim, Seung Ho Kim*, and Young Nam Chun[†]

Department of Environmental Engineering, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea
*Health & Environment Research Institute of Gwangju, 149 Hwajeong-ro, Seo-gu, Gwangju 502-831, Korea
(Received January 30, 2015; Revised March 5, 2015; Accepted March 10, 2015)

초 록

이산화탄소 포집 및 활용(CCU)은 화석연료 시 배출되는 온실가스인 CO₂ 저감과 이용을 위해 잠재력을 가지고 있는 기술이다. 이산화탄소를 분해하기 위해 3상 글라이딩 아크 플라즈마-촉매 반응기를 설계 및 제작하였다. 이산화탄소 저감 특성 실험은 단일 이산화탄소 가스 공급 유량 변화와 이산화탄소와 메탄 혼합 주입에 따른 주입 전력 변화, 촉매 그리고 수증기 공급 변화에 대해 연구를 수행하였다. 단일 이산화탄소 공급 유량이 12 L/min에서 분해율이 7.9%, 에너지 분해 효율은 0.0013 L/min · W로 나타났다. 이산화탄소 분해됨에 따라 일산화탄소와 산소가 생성된다. 메탄과 이산화탄소 혼합가스를 주입 시 CH₄/CO₂ 비 1.29, 주입 전력 0.76 kW에서 이산화탄소 분해율과 메탄 전환율이 각각 37.8, 56.6%를 보였다. NiO/Al₂O₃ 촉매 설치 시, 플라즈마 단독 공정에 비해 이산화탄소 분해율 및 메탄 전환율이 11.5, 9.9% 증가한다. 수증기 공급으로 인한 이산화탄소 분해 효과에는 큰 영향을 주지 못한다.

Abstract

CCU (Carbon Capture & Utilization) has a potential technology for the reduction and usage of carbon dioxide which is greenhouse gas emitting from a fossil fuel burning. To decompose the carbon dioxide, a three phase gliding arc plasma-catalytic reactor was designed and manufactured. Experiments of carbon dioxide reduction was performed by varying the gas flow rate with feeding the CO₂ only as well as the input power, the catalyst type and steam supply with respect to the injection of the mixture of CO₂ and CH₄. The CO₂ decomposition rate was 7.9% and the energy efficiency was 0.0013 L/min · W at a CO₂ flow rate of 12 L/min only. Carbon monoxide and oxygen was generated in accordance with the destruction of carbon dioxide. When the injection ratio of CH₄/CO₂ reached 1.29, the CO₂ destruction and CH₄ conversion rates were 37.8% and 56.6% respectively at a power supply of 0.76 kW. During the installation of NiO/Al₂O₃ catalyst bed, the CO₂ destruction and CH₄ conversion rates were 11.5% and 9.9% respectively. The steam supply parameter do not have any significant effects on the carbon dioxide decomposition.

Keywords: Carbon dioxide, Plasma, Catalyst, Syngas, Greenhouse gas

1. 서 론

인류의 주된 에너지원은 화석연료이고, 화석연료를 에너지로 전환하기 위해서는 반드시 연소과정을 필요하므로, 이 과정에서 이산화탄소의 발생은 필수적으로 발생하게 된다. 산업사회의 발달로 화석연료의 사용이 크게 늘면서 대기 중으로 배출되는 이산화탄소의 양도 증가하여 지구온난화를 더욱 심화시키는 요인으로 작용하고 있어, 근본

적으로 온실가스 배출을 줄여야 할 필요성이 더욱 시급해지고 있다. 온실가스 배출량 중 약 80%를 차지하고 있는 이산화탄소를 처리하는 방법은 CCS (Carbon Capture Storage) 방법과 CCU (Carbon Capture Utilization) 방법이 있다. CCS는 이산화탄소를 포집하여 저장하는 방식으로 다양한 기술들이 제시되고 있으나, 저장장소 제한 및 선정에 어려움이 있다. 그러나 최근 들어 막대한 탄소 자원의 원천이 될 수 있는 이산화탄소를 유용한 자원으로서의 활용이라는 측면에서 CCU 방법에 대한 기술에 관심이 점차 증가되고 있다. 이산화탄소 저감으로 온실가스 감축을 통해 지구 온난화 문제를 해결함과 동시에, 지속 가능한 탄소원의 재활용이란 측면에서 자원고갈 문제의 대안으로 다양한 CCU 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 아울러 전환 후 고부가가치 탄소화합물의 생성에 따른 추가적인 이익까지도 기대할 수 있기 때문에 그 가능성이 서서히 인정되고 있는 추세이다[1].

[†] Corresponding Author: Chosun University,
Department of Environmental Engineering, 309 Pilmun-daero, Dong-gu,
Gwangju 501-759, Korea
Tel: +82-62-230-7156 e-mail: ynchun@chosun.ac.kr

Table 1. Test Conditions and Ranges of Experiment Parameters

Variables	CO ₂ feed rate (L/min)	Input power (kW)	Catalyst	Steam feed rate (L/min)
Ranges	5~14	0.56~0.76	6 type	0~1
Reference conditions	12	0.72	NiO/Al ₂ O ₃	0

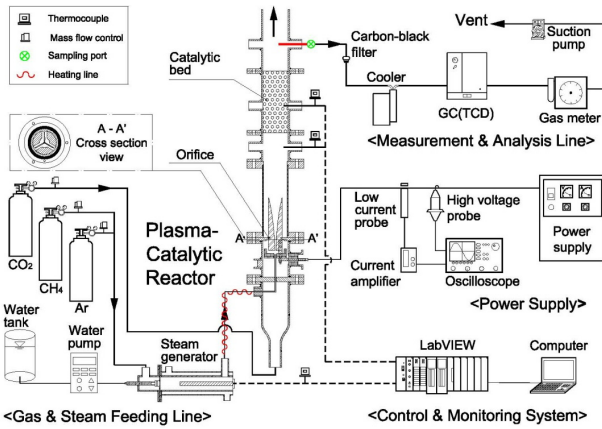


Figure 1. Schematic diagram of experimental equipment.

이산화탄소 이용 기술 중 플라즈마 기술은 이산화탄소 분해가 잘 되고 경제적인 기술로 제시되고 있다. 플라즈마 형태에 따라 코로나 방전[2], 유전체 방전[3], 글라이딩 아크 방전[4], 마이크로파 방전[5] 등의 연구가 진행되고 있다. 상기의 플라즈마 기술을 이용한 연구는 이산화탄소의 높은 전환율을 달성하였지만, 상대적으로 에너지 효율이 낮으며, 작은 유량 범위에서 실험실적 연구가 진행되고 있다.

플라즈마 아크 방전 기술 중 글라이딩 아크 플라즈마 방전은 전극 사이에 고속으로 가스를 주입하여 전극 사이에 아크 방전을 주기적으로 형성하는 것으로, 고온과 저온 플라즈마 특성을 동시에 가지고 있다. 글라이딩 아크 방전은 높은 플라즈마 밀도와 다른 저온 플라즈마와 달리 비교적 높은 전자온도를 발생시킬 수 있기 때문에 안정한 물질의 화학반응을 유도하기에 용이하며, 강한 결합력을 가진 이산화탄소와 같은 난분해성 물질의 분해에 효과적이고 저비용 중대형 용량의 개발이 가능하다[6].

본 연구에서는 이산화탄소를 효율적으로 분해할 수 있는 글라이딩 아크 플라즈마-촉매 반응기를 설계·제작하였다[7]. 단일 이산화탄소 주입량, 공급 전력, 촉매, 수증기 공급량에 대한 변수별 실험을 통해 이산화탄소 분해 특성과 에너지 효율을 파악하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

이산화탄소 분해 특성 실험을 위한 플라즈마-촉매 반응기 실험장치 구성도를 Figure 1에 나타내었다. 이다. 실험장치는 플라즈마-촉매 반응기, 전원공급장치, 가스 및 스팀 공급라인, 제어 및 모니터링 시스템, 측정 및 분석라인으로 구성되어 있다.

플라즈마-촉매 반응기는 플라즈마 반응기와 촉매 베드로 구성되어 있다. 플라즈마 반응기는 3상 글라이딩 아크 플라즈마가 발생하는 형식으로, 칼날형태(폭 12 mm, 높이 130 mm, 두께 2 mm)로 된 3개 전극을 지지체에 각각 120°로 배치하였으며, 전극 간격은 3 mm로 유지하였다. 지지체는 전극과의 절연을 위해 세라믹으로 제작되었다. 반응

기는 석영 재질로 된 관(직경 55 mm, 길이 200 mm)으로 제작하였다. 가스분사 노즐(내경 1.6 mm)은 전극상부 중심에 위치한 상태에서 지지체에 고정되었다[8]. 반응기 상부로부터 60 mm 지점에 볼 형태의 촉매를 넣을 수 있는 베드(직경 60 mm, 길이 130 mm)를 설치하였다. 전극 하단으로부터 20 mm 지점에 플라즈마 방전 간섭을 피하여 오리피스를 설치하였다.

전원공급장치는 전원공급기(Model UAP-15K1A, Unicon tech., Korea)와 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. 전원공급기는 3상 교류를 최대 15 kW(전압 : 15 kV, 교류전류 : 1 A)까지 3상 글라이딩 아크 플라즈마로 공급할 수 있다.

가스 및 스팀 공급라인에서 공급 가스는 이산화탄소 실린더와 메탄이 주성분이 압축천연가스(CNG, CH₄ 88.9%, C₂H₆ 8.9%, C₃H₈ 1.3%, 기타 0.9%) 실린더에서 각각 공급된다. 이때 두 가스는 MFC에 의해 유량이 조절된다. 스팀 공급은 소량 정량 물펌프(Model STEPDOS03, KNF, Switzerland)에 의해 스팀 발생기로 공급되어 스팀이 만들어져 메탄과 혼합되어 공급된다.

제어 및 모니터링 장치는 LabVIEW (Model LabVIEW 8.6, National Instrument, USA)를 이용하여, 가스유량 제어용 MFC, 물 공급용 물펌프, 스팀 발생용 히터에 연결되어 가스 및 물 유량 그리고 온도가 제어된다. 그리고 이들 값들과 반응기 내 온도가 연속적으로 모니터링이 된다. 측정 및 분석라인은 가스미터(Model DC-2A, Sinagawa, Japan), 흡입펌프(Model N-820.3FT 18, KNF, Switzerland), 수분응축을 위한 냉각장치로 구성된다. 그리고 가스 분석을 실시간으로 진행하기 위해 GC-TCD (Model CP-4900, Varian, Netherland)를 사용하여 분석하였다.

2.2. 실험 및 분석방법

이산화탄소 저감 특성을 파악하기 위해 변수 실험을 진행하였으며, 각 변수별 실험범위와 기준조건을 Table 1에 나타내었다. 실험 방법은 다량의 이산화탄소를 글라이딩 아크 플라즈마 반응기로 공급하기 위하여 반응기 하부에서 공급하며, 메탄과 수증기는 수증기 발생 장치에서 혼합 후 플라즈마 반응기 중심에 위치한 노즐을 통해 공급하였다. 플라즈마 공급 전력은 0.72 kW로 고정된 뒤, 안정화 시킨 후 Table 1에 제시된 변수별 조건에 따라 실험을 진행하였다.

분해 생성가스는 흡입 펌프로 2 L/min으로 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.

본 실험에 사용된 촉매는 습식함침법으로 제조하였다. 지지체로 알루미나(Al₂O₃)를 사용하였으며, Co(NO₃)₂ · 6H₂O, Ce(NO₃)₃ · 6H₂O, Cu(NO₃)₂ · 3H₂O 시약을 사용하여 Co, Ce, Cu의 중량비에 따라서 함

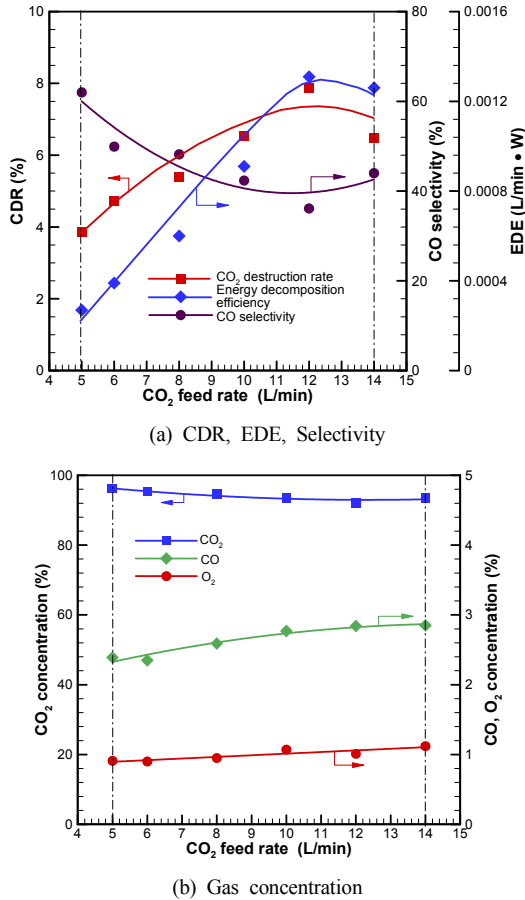


Figure 2. Effect of CO₂ feed rate on CDR, EDE, CO selectivity and gas concentration.

침하여 촉매를 제조하였다. 시약을 증류수에 녹인 후, 지지체에 잘 함침되도록 2 h 동안 충분히 교반을 하였다. 100 °C 12~24 h 건조시키고, 500~700 °C에서 4~6 h 소성시켜 제조한다.

2.3. 데이터 분석

플라즈마-촉매 반응기의 성능 및 효율을 표현하기 위해 이산화탄소 분해율(CDR; Carbon dioxide destruction rate), 메탄 전환율(MCR; Methane conversion rate), 에너지 분해 효율(EDE; Energy destruction efficiency), 일산화탄소 및 수소 선택도를 나타내었으며, 그 식들은 식 (1)~(4)와 같이 계산되었다.

이산화탄소 분해율 및 메탄 전환율은 각 가스의 성분이 얼마나 다른 성분으로 분해 또는 전환되는가를 나타내는 것으로, 다음 식 (1)로 나타냈다.

$$CDR(\%) \text{ or } MCR(\%) = \frac{[M]_{input} - [M]_{output}}{[M]_{input}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $[M]_{input}$ 는 주입된 이산화탄소, 메탄 유량(L/min), $[M]_{output}$ 는 배출된 이산화탄소, 메탄 유량(L/min)이다.

에너지 분해 효율은 글라이딩 아크 플라즈마로 공급되는 전기 에너지 대비 분해된 이산화탄소 양으로서 다음 식 (2)와 같다[9].

$$EDE(L/min \cdot W) = \frac{[CO_2]_{destroyed}}{IEP_{energy}} \quad (2)$$

여기서, $[CO_2]_{destroyed}(=[M]_{input}-[M]_{output})$ 는 분해된 이산화탄소 유량(L/min), IEP_{energy} 는 공급 전력(W)을 나타낸다.

일산화탄소 선택도는 전환된 가스의 이산화탄소 양에 대한 합성가스 중 일산화탄소 양으로 식 (3)와 같다.

$$CO \text{ selectivity}(\%) = \frac{[CO]_{produced}}{[CH_4]_{converted} + [CO_2]_{destroyed}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, $[CO]_{produced}$ 는 생성가스 중 일산화탄소 유량(L/min), $[CH_4]_{converted}$ 는 전환된 메탄 유량(L/min), 그리고 $[CO_2]_{destroyed}$ 는 분해된 이산화탄소 유량(L/min)을 나타낸다.

수소 선택도는 전환된 가스의 수소 양에 대한 합성가스 중 수소 양의 비로 식 (4)와 같다.

$$H_2 \text{ selectivity}(\%) = \frac{[H_2]_{produced}}{2 \times \text{mole of } [CH_4]_{converted}} \times 100 \quad (4)$$

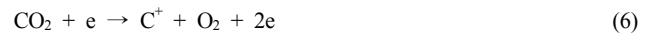
여기서, $[H_2]_{produced}$ 는 생성가스 중 수소 유량(L/min), $[CH_4]_{converted}$ 는 전환된 메탄 유량(L/min)을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단일 이산화탄소 주입량

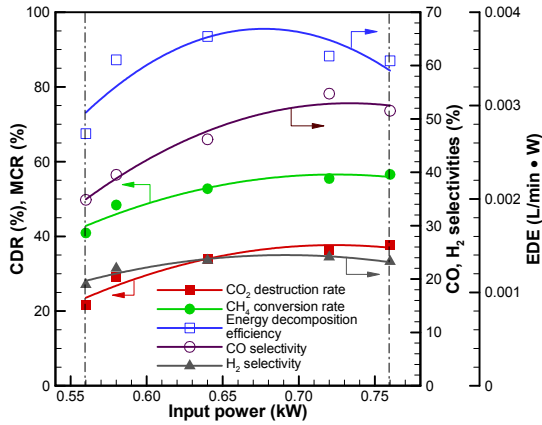
글라이딩 아크 플라즈마 이산화탄소만을 공급하였을 때의 이산화탄소 분해에 대한 결과를 Figure 2에 나타내었다. 이산화탄소 주입량을 5~14 L/min으로 변화를 주었으며, 플라즈마 공급 전력은 0.72 kW로 고정하였고, 반응기 출구 온도 분포는 283~306 °C이었다.

Figure 2(a)는 이산화탄소 분해율과 에너지 분해 효율을 나타내었다. 이산화탄소 분해율은 이산화탄소 주입량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하다 12 L/min에서 최대 7.9%를 나타낸 후 감소하였다. 이는 가스 주입량이 증가함에 따라 플라즈마 방전영역이 증가되어 이산화탄소 분해에 영향을 미치는 전자, 라디칼, 이온 등의 증가로 분해가 증가하기 때문이며, 식 (5)와 식 (6)과 같이 이산화탄소를 분해하는데 크게 기여한다. 그러나 주입량이 12 L/min 이상에서는 이산화탄소가 플라즈마 방전영역 내의 체류시간의 감소로 탄소-산소 결합을 분해하기 위해 충분한 에너지를 갖는 전자나 높은 에너지를 갖는 화학종과의 접촉할 시간이 짧아지므로 이산화탄소 분해율이 감소하였다.

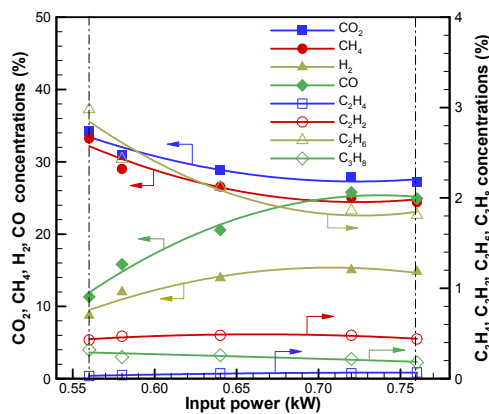


에너지 분해 효율은 공급전력이 고정된 상태에서 분해된 이산화탄소의 양을 의미하며, 이산화탄소 주입유량이 12 L/min에서 최대값인 0.0013 L/min · W를 나타냈다. 이산화탄소 분해율의 변화와 유사한 패턴을 보였다. 이전 연구에서 고주파 플라즈마 방전, 코로나 방전, 유전체 방전의 효율을 비교한 결과 상대적으로 높게 나타났다[9].

Figure 2(b)는 이산화탄소 분해에 의해 생성된 가스를 나타내었다. 일산화탄소와 산소가 생성되었으며, 그 외 미 분해된 이산화탄소가



(a) CDR, MCR, EDE, Selectivity



(b) Gas concentration

Figure 3. Effect of input power on CDR, MCR, EDE, H₂ selectivity, CO selectivity and gas concentration.

측정되었다. 이산화탄소 분해율이 큰 값을 나타내는 부근에서 이산화탄소의 농도가 상대적으로 작은 값을 가지며, 일산화탄소는 큰 값을 보인다. 이는 이산화탄소가 플라즈마 반응장 내에서 전자에 의해 분해되어 일산화탄소와 산소로 생성되었기 때문이다.

3.2. 주입 전력 영향

플라즈마 주입 전력변화에 대한 이산화탄소 분해특성을 Figure 3에 나타내었다. 선행된 연구를 통해 메탄 공급시 이산화탄소 분해율이 증감됨을 확인하였으며[7], 주입 전력에 따른 최대 이산화탄소 분해율을 파악하기 위해 CH₄/CO₂ 비는 1.29로 설정하기 위해 메탄을 공급하고, 주입 전력 0.56~0.76 kW 범위에서 실험을 진행하였다.

주입 전력이 증가할수록 이산화탄소 분해율 및 메탄 전환율이 증가하여, 본 연구의 최대 주입 전력 0.76 kW에서 이산화탄소 분해율과 메탄 전환율이 각각 37.8, 56.6%로 나타났으며, Gallon 등[9]의 연구에서와 같이 주입 전력을 증가하면 분해율이 증감됨을 알 수 있었다. 반응기 출구 온도 분포는 245~326 °C이었다. 높은 전력을 주입하게 되면 플라즈마 방전 영역에서 가스온도가 높아지며, 전기장의 전자 밀도를 증가시킨다. 또한 O 및 OH와 같은 더 많은 활성종을 생성하고, 메틸 라디칼로 메탄을 더 많이 해리시킨다.

일산화탄소와 수소 선택도는 전력 증가에 따라 증가되었다. 증가하는 입력 전력은 일산화탄소, 수소의 합성 가스의 생산을 증가한 반면

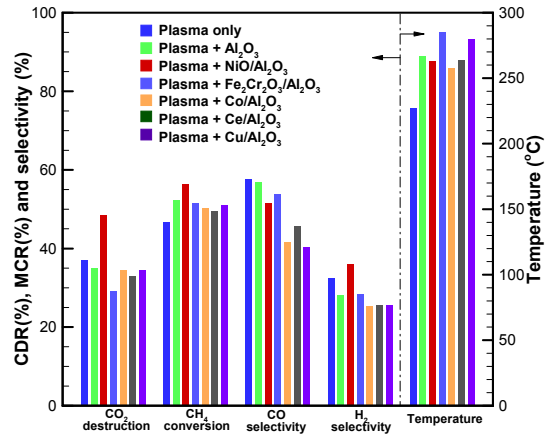


Figure 4. Effect of catalyst on CDR, MCR, H₂ selectivity, CO selectivity and temperature.

탄화수소(C₂H₂, C₂H₆)의 수율이 감소함을 알 수 있었다. 에너지 분해 효율은 0.64 kW에서 최대값 0.0037 L/min · W로 나타났으며, 이는 이산화탄소 제거 시 주입 전력값을 고려해야 할 것이다.

3.3. 촉매 영향

이산화탄소의 분해율을 향상시키기 위해 플라즈마 반응기에 촉매 베드를 추가 설치하였다. 촉매 베드에는 보조 열원을 공급하지 않고, 플라즈마 반응열에 의해서만 예열을 하여, 이산화탄소 분해 특성 결과를 Figure 4에 나타내었다.

사용된 촉매는 구형 2~4 mm의 알루미늄(Al₂O₃)에 니켈(NiO-6 wt%) 및 철(Fe₂O₃-Cr₂O₃; 85 : 15%) 촉매가 담지된 상용 촉매와 제조한 코발트(Co-5 wt%), 세륨(Ce-5 wt%), 구리(Cu-5 wt%) 촉매를 대상으로 실험을 진행하였다.

실험 결과 NiO/Al₂O₃ 촉매에서는 이산화탄소 분해 효율이 37.1%에서 48.6%로 증가하였으며, NiO/Al₂O₃ 촉매를 제외한 다른 촉매에서는 플라즈마 단독으로 진행한 실험 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 일반적으로 개질 촉매는 650 °C 이상의 촉매 활성 온도가 필요하지만, 본 연구에는 촉매 베드에 플라즈마 반응열만 공급하였으므로, 반응기 출구 온도 범위 290~345 °C, 촉매 베드 온도 범위가 263~285 °C를 형성하여, 촉매의 활성화가 되지 않는 것으로 보여진다. 하지만 6 wt% NiO/Al₂O₃ 촉매의 경우에는 이산화탄소 분해율 뿐만 아니라, 메탄 전환율과 일산화탄소 및 수소 선택도가 각각 56.5, 51.6, 36.0%를 나타내어, 낮은 온도에서도 NiO 촉매의 경우 활성화가 이뤄짐을 알 수 있었다. Pietruszka 등[10]의 연구에서 온도가 촉매 및 비평형 플라즈마의 조합하는 경우 그 자체가 활성화되기 위해 촉매 물질에 대해 충분히 온도가 높지 않은 경우도 전환율 및 선택도가 증가됨을 알 수 있었다. NiO/Al₂O₃ 촉매에서 에너지 분해 효율이 0.0046 L/min · W를 나타내었다.

3.4. 수증기 공급 영향

이산화탄소 분해를 위한 수증기의 영향을 파악하기 위해 플라즈마 단독일 때와 플라즈마-촉매 반응기일 때, 수증기 1 L/min를 주입하였으며, 주입전력이 0.72 kW로 고정하였다. 수증기 영향에 대한 실험 결과를 Figure 5에 나타내어, 이산화탄소 분해율, 메탄 전환율, 일산화탄소 및 수소 선택도와 에너지 분해 효율을 비교하였다.

이산화탄소 분해율은 수증기를 주입했을 때 약간 증가하였으며, 이

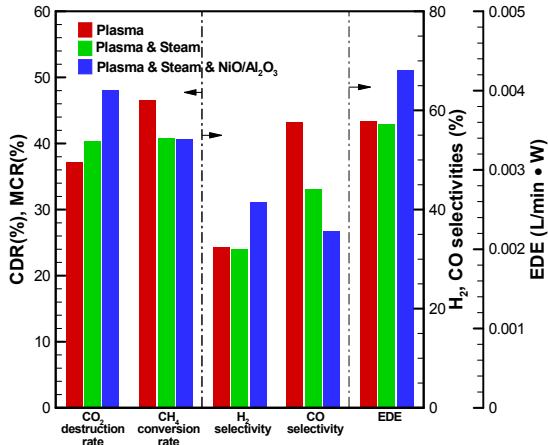


Figure 5. Effect of input steam on CDR, MCR, H₂ selectivity, CO selectivity and EDE.

는 수증기에 의한 카본 산화 반응에 의해 이미 생성된 카본을 산소에 의해 이산화탄소로 재전환을 억제하기 때문이다. 수증기를 주입하였을 때, 메탄 전환율은 감소함을 보이는데, 이는 이산화탄소 메탄 개질 반응(식 7)과 수증기 개질 반응(식 8)이 동시에 진행되는데, 상대적으로 이산화탄소 메탄 개질 반응이 수증기 개질 반응에 비해 에너지 엔탈피가 높아 상대적으로 메탄 전환율이 감소된다.



에너지 분해 효율은 상대적으로 감소하였으며, 플라즈마 반응기로 수증기를 가열하여 주입됨으로 이에 따른 에너지 소모가 크기 때문이다. 수증기를 공급하는 경우 일산화탄소 선택도는 크게 감소하였고, 수소 선택도는 약간 감소함을 보였다. 수증기를 공급한 경우 첨가된 수증기가 플라즈마 상태를 불안정하게 만들어 플라즈마 방전 에너지 유지를 어렵게 하기 때문이다.

수증기 주입된 NiO/Al₂O₃ 촉매의 이산화탄소 분해율, 메탄 전환율, 일산화탄소 및 수소 선택도, 에너지 분해 효율은 각각 48, 40.1, 35.7, 41.6%, 0.0043 L/min · W를 나타내었는데, 수증기를 주입하지 않는 촉매 반응의 경우 보다 전체적으로 결과값이 낮게 나와, 수증기는 이산화탄소 분해에 큰 영향을 주지 못하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 온실가스인 이산화탄소를 분해하기 위한 목적으로 플라즈마-촉매 반응기를 적용하여 단일 이산화탄소 양, 주입 전력, 촉

매, 수증기에 따른 이산화탄소 분해 특성을 파악하였다.

단일 이산화탄소에서는 유량이 증가할수록 이산화탄소 분해율은 증가하였으며, 12 L/min에서 이산화탄소 분해율은 7.9%로 최대를 보였으며, 이산화탄소가 분해됨에 따라 일산화탄소와 산소 농도는 다소 증가하였다.

주입 전력이 증가할수록 전기장의 전자밀도와 활성종의 증가로 이산화탄소 분해율과 메탄 전환율은 증가하였으며, 주입 전력 0.76 kW에서 이산화탄소 분해율과 메탄 전환율은 각각 37.8, 56.6%을 나타내었다.

촉매를 사용한 플라즈마-촉매 반응기에서 이산화탄소 분해율은 촉매가 없는 플라즈마 반응기 보다 10% 정도 증가됨을 보였으며, 수증기 공급으로 인한 이산화탄소 분해 효과는 큰 영향을 주지 못하였다.

References

- L. Lia, N. Zhaob, W. Weib, and Y. Sun, A review of research progress on CO₂ capture, storage, and utilization in Chinese Academy of Sciences, *Fuel*, **108**, 112-130 (2013).
- Y. Wen and X. Jiang, Decomposition of CO₂ Using Pulsed Corona Discharges Combined with Catalyst, *Plasma Chem. Plasma P*, **21**(4), 665-678 (2001).
- Z. Yuhan, Study on CO₂ reforming of CH₄ by dielectric barrier discharge, in *Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, March 28-29, Shenzhen, Guangdong, 874-877 (2011).
- A. D. Indarto, Kinetic of CO₂ Reduction by Gliding Arc Plasma, *Asian J. Water Environ*, **4**(1), 191-194 (2007).
- T. Sakurai and A. Yokoyama, Decompositions of Carbon Dioxide, Carbon Monoxide and Gaseous Water by Microwave Discharge, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**(9), 814-820 (2000).
- L. Lie, W. B. Bin, Y. Chi, and W. U. Chengkang, Characteristics of Gliding Arc Discharge Plasma, *Plasma Sci. Technol.*, **8**(6), 653-655 (2006).
- S. C. Kim, M. S. Lim, and Y. N. Chun, Reduction characteristics of carbon dioxide using a plasmatron, *Plasma Chem. Plasma P*, **34**, 125-143 (2014).
- Y. N. Chun, S. C. Kim, and C. Yoshikawa, Decomposition of benzene as a surrogate tar in a gliding Arc plasma. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, **32**(3), 837-845 (2013).
- H. J. Gallon, X. Tu, and J. C. Whitehead, Effects of Reactor Packing Materials on H₂ Production by CO₂ Reforming of CH₄ in a Dielectric Barrier Discharge, *Plasma Processes Polym.*, **9**, 90-97 (2012).
- B. Pietruszka and M. Heintze, Methane conversion at low temperature: the combined application of catalysis Land nonequilibrium plasma, *Catal. Today*, **90**, 151-158 (2004).