

Steam plasma와 DC arc plasma를 이용한 이산화탄소의 분해

박중완, 박동화*
 인하대학교 화학공학과
 (dwpark@inha.ac.kr*)

CO₂ decomposition using DC arc plasma and Steam plasma

Jung-Wan Park, Dong-Wha Park*
 Inha University
 (dwpark@inha.ac.kr*)

서론

화석연료의 사용이 증가함에 따라 대기 중 이산화탄소의 농도가 급격히 증가하고 있다. 이산화탄소가 증가함에 따라 지구온난화를 가속화시킬 뿐 만 아니라 식물성장에도 영향을 미치는 등 피해가 커지고 있어 이산화탄소의 양을 줄이기 위한 연구가 여러 방향으로 이뤄지고 있다.

열플라즈마는 화학적으로 안정한 물질도 분해가 가능하고, 높은 처리 속도를 얻을 수 있으며, 운전의 개시, 정지, 출력에 대한 빠른 제어가 가능하며, 큰 온도차에 의해 분해 생성물의 재결합을 막을 수 있다. 또한 플라즈마 반응기 내에서의 에너지 밀도가 높아서 폐기물의 처리비용을 줄이고 로의 용적을 소형화시킬 수 있는 장점때문에 유해 폐기물 및 배출가스 처리에 많이 응용되고 있다[1]. 별도의 steam generator없이 100% Steam을 plasma gas로 사용한 steam plasma는 활성이 뛰어난 수소와 산소가 존재하기 때문에 과불화탄소(PFCs), 휘발성유기화합물(VOCs)등의 분해에 우수한 분해능력을 나타낸다[2].

본 실험에서는 열플라즈마에 해당하는 Steam plasma와 DC arc plasma를 이용하여 이산화탄소를 분해하기 위한 최적조건을 알아보았다. 실험 전, 반응에 대한 열역학적 평형 조성을 계산하였고 이산화탄소의 유량변화, 메탄의 첨가에 따른 분해율 변화를 측정하였다. 생성물(gas)의 분해율은 Gas Chromatograph(GC)를 이용하여 분석하였다.

실험

실험은 대기압 하에서 이뤄졌으며 비이송식의 열플라즈마를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험장치는 플라즈마 토치, 반응관, 냉각관, 배출부로 이뤄져 있으며 DC arc plasma 장치는 플라즈마 발생 가스로 8 l/min의 아르곤이 사용되었다. 반응관(I.D: 21 mm, L: 250 mm)은 스테인리스 이중관으로 만들어져서 수냉방식으로 냉각된다. 이산화탄소(1000 ~ 4000 sccm)와 메탄(500, 1000 sccm)은 플라즈마가 발생되는 입구에 주입시켰다. 반응시간은 3분이며 플라즈마의 입력전원은 5 kW가 사용되었다. Steam plasma 장치는 플라즈마 발생 가스로 steam이 사용되었고 반응관(I.D: 10 mm, L: 300 mm)은 구리 이중관으로 만들어져 수냉방식으로 냉각된다. 이산화탄소(50 ~ 500 sccm)와 메탄(50 ~ 200 sccm)은 플라즈마가 발생되는 입구에 주입시켰다. 반응시간은 3분이며 입력전원은 1.3 kW가 사용되었다. 실험조건과 실험개략도 및 steam plasma torch를 Table 1과 Fig.1, Fig.2에 나타내었다. 플라즈마에 의한 이산화탄소의 분해정도를 알아보기 위하여 TCD(Thermal Conductivity Detector)가 설치된 가스크로마토그래피(CP9001, CHROMPACK)를 사용하여 이산화탄소의 농도를 측정하여 분해율을 계산하였다.

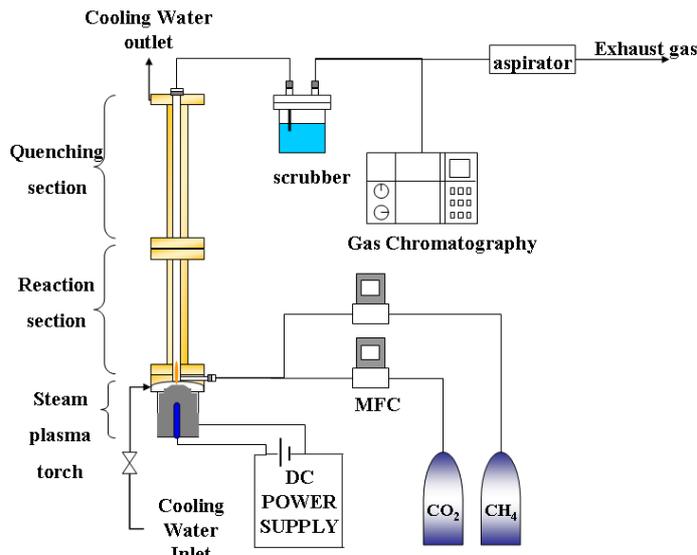


Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up for decomposition

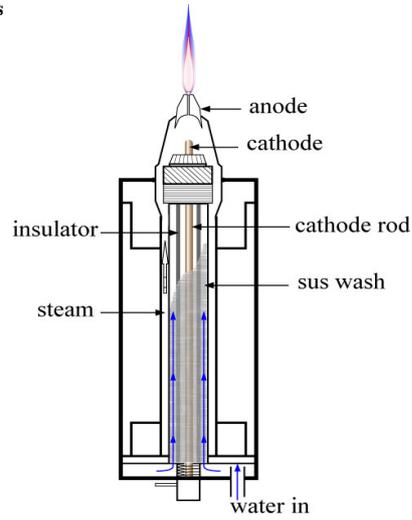


Fig.2 Steam plasma torch

Table. 1 Experimental condition

	DC arc plasma	Steam plasma
Input power	200A, 5 kW	9~11A, 1.3 kW
Plasma gas	Ar (8 l/min)	steam
Reacting gas	CO ₂ (1000 ~ 4000 sccm)	CO ₂ (50 ~ 500 sccm)
Reaction time	3 min	
Pressure	1 atm	

실험결과

실험에 앞서 고온의 영역에서 이산화탄소의 분해 후 거동을 살펴보기 위해 화학평형 조성계산을 행하였다. 화학평형 조성은 Gibb's free energy minimization에 기반을 둔 소

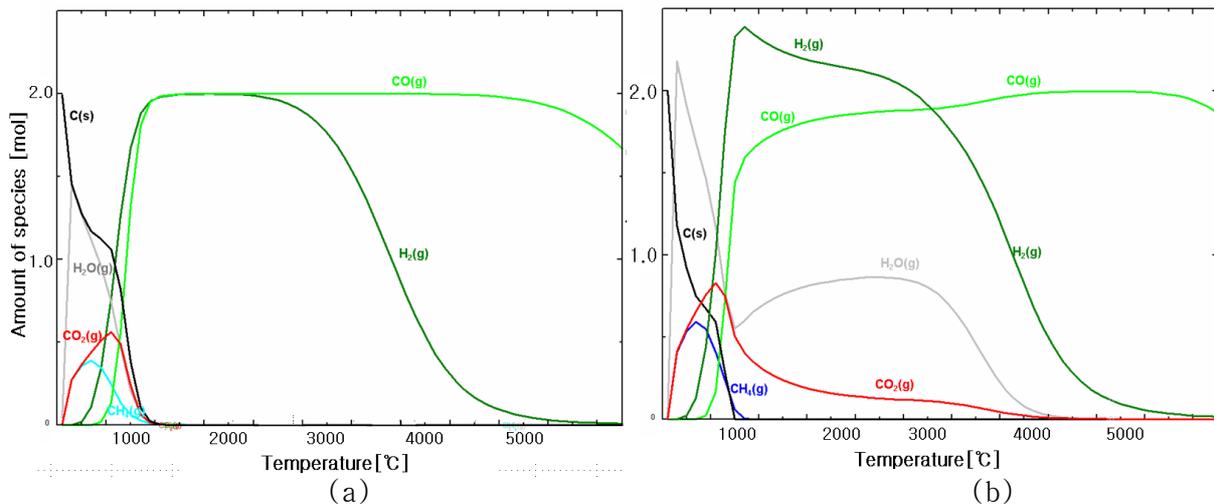


Fig 3. (a) DC arc plasma (b) Steam plasma. Chemical equilibrium composition.

프트웨어 프로그램인 Factsage를 사용하였다[3]. Steam plasma는 1200℃까지 메탄과 고체 카본이 감소하고 1000 ~ 2000 ℃의 영역에서 이산화탄소가 감소하고 수소, 일산화탄소가 증가하게 된다. DC arc plasma는 1300℃까지 이산화탄소, 고체 카본, 메탄이 감소하고 1200 ~ 2500℃의 영역에서는 수소와 일산화탄소가 존재하게 됨을 확인하였다.

열플라즈마에 의한 연구의 모든 공정에 대한 이산화탄소의 분해율을 알아보기 위하여 다음과 같이 분해율을 정의하였다.

$$\text{Decomposition of carbon dioxide} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100$$

C_i = 플라즈마 반응 전의 이산화탄소 양, C_o = 플라즈마 반응 후의 이산화탄소 양

이산화탄소(99.999%)를 1000 ~ 4000 sccm, 50 ~ 500 sccm 유량으로 DC arc plasma와 steam plasma에 주입하였다. DC arc plasma에 1000 sccm을 주입하였을 때 90%의 분해율을 얻었으며, 4000 sccm을 주입하였을 때 68%의 분해율을 확인하였다. steam plasma에 50 sccm을 주입하였을 때 분해율은 50%, 500 sccm을 주입하였을 시는 6%의 분해율이 얻어졌다. Fig. 4,5는 DC arc plasma와 steam plasma의 이산화탄소 유량에 대한 분해율을 나타낸 것이다. Fig.4에서는 5kW로 일정한 전력에서 이산화탄소의 유량이 늘어날수록 분해율이 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig.5에서도 이산화탄소의 유량이 늘어날수록 분해율이 감소하는 것을 볼 수 있다.

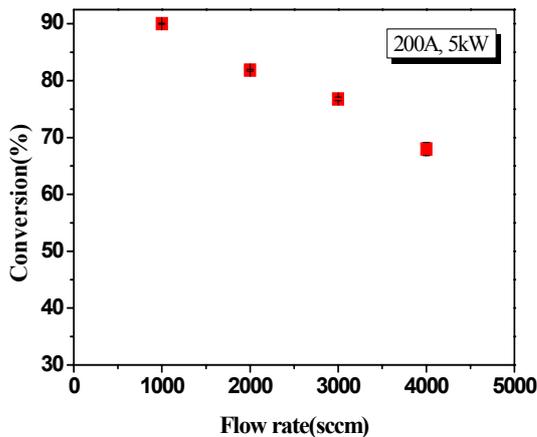


Fig 4. Conversion of carbon dioxide by DC arc plasma

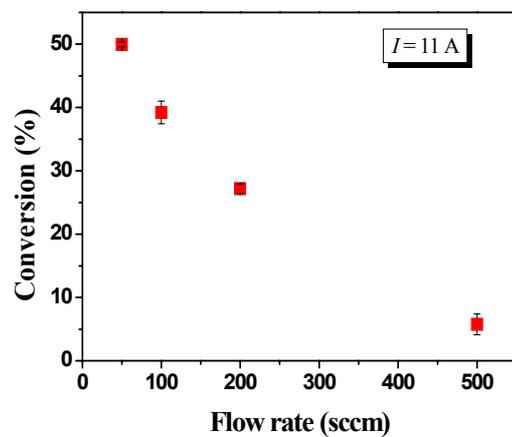


Fig 5. Conversion of carbon dioxide by steam plasma

이산화탄소의 분해율을 높이기 위해 메탄의 유량에 변화를 주어 주입하였다. 이산화탄소와 메탄은 Eq.(1)과 같이 흡열반응을 일으키고 메탄과 스팀도 Eq.(2)와 같이 흡열반응을 일으킨다[4,5]. 따라서 이산화탄소의 직접 분해의 경우(물리적 냉각)에다가 메탄을 이용한 이산화탄소의 분해(화학적 냉각)가 적용되어 더 높은 분해율을 얻을 수 있었다.



Fig.6은 DC arc plasma를 이용하여 이산화탄소를 1000 ~ 4000 sccm으로 변화시킬 때 메탄유량(500, 1000 sccm)에 따른 분해율을 비교한 것이고 Fig.7은 steam plasma를 이용하여 전류와 이산화탄소의 유량이 일정할 때 메탄의 유량변화(50 ~ 200 sccm)에 따른 분해율 변화를 나타내었다.

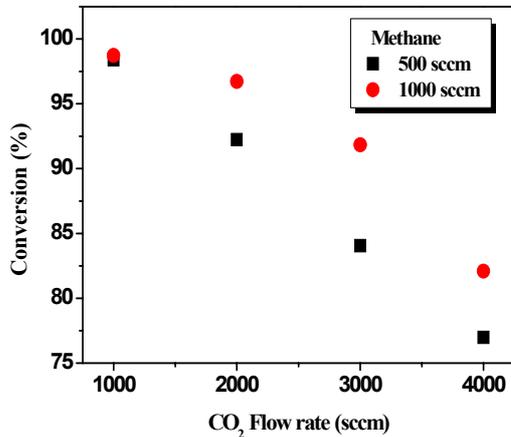


Fig 6. Conversion of CO₂ under different CH₄ flow rate (500, 1000 sccm) by DC arc plasma

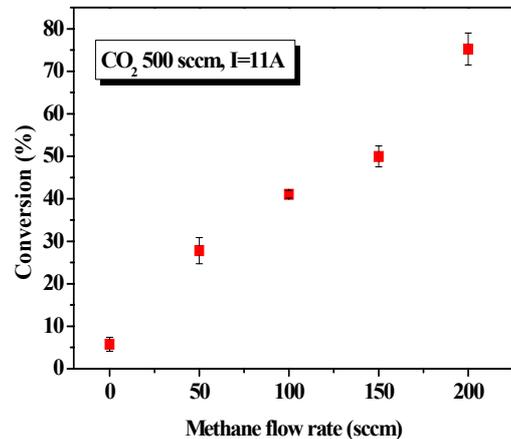


Fig 7. Conversion of CO₂ under different CH₄ flow rate (CO₂ 500 sccm, I = 11 A) by steam plasma

결론

DC arc plasma와 Steam plasma를 이용하여 이산화탄소의 직접 분해하는 실험을 수행하였다. 실험에 앞서 이산화탄소와 메탄의 유량 변화에 따른 화학평형조성을 이용하여 이산화탄소의 감소를 확인하였다. 실험 결과, 이산화탄소의 유량이 1000 sccm일때 5kW DC arc plasma를 사용한 이산화탄소의 직접 분해율은 90.0%가 분해되었고 메탄 1000 sccm첨가시 98.7%가 분해되었다. 이산화탄소 50 sccm을 1.3kW steam plasma를 이용하여 직접 분해시 49.9%가 분해되었고 메탄 200 sccm 첨가시 67.7%가 분해되었다. 이산화탄소의 유량이 적고 메탄의 유량이 많을수록 이산화탄소의 분해율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 메탄과 이산화탄소의 흡열반응이 이산화탄소의 재결합을 막는 냉각효과를 나타내어 화학적 냉각이 이산화탄소의 분해에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업지원부 지정 열플라즈마 환경기술 연구센터의 2007년도 지원을 받아 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박동화, 오성민. "열플라즈마 공정과 응용". 인하대학교 출판부. 124(2004).
2. H.Sekiguchi, T.Honda, A.Kanzawa, Plasma Chem. Plasma Processing, **13**, 463(1993)
3. Factsage, software program, Version 5.4, GTT-Technologies, Germany.
4. Jaimee K, Dahl, Joseph Tamburini, and Alan W. Weimer, *Energy & Fuels*, **15**, 1227(2001)
5. Qiangshan Jing, *International Journal of Hydrogen Energy*, **29**, 1245(2004)