



마이크로웨이브 가열 바이오 활성탄 수용체 이산화탄소 에너지 전환

송희관* · 김은혁* · 전영남**†

*조선대학교 환경공학과 박사과정 학생, **조선대학교 환경공학과 교수

Energy Conversion of Carbon Dioxide by Microwave Heating with a Bio-Activated Carbon Receptor

Song, Hee Gaen* · Kim, Eun Hyuk* and Chun, Young Nam**†

*Ph.D course, Department of Environmental Engineering, Chosun University
**Prof, PHD & DEng, Department of Environmental Engineering, Chosun University

ABSTRACT

In order to address the energy storage and greenhouse gas problem, experiments were carried out on a laboratory scale to understand the characteristics of microwave-heating CO₂ gasification using a carbon receptor and the possibility of conversion to chemical energy. For this purpose, the conversion of CO₂ and the characteristics of the generated gas were investigated using coconut shell activated carbon. In the case of microwave-heating conversion using a carbon receptor, carbon dioxide could be converted to carbon monoxide fuel by gasification reforming using fixed carbon in the carbon receptor. In this study, the effects of gasification temperature, gas residence time, and process gas temperature on carbon dioxide gasification were investigated and the optimal conditions established for each factor.

Key words: Microwave, Activated Carbon Receptor, CO₂ Conversion, Product Gas, Gasification

1. 서 론

현재 세계는 인구증가, 산업발전 등으로 인한 에너지 수요는 증가하나 화석연료 고갈과 오염물질 배출로 인한 환경문제가 발생하고 있다. 해결책으로 재생 가능한 에너지의 개발을 필요로 하고 있다.

에너지 산업과 재생 가능한 에너지의 개발에 있어서 에너지 저장은 중요 관심사 중 하나이다. 기존의 기술은 휴대나 이동성을 확보하기 위해 전기나 자동차 산업 (휴대폰, 컴퓨터, 자동차 등)에서 에너지 저장이 이용되었다. 그러나 대부분의 재생 에너지 생산설비가 고정설비임에도 불구하고 대량 생산 시에 재생 에너지 생성 특성으로 인해 에너지 저장의 적용이 필요하므로 다양한 연구가 진행되고 있다. (E.C.t.E.S Committee, 2011)

재생에너지는 에너지 생산에 있어 단속적이라는 중요한

문제를 가지고 있다. (Daud et al., 2013) 주요 재생에너지의 하나인 태양과 풍력에너지로 에너지를 생산할 경우 낮과 밤 그리고 지형적요인으로 인한 에너지 생산이 단속적이고 요구되는 시간대와 항상 일치하지 못한다. 이러한 요인으로 지속적으로 에너지를 공급하지 못한다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 요인으로 인해 재생에너지는 화석에너지의 보조에너지원으로 사용되어진다. 문제의 해결책으로 최근 화학에너지로 전환하여 저장하는 기술에 대한 관심이 증가되고 있다. 이 기술의 근본은 가역반응을 이용하는 것이다. 첫번째 단계에서는 에너지 저장을 위해 흡열반응에 의해 에너지를 소모하고, 두번째 단계에서 에너지를 사용하는 발열반응이 진행된다. (Verfondern and Lensa, 2005)

지금까지 앞서 언급된 화학에너지 저장 불균일촉매반응 (heterogeneous catalytic reaction)은 수소와 일산화탄소를 생성하는 메탄의 이산화탄소 개질이다. (Jing et al., 2004) 그러

† **Corresponding author:** yunchun@chosun.ac.kr (Department of Environmental Engineering, Chosun University, #309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju, 61452, Rep. of Korea, Tel. +82-62-230-7156)

Received June 22, 2019 / Revised November 4, 2019 / Accepted November 25, 2019

나 개질 시 촉매활성의 저하로 인해 산업규모 (industrial field scale)의 대량생산 과정에서 운전의 안정성과 수율 (yield) 증대의 어려움이 있다. 또한, 에너지 이용 시에 발열과정에서 전환기술 문제에 대한 극복 요소기술들이 있어 에너지 저장하고 이용하는 기술에 대한 대체 기술이 필요하다.

기존에 사용되어진 화석에너지의 저장문제를 해결할 수 있는 대체방법으로 탄소물질 (carbon materials)의 가스화가 있다. 이는 탄화물 (carbonaceous material)의 가스화를 통하여 고정탄소 에너지 활용하며 이전에 가스화에 의한 생성가스의 연소에 사용된 에너지 회복이 가능하다. 여러 가스화 가스 (steam, O₂, CO₂) 중 이산화탄소는 생성가스 연소 생성물로 가스화 과정에서 재사용이 가능하여 가장 좋은 선택이다.

재생에너지는 전기와 열이 생산되는데 이를 가스화과정에 사용할 수 있다. 특히, 재생에너지의 경우 대부분을 전기에너지로 생산하는데 마이크로웨이브 파워 전원으로 마이크로웨이브 가스전환장치에 적용하여 사용할 수 있다.

일반적으로 탄소물질은 좋은 마이크로웨이브 흡수체로 마이크로웨이브 가열 가스화에 사용되어질 수 있다. (Menéndez et al., 2010) 게다가 마이크로웨이브 가열은 불균일촉매반응 (heterogeneous catalytic reactions)을 향상시키기 위해 유효한 기술임이 이미 입증되었다. 왜냐하면 이는 NO_x 저감 (Kong and Cha, 1996), SO₂저감 (Cha and Kim, 2001), 메탄의 CO₂ 개질 (Jing et al., 2004)의 이상과정 (heterogeneous process)에서 전환율 (conversion)과 선택도 (selectivity)가 증가될 수 있기 때문이다. 이 결과는 마이크로웨이브 가열이 진행되는 동안 탄소흡수체에 마이크로플라즈마 (microplasma)가 생성됨에 따라 가상촉매효과 (pseudo-catalytic effect)로 인한 것이다. (Menéndez et al., 2011)

본 연구에서는 마이크로웨이브 탄소 수용체의 이산화탄소 가스화에 대한 진행과정에 대해 심도 깊게 규명하였다. 그리고 주요 영향변수인 개질온도, 탄소 수용체, 가스체류시간, 공급가스 온도에 대해 전환특성을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

사용된 장치는 Fig. 1.과 같다. 장치는 마이크로웨이브 가스 전환기 (microwave gas convertor; MGC), 가스공급라인 (gas feed line), 제어/모니터링장치 (control & monitoring equipment), 샘플링/분석라인 (sampling & analysis line)으로 구성하였다.

멀티모드 캐비티 오븐 (multimode-microwave cavity oven)을 사용하는 마이크로웨이브 가스 전환기 안쪽에 석영관 (직

경 40 mm, 길이 320 mm) 탄소 수용체 개질기 (carbon receptor reformer: CRR)를 수직으로 설치하였다. 개질기 온도 설정은 1,000°C까지 설정 가능하며 마이크로웨이브 수용체 중앙에 열전대 (thermocouple: k-type, 직경 2 mm)와 연결하여 제어하였다. 온도 데이터를 데이터 로거 (data logger: Model Hydra data logger 2625A, Fluke, USA)를 사용하여 탄소 수용체 내부 온도를 연속적으로 확인하였다. 개질기 내부에서 샘플 바스켓 (sample basket)을 별도 상하 가변 되도록 제작하여 탄소 수용체 샘플의 위치 설정 및 반응기로 유입 및 배출이 가능하도록 하였다. 가스공급라인은 개질가스인 이산화탄소 (CO₂)와 운반가스인 질소 (N₂) 보배에서 가스의 유량조절을 위한 MFC (BRONKHORST, F201AC-FAC-22-V, Netherlands)를 거쳐 가열 라인을 통해 가스 온도를 제어하여 개질기로 공급되었다. 개질 실험은 이산화탄소 (CO₂) 단일 가스로 진행되었으며, 운반가스인 질소 (N₂)는 이산화탄소 (CO₂) 개질 이후 탄화물의 고온산화 방지하며 온도를 내리기 위하여 사용되었다. 제어/모니터링장치는 LabVIEW (Model LabVIEW 8.6, National Instrument, USA)를 이용하여 가스유량 제어와 온도를 연속적으로 모니터링을 하였다. 샘플링/분석라인은 수분 및 검댕 제거를 위해 염화칼슘과 유리섬유필터 (Glass wool filter)를 주입한 임핀저와 냉각기 (ECS-30SS, Eyela Co., Japan)로 구성하였고, 가스화 생성가스 분석을 위해 GC-TCD (CP-4900, Varian, Netherland)를 연결하여 분석하였다.

탄소 수용체는 2~3 mm로 분쇄하여 체 거름 후 수분을 제

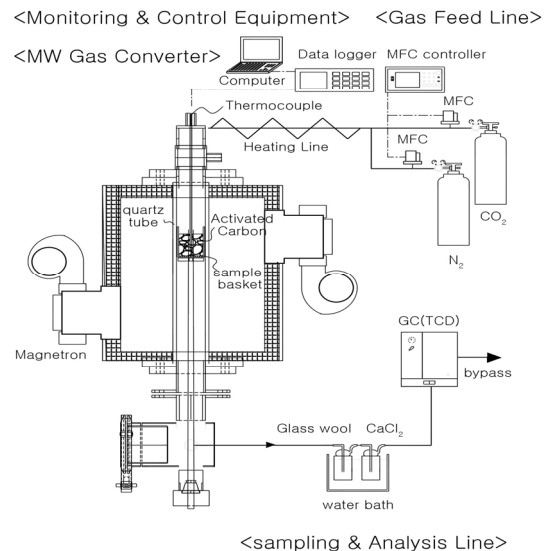


Fig. 1. Schematics of the microwave gasification.

거하여 사용하였다. 탄소 수용체 8 g을 샘플 바스켓에 넣고 탄소 수용체 개질기 (CRR) 중심부에 위치시켰다. 초기 이산화탄소를 200 mL min⁻¹로 20분간 흘려보낸 후 40 mL min⁻¹로 공급량을 바꾸고 10분간 흘려보낸 후 마이크로웨이브 가스 전환기 전원을 작동시켰다. 1 kW로 마이크로웨이브 전력을 공급 하여 탄소 수용체 온도를 상온에서부터 선형적으로 높여 설정온도로 일정하게 유지되게 하였다. 가스성분 분석을 위하여 가스 포집용 테들라 백 (tedla bag)을 사용하여 실험 시작부터 일정시간 생성가스를 포집하여 분석하였다. GC-TCD를 이용하여 주입가스와 생성가스를 분석하였다.

다음 Equation (1)과 같이 이산화탄소 전환율 (CO₂ conversion)을 계산되었다.

$$CO_2\ conversion(\%) = \frac{(CO_2)_{in} - (CO_2)_{out}}{(CO_2)_{in}} \times 100 \quad (1)$$

여기서, (CO₂)_{in}, (CO₂)_{out} 은 각각 입구와 출구에서 분석된 이산화탄소 부피농도 (%)이다.

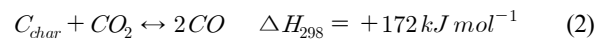
이산화탄소 가스화를 위한 탄소 수용체는 야자각 (coconut shell) 활성탄을 사용하였다. 공업분석 (Thermolyne Co., Type48000 Furnace/ Hansung Co., HS2140 Electronic Balance)과 원소분석 (Thermofinnigan Co., EA2000/EA1112)을 통해 탄소 수용체의 특성을 파악하였고 X-ray fluorescence (XRF) Spectrometer (Shimadzu Co., ED-720)분석을 통해 K, Ca, Fe 등을 측정하여 이산화탄소 가스화 시 활성탄 탄화물의 촉매작용에 관여될 무기산화물을 분석하였다. Table 1은 탄화물 수용체인 활성탄 시료의 4가지 성분, 원소 분석 성분의 특성과 무기산화물을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 탄소 - CO₂ 가스화 에너지 저장

온실가스 대표물질인 이산화탄소의 전환특성을 파악하기 위하여 탄소 수용체를 이용하여 마이크로웨이브 가열 전환 실험을 진행하였다. 실험은 CRR 온도를 900°C로 하고 체적 공간속도 (Volumetric Hourly Space Velocity: VHSV) 0.3 L g⁻¹ h⁻¹로 일정하게 한 상태에서 진행하였다.

Fig. 2 (a)는 이산화탄소 가스화 전환이 시작됨에 따라 CO₂가 급격히 감소하고 CO가 생성되어 CO₂전환율이 급격히 증가하여 전환율이 최대 80%를 보이며 1시간 까지 거의 일정하게 진행되었다. Fig. 2 (b)는 가스화 시간인 60분 동안 탄소 수용체의 무게감소율 (Weight Reduction Rate; WRR)과 고위 발열량 (Higher Heating Value; HHV)을 나타내었고 60분 동안 CO₂와 CO값을 측정하여 평균값을 나타내었다. 가스화 초기에 전환율이 증가하는 이유는 Equation (2)와 같이 탄소 가스화 반응 (carbon gasification reaction)이 일어나 고정탄소 (fixed carbon)가 이산화탄소 (CO₂)와 반응하여 일산화탄소 (CO)로 전환되기 때문이다. 이는 가스화 전환 시간 동안 CO의 농도가 증가하면서 CO₂의 농도가 감소하는 것에 보고도 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 탄화물의 중량이 감소하였지만 고정탄소 (C_{char})가 이산화탄소 가스화반응 (Equation 2)에 충분하여 1시간이 경과하여도 전환율이 일정한 것으로 보여진다.



마이크로웨이브 가열 특성은 수용체 내부로 마이크로웨이브 에너지가 전달되어 물체 진동을 통해 운동에너지가 열에너지로 전환되어 가열하는 방식으로 기존의 가열방식인 열원

Table 1. Chemical characteristics and inorganic composition for activated carbon (unit: wt%)

Proximate analysis				Ultimate analysis ^{a,b}				
M	A ^a	VM ^a	FC ^a	C	H	N	S	O
5.46	1.68	4.15	94.17	98.69	0.33	0	0	0.98
Inorganic composition								
K	Ca	Fe	Cu	S	Rb			
73.41	20.29	4.22	0.96	0.68	0.44			

M: moisture, A: ash, VM: volatile matter, FC: fixed carbon

^aDry basis, ^bAsh free basis

이 수용체 외부에서 전달되는 방식과 다르다. 이로 인해 마이크로플라즈마 (microplasma)가 유전체 (dielectric solid)인 탄소 수용체의 내부에서부터 발생되어 기존 가열방식과는 다르게 특정 위치가 열수용체 매트 온도보다 고온이 유지되는 현상을 보인다. 이로 인해 불균일반응 (heterogeneous)인 가스화 반응 등이 고온부 (hot spot)에서 활성화된다.

탄소 수용체는 알칼리 토류 금속 (alkaline earth metal) Ca 과 알칼리 금속 (alkaline metal) K이 촉매 주성분이다. (Table 1 참조) 촉매성분을 함유하는 탄소물질은 기존의 촉매에 비해 촉매활성이 우수하며 황에 의한 피독현상이 적고 비용이 저렴한 장점을 가지고 있다. 촉매성분이 이산화탄소 가스화 반응을 촉진시켜 CO₂ 전환율을 증대 시켰다. (Jing et al., 2004)

3.2 주요 영향변수별 연구

탄소 수용체 이산화탄소 가스화의 연구는 가스화 온도, CRR 가스 체류시간, 처리가스 온도에 대한 생성가스와 전환 특성 등에 대하여 비교 분석하였다.

3.2.1 가스화 온도 영향

Fig. 3 (a)는 수용체로 활성탄을 사용하고 상온 (20°C)의 처리가스를 40 mL min⁻¹ (VHSV: 0.3 L g⁻¹ h⁻¹)로 일정하게 하여 CRR온도인 가스화 온도를 700°C에서 1000°C까지 변화시켜 가면서 실험을 진행하였을 때 CO₂ 전환율을 나타내었다. Fig. 3 (b)는 60분 동안 생성가스의 평균 농도와 탄소 수용체의 무게감소율 (WRR)과 생성가스의 고위발열량

(HHV)을 나타내었다

가스화 온도를 700°C에서 1000°C까지 증가시킴에 따라 CO₂ 전환율이 각각 16%에서 51%까지 증가되었다. 이는 가스화 반응인 Equation (2) (Boudouard reaction)에 의해 전환되는 이산화탄소가 가스화 온도에 영향이 크다고 볼 수 있다. 1000°C에서의 CO₂ 전환율이 700°C에 비해 3.1배 컸다. 앞서 언급된 부도아 반응 (Boudouard reaction) (Equation (2) 참조)는 흡열반응으로 고온에서 CO생성반응으로 전환되어 높은 CO₂ 전환을 이룰 수 있다. 고온 (전형적으로 >800°C)에서 상당히 큰 엔트로피 항 (entropic term) (TΔS)이 엔탈피 항 (enthalpic component)보다 우위에 있을 때 깁스 자유 에너지 (Gibbs free energy) (ΔG=ΔH-TΔS)는 음의 값이 된다. 부도아 반응 (Boudouard reaction)은 정반응이 우세하여 CO가 생성되게 되며 생성가스의 발열량이 2.03 MJ m⁻³ (700°C)에서 6.18 MJ m⁻³ (1000°C)로 증가되었다.

이산화탄소 가스화 시 동일조건하에서 마이크로웨이브 가열 방식은 기존의 가열방식 (conventional heating)방식에 비해 부도아 반응이 상대적으로 우수하여 CO생성이 더욱 효과적으로 알려져 있다 (Chun and Jeong, 2018). 마이크로웨이브 가열 방식은 가열 특성상 직접 CRR내 위치한 탄소수용체만 직접 가열되어 가스화가 진행된다. 그로 인해 마이크로웨이브 가열 방식은 탄화물의 입자 체적 (volume of char particle) 내에서 반응이 일어나며, 특히 가열 존 (hot spot)에서 반응이 증진되어진다.

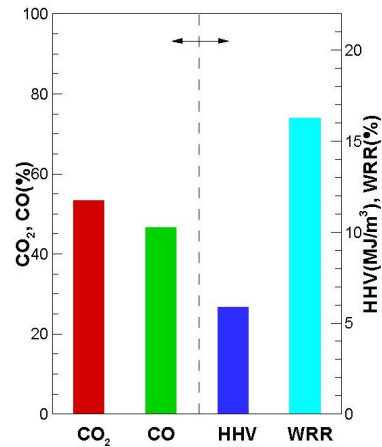
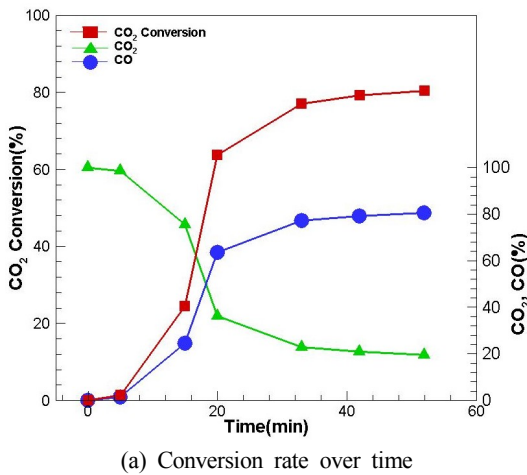


Fig. 2. Microwave CO₂ gasification results.

3.2.2 처리가스유량 영향

수용체를 활성탄으로 하고 가스화 온도를 900°C로 유지한 상태에서 상온의 처리가스 유량을 변화시켜 가면서 이산화탄소 가스화 실험을 진행하였으며 결과는 Fig. 4와 같다.

처리가스 유량이 40 mL min⁻¹ (VHSV=0.3)일 때 CO₂ 전환율이 46%에서 처리가스 유량을 120 mL min⁻¹ (VHSV=0.9)로 증가 시켰을 때 CO₂ 전환율이 37%로 감소 되었다. 이는 처리가스 유량이 증가되면서 탄소 수용체 배드 내에 처리가스 체류 시간이 감소됨에 따라 부도가 반응 기회가 상대적으로 적기 때문이다. 이는 전환되지 못한 CO₂양이 큰 값을 보이고 부도가 반응 생성가스인 CO가 감소되는 것에서도 알 수 있다.

탄화물 수용체를 마이크로웨이브 가열을 할 경우 기존의 가열방식과 달리 다음 두가지 우수한 특성을 가지고 있다. (Menéndez et al., 2011) 첫째, 탄소 수용체는 전자기장 (electromagnetic field)에서 우수한 극성 성질 (polarization property)을 가지고 있어 마이크로웨이브 조사 (irradiation)시 배향 및 계면 분극 (orientation and interfacial polarization)으로 인해 탄소 수용체를 급격한 가열이 가능하다. 둘째, 탄소 수용체의 전자기와 열적 성질이 온도에 대하여 비선형성 때문에 전기 아크와 작은 스파크가 비선형적으로 관찰되는 마이크로플라즈마로 불리는 미세 과열부 (hot spot)가 생성된다. 탄소 수용체에서 생성되는 미세 과열부 (hot spot)는 상대적으로 주변 온도보다 상당히 높아 수용체내에서 온도차가

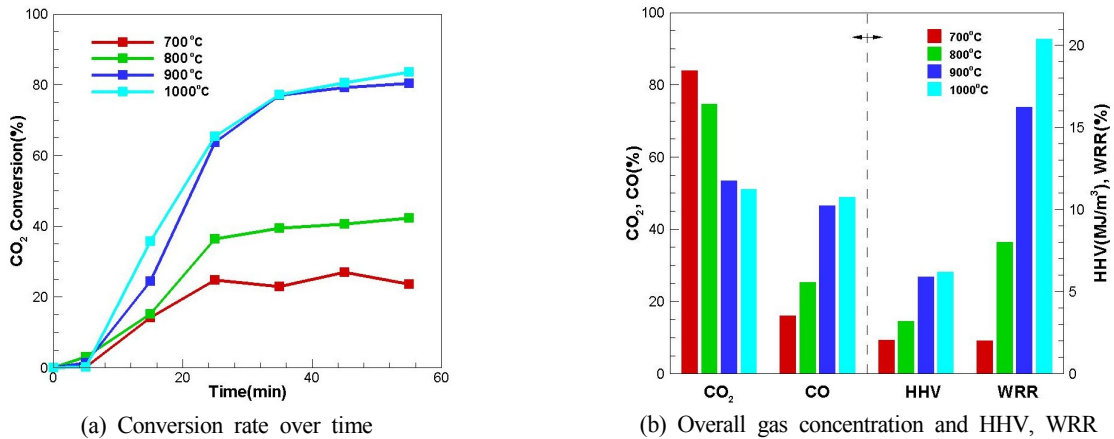


Fig. 3. Microwave CO₂ gasification results according to temperature changes.

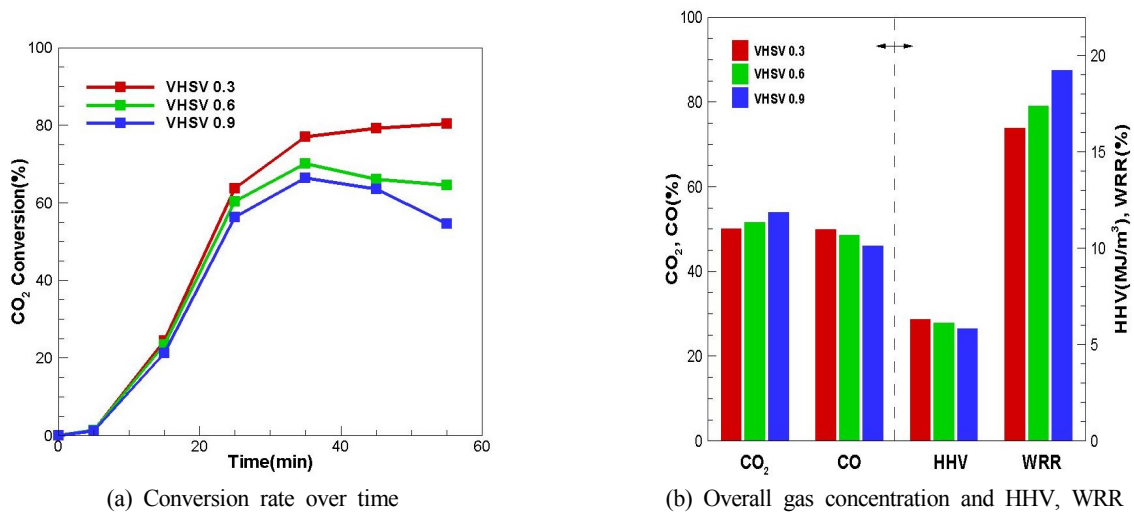


Fig. 4. Microwave CO₂ gasification results according to change in raw gas flow rates.

생기고 이로 인한 온도구배 (temperature gradient)가 형성된다. 즉, 본 연구에서 사용한 활성탄과 같은 촉매 성분이 함유된 탄화물의 경우 미세 과열부에서 촉매작용이 일어나 반응이 활성화 된다. 이러한 효과는 탄화물 마이크로웨이브 메탄 개질 연구에서도 보고되어 있다. (Jing et al., 2004)

VHSV 0.3 (처리가스 유량 40 mL min⁻¹)일 경우 상대적으로 탄소 수용체에서 머무는 체류시간이 증가되고 마이크로 가열 효과에 의해 가스화 반응이 촉진되어 CO₂ 전환율이 높은 값을 가진다.

3.2.2 처리가스 온도 영향

Fig. 5는 수용체 탄화물을 활성탄으로 하고 가스화 온도를 900°C, 처리가스의 유량을 40 mL min⁻¹ (VHSV: 0.3 L g⁻¹ h⁻¹)로 일정하게 하고 처리가스의 온도를 500°C하여 공급하였을 때의 결과이다.

Fig. 5 (a)에서 볼 수 있듯이 처리가스를 가열하여 공급되는 경우가 상온으로 공급되는 경우에 비해 초기에는 다소 CO₂ 전환이 작으나 시간이 경과됨에 따라 거의 유사한 값을 가진 후 다소 큰 값을 보였다. 이는 CO와 CO₂의 농도 변화에서도 확인된다. CO₂ 전환율이 초기 적은 값을 보이는 것은 가스 온도 증가로 인해 가스체적 팽창으로 인한 가스밀도 감소와 탄소 수용체내 체류시간 감소로 인한 가스화 반응의 저감으로 보인다. 그러나 후류에서 역전되어 전환율이 증가되는 것은 초반부 고온 가스의 열이 탄소 수용체로 전달되어 다소 가열된 상태에서 산화반응 활성화가 이루어 졌기 때문이다.

Fig. 5 (b)는 각 경우 전체 평균값으로 처리가스가 고온으

로 공급되는 경우가 CO 생성량이 커서 생성가스 발열량이 5.95 MJ m⁻³ 로 높으나 그 영향은 크지 않다.

4. 결론

탄소 수용체를 이용한 마이크로웨이브 CO₂ 가스화 특성 파악 및 화학에너지로의 전환 가능성을 파악하기 위해 실험실 규모의 실험을 수행하였다. 이를 위해 탄소 수용체인 야자 각 활성탄을 이용하여 생성가스의 특성과 CO₂ 전환을 규명하였다.

탄소 수용체를 이용한 마이크로웨이브 CO₂ 가스화 시 고정탄소가 CO₂와 반응하여 CO로 전환되었다. 이 전환율은 가스화 온도를 높이고 공간속도가 낮아 체류시간이 길 때 CO₂ 전환율이 높았다. 가스화 온도의 경우 온도가 높을수록 전환율이 높았다. 가스화 온도가 700°C에 비해 1000°C에서 전환율이 3.1배 높았다. 공간속도의 경우 처리가스 유량이 0.04 L min⁻¹ (VHSV=0.3)이 처리가스 유량이 0.12 L min⁻¹ (VHSV=0.9)에 비해 CO₂ 전환율이 1.2배 높았는데 이는 유량이 작을수록 반응기회가 상대적으로 많기 때문이다. 처리가스 온도의 경우 처리가스를 500°C로 가열하여 공급되는 경우 상온공급에 비해 CO₂ 전환율이 높았으나 영향이 크지 않았다.

연구결과 탄소 수용체를 이용한 마이크로웨이브 CO₂ 가스화 특성과 화학에너지로의 전환 가능성을 파악하였다. 이는 지구온난화 물질인 이산화탄소를 저장하고, 에너지로 전환하는 것은 에너지와 환경 문제를 해결하는데 의미가 있다. 앞으로 재생에너지와 연결하여 마이크로웨이브 가스전환기에 전

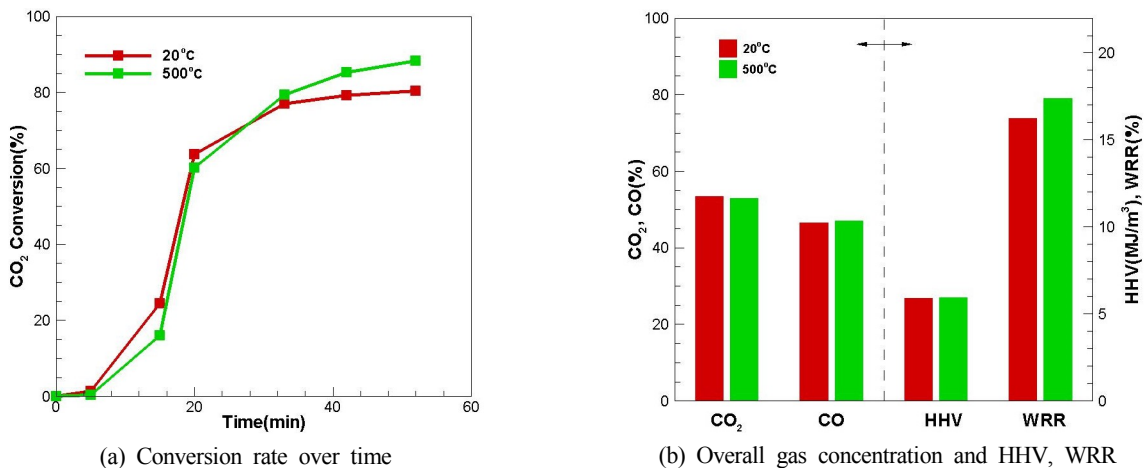


Fig. 5. Microwave CO₂ gasification results according to change in temperatures raw gas.

력을 공급하고 수용체를 다양화하는 연구를 통하여 에너지저장 문제와 환경문제를 해결할 수 있다.

사 사

이 논문은 2018년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NO. 2018R1D1A1B07040326)

REFERENCES

- Cha CY, Kim DS, 2001. Microwave induced reactions of sulfur dioxide and nitrogen oxides in char and anthracite bed. *Carbon* 39 (8): 1159-1166.
- Chun YN, Jeong BR, 2018. Characteristics of the microwave pyrolysis and microwave CO₂-assisted gasification of dewatered sewage sludge. *Environmental technology* 39 (19): 2484-2494.
- Daud MZ, Mohamed A, Hannan MA, 2013. An improved control method of battery energy storage system for hourly dispatch of photovoltaic power sources. *Energy Conversion and Management* 73: 256-270.
- E.C.t.E.S. Committee, 2011. Energy conservation through energy storage programme annual report. International Energy Agency.
- Jing QS, Fei JH, Lou H, Mo LY, Zheng XM, 2004. Effective reforming of methane with CO₂ and O₂ to low H₂/CO ratio syngas over Ni/MgO-SiO₂ using fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management* 45 (20): 3127-3137.
- Kong Y, Cha CY, 1996. Reduction of NO_x adsorbed on char with microwave energy. *Carbon*, 34 (8): 1035-1040.
- Menéndez JA, Arenillas A, Fidalgo B, Fernández Y, Zubizarreta L, Calvo EG, Bermúdez JM, 2010. Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Processing Technology* 91 (1): 1-6.
- Menéndez JA, Juárez-Pérez EJ, Ruisánchez E, Bermúdez JM, Arenillas A, 2011. Ball lightning plasma and plasma arc formation during the microwave heating of carbons. *Carbon* 49 (1): 346-349.
- Verfondern K, Lensa WV, 2005. Past and present research in Europe on the production of nuclear hydrogen with HTGR. *Progress in Nuclear Energy* 47 (1-4): 472-483.