

이산화탄소 전환을 위한 글라이딩 아크 플라즈마 스크러버의 수치계산

Numerical Analysis of a Gliding Arc Plasma Scrubber for CO₂ Conversion

김 성 천 · 전 영 남*

조선대학교 환경공학과

(2014년 4월 7일 접수, 2014년 6월 24일 수정, 2014년 7월 7일 채택)

Seong Cheon Kim and Young Nam Chun*

Department of Environmental Engineering, Chosun University

(Received 7 April 2014, revised 24 June 2014, accepted 7 July 2014)

Abstract

CO₂ emission has been gradually increased due to rising fossil fuel use. A gliding arc plasma scrubber (GAPS) was proposed to destruct CO₂. For optimum design of GAPS, a CFD analysis has been conducted in different configuration for the system. The parameters considered included gas injection velocity at the nozzle and gas flow rate to gap between electrodes. The reactor configuration affected velocity fields which caused changes in the mixture fraction and the retention time. The mixing effect of CO₂ and supplied gas (CH₄ and steam) was enhanced by installing a orifice baffle. This revealed that the orifice baffle is effective in CO₂ conversion by positioning the reactants in the gas into the center of plasma discharge.

Key words : Plasma, Carbon dioxide, Gliding arc, CFD

1. 서 론

이산화탄소는 온실가스로서 지구가후 변화를 초래하며, 전체 온실가스 배출량 중 약 80%를 차지하기 때문에 처리의 주요 대상이다. 따라서 최근 온실가스 배출량 증가에 따른 이산화탄소 저감에 관한 연구에 대하여 관심이 증가되고 있다(Park *et al.*, 2013; Rim

et al., 1999). 또한 교토 의정서의 이산화탄소 배출 감량 의무 조약이 연장되면서 향후 2020년 배출 전망치(BAU) 대비 온실가스 30%를 줄이기 위해 CO₂ 저감기술이 필요한 실정이다.

이산화탄소의 처리에 대한 기술은 CCS (carbon capture & storage)와 전환 기술에 대한 연구가 집중되어 있다. 이 중 이산화탄소 전환에 관한 연구로는 촉매 개질법 (Jin *et al.*, 2008), 전기-화학적 환원법 (Hirata *et al.*, 2012), 그리고 생물학적 고정화법 (Chiu *et al.*, 2008) 등의 연구 외에 최근 플라즈마를 이용한 이산화탄소 전환에 관한 연구가 활발히 진행되고 있

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-230-7156, E-mail : ynchun@chosun.ac.kr

다. 플라즈마 형태로는 코로나 방전(Wen and Jiang, 2001), 유전체 방전(Li *et al.*, 2004), 글라이딩 아크 방전(Indarto *et al.*, 2007), 마이크로파 방전(Spencer and Gallimore, 2013), 고온 플라즈마(Kim *et al.*, 2013) 등의 연구가 진행되고 있다. 상기의 플라즈마 기술을 이용한 연구는 이산화탄소의 높은 전환율을 달성하였지만, 상대적으로 플라즈마 주입 에너지에 비해 효율이 낮으며, 작은 유량 범위에 해당하는 실험실적 연구가 진행되고 있다. 이 중 글라이딩 아크 플라즈마는 전극 사이에 고속으로 가스를 주입하여 전극 사이에 아크 방전을 주기적으로 형성하는 것으로, 고온과 저온 플라즈마 특성을 동시에 가지고 있어 난분해성 유해 물질 등의 분해 적용이 가능하다(Fridman *et al.*, 1998). 또한 빠른 전환 반응과 비교적 플라즈마 발생이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 그러나 CO_2 는 열역학적 계산을 통해 약 1500°C 에서 화학적 결합이 깨지는 것으로 알려져 있으며, 메탄과 이산화탄소 개질 반응 역시 강한 흡열 반응이므로 큰 에너지를 공급해야만 전환이 가능하다(Indarto *et al.*, 2007). 그러므로 플라즈마를 이용한 이산화탄소 처리에서 가장 큰 단점으로는 다량의 전기에너지를 통해 운전되기 때문에 플라즈마 반응기의 효율을 높이기 위한 방안이 필요로 한다.

따라서 본 연구에서는 플라즈마 방전 영역 내 처리가스의 체류시간을 증진시켜 에너지 효율 및 처리

량을 증가시키기 위해 플라즈마 전극의 중간영역에 오리피스를 설치하였다. 반응기 내 유동 특성을 파악하기 위해 노즐에 주입하는 가스 속도, 공급 가스 유량, 오리피스 유무에 따른 유동 특성에 대한 수치해석 및 실험을 통해 다음 연구를 수행하였다.

첫째, 오리피스 설치 유무에 따른 플라즈마 내부 혼합 분율 및 체류시간에 영향에 대한 수치해석 연구를 수행하여 높은 이산화탄소 전환율을 나타내기 위한 조건을 제시하였다.

둘째, 유동 수치 해석을 통해 얻어진 결과를 이용하여 실험 적용한 뒤 이산화탄소 전환율의 증가를 파악하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 플라즈마 반응기 구성

본 수치해석 시 적용한 글라이딩 아크 플라즈마 스크러버 형상을 그림 1에 나타내었다. 크기는 길이 0.2 m, 직경 0.6 m이며, 칼날 형태의 전극은 하단으로부터 높이 0.02 m 지점에 3개가 위치하고 있다. 또한 높이 0.056 m에는 반응기 하단에서 공급되는 가스를 플라즈마 방전영역으로 모으기 위한 오리피스가 위치하고 있다. 그림 1에서는 기준 운전조건과 변수별 연구에 따른 유동 현상을 계산하기 위한 3차원 수치해석 형

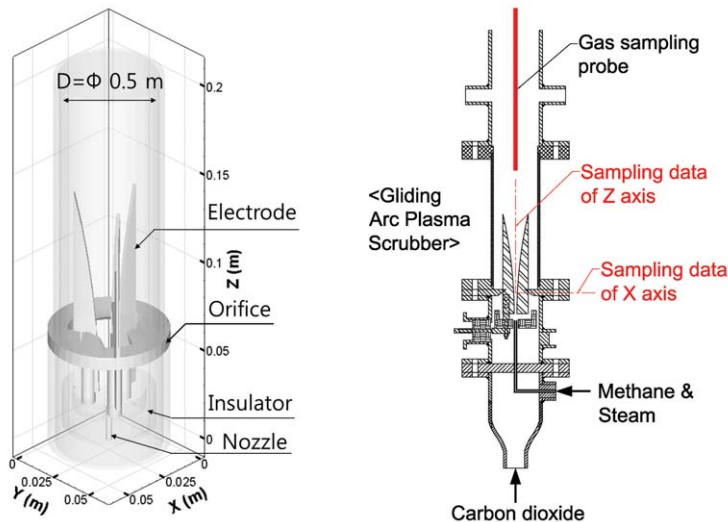


Fig. 1. Schematic diagram of 3-phase gliding arc plasma.

상과 결과를 적용할 실험 장치를 나타냈다. 실험 장치는 기존 연구(Kim *et al.*, 2014)에서 사용된 장치를 이용하였다.

2. 2 수치해석 모델 및 방법

2. 2. 1 지배방정식

플라즈마 반응기내의 열 · 유동해석은 다음의 연속 방정식, 운동방정식, 에너지 방정식, k - ϵ 난류모델 방정식의 지배 방정식(governing equation)을 계산하였다(Chun, 1999; Khalil *et al.*, 1975).

▶ 연속 방정식 (continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

▶ 운동 방정식 (momentum equation)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

▶ 에너지 방정식 (energy equation)

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \frac{C_p}{k} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = -\frac{DP}{Dt} \quad (3)$$

▶ 난류 에너지 방정식

- 난류 운동에너지 생성방정식 (turbulent kinetic energy equation)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + G - \rho \epsilon \quad (4)$$

- 난류 운동에너지 소산방정식 (turbulent kinetic energy dissipation equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} \left(C_1 G - C_2 \rho \epsilon \right) \\ &- \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \cdot \frac{\rho \epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

2. 2. 2 수치해석 모델

(1) 난류모델

난류유동은 k - ϵ 모델(Bird *et al.*, 1960)을 사용하였고, 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산을 ϵ 은 지배방정식 (4, 5)에 의해 계산하였다. 난류 전단력은

Boussinesq 가정에 의하여 에디 또는 난류점성계수 μ 와 평균속도 구배의 곱으로 표시되며, 난류점성계수 μ 는 Prandtl-Kolmogorov 관계식에서 산출되었다.

$$\mu_g = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

난류점성계수 μ 는 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 의 지배방정식으로부터 구한 k 와 ϵ 의 해로 구해질 수 있다. 따라서 유효점성계수(effective turbulent viscosity)는 Eq.(7)과 같이 층류점성계수(μ)와 난류점성계수(μ)의 합으로 주어진다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu \quad (7)$$

여기서 유효 점성계수 μ_{eff} 가 구해지면 물질 또는 에너지 전달식의 확산계수는 난류에서 Schmidt수 또는 Prandtl수인 σ 를 이용하여 물질 및 에너지의 전달계수를 각각 구할 수 있다.

2. 2. 3 수치해석 방법

수치해석은 상용 CFD 코드인 PHOENICS V2012를 사용하였다. 수치계산 시 대류항의 차분도식으로 안정된 해를 줄 수 있는 하이브리드 도식을 사용하였다.

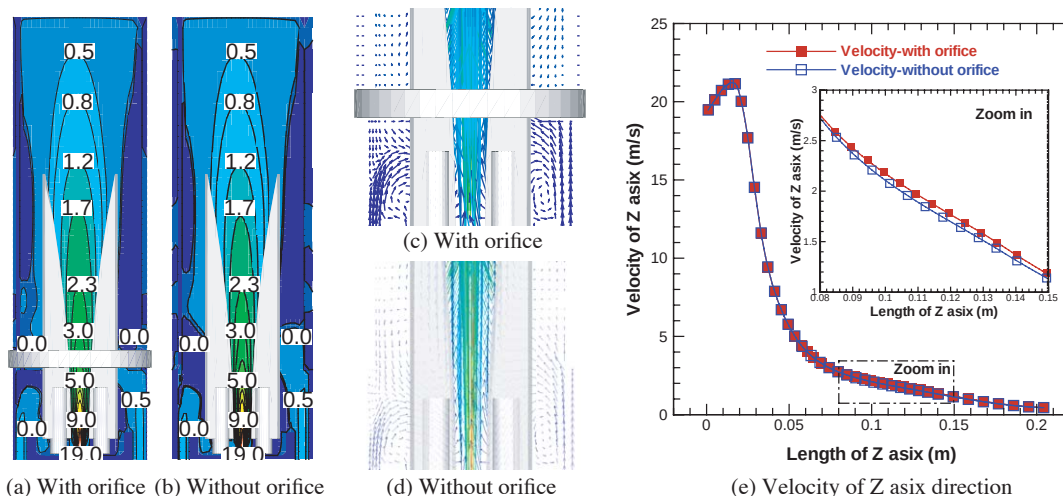
본 논문에서 사용한 수치해석은 파탕커 방법을 사용하였으며 차분화된 운동방정식으로 셀 압력의 디커플링(decoupling)을 없애기 위하여 엇갈린 격자망을 사용하였다(Patanker, 1980). 각 검사체적에 대한 이산화 방정식은 Line-by-line TDMA 알고리즘에 의해 해를 구하였다. 그리고 Navier-Stokes 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계는 빠른 수렴을 위하여 SIMPLE 알고리즘에서 변형된 SIMPLEST 알고리즘(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Shortened)을 사용하였다(Spalding, 1989). 직교 좌표를 사용하며, 난류 유동장을 계산하였다. 격자의 개수는 $37 \times 39 \times 77$ 개이다.

2. 2. 4 연구변수 설정

영향을 주는 주요 변수를 표 1과 같이 연구 변수로 설정하여 연구를 수행하였다. Case R은 기준 조건으로 변수별 연구를 통해 내부에 유동 및 혼합 특성이 최적인 조건을 설정하였다. Case 1은 노즐 주입 가스 유속 변화, Case 2는 반응기 하단의 주입 가스 유량을 변화시킨 것이다.

Table 1. Conditions of parametric screening study.

Case	Case R		Case 1			Case 2		
Injection velocity (m/s)	41.4	64.9	81.5	98.1	165.8	41.4		
Gas flow rate (L/min)	25		25			15	20	30
							50	

**Fig. 2. Calculated velocity and vector in a gliding arc plasma reactor.**

3. 결과 및 토의

3.1 글라이딩 아크 플라즈마 반응기 설계 기준

그림 2는 반응기 내 유속 계산 결과를 나타낸 것이다. Case R에서 오리피스 유무에 따른 해석 결과 유사한 유속 분포를 나타냈다. 그러나 오리피스가 설치된 상태에서 반응기 중심 영역은 오리피스가 없는 경우에 비해 유속이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 플라즈마 전극 중심영역에 설치된 오리피스로 인해 가스의 유속이 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 오리피스 설치 영역 부근을 확대해서 나타낸 벡터 선도에서도 동일한 결과를 나타냈다.

그림 3은 Case R에서 오리피스 유무의 경우를 비교하여 플라즈마 반응기 내 혼합 분율을 나타낸 것이다. 혼합 분율은 노즐에서 주입되는 가스와 반응기 하단에서 주입되는 두 성분의 혼합 정도를 나타내며, 초기 값으로 노즐 측 값을 1로, 반응기 하단 주입 부의 값을 0으로 하였다. 따라서 노즐 측과 하단 주입 부 간의 혼합율을 0과 1사이의 값으로 나타냈다.

그림 3(a)는 Case R의 조건에서 오리피스를 설치한 상태, 그리고 그림 3(b) 오리피스를 설치하지 않은 혼합 분율을 각각 나타낸 것으로 오리피스에 의해 Case R의 전극 중심 부분의 값이 Case 1보다 낮아 노즐에서 공급되는 가스와 반응기 하단에서 공급되는 가스의 혼합이 더 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. 이러한 효과는 오리피스에 의해 플라즈마가 세 전극에서 형성되는 전극 사이 지점의 가스 혼합율을 높여 플라즈마에 의한 효율이 증가 될 것으로 판단된다.

그림 4는 반응기 내 체류시간을 나타낸 것이다. 오리피스가 설치된 경우, 오리피스의 하단부 체류시간이 짧은 것으로 나타났으며 반면, 오리피스 상단부는 체류시간이 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 오리피스가 혼합 영역의 가스 모멘텀을 증가하여 혼합이 잘되고 혼합된 가스의 체류시간을 증가함으로써 전극 사이에서 플라즈마 방전영역내의 반응물의 체류시간을 증가시키는 효과를 가져와 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. Z축 방향의 체류시간은 오

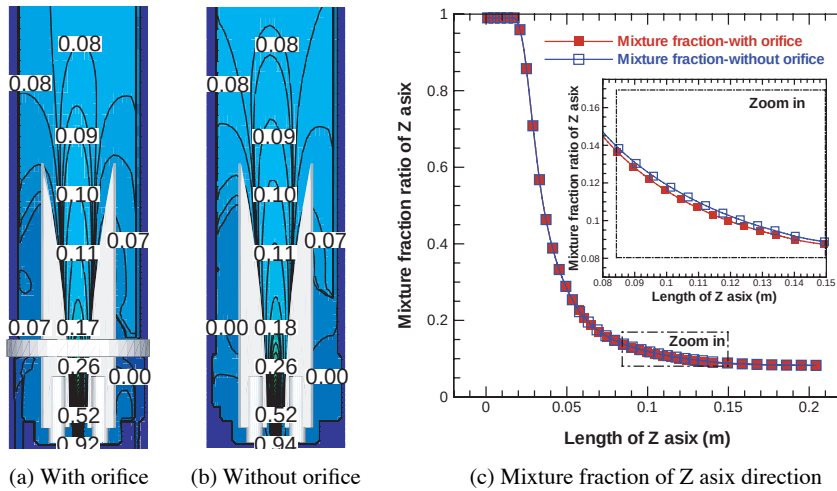


Fig. 3. Calculated mixture fraction in a gliding arc plasma reactor.

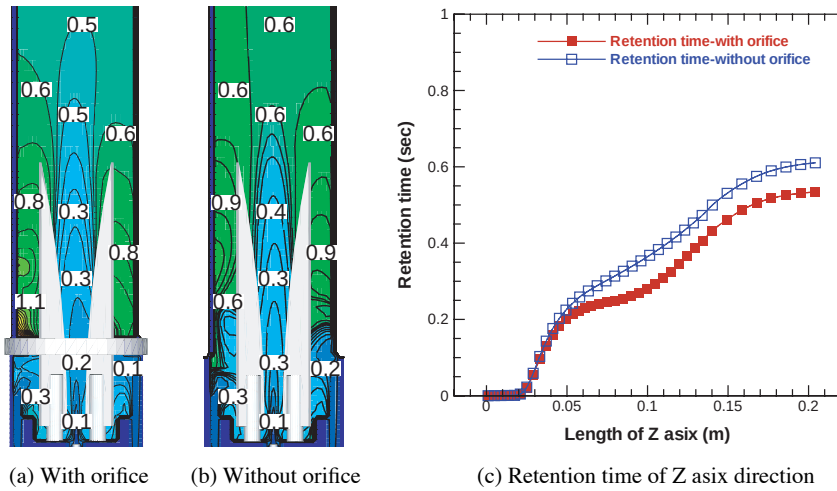


Fig. 4. Calculated retention time in a gliding arc plasma reactor.

리피스로 인해 유속 증가로 체류시간은 감소되는 것으로 나타났다.

그림 5는 Case R 조건에서 오리피스 유무에 따라 플라즈마 반응기 내 온도 분포를 비교하여 나타낸 것이다. 노즐에서 주입되는 가스의 온도는 450°C 그리고 반응기 하단에서 주입되는 가스의 온도는 25°C로 설정하였다. 노즐 주입가스는 반응기 하단에서 주입되는 가스에 의해 냉각되어 반응기 출구에서는 약 56°C의 온도를 나타냈다. 그러나 Case R의 오리피스

에 의해 전극 중심부의 온도가 오리피스가 없는 경우에 비하여 높은 결과를 나타냈다. 이는 오리피스에 의해 재순환영역 생성(그림 2(c), (d) 참조)과 가스 유속의 증가(그림 2(e) 참조)로 인한 온도 증가로 판단된다.

그림 6은 수치해석 데이터와 이를 근거로 실험을 수행하여 이산화탄소 전환율에 대한 결과를 나타냈다.

그림 6(a)에 나타난 수치해석 결과는 플라즈마 반

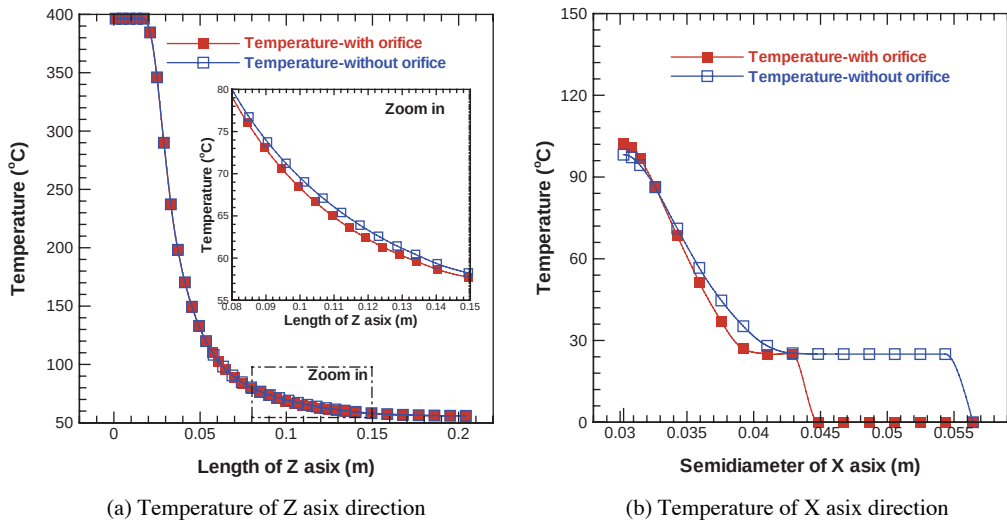


Fig. 5. Calculated temperature in a gliding arc plasma reactor.

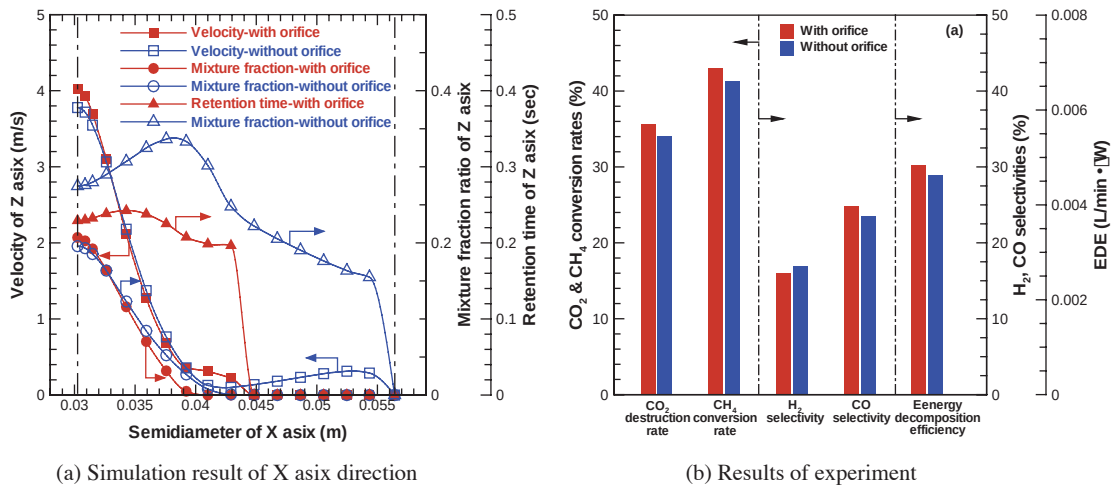


Fig. 6. Comparison of simulation and experiments.

응기의 중심으로부터 반경방향으로 오리피스가 위치한 격자의 결과를 나타낸 것이다. 오리피스가 설치된 경우 플라즈마 반응기 내 전극 중심부의 유속과 혼합도는 증가하였으며, 체류시간은 감소되는 결과를 나타냈다.

실험의 경우, CH_4/CO_2 비, 주입 가스 속도, 가스유량을 고정된 후, 반응기 내부에 설치된 오리피스 형상에 따른 CO_2 저감 영향을 파악하였다. CO_2 및 CH_4 전

환율은 크게 차이가 나진 않았지만, 오리피스가 설치된 경우가 조금 높게 형성되었다. 오리피스가 설치된 경우, 이산화탄소 및 메탄 전환율 그리고 에너지 분해 효율은 각각 35.5%, 42.5%, 0.0048 L/min · W를 나타냈다. 이는 오리피스로 인해 방전영역의 중심부로 미 반응 가스를 모을 수 있기 때문이다. 즉, 오리피스의 내경 면적이 적을수록 가스를 플라즈마 반응 영역으로 집중시킬 수 있다. 그러나 전극의 중간 지점에서

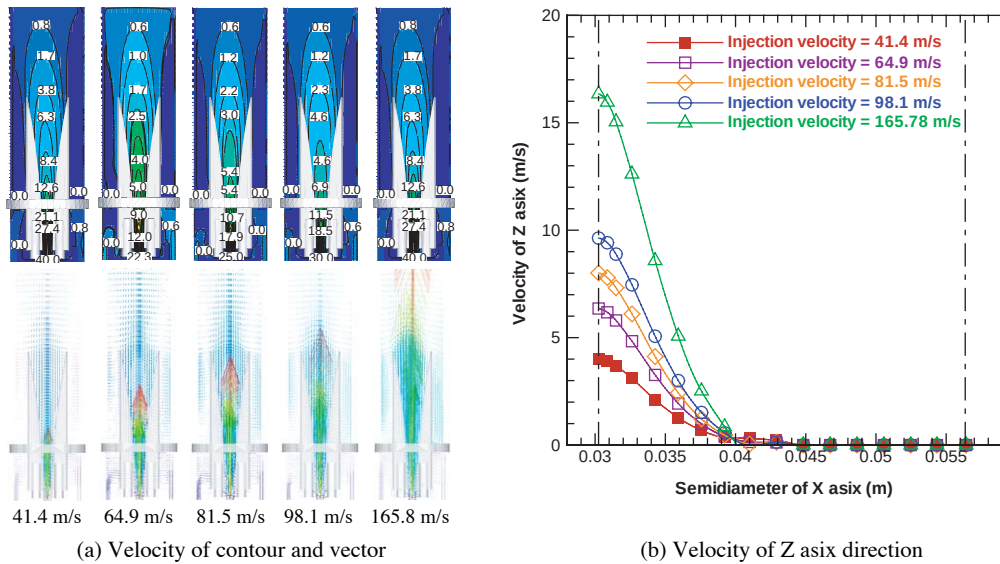


Fig. 7. Calculated velocity and vector of increasing nozzle velocity in 3-phase gliding arc plasma.

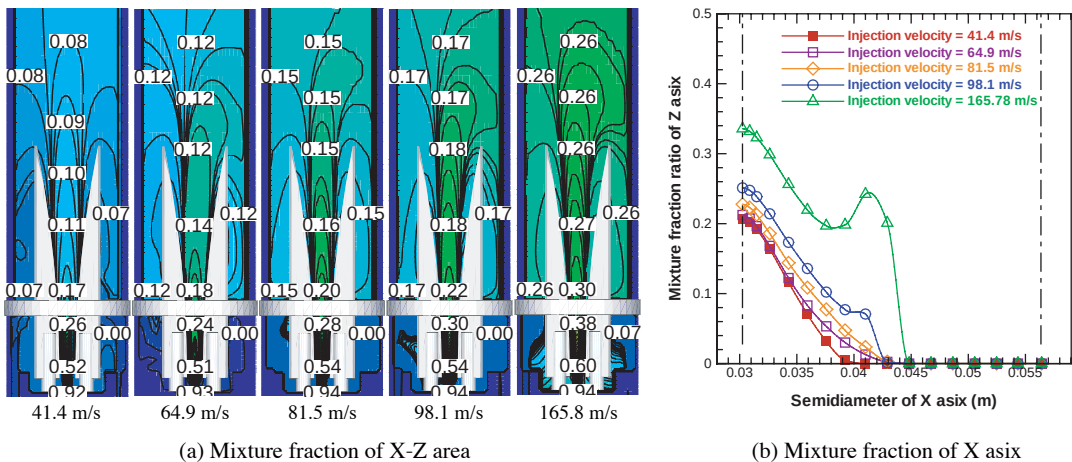


Fig. 8. Calculated mixture fraction of increasing nozzle velocity in 3-phase gliding arc plasma.

오리피스를 설치하므로 전기적 절연에 따른 문제로 오리피스 내경 면적을 최소화하는 부분이 제한적이 었다. 오리피스가 없는 경우, 플라즈마 방전영역에서 반응을 하지 못하고 빠져나가는 가스량이 증가되어, CO₂ 전환율이 감소하는 결과를 나타냈다.

3.2 노즐 주입 조건

그림 7은 플라즈마 반응기 내 유속과 벡터선도를

나타낸 것이다. 노즐의 속도가 증가할수록 전극 중심 부의 유속 또한 증가하는 결과를 나타냈으며, 벡터선 도에서는 약 81.5 m/s 이상에서는 오리피스 상단의 측면에서 재순환 영역이 생성되어 벡터의 방향이 바뀌는 것을 알 수 있다.

그림 8은 Case R의 조건에서 노즐 속도를 변화하였을 때 플라즈마 반응기 내 혼합 분율을 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 반응기 전체 영역에서 체류시간

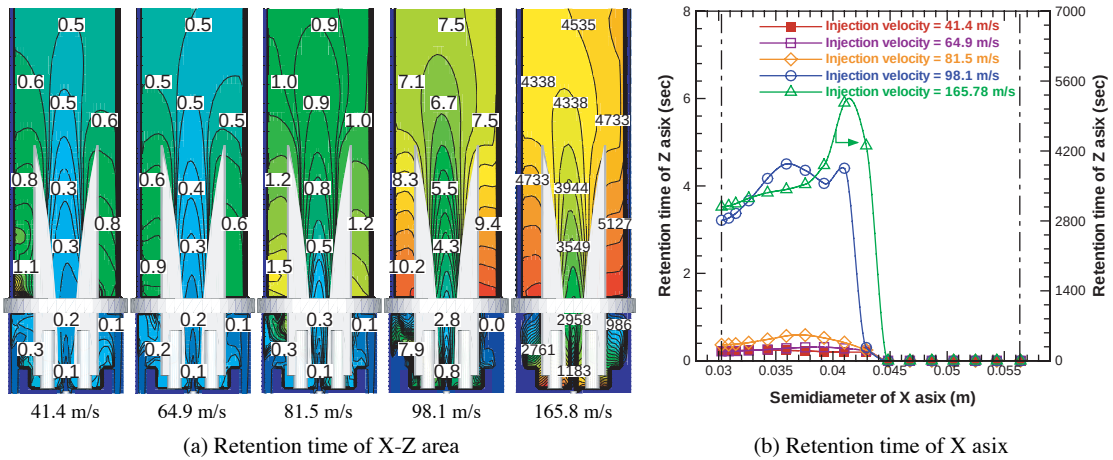


Fig. 9. Calculated retention time of increasing nozzle velocity in 3-phase gliding arc plasma.

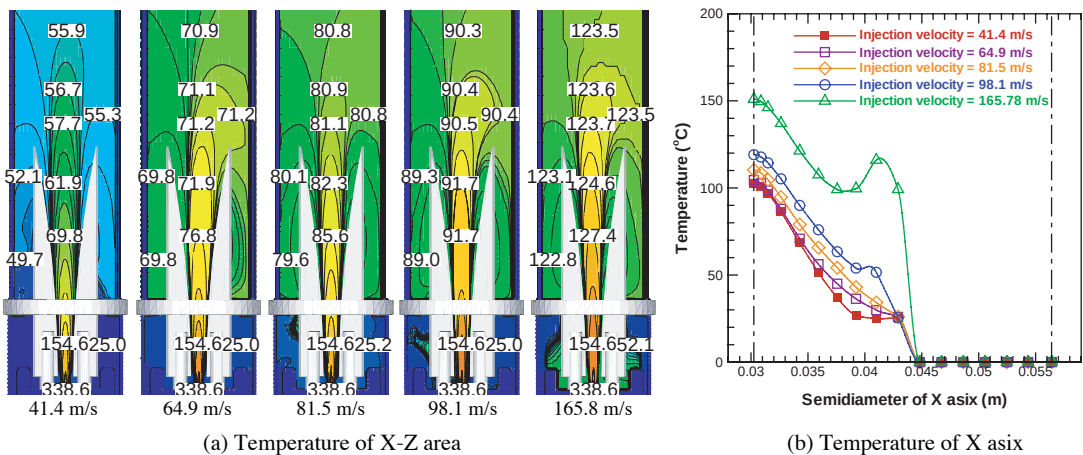


Fig. 10. Calculated temperature of increasing nozzle velocity in 3-phase gliding arc plasma.

변화를 나타냈으며, 그림 8(b)는 반응기 중심으로부터 반경방향으로 오리피스가 위치한 격자의 데이터를 나타낸 것이다. 노즐에서 분사되는 가스 유속이 증가함에 따라 혼합율은 증가하여 노즐과 하단부에서 주입되는 가스의 혼합이 잘 이루어지지 않음을 알 수 있다.

그림 9는 Case R의 조건에서 노즐 속도를 변화하였을 때 플라즈마 반응기 내 체류시간을 나타낸 것이다. 노즐 속도가 증가할 경우 반응기 중심 영역의 체류시간은 증가되는 것으로 결과를 나타냈으며, 특히 오리피스 상단부의 측면에서 체류시간이 급속도

로 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 노즐 속도의 증가가 체류시간을 증대함으로써 전극 사이에서 플라즈마 방전영역내의 반응물의 체류시간을 증가시키는 효과를 가져와 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단되나 98.1 m/s 이상의 노즐 속도에서는 오리피스 상단 측면의 미반응 영역이 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 10은 Case R의 조건에서 노즐 속도를 변화하였을 때 플라즈마 반응기 내 온도 변화를 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 반응기 전체 영역에서 온도 변화를 나타냈으며, 그림 10(b)는 반응기 중심으로부터 반경방향으로 오리피스가 위치한 격자의 데이터를

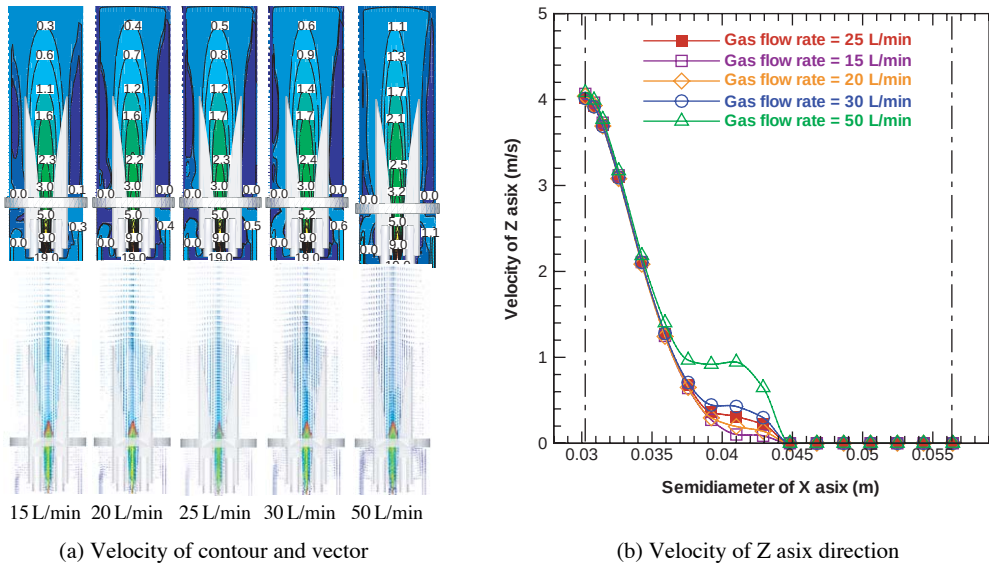


Fig. 11. Calculated velocity and vector of increasing gas flow rate in 3-phase gliding arc plasma.

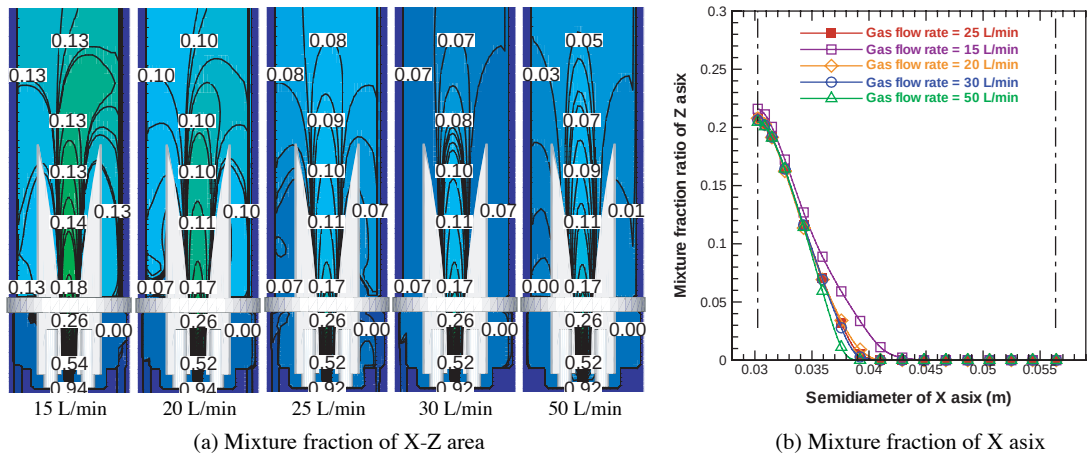


Fig. 12. Calculated mixture fraction of increasing gas flow rate in 3-phase gliding arc plasma.

나타낸 것이다. 노즐에서 분사되는 가스 유속이 증가함에 따라 X축 반경방향에 따른 온도가 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 3 전체가스량 변화

그림 11은 반응기 내 유속 변화를 나타낸 것이다. 하단부 주입 가스량이 증가함에 따라 전극 중심부의 유속 차이는 크게 변하지 않았다. 그러나 오리피스

설치된 측면에서는 하단부 주입 가스량이 증가하면서 오리피스 내경 부분의 유속이 증가하는 결과를 나타냈다.

그림 12는 노즐에 공급되는 유속을 고정하고 반응기 하단에서 주입되는 가스 유량을 증가시켜 플라즈마 반응기 내 혼합도를 나타낸 것이다. 혼합율은 가스 유량이 증가할수록 노즐 공급가스와 하단부에서 공급되는 가스의 혼합이 증가하여 값이 감소하였다.

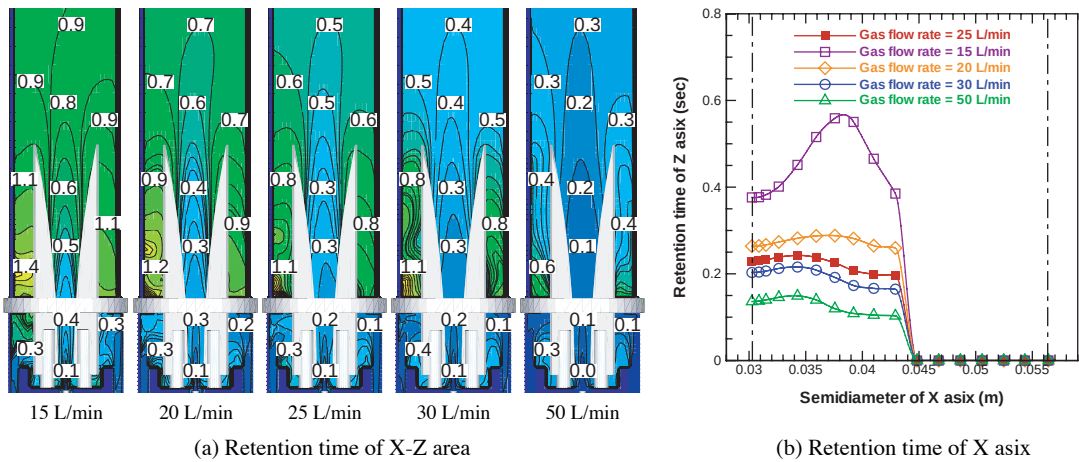


Fig. 13. Calculated retention time of increasing gas flow rate in 3-phase gliding arc plasma.

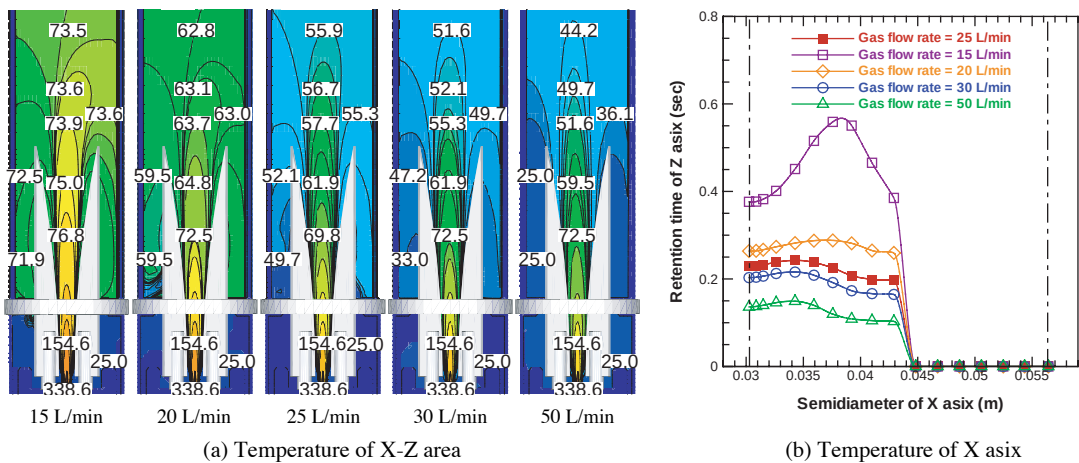


Fig. 14. Calculated temperature of increasing gas flow rate in 3-phase gliding arc plasma.

그림 13은 반응기 내 체류시간을 나타낸 것이다. 하단부의 주입가스 유량이 증가할수록 체류시간은 감소하는 결과를 나타냈으며, 특히 기준 조건인 25 L/min에서 30 L/min은 큰 차이를 보이지 않지만, 50 L/min에서는 체류시간이 0.2 sec 이하로 감소하였다. 따라서 적정 공급유량 범위는 약 25~30 L/min이 적정한 것으로 판단되었다.

그림 14는 플라즈마 반응기 내 온도 분포를 나타낸 것이다. 25°C로 설정된 반응기 하단의 가스공급량이 증가함에 따라 냉각에 의해 최종 배출 온도는

감소하는 결과를 나타냈다.

4. 결 론

본 논문에서는 플라즈마 반응기 내 유량을 효과적으로 증대시킬 수 있는 오리피스에 영향을 대하여 수치해석 및 실험 연구를 수행하였다. 수치해석은 상용코드인 Phoenix V2012를 사용하여 수행하였다.

기존의 글라이딩 아크 플라즈마는 전극 사이에 노

즐을 설치하여 빠른 유속을 공급함으로써 플라즈마 영역에서 반응을 일으키는 형태로서, 노즐이 유량을 늘려 플라즈마 처리 용량을 늘이는데 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서 제시된 오리피스를 적용한 플라즈마 반응기는 플라즈마 방전 영역으로 반응물을 오리피스에 의해 집중하여 주입함으로써 기존 노즐을 사용하는 것 보다 효율 및 처리량을 증가시켰다.

수치해석 결과, 플라즈마 반응기내 유속과 체류시간은 노즐에서 공급되는 가스량에 의해 주로 영향을 받지만 오리피스가 설치되면 혼합분율이 개선되면서 최적 조건에서 이산화탄소 전환율을 높일 수 있는 요소로 작용되었다. 계산을 통해 얻어진 결과를 이용하여 실험에 적용하여 판단한 결과, 방전전극 사이에 오리피스 설치는 가스 혼합율을 증가시켜 이산화탄소 전환효율이 높으면서 일반적인 글라이딩 아크 플라즈마 단점으로 제시된 많은 유량의 처리가 가능함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012R1A1A2007144).

References

- Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot (1960) Transport Phenomena, John Wiley and Sons.
- Chiu, S.Y., C.Y. Kao, C.H. Chen, T.C. Kuan, S.C. Ong, and C.S. Lin (2008) Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor, *Bioresource Technol.*, 99(9), 3389-3396.
- Chun, Y.N. (1999) Numerical Simulation of Dump Combustor with Auxiliary, *KSME International Journal*, 13(12), 948-961.
- Fridman, A., S. Nester, L.A. Kennedy, A. Saveliev, and O. Mutaf-Yardimci (1998) Gliding arc gas discharge. *Prog. Energ. Combust.*, 25(2), 211-231.
- Hirata, Y., M. Ando, N. Matsunaga, and S. Sameshima (2012) Electrochemical decomposition of CO₂ and CO gases using porous yttria-stabilized zirconia cell, *Ceram. Int.*, 38(8), 6377-6387.
- Indarto, A., D.R. Yang, J.W. Choi, H. Lee, and H.K. Song (2007) Gliding arc plasma processing of CO₂ conversion, *J. Hazard. Mater.*, 146(1-2), 309-315.
- Jin, W., C. Zhang, X. Chang, Y. Fan, W. Xing, and N. Xu (2008) Efficient Catalytic Decomposition of CO₂ to CO and O₂ over Pd/Mixed-Conducting Oxide Catalyst in an Oxygen-Permeable Membrane Reactor, *Environ. Sci. Technol.*, 42(8), 3064-3068.
- Khalil, E.E., D.B. Spalding, and J.H. Whitelaw (1975) The Calculation of Local flow Properties in Two-Dimensional Furnaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 18, 775-791.
- Kim, S.C., J.H. Jeon, and Y.N. Chun (2013) Characteristics of Carbon Dioxide Destruction with a Plasma Torch and Effect of Additives, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(3), 287-296. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.C., M.S. Lim, and Y.N. Chun (2014) Reduction Characteristics of Carbon Dioxide Using a Plasmatron, *Plasma Chem. Plasma P.*, 34(1), 125-143.
- Li, R., Q. Tang, S. Yin, Y. Yamaguchi, and T. Sato (2004) Decomposition of Carbon Dioxide by the Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Using Ca_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ Barrier, *Chem. Lett.*, 33(4), 412-413.
- Park, C.M., W.J. Ahn, W.K. Jo, J.H. Song, K.J. Kim, W.J. Jeong, B.K. Sohn, B.K. Ahn, M.C. Chung, K.P. Park, and H.G. Ahn (2013) Study on Conversion of Carbon Dioxide to Methyl Alcohol over Ceramic Monolith Supported CuO and ZnO Catalysts, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29(1), 97-104. (in Korean with English abstract)
- Patanker, S.V. (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Rim, B.S., S.H. Kim, and Y.G. Park (1999) The Decomposition of Carbon-dioxide and Methanation with Activated Magnetite, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 15(2), 183-190. (in Korean with English abstract)
- Spalding, D.B. (1989) PHOENICS Training Course Notes, TR /300, CHAM, 1989.
- Spencer, L.F. and A.D. Gallimore (2013) CO₂ dissociation in an atmospheric pressure plasma/catalyst system: a study of efficiency, *Plasma Sources Sci. T.*, 22(1), 1-9.
- Wen, Y. and X. Jiang (2001) Decomposition of CO₂ Using Pulsed Corona Discharges Combined with Catalyst, *Plasma Chem. Plasma P.*, 21(4), 665-678.