

# 워터젯 글라이딩 아크 플라즈마에 의한 사불화탄소 제거에 미치는 운전변수의 영향

이채홍 · 전영남<sup>†</sup>

조선대학교 환경공학부 · BK21 바이오가스기반 수소생산 사업팀  
(2010년 8월 2일 접수, 2010년 11월 1일 채택)

## Effects of Operating Parameters on Tetrafluoromethane Destruction by a Waterjet Gliding Arc Plasma

Chae Hong Lee and Young Nam Chun<sup>†</sup>

BK21 Team for Hydrogen Production · Department of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea  
(Received August 2, 2010; Accepted November 1, 2010)

사불화탄소(CF<sub>4</sub>)는 반도체 제조공정에서 플라즈마 에칭과 화학기상증착(CVD)에서 사용되어온 가스이다. CF<sub>4</sub>는 적외선을 강하게 흡수하고 대기 중 잔류시간이 길어서 지구온난화에 영향을 미치기 때문에 고효율의 분해가 필요하다. 본 연구에서는 플라즈마와 워터젯을 결합하여 방전영역을 증가시키고 다량의 OH 라디칼을 생성시켜 CF<sub>4</sub>를 고효율로 분해할 수 있는 워터젯 글라이딩 아크 플라즈마 시스템을 개발하였다. 실험 변수로 전극 형태, 전극 각도, 가스 노즐 직경, 전극 간격과 전극 길이를 취하였다. 변수실험을 통하여 Arc 형태의 전극에서 전극 각도가 20°, 가스 노즐 직경이 3 mm, 전극 간격이 3 mm, 전극 길이가 120 mm일 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 최고 93.4%까지 도달하였다.

Tetrafluoromethane (CF<sub>4</sub>) has been used as the plasma etching and chemical vapor deposition (CVD) gas for semiconductor manufacturing processes. However, the gas need to be removed efficiently because of their strong absorption of infrared radiation and the long atmospheric lifetime which cause global warming effects. A waterjet gliding arc plasma system in which plasma is combined with the waterjet was developed to effectively produce OH radicals, resulting in efficient destruction of CF<sub>4</sub> gas. Design factors such as electrode shape, electrode angle, gas nozzle diameter, electrode gap, and electrode length were investigated. The highest CF<sub>4</sub> destruction of 93.4% was achieved at Arc 1 electrode shape, 20° electrode angle, 3 mm gas nozzle diameter, 3 mm electrode gap and 120 mm electrode length.

**Keywords:** non-CO<sub>2</sub> gas, CF<sub>4</sub>, waterjet scrubber, gliding arc plasma, greenhouse gas

### 1. 서 론

최근에 지구 온난화 가스의 발생은 세계적으로 중요한 환경 문제가 되었다. 일반적으로 대기 중에 존재하는 온실 가스로는 수증기, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 그리고 오존을 포함하고 있다. 그리고 인위적으로 생성되는 온실 가스는 다양한 산업 공정에서 발생하는 염화불화탄소 화합물(CFCs), 수소불화탄소 화합물(HFC)과 과불화탄소 화합물(PFCs) 등이 있다[1]. 이 중 PFCs (Perfluorocompounds)는 다수의 불소가 포함된 CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, CHF<sub>3</sub>와 같이 탄소를 포함한 경우와 SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>와 같은 무기성 가스로 구성되어 있다[2,3].

PFCs는 반도체 산업이 발달하면서 식각(etching)공정과 화학기상증착(CVD)공정에서 광범위하게 사용되고 있으며, 결합력이 강하여 대기 중에서 분해되는데 오랜 시간이 걸린다. 게다가 PFCs는 적외선을 흡수하여 지구온난화의 주된 원인이 되는 가스이다[4].

이러한 이유로 인하여 현재 PFCs의 분해를 위해 Microwave[1,5],

Torch[6], RF plasma[7], DBD (Dielectric barrier discharges)[2,8] 등의 여러 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 글라이딩 아크 플라즈마 (Gliding arc plasma discharge)는 반응기 내에서 열평형 플라즈마와 비평형 플라즈마의 성질이 복합적으로 나타나며, 각 상태의 특징을 이용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다[9].

플라즈마 반응기 내에서의 난분해성 기체의 분해는 높은 에너지를 가지는 전자와 기체 분자와의 충돌을 통해 일어나는데, 난분해성 기체 분자의 원자간 연결 고리를 끊기 위해서는 높은 에너지를 가지는 전자의 밀도를 높게 하지 못하면 전자와의 충돌에 의한 분해의 효율이 낮아지게 된다. 높은 에너지를 가지는 전자를 다량으로 생성시키기 위해서는 낮은 기체 밀도장이 형성되어 전자의 가속 구간이 길어지고 충분한 전기장이 형성되어야 한다.

CF<sub>4</sub>는 화학활성종과의 반응성이 매우 낮으며, CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, 그리고 CF와 같은 형태로 분해되어야 화학활성종과의 반응성이 높은 것으로 알려져 있다. 그러므로 CF<sub>4</sub>를 효과적으로 분해하기 위해서는 1차적으로 전자와 반응하여 활성종과 반응성이 높은 형태로 전환한 후, 2차적으로 반응을 하여야 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에[10] 반응기 설계

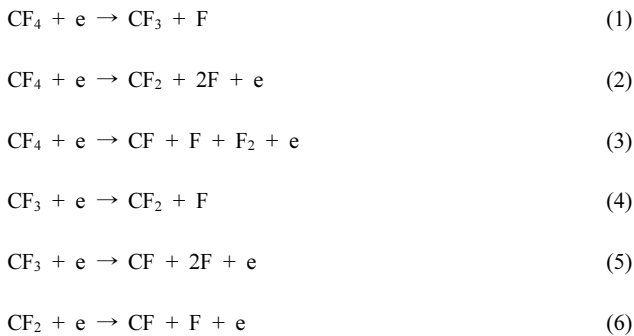
<sup>†</sup> 교신저자(e-mail: ynchun@chosun.ac.kr)

시 이에 따른 고려가 필요하다.

따라서 본 연구에서 글라이딩 아크 플라즈마와 워터젯을 결합하여 CF<sub>4</sub>의 분해를 위한 플라즈마와 화학적 활성종의 생성, 전자의 가속 및 전기장의 형성을 최적화하기 위해 물 분사 플라즈마 방전 특성을 규명하였다. 또한 고효율의 분해 반응기 개발을 위하여 전극 형태, 전극 각도, 가스 노즐 직경, 전극 간격, 전극 길이에 따른 변수별 실험을 진행하였다.

## 2. 이론적 배경

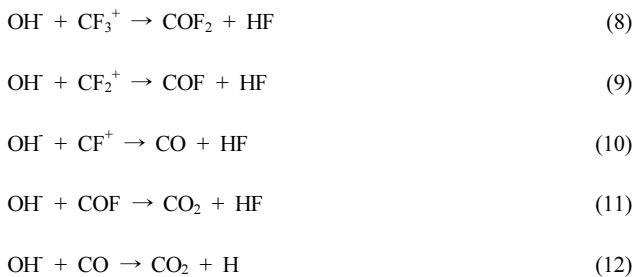
CF<sub>4</sub>의 분해 과정은 전자에 의한 직접 분해와 OH radical에 의한 분해가 있다. 첫 번째로 플라즈마에서 발생하는 전자에 의한 직접 분해로 CF<sub>4</sub>는 반응식 (1~6)과 같이 CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, CF로 분해된다[4,10].



주입되는 워터젯과 전자에 의하여 반응식 (7)과 같이 수산화기(OH radical)를 생성한다[11].



전자에 의한 직접 분해로 생성된 CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, CF와 플라즈마에 워터젯을 주입함으로써 생성된 OH 라디칼과 반응하여 반응식 (8~11)과 같이 전환된다[12,13].



OH 라디칼의 반응을 저감시키는 요인으로 반응식 (7)에서 생성된 OH 라디칼은 반응식 (12~17)과 같이 다른 반응물과 반응하여 다른 물질로 전환되어 OH 라디칼의 소실이 일어난다[14].

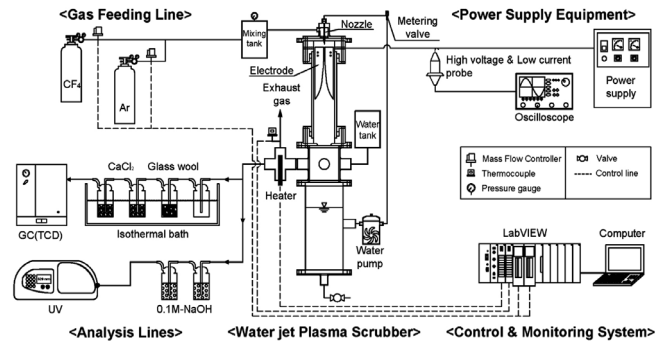
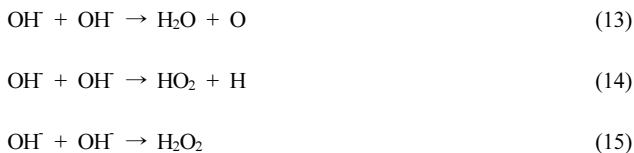


Figure 1. Experimental apparatus setup.

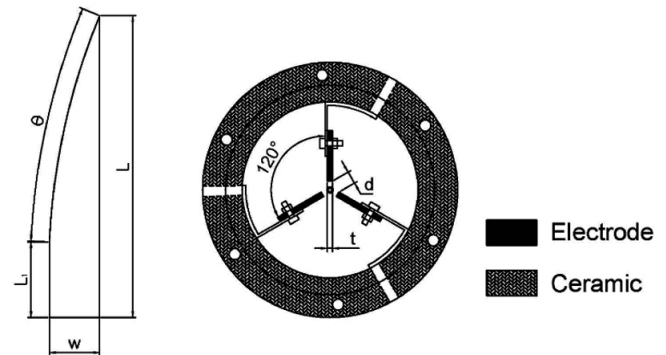


Figure 2. Electrode shape.



## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1. 실험장치

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

워터젯 플라즈마 반응기의 체적은 0.8 L이며, 플라즈마 반응부와 주입되는 워터젯을 받기 위한 구조로 나누어져 있다. 이류체 노즐을 사용하였으며, 방전 전극의 재질은 스테인리스로 제작하였다. Figure 2와 같이 전극의 두께(t)는 2 mm, 전극의 폭(w)은 20 mm로 제작하였으며, 전극간의 각도는 120°로 설치하였다. 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 워터젯을 주입하기 위해 정량 펌프(KNF, NF1.300 KP.27E, Switzerland)를 설치하였으며, 정량 주입되는 증류수의 분무량을 조절하기 위하여 정량 밸브(HOKE, 1666G4YA, USA)를 설치하였다.

전원공급장치(Unicorn Tech, UAP-15K1A, Korea)는 안정적인 플라즈마 방전을 유지하기 위한 장치로 3상 고전압 전원공급장치를 사용하였다. 그리고 워터젯 플라즈마 반응기로 공급되는 전기특성을 파악하기 위해 고전압 프로브(Tektronix, P6015, USA)와 저전류 프로브

**Table 1. Experimental Conditions for Parametric Studies**

Variable	Range			
	Triangle	Arc1	Arc2	Arc3
Electrode shape	Triangle	Arc1	Arc2	Arc3
Electrode angle (°)	14	17	20	23
Gas nozzle diameter (mm)	2.5	3	4	4
Electrode gap (mm)	2	3	4	5
Electrode length (mm)	80	100	120	140

(Tektronix, A6303, USA)를 설치하여 측정하였다.

가스 공급 라인에 CF<sub>4</sub>와 아르곤(Ar)이 별도로 공급되며, 혼합탱크에서 혼합하여 위터젯 플라즈마 반응기에 설치된 노즐로 공급된다. 각각의 주입되는 가스는 실린더에서 MFC (Mass Flow Controller; Line Tech, M3030V, Korea)에 의해 유량 제어되어 공급된다.

분석 장치는 가스크로마토그래프(Varian, GC-4900, Netherlands), 분광광도계(Biochrom, Ultrospec-2100pro, England)를 사용하였으며, 가스크로마토그래프의 검출기는 열전도도검출기(Thermal conductivity detector)를 사용하였으며, 컬럼은 PoraPLOT-Q와 Molecular Sieve 5A를 사용하였다.

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

**3.2. 실험방법**

실험은 상온, 대기압 상태에서 진행하였으며, 기준조건으로는 주입되는 CF<sub>4</sub>와 Ar은 각각 40 mL/min, 19.96 L/min으로 주입 가스량 20 L/min으로 고정한 상태에서 혼합기에서 혼합 후 노즐로 주입하였으며, 주입되는 위터젯은 18.5 mL/min으로 고정하였다. SEI (Specific energy input)은 평균 2.1 kJ/L (6 kV, 114 mA)로 유지하도록 조절하여 실험을 진행하였다. HF를 분석하기 위한 란탄-알리자린 콤플렉스법(La-Alizarin Complexon)에서 제시된 샘플가스의 온도를 유지하기 위하여 히터를 설치하여 위터젯 플라즈마 장치에서 배출되는 가스의 온도는 120 °C로 조절하였다. 위터젯 플라즈마 장치의 출구에서 배기가스 온도를 실시간으로 측정하였으며, CF<sub>4</sub>의 제거특성과 부산물의 생성을 파악하기 위하여 플라즈마 반응기 유입부와 반응기 출구부에서 가스를 샘플링 하였다.

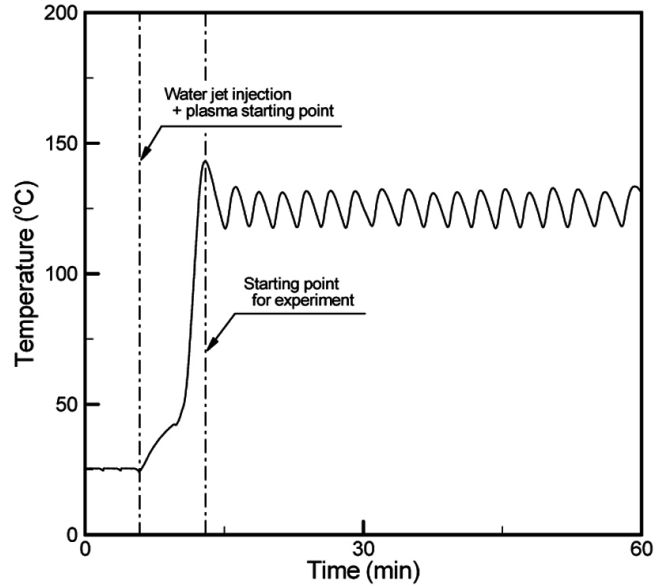
가스크로마토그래프의 분석을 위한 가스시료는 냉각장치를 통과하여 수분을 응축시켜 제거한 후 건식가스 기준으로 가스크로마토그래프의 샘플링 루프로 연속적으로 유입한 후 분석하였다. 또한 생성되는 부산물 중 HF의 분석은 0.1 M-NaOH 흡수액을 이용하여 흡광광도법(Absorptiometric analysis) 중 란탄-알리자린 콤플렉스법을 이용하여 흡광도 620 nm에서 분석하였다.

변수별 연구로는 CF<sub>4</sub>의 분해율에 영향을 미치는 인자로 전극 형태 변화, 전극 각도 변화, 가스 노즐 직경 변화, 전극 간격 변화, 전극 길이 변화에 대하여 각각 실험을 진행하였다.

Figure 3은 위터젯 플라즈마 반응기의 배기가스 온도로 반응기의 시동특성을 나타낸 것이며, Table 1은 변수별 실험 조건을 나타냈다.

**3.3. 데이터 처리**

CF<sub>4</sub>의 분해율( $\eta_c$  : Destruction efficiency)[1,4]은 다음의 식 (19)을 이용하여 계산하였다.



**Figure 3. Initial operating and stable condition in the waterjet plasma reactor.**

$$\eta_c (\%) = \frac{[CF_4]_{inlet} - [CF_4]_{exhaust}}{[CF_4]_{inlet}} \times 100 (\%) \quad (19)$$

여기서, [CF<sub>4</sub>]<sub>inlet</sub>은 플라즈마 반응 전 CF<sub>4</sub>의 농도를 나타내며, [CF<sub>4</sub>]<sub>exhaust</sub>는 플라즈마 반응 후 CF<sub>4</sub>의 농도를 나타낸다.

에너지 효율( $\eta_e$  : Energy efficiency)[15]은 다음의 식 (20)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta_e (g/kWh) = \frac{[CF_4]_{destruction\ efficiency} \times Gas\ flow\ rate (g/h)}{Power\ input (kW)} \quad (20)$$

여기서, [CF<sub>4</sub>]<sub>destruction efficiency</sub>는 CF<sub>4</sub>의 분해율이며, Gas flow rate (g/h)는 위터젯 플라즈마에 주입되는 CF<sub>4</sub>의 가스량이며, Power input (kW)는 플라즈마의 주입전력을 나타낸다.

주입에너지량(SEI : Specific energy input)[15]은 다음의 식 (21)을 이용하여 계산하였다.

$$SEI (kJ/L) = \frac{Discharge\ power (kW)}{Total\ gas\ flow\ rate (L/s)} \quad (21)$$

여기서, Discharge power (kW)는 플라즈마의 방전전력이며, Total gas flow rate (L/s)은 위터젯 플라즈마에 주입되는 전체가스량을 나타낸다.

**4. 결과 및 고찰**

**4.1. 전극 형태 변화**

Figure 4는 전극 형태 변화에 따른 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량과 에너지 효율을, Figure 5는 전극의 형태에 따른 방전 상태를 나타내었으며, 실험은 기준조건에서 전극의 형태를 Triangle, Arc 1, Arc 2, Arc 3으로 변화하여 실험을 진행하였다.

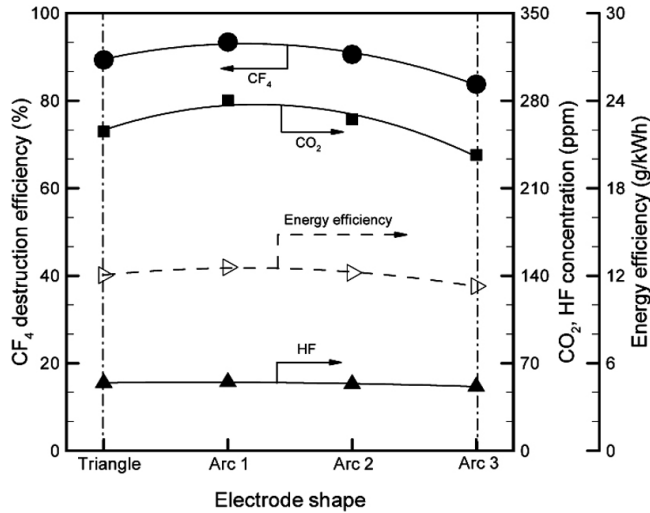


Figure 4. Effect of electrode shape on the CF<sub>4</sub> destruction efficiency, CO<sub>2</sub>, HF concentration and energy efficiency.

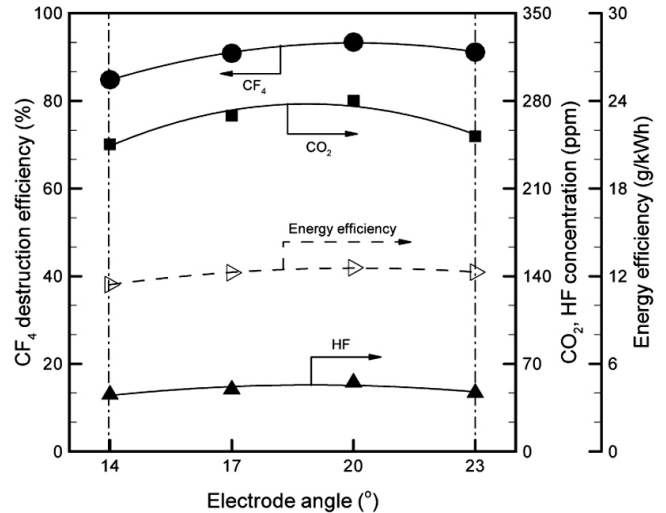


Figure 6. Effect of electrode angle on the CF<sub>4</sub> destruction efficiency, CO<sub>2</sub>, HF concentration and energy efficiency.

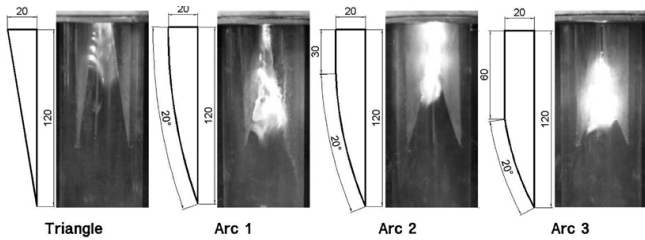


Figure 5. Effect of electrode shape on the discharge state.

Triangle의 경우 생성되는 플라즈마의 폭은 가장 크지만 breakdown이 생성되는 시점으로부터 전극의 정점까지 방전이 형성되지 못하며 전극의 중간부분에서 방전이 소멸되는 경향을 나타냈다. 이에 반하여 Arc 1의 경우는 breakdown이 생성되는 시점으로부터 전극의 정점까지 방전이 형성되어 전극을 전체적으로 플라즈마가 형성되었다[16]. Arc 2와 Arc 3의 경우는 방전이 분기되는 시점을 변화(L<sub>i</sub>)하여 실험을 진행하였다. breakdown으로부터 방전이 분기되는 시점이 멀어질수록 생성되는 플라즈마의 길이가 감소하여 플라즈마의 체적이 감소하는 경향을 나타내었다. 플라즈마의 형성이 가장 우수한 Arc 1의 경우는 데이터를 확인하였을 때 다른 전극의 형태보다 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF의 생성량, 에너지 효율도 가장 높게 나타났다. CF<sub>4</sub> 분해율은 93.4%, CO<sub>2</sub>와 HF의 생성량은 각각 280 ppm, 55 ppm이 형성되었으며, 에너지효율은 12.5 g/kWh로 나타내었다. 따라서 CF<sub>4</sub>의 효과적 분해를 위해서는 Arc 1의 전극형태가 최적임을 알 수 있었다.

4.2. 전극 각도 변화

Figure 6은 전극 형태 변화에 따른 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량과 에너지 효율을 나타내었으며, 실험은 기준조건에서 전극 각도( $\theta$ )를 14, 17, 20, 23°로 변화하여 실험을 진행하였다.

14°에서 20°까지 전극의 각도가 증가할수록 CF<sub>4</sub> 분해율은 84.8%에서 93.4%, CO<sub>2</sub>와 HF의 생성량은 각각 245 ppm (14°)에서 280 ppm (20°)으로, 45 ppm (14°)에서 55 ppm (20°)으로 증가하였으며, 에너지 효율은 11.4 g/kWh에서 12.5 g/kWh로 증가하였다. 이에 반하여 전극의 각도가 23°로 증가하였을 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 91.1%, CO<sub>2</sub>와 HF의 생성량

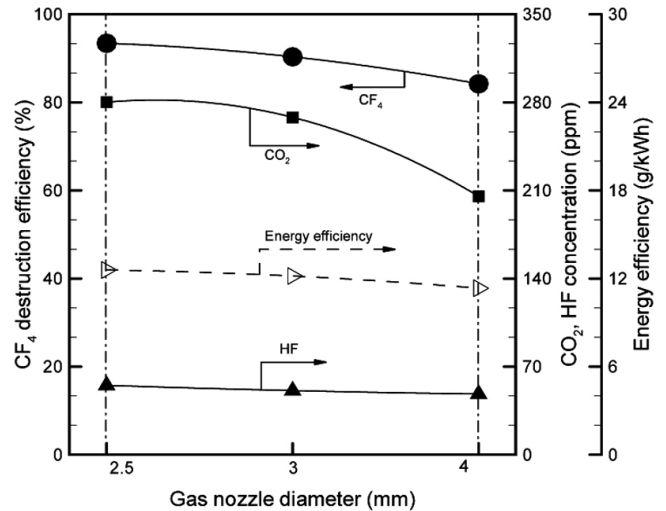


Figure 7. Effect of gas nozzle diameter on the CF<sub>4</sub> destruction efficiency, CO<sub>2</sub>, HF concentration and energy efficiency.

은 각각 251 ppm, 46 ppm으로 감소하였으며, 에너지 효율은 12.2 g/kWh로 감소하였다. 전극의 각도(14~20°)가 커질수록 breakdown이 생성되는 시점으로부터 전극의 정점까지 방전이 형성되며 전극의 전체적으로 플라즈마가 형성되어 플라즈마의 체적이 증가하여 분해율이 증가하나[17], 전극의 각도가 23°일 때 생성되는 플라즈마의 길이는 증가하나 폭이 감소하여 전체적으로 플라즈마의 체적이 적어져 효율이 감소된다. 따라서 CF<sub>4</sub>의 효과적 분해를 위해서는 20°의 전극 각도가 최적임을 알 수 있었다.

4.3. 가스 노즐 직경 변화

Figure 7은 가스 노즐 직경 변화에 따른 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량과 에너지 효율을 나타내었으며, 실험은 기준조건에서 가스 노즐 직경을 2.5, 3, 4 mm로 변화하여 실험을 진행하였다.

가스 노즐의 직경이 2.5 mm에서 4 mm로 증가하였을 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 93.4%에서 84.2%, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량은 각각 280 ppm에서 205

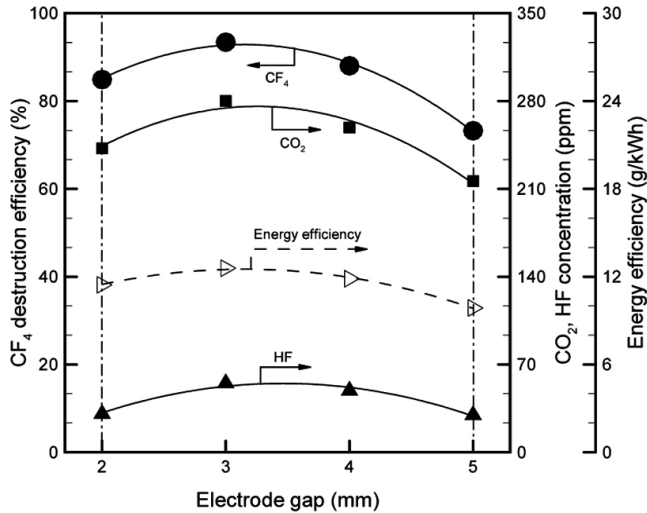


Figure 8. Effect of electrode gap on the CF<sub>4</sub> destruction efficiency, CO<sub>2</sub>, HF concentration and energy efficiency.

ppm으로, 55 ppm에서 48 ppm으로 감소하였으며, 에너지 효율은 12.5 g/kWh에서 11.3 g/kWh으로 감소하였다. 노즐 직경(2.5~4 mm)이 증가함으로써 가스속도가 감소하여 공급되는 가스가 전극 사이를 통과하지 못하고 확산된다. 또한 노즐 직경이 4 mm일 때는 방전이 간헐적으로 형성되어 효율이 감소하게 된다.

#### 4.4. 전극 간격 변화

Figure 8은 전극 간격 변화에 따른 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량과 에너지 효율을 나타내었으며, 실험은 기준조건에서 노즐의 직경은 2.5 mm로 고정한 상태에서 전극 간격(d)을 2, 3, 4, 5 mm로 변화하여 실험을 진행하였다.

전극 간격이 2 mm에서 3 mm로 증가하였을 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 84.9%에서 93.4%, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량은 각각 242 ppm (2 mm)에서 280 ppm (3 mm)으로, 30 ppm (2 mm)에서 55 ppm (3 mm)으로 증가하였으며, 에너지 효율은 11.4 g/kWh에서 12.5 g/kWh으로 증가하였다. 반면에 전극 간격이 3 mm에서 5 mm로 증가하였을 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 93.4%에서 73.2%, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량은 각각 280 ppm에서 216 ppm으로, 55 ppm에서 29 ppm로 감소하였으며, 에너지 효율은 12.5 g/kWh에서 9.86 g/kWh으로 감소하였다. 전극간격/노즐직경의 비가 1보다 작은 경우 공급되는 가스가 확산되어 전극의 사이로 통과하지 못하여 일부의 가스만 플라즈마 영역에 반응을 하게 된다. 그와는 반대로 비율이 1보다 큰 경우 공급되는 가스가 전극의 사이로 통과하게 되므로 플라즈마 영역에 전체적으로 반응하여 효율이 증가하게 된다 [18]. 또한 전극간의 간격이 증가할수록 플라즈마의 유효체적과 활성종의 수가 증가하게 되지만 [15], 플라즈마를 안정적인 상태로 유지하기가 어렵기 때문에 효율이 감소하게 된다 [19].

#### 4.5. 전극 길이 변화

Figure 9는 전극 길이 변화에 따른 CF<sub>4</sub> 분해율, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량과 에너지 효율을 나타내었으며, 실험은 기준조건에서 전극 길이(L)를 80, 100, 120, 140 mm로 변화하여 실험을 진행하였다.

전극 길이가 80 mm에서 120 mm로 길어졌을 때 CF<sub>4</sub> 분해율은 86.1%에서 93.4%, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량은 각각 251 ppm (80 mm)에서 280 ppm (120 mm)으로, 45 ppm (80 mm)에서 55 ppm (120 mm)으로

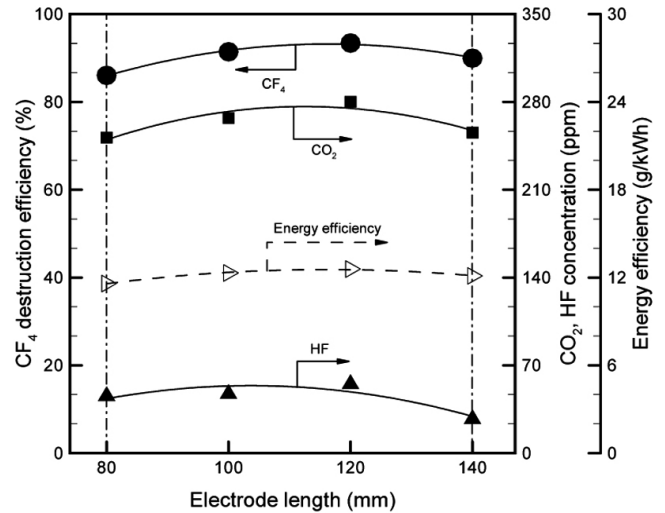


Figure 9. Effect of electrode length on the CF<sub>4</sub> destruction efficiency, CO<sub>2</sub>, HF concentration and energy efficiency.

증가하였으며, 에너지 효율은 11.5 g/kWh (80 mm)에서 12.5 g/kWh (120 mm)으로 증가하였다. 전극의 길이가 길어질수록 생성되는 플라즈마의 체적이 증가하여 효율이 증가하였으나, 전극이 140 mm로 증가하였을 때는 CF<sub>4</sub> 분해율은 89.9%, CO<sub>2</sub>와 HF 생성량은 각각 255, 27 ppm으로 감소하였으며, 에너지 효율은 12.1 g/kWh으로 감소하였다.

플라즈마를 생성할 때 높은 전압을 필요로 하며, 생성된 플라즈마의 길이가 증가할수록 소요 전압과 전류는 증가하여, 결과적으로 소요전력이 증가하게 된다. 전극의 길이가 길어질수록 플라즈마의 길이가 증가하여 더욱 많은 전력을 소비하게 되지만 [20], 주입되는 전력이 일정하도록 유지하였기 때문에 전극의 길이가 길어질수록 절연과피 - 평형상태 - 비평형상태의 순환 횟수가 감소하여 효율이 감소하게 된다 [21].

## 5. 결 론

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

첫째, 전극의 형태 변화를 실험한 결과 Triangle의 경우 플라즈마의 체적이 적은 반면에, Arc의 경우 전극 전체적으로 플라즈마가 형성되어 효율이 증가하였다. 방전의 분기시점(L<sub>1</sub>)이 멀어질수록 플라즈마 체적의 감소로 효율이 감소된다.

둘째, 전극의 각도가 커질수록 플라즈마의 체적이 증가하여 효율이 증가하나, 생성되는 플라즈마의 길이는 증가하고 폭이 감소하여 전체적으로 플라즈마의 체적이 적어져 효율이 감소된다.

셋째, 가스 노즐 직경의 직경이 증가할수록 효율은 감소된다. 가스가 동일할 경우 가스속도가 감소하여 가스가 전극 사이를 통과하지 못하고 확산된다.

넷째, 전극간격/노즐직경의 비율이 1보다 작은 경우 효율이 감소하며, 1보다 큰 경우 효율이 증가한다. 전극 간격의 증가로 플라즈마의 체적과 활성종의 수가 증가하지만, 플라즈마를 안정적인 상태로 유지하기 어렵기 때문에 효율이 감소된다.

다섯째, 전극의 길이가 길어질수록 플라즈마의 체적 증가로 효율이 증가하나, 필요 전력의 증가로 방전의 횟수가 감소하여 효율이 감소 된다.

## 감 사

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

## 참 고 문 헌

1. H. Xie, B. Sun, and X. Zhu, *J. Hazard. Mater.*, **168**, 765 (2009).
2. H. M. Lee, M. B. Chang, and R. F. Lu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 5526 (2005).
3. Narengerile, H. Saito, and T. Watanabe, *Thin Solid Films.*, **518**, 929 (2009).
4. J. W. Sun and D. H. Park, *Korean J. Chem. Eng.*, **20**, 476 (2003).
5. C. H. Tsai and Z. Z. Kuo, *J. Hazard. Mater.*, **161**, 1478 (2009).
6. D. Y. Kim and D. W. Park, *Surf. Coat. Technol.*, **202**, 5280 (2008).
7. T. Kuroki, S. Tanaka, M. Okubo, and T. Yamamoto, *IEEE Trans Ind Appl.*, **43**, 1075 (2007).
8. H. L. Chen, H. M. Lee, L. C. Cheng, M. B. Chang, S. J. Yu, and S. N. Li, *IEEE Trans Plasma Sci.*, **36**, 509 (2008).
9. N. Y. K. I. V. Kuznetsova, A. F. Gutsol, A. A. Fridman, and L. A. Kennedy, *J. Appl. Phys.*, **92**, 4231 (2002).
10. S. J. Yu and M. B. Chang, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **21**, 311 (2001).
11. C. M. Du and J. H. Yan, *IEEE Trans Plasma Sci.*, **35**, 1648 (2007).
12. Y. C. Hong, H. S. Kim, and H. S. Uhm, *Thin Solid Films*, **435**, 329 (2003).
13. D. R. Burgess, M. R. Zachariah, W. Tsang, and P. R. Westmoreland, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **21**, 453 (1996).
14. Z. Z. Su, K. Ito, K. Takashim, S. Katsura, K. Onda, and A. Mizuno, *J. Phys. Appl. Phys.*, **35**, 3192 (2002).
15. C. M. Du, J. H. Yan, and B. Cheron, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **16**, 791 (2007).
16. H. Shiki, T. Okawa, S. Yamanaka, E. Usuki, Y. Nishimura, S. Hishida, and T. Sakakibara, *Thin Solid Films.*, **516**, 3684 (2008).
17. S. Pellerin, F. Richard, J. Chapelle, J. M. Cormier, and K. Musiol, *J. Phys. Appl. Phys.*, **33**, 2407 (2000).
18. Z. Bo, J. H. Yan, X. D. Li, Y. Chi, B. Cheron, and K. F. Cen, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **27**, 691 (2007).
19. J. H. Yan, C. M. Du, X. D. Li, B. G. Cheron, M. J. Ni, and K. F. Cen, *Plasma Chem. Plasma Process.*, **26**, 31 (2006).
20. C. S. Kalra, A. F. Gutsol, and A. A. Fridman, *IEEE Trans Plasma Sci.*, **33**, 32 (2005).
21. A. Fridman, S. Nester, L. A. Kennedy, A. Saveliev, and O. Mutaf-Yardimci, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**, 211 (1999).