

## 과불화탄소 제거를 위한 플라즈마 워터젯 스크러버 개발

### Development of a Plasma Waterjet Scrubber for the Reduction of PFCs

이 채 홍 · 전 영 남\*

조선대학교 환경공학부 · BK21 바이오가스기반 수소생산 사업팀  
(2010년 6월 25일 접수, 2010년 8월 3일 수정, 2010년 10월 6일 채택)

Chae Hong Lee and Young Nam Chun\*

Department Environmental Engineering · BK21 Team for Hydrogen Production,  
Chosun University

(Received 25 June 2010, revised 3 August 2010, accepted 6 October 2010)

#### Abstract

Perfluorocarbons (PFCs) are widely used in semiconductor industry. These gases need to be removed efficiently because of their strong absorption of infrared radiation and long atmospheric lifetimes which cause the global warming effect.

To destruct  $CF_4$ , a waterjet gliding arc plasma was designed and manufactured. The highest  $CF_4$  destruction showed at waterjet plasma case, compared to plasma discharge only or water scrubber only, respectively. In addition, it could be known that the  $CF_4$  destruction should be associated with the electron and OH radicals.

The operating conditions such as waterjet flow rate, initial  $CF_4$  concentration, total gas flow rate, specific energy input were investigated experimentally using a plasma waterjet scrubber. Through the parametric studies, the highest  $CF_4$  destruction of 94.5% was achieved at 0.2%  $CF_4$ , 2.1 kJ/L SEI, 20 L/min total gas flow rate and 18.5 mL/min waterjet flow rate.

**Key words** : Tetrafluoromethane, Waterjet, Gliding arc plasma, Energy efficiency, OH radical

#### 1. 서 론

과불화탄소(PFCs, Perfluoro compounds)는 다수의 불소가 포함된 가스로  $CF_4$ ,  $C_3F_8$ ,  $C_2F_6$ 와 같이 탄소를 포함한 경우와  $NF_3$ ,  $SF_6$ 와 같은 무기성 가스로 구분할 수 있다(Kim *et al.*, 2004). PFCs는 반도체 산

업에서 식각(etching)과 화학기상증착(CVD)에서 광범위 하게 사용되고 있으며, 대기 중에 결합력이 강하여 분해되는데 오랜 시간이 걸린다(Tsai and Kuo, 2009). 게다가 PFCs는 적외선을 흡수하며 지구온난화의 주된 원인이 되는 가스이다(Sun *et al.*, 2003). 지구 온난화의 대표적 물질은  $CO_2$ 이며, 배출되는 양도 PFCs보다 훨씬 많지만  $CO_2$ 의 경우는 소각로, 발전소, 자동차, 일반가정, 산업전반에서 광범위하게 배출되어 처리하기 어려운 문제가 있다. 그러나 PFCs

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

중 CF<sub>4</sub>의 경우 반도체 산업에 집중되어 있기 때문에 기술적으로 처리가 가능하다. 따라서 현재 CF<sub>4</sub>의 배출가스에 대한 분해기술을 비롯하여 회수 및 대체 물질 개발에 관한 연구가 필요하다(노임준 등, 2008).

여러 처리기술 중 글라이딩 아크 플라즈마는 다양한 난분해성 물질을 분해하는데 사용되고, 글라이딩 아크 플라즈마는 저온 플라즈마와 고온 플라즈마의 성질을 동시에 가지고 있으며, 플라즈마 공정상에 동시에 발생하는 특징이 있다(Indarto *et al.*, 2007).

CF<sub>4</sub>는 글라이딩 아크 플라즈마에서 발생하는 화학활성종과 반응성이 낮으므로, CF<sub>1</sub>(CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, CF)과 같은 형태로 분해되어야 화학활성종과의 반응이 높기 때문에(Yu and Chang, 2001), 반응기 설계 시 이에 따른 고려가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 글라이딩 아크 플라즈마에 워터젯을 적용하여 CF<sub>4</sub>의 분해를 위한 플라즈마와 화학적 활성종의 생성, 전자의 가속 및 전기장 형성을 최적화하였다. 이때 CF<sub>4</sub>의 분해효율에 기여하는 OH 라디칼의 생성을 확인하기 위해 워터젯 플라즈마에 N<sub>2</sub>와 CO를 주입하여 반응 후 생성된 CO<sub>2</sub>로부터 OH 라디칼 생성범위를 확인하는 방법(Su *et al.*, 2002)으로 OH 라디칼의 최적 생성조건을 구하였다. 워터젯을 주입한 경우와 주입하지 않은 경우의 실험을 진행하여 그 결과를 비교한 후 저비용 고효율의 최적화를 위한 워터젯 주입유량, 주입농도, 전체가스량, 주입전력에 따른 변수별 실험을 진행하였다.

## 2. 플라즈마 반응의 메카니즘

### 2.1 플라즈마 반응(Narengerile *et al.*, 2009; Xie *et al.*, 2009; Yu and Chang, 2001)

플라즈마에 의한 CF<sub>4</sub>의 분해 과정 원리는 전자(e)와 충돌에 의한 CF<sub>4</sub> 분자의 직접 분해이며, 분해 메카니즘은 다음과 같은 반응식(1~6)으로 나타낼 수 있다.



### 2.2 OH 라디칼(Du and Yan, 2007; Su *et al.*, 2002)

주입되는 물은 전자(e) 또는 여기상태(excited state)의 Ar 분자(Ar\*)에 의하여 다음과 같은 반응식(7~8)과 같이 화학활성종인 ·OH, H· 라디칼을 생성한다.



반응식(7~8)에서 생성된 화학활성종과 반응식(1~6)에서 분해된 반응물이 반응하여 다음과 같은 반응식(9~12)으로 나타낼 수 있다.

### 2.3 OH 라디칼 반응(Hong *et al.*, 2003)



반응식(7~8)에서 생성된 화학활성종은 다른 반응물과 반응하여 다른 물질로 전환되어 효율을 저감시키며, 다음과 같은 반응식(13~18)으로 나타낼 수 있다.

### 2.4 OH 라디칼 손실반응(Su *et al.*, 2002; Buxton *et al.*, 1988)



### 2.5 CO 산화 모니터링(Su *et al.*, 2002)

반응식(7~8)과 CO를 반응시켜 OH 라디칼을 측

정하는 방법으로 다음과 같은 반응식 (19)으로 나타낼 수 있다.



### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치

그림 1은 본 실험에서 사용한 글라이딩 아크 워터젯 플라즈마 장치를 나타낸 것으로 워터젯 플라즈마 반응기, 전원공급 장치, 가스 공급 라인, 분석 라인 그리고 제어 및 모니터링 장치로 구성되어 있다.

워터젯 플라즈마 반응기는 체적은 0.8 L이며, 플라즈마 반응부와 주입되는 워터젯을 받기 위한 구조로 나누어져 있다. 이류체 노즐을 사용하였으며, 방전 전극의 재질은 스테인레스 스틸이며, 전극 간격은 3 mm, 전극 길이는 120 mm, 각각 전극의 각도는 120°로 제작하였다. 반응기의 관은 절연 및 내부를 관찰할 수 있도록 석영관을 사용하였으며, 전극의 고정 및 절연을 위하여 워터젯 플라즈마 반응기의 상단부는 세라믹 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 99 wt.%)을 이용하였다. 또한 워터젯 주입량에 따른 변수별 실험을 위해 펌프를 설치하여 물 유량을 추가적으로 조절할 수 있도록 설치하였으며, 정량 주입되는 증류수의 분무량을 조절하기 위하여

정량 밸브를 설치하였다.

전원공급장치 (Unicorn Tech, UAP-15K1A, Korea)는 안정적인 플라즈마 방전을 유지하기 위한 장치로 3상 고전압 파워서플라이 (3 kW)를 사용하였다. 그리고 워터젯 플라즈마 반응기로 공급되는 전기특성을 파악하기 위해 고전압 측정기 (Tektronix, P6015, USA)와 전류 측정기 (Tektronix, A6303, USA)를 설치하여 측정하였다.

가스 공급 라인은 CF<sub>4</sub>, Ar, N<sub>2</sub>, CO로 구분하여 공급되며, 주입되는 가스는 실린더에서 질량유량계 (Line Tech, M3030V, Korea)에 의해 유량 제어되어 공급된다. N<sub>2</sub>와 CO, 그리고 CF<sub>4</sub>와 Ar은 각각의 실험 시 혼합탱크에서 혼합하여 워터젯 플라즈마 반응기에 설치된 노즐로 공급된다.

분석 장치는 가스크로마토그래프 (Varian, GC-4900, Netherlands)를 사용하였으며, 검출기는 열전도도검출기 (Thermal conductivity detector), 컬럼은 PoraPLOT-Q와 Molecular Sieve 5A를 사용하였다.

제어 및 모니터링 시스템은 LabVIEW (National Instrument, LabVIEW 8.6, USA)를 이용하여 반응 온도를 파악하기 위하여 실시간으로 측정하였다.

#### 3.2 실험방법

실험은 상온 상태에서 진행되며 두 가지 실험을 진

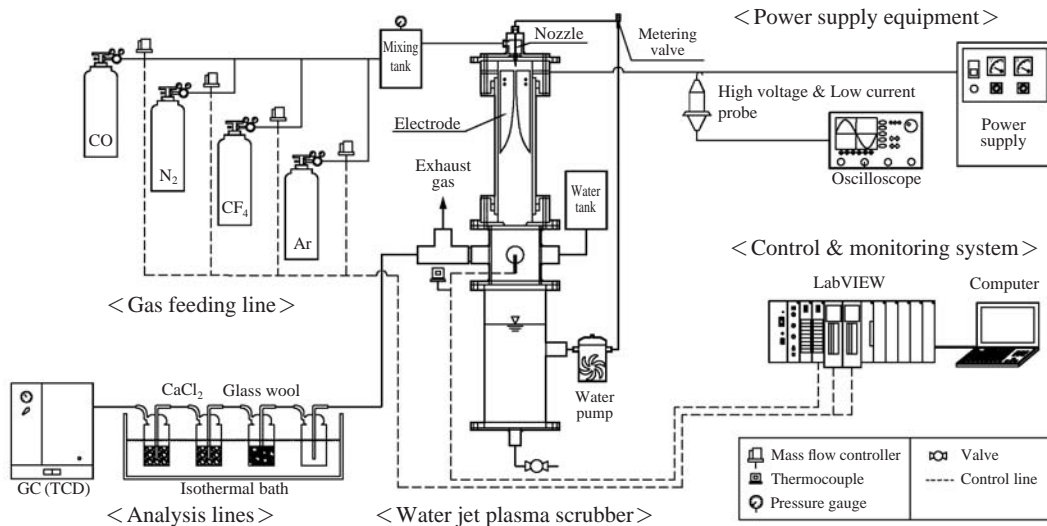


Fig. 1. Experimental apparatus.

행하였다. 첫 번째 실험으로 OH 라디칼 형성조건을 파악하기 위해 N<sub>2</sub>와 CO를 혼합기에서 혼합 후 노즐로 주입하였으며, 워터젯을 주입하고 방전 전압과 전류는 각각 6kV, 114mA로 하였다. 그리고 워터젯 주입 유량에 따른 실험을 진행하였다. 두 번째로 CF<sub>4</sub>와 Ar을 주입하여 플라즈마를 방전한 후 SEI(Specific energy input)는 2.1 kJ/L로 조절하였다. 그리고 공급되는 물의 양 0mL/min에서 배출가스의 온도를 130°C로 안정화한 뒤 물을 주입하여 반응가스의 온도를 측정하여 75°C에서 안정한 상태로 유지됨을 확인하였다. 워터젯 플라즈마 장치의 출구에서 배기가스 온도를 실시간으로 측정하였으며, CF<sub>4</sub>의 제거특성을 파악하기 위하여 플라즈마 반응기 유입부와 반응기 출구부에서 가스를 샘플링 하였으며, 채취된 시료는 냉각장치를 통과하여 수분을 응축시켜 제거한 후 건조가스 기준으로 가스크로마토그래프의 샘플링 루프로 연속적으로 유입한 후 분석하였다. 변수별 연구로는 CF<sub>4</sub>의 분해효율에 영향을 미치는 인자로 운전조건 변화, 워터젯 주입유량 변화, CF<sub>4</sub>의 초기 농도 변화,

전체가스량 변화, SEI 변화에 대하여 각각 실험을 진행하였다.

그림 2는 워터젯 플라즈마 반응기의 배기가스 온도로써 반응기의 시동특성을 나타낸 것이며, 표 1은 변수별 실험 조건을 나타냈다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 실험결과 데이터 처리

4.1.1 CF<sub>4</sub> 제거 효율 (DRE: Decomposition rate efficiency) (Xie *et al.*, 2009; Sun and Park, 2003)

$$DRE (\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad (20)$$

여기서, C<sub>in</sub>은 CF<sub>4</sub>의 주입농도를 나타내며, C<sub>out</sub>은 CF<sub>4</sub>의 출구농도를 나타낸다.

4.1.2 에너지 효율 (Du *et al.*, 2007)

$$\eta_e (\text{g/kWh}) = \frac{[CF_4]_{\text{removal}} \times \text{Gas flow rate (g/h)}}{\text{Power input (kW)}} \quad (21)$$

여기서, [CF<sub>4</sub>]<sub>removal</sub>는 CF<sub>4</sub>의 제거율이며, Gas flow rate (g/h)는 워터젯 플라즈마에 주입되는 CF<sub>4</sub>의 가스량이며, Power input (kW)는 플라즈마 주입전력을 나타낸다.

4.1.3 주입 에너지량 (SEI) (Du *et al.*, 2007)

$$SEI (\text{kJ/L}) = \frac{\text{Discharge power (kW)}}{\text{Total gas flow rate (L/s)}} \quad (22)$$

여기서, Discharge power (kW)는 플라즈마 주입전력이며, Total gas flow rate (L/s)은 워터젯 플라즈마에 주입되는 전체가스량을 나타낸다.

##### 4.2 CO 산화 모니터링

CO 산화 모니터링 방법은 OH 라디칼의 농도를 측정하는데 사용되었다. H<sub>2</sub>O와 불활성 기체를 플라즈마

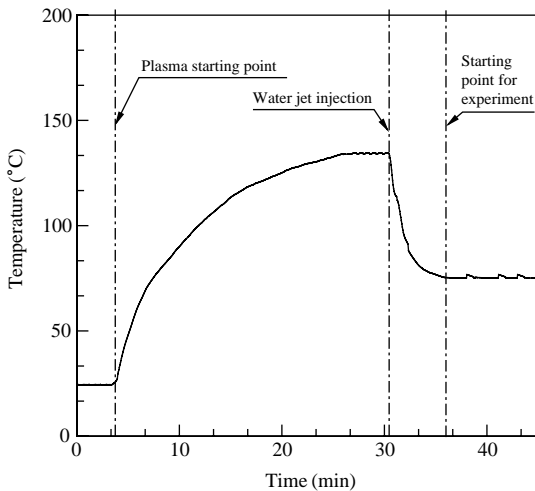


Fig. 2. Initial operating conditions in the waterjet plasma reactor.

Table 1. Experimental conditions for parametric studies.

Conditions	Water input flow rate (mL/min)	Specific energy input (kJ/L)	Total gas flow rate (L/min)	Input concentration of CF <sub>4</sub> (%)
Variables range	0 ~ 52	2.1 ~ 5.1	10 ~ 26	0.1 ~ 0.3

방전을 형성시키면, 반응식(7~8)과 같이 플라즈마 반응에 의하여 OH 라디칼을 생성한다. CO를 첨가하게 되면 반응식(19)와 같이 반응이 일어나 OH 라디칼에 의하여 산화된다. 따라서 CO<sub>2</sub>가 생성되는 양에 의하여 OH 라디칼의 농도를 추정할 수 있다(Su *et al.*, 2002).

그림 3은 물의 주입유량에 따른 CO와 CO<sub>2</sub>의 농도 변화를 나타낸 것이다. N<sub>2</sub>의 주입유량은 19.8L/min, CO의 주입유량은 0.2L/min, 그리고 SEI는 2.1 kJ/L로 고정하였으며, 워터젯 주입유량은 0.5~53 mL/min으로 변화하였다. 물의 주입유량이 18.5 mL/min 일 때 CO<sub>2</sub>의 농도는 최대 3,750 ppm으로 가장 크게 나타났

으며, 물의 주입유량이 23 mL/min 이상의 경우는 CO<sub>2</sub>의 농도가 점차 감소하였다. 이는 물의 주입유량이 증가할수록 주입되는 물이 기화되면서 가스량이 증가하여 플라즈마 내의 체류시간이 감소하여 OH 라디칼의 생성농도가 작아지므로 CO의 농도는 증가하고, CO<sub>2</sub>의 농도는 감소한다고 추정된다.

### 4.3 CF<sub>4</sub>의 제거 실험결과

#### 4.3.1 운전조건 변화

그림 4(a)는 운전조건에 따른 CF<sub>4</sub>의 분해효율, CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율을 나타낸 것이며, 그림 4(b)는 운전조건에 따른 방전 상태를 나타낸 것이다. 그림 5는 운전조건에 따른 부산물을 FT-IR (Otsuka, IG-2000, Japan)로 측정된 결과이다. 워터젯 플라즈마, 플라즈마, 워터젯만 주입하였을 때의 기본적인 운전조건으로는 Ar의 주입유량은 19.96 L/min, CF<sub>4</sub>의 주입유량은 0.04 L/min으로 주입되는 CF<sub>4</sub>의 농도는 0.2%이며, 물의 주입유량은 18.5 mL/min, SEI는 2.1 kJ/L로 고정하였다.

그림 4(a)의 그래프의 경우 워터젯만 주입하였을 때 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 약 14%이며, HF는 검출되지 않았으며, CO<sub>2</sub>의 경우는 TCD로 분석하였을 때는 생성되지 않았으나, FT-IR로 분석을 하였을 때 소량의 CO<sub>2</sub>가 검출되었다. 이는 FT-IR 분석을 위하여 샘플 과정 중 CO<sub>2</sub>가 유입된 것으로 판단된다. 에너지 효율은 플라즈마를 사용하지 않았기 때문에 0 g/kWh이며, 주입되는 워터젯이 플라즈마에 의하여 OH 라디칼

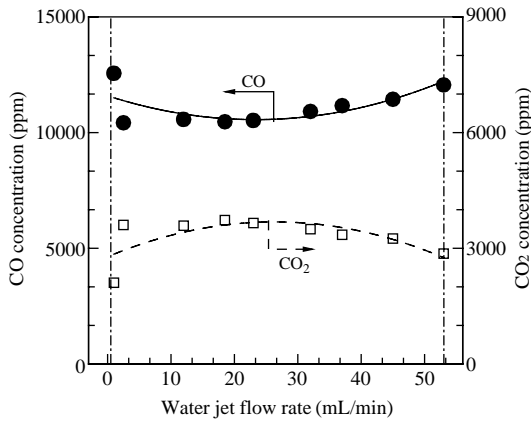


Fig. 3. Effects of waterjet flow rate on the CO, CO<sub>2</sub> concentration.

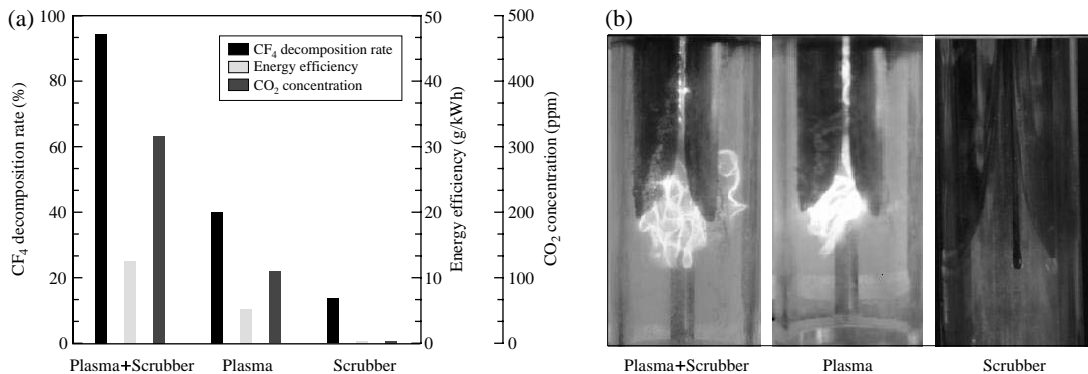


Fig. 4. (a) Effect of waterjet plasma, plasma and waterjet on the CF<sub>4</sub> decomposition rate, CO<sub>2</sub> concentration and energy efficiency. (b). Effect of waterjet plasma, plasma and waterjet on the discharge state.

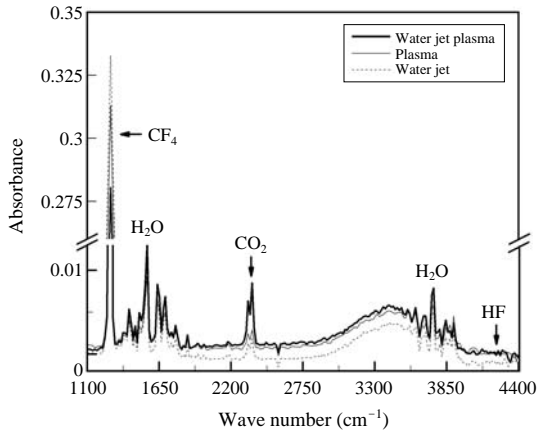


Fig. 5. Concentration of by-product depending on waterjet plasma, plasma, and waterjet.

이 생성되지 않았으므로 CO<sub>2</sub>가 생성되지 않았다. 플라즈마 방전만 했을 경우 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 40.2%, CO<sub>2</sub>는 약 110 ppm이 생성되었으나, HF는 검출되지 않았으며, 에너지 효율은 5.4 g/kWh로 나타났다. 워터젯과 플라즈마를 동시에 하였을 경우에는 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 94.5%, CO<sub>2</sub>는 약 320 ppm, HF는 41 ppm이 생성되었으며, 에너지 효율은 12.7 g/kWh로 나타났다. FT-IR을 이용하여 분석하였을 때 전체적으로 소량의 H<sub>2</sub>O가 검출되었다. 특히 워터젯과 플라즈마를 동시에 하였을 때 반응식(13~18)의 OH 라디칼 손실에 의해 H<sub>2</sub>O가 생성되어 가장 높게 나타났다.

플라즈마 방전상태에서 워터젯의 주입 유무를 비교하였을 때 CO<sub>2</sub>의 생성량이 110 ppm에서 320 ppm으로 증가하는 것과 HF의 생성으로 보아 워터젯을 주입함으로써 반응식(9~12)와 같은 반응으로 인하여 OH 라디칼의 생성과 그림 4(b)와 같이 워터젯으로 인해 플라즈마 체적의 증가로 CF<sub>4</sub>의 분해효율이 40.2%에서 94.5%로 증가되며, 에너지 효율은 5.4 g/kWh에서 12.7 g/kWh로 증가되는 결과가 확인되었다. 이를 토대로 워터젯 유량변화, CF<sub>4</sub> 주입농도 변화, 전체가스량 변화, 주입전력 변화를 통하여 CF<sub>4</sub>의 분해효율의 최적 조건을 연구하였다.

4.3.2 Waterjet 유량 변화

그림 6은 물의 주입유량에 따른 CF<sub>4</sub>의 분해효율, CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율을 나타낸 것이다. Ar의 주입유량은 19.96 L/min, CF<sub>4</sub>의 주입유량은 0.04 L/min

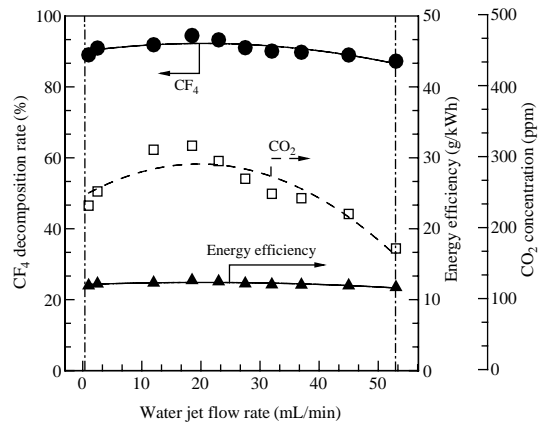


Fig. 6. Effect of waterjet flow rate on the CF<sub>4</sub> decomposition rate, CO<sub>2</sub> concentration and energy efficiency.

으로 주입되는 CF<sub>4</sub>의 농도는 0.2%로 고정하였다. 그리고 SEI는 2.1 kJ/L로 고정하였으며, 물의 주입유량은 0.5~53 mL/min으로 변화하였다. 물의 주입유량이 증가할수록 OH 라디칼 반응에 의하여 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 증가하였으며, 물의 주입유량이 18.5 mL/min 일 때 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 94.5%, CO<sub>2</sub>의 생성량은 약 320 ppm, 에너지 효율은 12.7 g/kWh로 나타났으며, 물의 주입유량이 18.5 mL/min 이상일 경우 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량이 점차 감소하였으며, 물의 주입량에 관계없이 에너지 효율은 평균적으로 12 g/kWh으로 유지하였다. 물의 주입유량이 증가할수록 CF<sub>4</sub>의 분해효율이 감소하는 이유는 워터젯이 기화되면서 전체가스량의 증가로 인하여 체류시간의 감소로 인한 OH 라디칼의 손실로 인하여 CF<sub>4</sub>의 분해효율 및 CO<sub>2</sub>의 생성량이 감소하였다.

4.3.3 CF<sub>4</sub> 주입농도 변화

그림 7은 CF<sub>4</sub>의 주입농도 변화에 따른 CF<sub>4</sub>의 분해효율, CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 물의 주입유량은 18.5 mL/min, SEI는 2.1 kJ/L로 고정하였으며, 주입되는 CF<sub>4</sub>의 농도는 0.1~0.3%로 조절하였다. CF<sub>4</sub>의 분해효율은 CF<sub>4</sub>의 주입농도가 0.2% 일 때 94.5%로 가장 높게 나타났으나, 평균적으로 분해효율은 94%를 유지하였다. 에너지 효율은 CF<sub>4</sub>의 주입농도가 증가할수록 식(21)에서 동일한 주입전력에서 평균적으로 CF<sub>4</sub>의 분해효율을 유지하고 있으나, CF<sub>4</sub>의 양이 증가함으로써 에너지 효율은 6.3 g/kWh

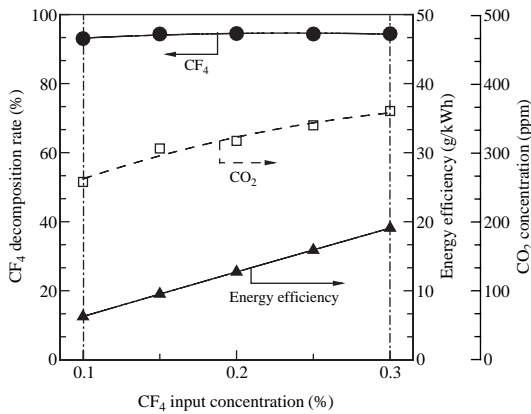


Fig. 7. Effect of CF<sub>4</sub> input concentration on the CF<sub>4</sub> decomposition rate, CO<sub>2</sub> concentration and energy efficiency.

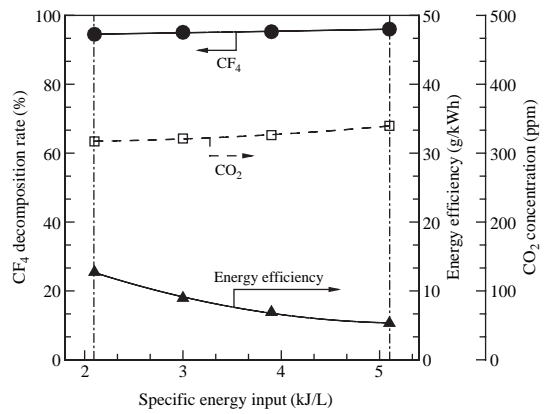


Fig. 9. Effect of SEI on the CF<sub>4</sub> decomposition rate, CO<sub>2</sub> concentration and energy efficiency.

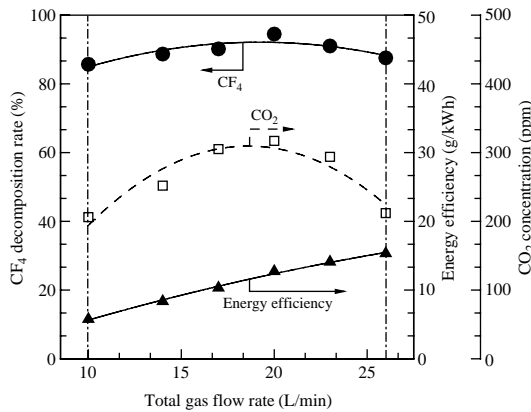


Fig. 8. Effect of total gas flow rate on the CF<sub>4</sub> decomposition rate, CO<sub>2</sub> concentration and energy efficiency.

에서 19.1 g/kWh로 증가된다. CO<sub>2</sub>의 생성량 경우 CF<sub>4</sub>의 주입농도가 증가함에 따라 생성되는 CO<sub>2</sub>의 양은 약 260 ppm에서 약 360 ppm으로 증가하였다. 주입되는 CF<sub>4</sub> 양의 증가로 인한 탄소의 수가 증가하여 반응식 (11), (19)에 의한 OH 라디칼과 CO 산화 반응이 증가하여 CO<sub>2</sub>의 양도 증가하였다.

#### 4.3.4 전체가스량 변화

그림 8은 전체가스량에 따른 CF<sub>4</sub>의 분해효율, CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 주입되는 CF<sub>4</sub>의 농도는 0.2%로 고정하였으며, 물의 주입유량

은 18.5 mL/min, SEI는 2.1 kJ/L로 고정하였다. 주입되는 전체가스량은 10~26 L/min로 조절하였으며, 전체가스량이 증가 시 가스속도가 증가하여 절연과피 (breakdown)에서 생성되는 플라즈마가 전극의 상단 부까지 생성되어 플라즈마의 체적이 증가하므로 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량은 증가하였다. 전체가스량이 20 L/min로 주입하였을 때 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 최대 94.5%로 나타났으며, CO<sub>2</sub>의 생성량의 경우 약 320 ppm으로 높게 나타났다. 주입되는 가스량이 증가할수록 CF<sub>4</sub>의 양이 증가하므로 에너지 효율은 5.7 g/kWh에서 15.3 g/kWh으로 증가하였다. 주입되는 가스량이 20 L/min 이상일 경우에는 플라즈마반응 영역의 체류시간의 감소로 인하여 CF<sub>4</sub>의 분해효율 및 CO<sub>2</sub>의 생성량이 감소하였다.

#### 4.3.5 주입전력 변화

그림 9는 주입전력 변화에 따른 CF<sub>4</sub>의 분해효율, CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율을 나타낸 것이다. Ar의 주입유량은 19.96 L/min, CF<sub>4</sub>의 주입유량은 0.04 L/min으로 주입되는 CF<sub>4</sub>의 농도는 0.2%이며, 물의 주입유량은 18.5 mL/min으로 고정하였다. 주입전력을 변화하여 SEI를 2.1~5.1 kJ/L로 조절하였다. 이때 CF<sub>4</sub>의 분해 효율은 SEI가 5.1 kJ/L로 하였을 때 최대 96%로 나타냈다. 주입전력이 증가할수록 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량은 증가하지만 에너지 효율은 감소하는 결과를 나타내고 있다. SEI가 증가하면서 CF<sub>4</sub>와 전자와의 반응이 증가하게 되고 또한 워터젯으로부터 생

성되는 OH 라디칼이 증가하기 때문에 CF<sub>4</sub>의 분해 효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량은 증가하지만 주입전력의 증가로 인하여 에너지 효율은 감소하였다.

## 5. 결 론

워터젯 플라즈마를 이용하여 CF<sub>4</sub>의 분해효율에 영향을 줄 수 있는 변수별 실험 결과를 통해 다음과 같은 결과를 나타냈다.

- 1) 워터젯 플라즈마 반응기에 CO를 주입하여 OH 라디칼과 반응된 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정함으로써 OH 라디칼 생성 여부 및 생성량을 알 수 있었으며, 물의 주입량이 18.5 mL/min일 때 CO<sub>2</sub>의 농도는 최대 3,750 ppm이 생성되었다.
- 2) 각각 워터젯 플라즈마, 플라즈마, 워터젯을 실험한 결과 워터젯만 사용하였을 경우 CF<sub>4</sub>의 분해 효율은 약 14%이고 CO<sub>2</sub>, HF는 검출되지 않았으며, 플라즈마만 사용하였을 경우 CF<sub>4</sub>의 분해 효율은 40.2%, CO<sub>2</sub>는 약 110 ppm이고 HF는 검출되지 않았다. 워터젯과 플라즈마를 동시에 하였을 경우 CF<sub>4</sub>의 분해효율은 94.2%, CO<sub>2</sub>는 약 320 ppm, HF는 41 ppm이 생성되었다. 플라즈마 방전상태에서 워터젯의 주입여부에 따른 CO<sub>2</sub>와 HF의 생성으로 인하여 OH 라디칼의 생성의 차이를 확인하였다.
- 3) 물의 주입 유량이 증가할수록 OH 라디칼과의 반응이 일어나 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량이 증가하며, 최적의 물의 주입유량은 18.5 mL/min임을 확인하였다. 그러나 물의 주입 유량을 계속하여 증가시키면 분해효율은 감소하였다.
- 4) CF<sub>4</sub>의 주입농도가 0.2%일 때 CF<sub>4</sub>의 제거효율은 94.5%로 가장 높게 나타났으며, CF<sub>4</sub>의 주입농도가 증가할수록 CO<sub>2</sub>의 생성량과 에너지 효율은 증가하였다.
- 5) 전체가스량의 경우 주입되는 가스량이 20 L/min일 때 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량이 최대로 나타났으며, 전체가스량 증가 시 CF<sub>4</sub>의 분해 효율과 CO<sub>2</sub>의 생성량은 감소하는 결과를 나타냈다.
- 6) 주입전력의 증가 시 높은 CF<sub>4</sub>의 분해효율과 CO<sub>2</sub>

의 생성량이 증가하였다. 플라즈마 영역의 증가로 반응기 내에서 CF<sub>4</sub>의 전자 밀도의 증가와 OH 라디칼의 증가 때문에 CF<sub>4</sub>의 분해 반응이 증가한 것을 알 수 있었다.

- 7) 워터젯 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 장치는 고효율의 CF<sub>4</sub> 분해 장치를 필요로 하는 산업 현장에서 응용가능성이 충분한 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2010-0016897).

## 참 고 문 헌

- 노임준, 신백균, 박동화, 김형권, 이상희, 박종국, 강대하, 김진식 (2008) PFCs가스 분해처리를 위한 글라이딩 아크 플라즈마 응용, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 16-18.
- Buxton, G.V., C.L. Greenstock, W.P. Helman, and A.B. Ross (1988) Critical review of rate constants for reactions of hydrated electrons, hydrogen atoms and hydroxyl radicals in aqueous solution, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 17, 513-886.
- Du, C.M. and J.H. Yan (2007) Electrical and spectral characteristics of a hybrid gliding arc discharge in air-water, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35(6), 1648-1650.
- Du, C.M., J.H. Yan, and B. Cheron (2007) Decomposition of toluene in a gliding arc discharge plasma reactor, *Plasma Sources Science and Technology*, 16, 791-797.
- Hong, Y.C., H.S. Kim, and H.S. Uhm (2003) Reduction of per-fluorocompound emissions by microwave plasma-torch, *Thin Solid Films*, 435, 329-334.
- Indarto, A., D.R. Yang, J.W. Choi, H. Lee, and H.K. Song (2007) Gliding arc plasma processing of CO<sub>2</sub> conversion, *Journal of Hazardous Materials*, 146, 309-315.
- Kim, K.T., Y.H. Kim, M.S. Cha, Y.H. Song, S.T. Kim, and J.I. Ryu (2004) Decomposition characteristics of PFCs for various plasma discharge methods in dielec-



- tric barrier discharge, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 20(5), 625-632. (in Korean with English abstract)
- Narengerile., H. Saito, and T. Watanabe (2009) Decomposition of tetrafluoromethane by water plasma generated under atmospheric pressure, Thin Solid Films, 518, 929-935.
- Su, Z.Z., K. Ito, K. Takashim, S. Katsura, K. Onda, and A. Mizuno (2002) OH radical generation by atmospheric pressure pulsed discharge plasma and its quantitative analysis by monitoring CO oxidation, Journal of Physics D : Applied Physics, 35, 3192-3198.
- Sun, J.W. and D.H. Park (2003) CF<sub>4</sub> Decomposition by thermal plasma processing, Korean Journal of Chemical Engineering, 20(3), 476-481.
- Tsai, C.H. and Z.Z. Kuo (2009) Effects of additives on the selectivity of byproducts and dry removal of fluorine for abating tetrafluoromethane in a discharge reactor, Journal of Hazardous Materials., 161, 1478-1483.
- Xie, H., B. Sun, and X. Zhu (2009) Abatement of perfluorocompounds with microwave plasma in atmospheric pressure environment, Journal of Hazardous Materials, 168, 765-769.
- Yu, S.J. and M.B. Chang (2001) Oxidative conversion of PFC via plasma processing with dielectric barrier discharges, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 21(3), 311-327.