

워터젯 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 사불화탄소 저감

이채홍 · 전영남[†]

조선대학교 환경공학부·BK21 바이오가스기반 수소생산 사업팀
501-759 광주광역시 동구 서석동 375
(2010년 11월 15일 접수, 2010년 12월 18일 채택)

Reduction of Tetrafluoromethane using a Waterjet Gliding Arc Plasma

Chae Hong Lee and Young Nam Chun[†]

BK21 Team for Hydrogen Production · Department of Environmental Engineering,
Chosun University, 375 Seoseok-dong Dong-gu Gwangju 501-759, Korea
(Received 15 November 2010; accepted 18 December 2010)

요 약

사불화탄소(CF₄)는 반도체 제조공정에서 에칭과 반응기 세척에서 사용되어온 가스이다. CF₄는 적외선을 강하게 흡수하고 대기 중 잔류시간이 길어서 지구온난화에 영향을 미치기 때문에 고효율의 분해가 필요하다. 본 연구에서는 플라즈마와 워터젯을 결합하여 워터젯 글라이딩 아크 플라즈마 시스템을 개발하고, 이를 이용하여 CF₄를 고효율로 분해할 수 있도록 방전영역을 증가시키고 다량의 OH 라디칼을 생성시킬 수 있는 최적의 조업 조건을 결정하였다. 공정 실험 변수로는 워터젯 주입량, CF₄ 초기 농도, 전체 가스량과 주입에너지량(SEI : Specific energy input)을 선정하였다. 변수실험을 통하여 워터젯 주입량이 25.5 mL/min, CF₄ 초기 농도 2.2%, 전체 가스량 9.2 L/min, SEI 7.2 kJ/L일 때 CF₄ 분해율은 최고 97%까지 도달하였다.

Abstract – Tetrafluoromethane(CF₄) has been used as etching and chamber cleaning gases for semiconductor manufacturing processes. These gases need to be removed efficiently because of their strong absorption of infrared radiation and long atmospheric lifetime which causes the global warming effect. We have developed a waterjet gliding arc plasma system in which plasma is combined with waterjet and investigated optimum operating conditions for efficient CF₄ destruction through enlarging discharge region and producing large amount of OH radicals. The operating conditions are waterjet flow rate, initial CF₄ concentration, total gas flow rate, specific energy input. Through the parametric studies, the highest CF₄ destruction of 97% was achieved at 2.2% CF₄, 7.2 kJ/L SEI, 9 L/min total gas flow rate and 25.5 mL/min waterjet flow rate.

Key words: Tetrafluoromethane, Waterjet, Gliding arc Plasma, Energy Efficiency, OH Radical

1. 서 론

현재 반도체 산업에서 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, CHF₃, SF₆, NF₃ 등과 같은 PFCs(Perfluorocompounds) 가스는 반도체 제조공정 중 에칭 단계와 반응기 세척 단계 등에서 광범위하게 사용되고 있다. PFCs는 상대적으로 안전하고 독성은 없으나, 지구상에서 분해되는 시간이 약 1,000~10,000년 이상 걸리기 때문에 지구에 잔존하는 시간이 상당히 길다. 또한 PFCs 가스는 적외선을 강하게 흡수하여 지구온난화의 주된 원인이 되는 가스이며[1], PFCs는 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 지구온난화 가스보다 대기 중 잔류시간(lifetime)이 길다. Table 1에서는 가스의 종류에 따라 지구온난화 지수를 나타낸 것이다.

PFCs 가스의 발생을 줄이는 방법으로는 대체물질의 개발, 재사용 그리고 분해로 크게 3가지 방법이 있다. 그러나 현재 PFCs를 완전히 대체할 수 있는 화학물질이 없는 실정이기 때문에 반도체 산업에서 필수적인 PFCs를 재사용하거나 분해기술을 개발하는 것이 필요하다 [2]. 이러한 이유로 인하여 현재 PFCs 분해기술은 고온 소각법[3]이나 torch와 같은 고온 플라즈마[4,5]를 이용한 기술이 개발되고 있으며, DBD(Dielectric barrier discharge) 등의 저온 플라즈마[6]를 이용하여 처리 기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

여러 처리기술 중 글라이딩 아크 플라즈마는 다양한 난분해성 물질을 분해하는데 연구되었으며, 현재 주로 사용되고 있는 비열평형 플라즈마와 열평형 플라즈마의 성질을 복합적으로 나타내기 때문에 각 상태의 특징을 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다[7].

워터젯 플라즈마는 주입되는 물이 수증기 형태가 아닌 제트 형태로 주입된다. 전력을 인가하였을 때 워터젯에서 절연과괴가 발생하

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ynchun@chosun.ac.kr

Table 1. Global warming potentials(100 years horizon) and atmospheric lifetime of some greenhouse gases

Greenhouse gases	GWP ₁₀₀	Atmospheric lifetime (year)
CO ₂	1	5~200
CH ₄	23	12
N ₂ O	296	120
CF ₄	5,700	50,000
C ₂ F ₆	11,900	10,000

며, 워터젯 표면에서 방전이 형성되어 강력한 UV radiation, short-wave가 발생된다[8]. 또한 주입되는 물을 수증기로 전환하지 않기 때문에 수증기 발생장치나 수증기 공급 라인 등에 응축되는 현상을 방지하기 위하여 외부로부터 열을 사용하지 않기 때문에 사용되는 에너지의 양이 적은 장점이 있다[9].

CF₄의 분해 메커니즘은 플라즈마에서 생성된 전자에 의한 직접 분해와 라디칼 분해에 의한 두 가지 방법이 있다. 첫 번째로 전자와의 충돌에 의하여 CF_x(CF₃, CF₂, CF)와 같은 형태로 분해된다. CF_x와 같은 형태는 반응식(1~6)과 같이 전자(e)와 충돌하여 생성된다. 생성된 CF_x의 형태는 OH 라디칼과 반응하여 (7~10)과 같이 CO₂, COF₂, HF와 같은 물질을 생성한다. Table 2는 워터젯 플라즈마 시스템의 주요 메커니즘을 나타내고 있다.

Table 2. Importance of reaction steps in CF₄ decomposition system

Reaction mechanism	Number
CF ₄ + e → CF ₃ + F + e	(1)
CF ₄ + e → CF ₂ + 2F + e	(2)
CF ₄ + e → CF + F + F ₂ + e	(3)
CF ₃ + e → CF ₂ + F + e	(4)
CF ₃ + e → CF + 2F + e	(5)
CF ₂ + e → CF + F + e	(6)
·OH + CF ₃ → COF ₂ + HF	(7)
·OH + CF ₂ → COF + HF	(8)
·OH + CF → CO + HF	(9)
·OH + COF → CO ₂ + HF	(10)

따라서 본 연구에서 글라이딩 아크 플라즈마와 워터젯을 결합함으로써 플라즈마에서 생성된 전자의 반응과 워터젯에 의하여 생성되는 다량의 OH 라디칼에 의하여 고효율의 CF₄ 분해를 위한 워터젯 글라이딩 아크 플라즈마 장치를 개발하였다. 운전상태, 워터젯 주입량, CF₄ 초기 농도, 전체 가스량, 주입에너지량 변화에 따른 변수별 실험을 통하여 최적의 화학적 활성종의 생성과 전기장의 형성의 최적조건을 확인하였다.

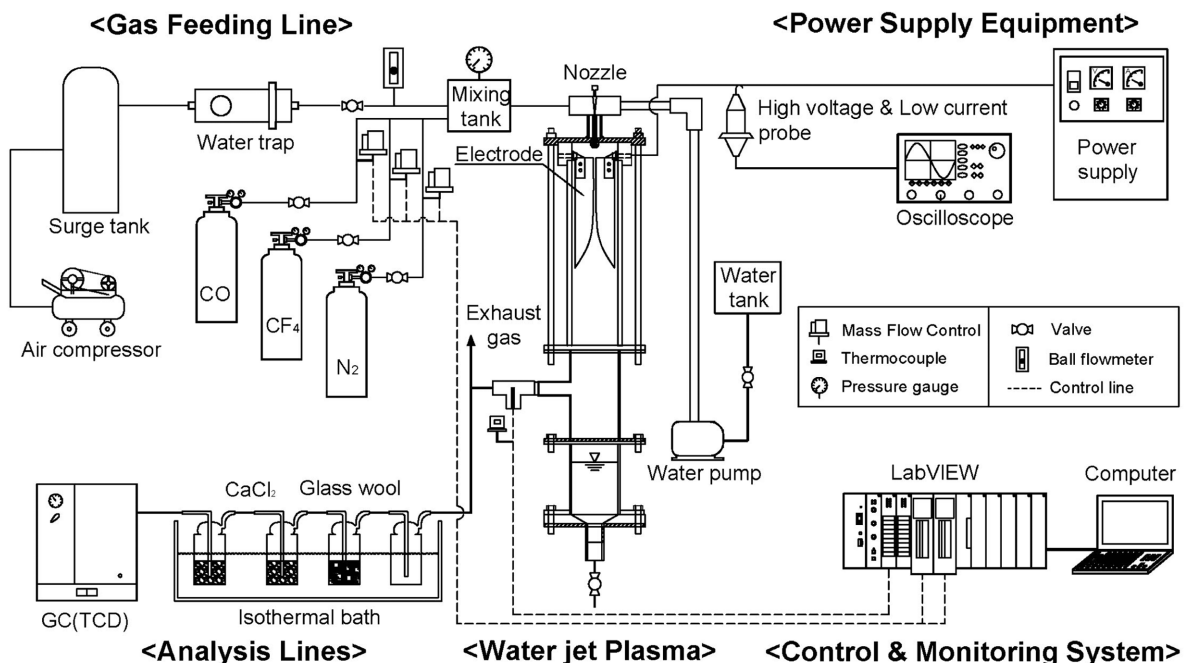
2. 실험 장치 및 실험 방법

2-1. 실험 장치

Fig. 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 시스템으로 구성되어 있다.

워터젯 플라즈마 반응기의 체적은 1.2 L이며, 플라즈마 반응부와 주입되는 워터젯을 받기 위한 구조로 나누어져 있다. 이류체 노즐(HANMI NOZZLE, XA-SR150, Korea)을 사용하였으며, 글라이딩 아크 플라즈마 전극의 재질은 스테인레스 스틸로 제작하였다. 전극의 두께는 2 mm, 전극의 길이는 120 mm로 제작하였으며, 전극간의 각도는 120°, 노즐과 전극의 간격은 10 mm로 설치하였다. 반응기의 관은 절연 및 내부를 관찰할 수 있도록 석영관을 사용하였으며, 전극의 고정 및 절연을 위하여 워터젯 플라즈마 반응기의 상단부는 세라믹(Al₂O₃, 96 wt%)을 사용하였다. 또한 워터젯을 주입하기 위해 펌프(HANIL, PH-80, Korea)를 설치하였으며, 주입되는 증류수는 분무각도를 19°로 일정하게 하여 제트 형식으로 미세하게 분무되며, 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

**Fig. 1. Experimental apparatus.**

파악하기 위해 고전압 측정기(Tektronix, P6015, USA)와 저전류 측정기(Tektronix, A6303, USA)를 설치하여 측정하였다.

가스 공급 라인에는 CF₄와 공기, 질소와 일산화탄소는 별도로 공급되며, 혼합탱크에서 혼합하여 위터젯 플라즈마 반응기에 설치된 노즐로 공급된다. 각각의 주입되는 가스는 실린더에서 질량유량계(Mass Flow Controller; Line Tech, M3030V, Korea)에 의해 유량은 제어되어 공급되며, 공기는 컴프레서에서 서지탱크를 거친 후 수분 제거장치를 통과하여 볼 타입 유량계를 사용하여 공기량을 조절하였다.

분석 장치는 가스크로마토그래프(Varian, GC-4900, Netherlands)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.

2-2. 실험 방법

실험은 상온, 대기압에서 진행하였으며, 두 가지 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험으로 OH 라디칼 형성 조건을 파악하기 위해 질소와 일산화탄소를 혼합기에서 혼합 후 노즐로 주입하였으며, SEI는 평균 7.2 kJ/L(6.5 kV, 169 mA)로 유지하도록 조절하였으며, 주입되는 위터젯은 12~38 mL/min으로 조절하여 실험을 진행하였다.

두 번째 실험으로 CF₄의 제거 특성을 파악하기 위해 공기를 주입하여 플라즈마를 방전한 후 SEI는 7.2 kJ/L로 조절하였다. 그리고 주입되는 위터젯이 0 mL/min 조건에서 배출가스의 온도는 113 °C로 안정화한 뒤 위터젯을 주입하여 반응가스의 온도를 측정하여 153 °C로 안정한 상태를 확인한 후 실험을 진행하였다. 온도는 위터젯 글라이딩 아크 플라즈마 장치의 출구에서 측정하였으며, CF₄의 제거 특성을 파악하기 위하여 플라즈마 반응기 유입부와 반응기 출구부에서 가스를 분석하였다.

가스크로마토그래프의 분석을 위한 가스시료는 냉각장치를 통과하여 수분을 응축시켜 제거한 후 건식가스 기준으로 가스크로마토그래프로 연속적으로 유입되어 분석하였다.

변수별 연구로는 CF₄ 분해율에 영향을 미치는 인자로 운전상태, 위터젯 주입량, CF₄ 초기 농도, 주입에너지량, 전체 가스량 변화에 대하여 각각 실험을 진행하였으며, Table 3은 변수별 실험 조건을 나타내고 있다.

2-3. 데이터 처리

CF₄ 분해율(η_c : Destruction efficiency)[12]은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta_c(\%) = \frac{[CF_4]_{in} - [CF_4]_{out}}{[CF_4]_{in}} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서, [CF₄]_{in}은 플라즈마 반응 전 CF₄의 농도를 나타내며, [CF₄]_{out}는 플라즈마 반응 후 CF₄의 농도를 나타낸다.

에너지 효율(η_e : Energy efficiency)[13]은 다음의 식 (2)를 이용하여

계산하였다.

$$\eta_e(g/kWh) = \frac{[CF_4]_{DE} \times Q_c(g/h)}{P(kW)} \quad (2)$$

여기서, [CF₄]_{DE}는 CF₄ 분해율이며, Q_c(g/h)는 위터젯 플라즈마에 주입되는 CF₄의 가스량이며, P(kW)는 플라즈마의 주입전력을 나타낸다. 주입에너지량[13]은 다음의 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$SEI(kJ/L) = \frac{P(kW)}{Q_T(L/s)} \quad (3)$$

여기서, P(kW)는 플라즈마의 방전전력이며, Q_T(L/s)은 위터젯 플라즈마에 주입되는 전체 가스량을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. OH 라디칼 생성

CO 산화 모니터링 방법은 OH 라디칼의 농도를 측정하는데 사용되었다. H₂O와 불활성 기체(질소)에 플라즈마를 형성시키면, 전자(e)에 의하여 반응식 (14)와 같은 플라즈마 반응에 의하여 ·OH, H· 라디칼을 생성한다[14]. 일산화탄소를 첨가하게 되면 반응식 (15)와 같은 반응이 일어나 OH 라디칼에 의하여 산화된다. 따라서 이산화탄소가 생성되는 양에 의하여 OH 라디칼의 농도를 추정할 수 있다[15].



Fig. 2는 위터젯 주입량에 따라 생성되는 이산화탄소의 농도를 나타낸 것이다. 질소와 일산화탄소는 각각 9 L/min, 0.2 L/min으로 주입되며, SEI는 7.2 kJ/L, 위터젯 주입량을 12~38 mL/min으로 조절하였다. 위터젯 주입 유량이 20.7 mL/min일 때, 이산화탄소의 농도는 최대 10,120 ppm으로 가장 높게 나타났으며, 이는 가장 많은 OH

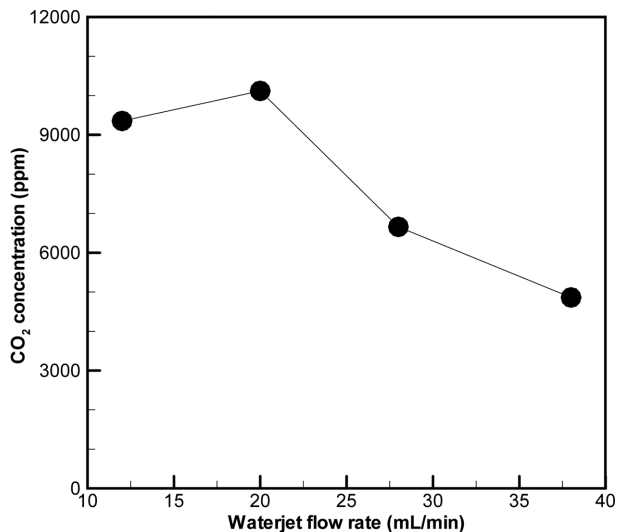


Fig. 2. Effect of waterjet flow rate on the CO₂ concentration.

Table 3. Experimental conditions for parametric screening studies

Conditions	Operating conditions	Water input flow rate (mL/min)	Input concentration of CF ₄ (%)	Total gas flow rate (L/min)	Specific energy input (kJ/L)
Variables range	Waterjet + Plasma, Plasma, Waterjet	0 ~ 32	1.1 ~ 5.4	4.3 ~ 13.8	4.1 ~ 11.3

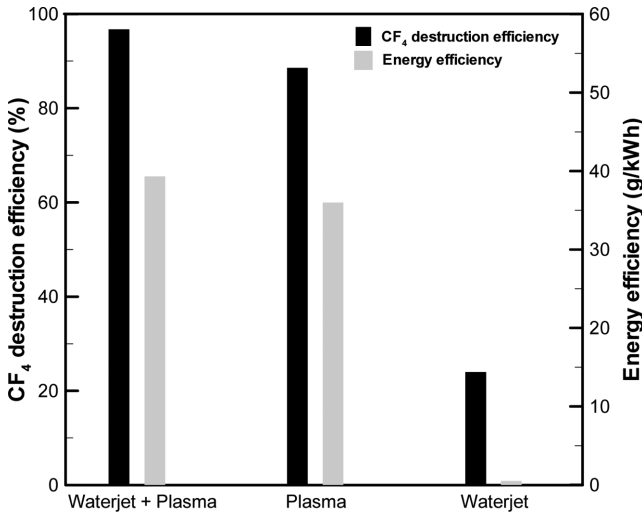


Fig. 3. Effect of waterjet plasma, plasma and waterjet on the CF₄ destruction efficiency and energy efficiency.

라디칼의 생성이 일어나는 조건임을 알 수 있다. 워터젯 주입량이 28.5 mL/min 이상의 경우, 이산화탄소의 농도가 감소하였으며, 이는 플라즈마 반응영역에 주입되는 워터젯의 일부가 기화되면서 가스량이 증가하면서 플라즈마 내의 체류시간 감소로 OH 라디칼의 생성이 감소되기 때문이다.

3-2. CF₄ 제거 실험 결과

3-2-1. 운전상태 변화

Fig. 3은 워터젯 + 플라즈마, 플라즈마, 워터젯만 하였을 때 각각의 상태에 대한 CF₄ 분해율과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 공기와 CF₄는 각각 9 L/min, 0.2 L/min으로 주입하였으며, 운전상태에 따라 워터젯은 25.5 mL/min, SEI는 7.2 kJ/L로 각각 유지하였다. 워터젯만 하였을 경우 CF₄ 분해율은 약 24%, 에너지 효율은 플라즈마를 가동하지 않았기 때문에 0 g/kWh이다. 플라즈마만하였을 때는 CF₄ 분해율은 약 88%, 에너지 효율은 36 g/kWh로 나타났다. 워터젯과 플라즈마를 같이 하였을 때 CF₄ 분해율은 약 97%, 에너지 효율은 39 g/kWh로 나타났다. 플라즈마를 가동한 상태에서 워터젯의 주입 유무를 비교하였을 때, CF₄ 분해율은 약 9% 정도 증가하였다. 플라즈마를 가동하였을 때 반응식(1~6)의 반응이 발생하며, 워터젯을 주입함으로써 OH 라디칼이 생성되어 반응식(7~10)의 반응이 증가하여 분해율이 증가하였다. 이러한 결과로 워터젯과 플라즈마를 결합하였을 때 다른 운전상태보다 분해율이 우수한 것을 확인하였다.

3-2-2. Waterjet 주입량 변화

Fig. 4는 워터젯 주입량 변화에 따른 CF₄ 분해율과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 공기와 CF₄는 각각 9 L/min, 0.2 L/min으로 주입하였으며, SEI는 7.2 kJ/L로 유지하였다. CF₄ 분해율은 워터젯 주입량을 25.5 mL/min으로 주입하였을 때 최대 약 97%로 증가하였으며, 에너지 효율은 약 39 g/kWh를 나타냈다. 에너지 효율의 경우 식 (2)에서 주입되는 CF₄의 농도(2.2%)와 SEI(7.2 kJ/L)가 동일하기 때문에 분해율에 비례하게 된다. 워터젯 주입량이 증가할수록 플라즈마 영역 및 에너지의 전자 밀도가 증가하며, 다량의 OH 라디칼이 생성되어 반응식(1~10)에 따라 CF₄ 분해율이 증가하는 결과를 나타냈다. 하지만 28.5 mL/min 이상에서는 플라즈마 반응영역에 주입되는 워터젯의 일부가 기화되면서 가스량이 증가하여 플라즈마 내의 반응시

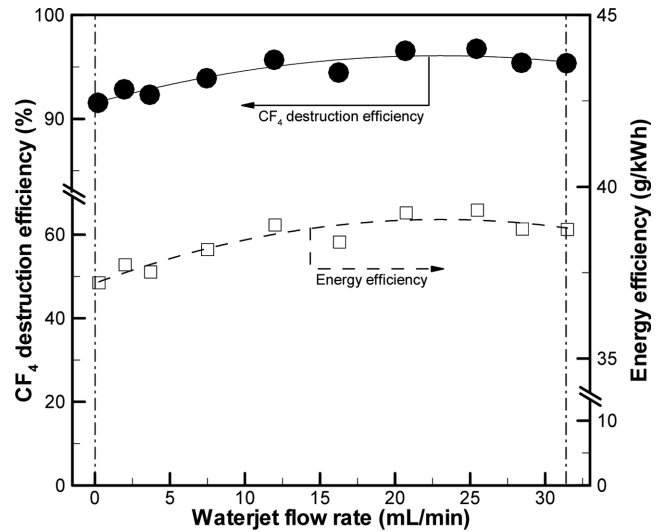


Fig. 4. Effect of waterjet flow rate on the CF₄ destruction efficiency and energy efficiency.

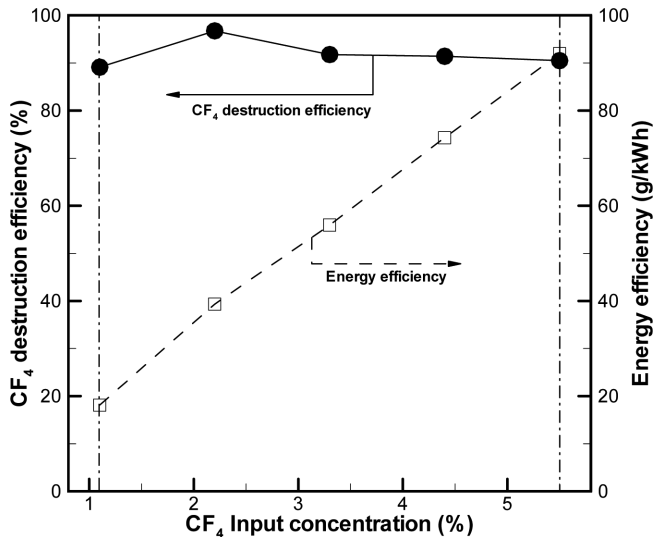


Fig. 5. Effect of CF₄ input concentration on the CF₄ destruction efficiency and energy efficiency.

간이 짧아져 반응성이 감소하였다. 적절한 워터젯 주입량은 플라즈마의 체적의 증가와 다량의 OH 라디칼의 생성으로 인하여 반응성이 증가하는 것을 확인하였다.

3-2-3. CF₄ 초기 농도 변화

Fig. 5는 CF₄ 초기 농도 변화에 따른 CF₄ 분해율과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 전체 가스량을 9.2 L/min으로 유지하면서 주입되는 CF₄ 초기 농도를 1.1~5.4%로 각각 변화하였다. 워터젯 주입량은 25.5 mL/min, SEI는 7.2 kJ/L로 유지하였다. CF₄ 초기 농도가 2.2%까지 증가하였을 때 CF₄ 분해율은 최대 97%를 나타냈으나, 5.4%까지 주입하였을 때 CF₄ 분해율은 90%까지 감소하였다. 에너지 효율은 농도가 증가할수록 18 g/kWh(1.1%)에서 92 g/kWh(5.4%)까지 증가하였다. 주입되는 SEI가 일정하도록 유지하였기 때문에 생성되는 전자의 양은 일정하나, 농도가 증가할수록 공급되는 CF₄의 양이 증가하기 때문에 반응식(1~6)의 현상이 감소하여 CF₄ 분해율이 감소되었다. 에너지 효율의 경우 CF₄ 가스 성분 농도가 증가함에 따라 제거되는 CF₄의 양도 증가하기 때문에 에너지 효율은 계속하여 증가

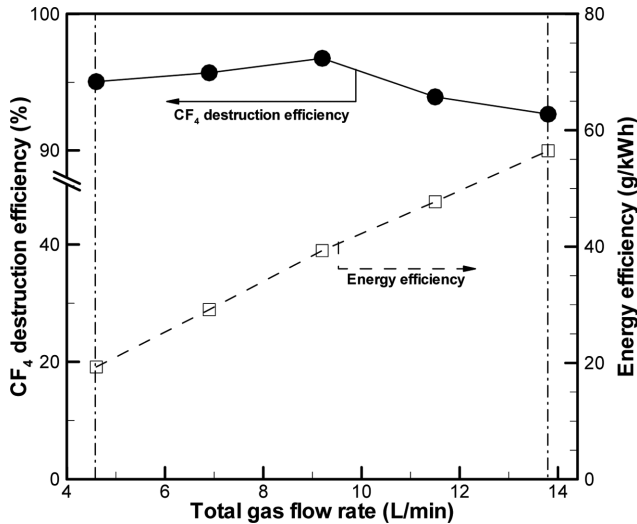


Fig. 6. Effect of total gas flow rate on the CF₄ destruction efficiency and energy efficiency.

하였다.

3-2-4. 전체 가스량 변화

Fig. 6은 전체 가스량 변화에 따른 CF₄ 분해율과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 위터젯 주입량은 25.5 mL/min, SEI는 7.2 g/kWh로 유지하였다. CF₄ 초기 농도는 2.2%로 유지하면서 전체 가스량을 4.3~13.8 L/min으로 조절하여 공급하였다. 전체 가스량이 증가할수록 안정적인 플라즈마를 형성하며, 플라즈마 체적이 증가하여 CF₄ 분해율은 95%(4.6 L/min)에서 97%(9.2 L/min)로 증가하였다. 9.2 L/min을 초과하여 가스량을 공급하였을 때는 가스속도가 증가하여 플라즈마 영역 내에 체류시간이 짧아져 분해율은 감소하였다. 에너지 효율은 CF₄ 초기 농도를 2.2%로 유지하였기 때문에, 전체 가스량이 증가 시 주입되는 CF₄ 가스량도 증가하여 분해되는 양의 증가로 인해 에너지 효율은 전체적으로 증가하였다.

3-2-5. 주입에너지량 변화

Fig. 7은 주입에너지량 변화에 따른 CF₄ 분해율과 에너지 효율을 나타낸 것이다. 공기와 CF₄는 각각 9 L/min, 0.2 L/min으로 주입하였으며, 위터젯 주입량은 25.5 mL/min으로 유지하였다. SEI를

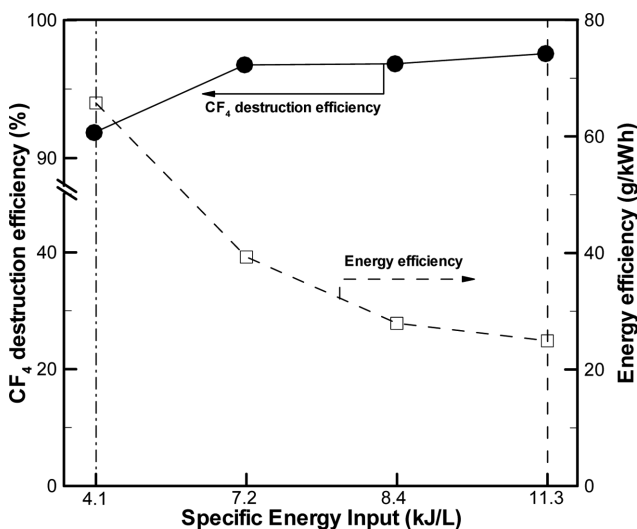


Fig. 7. Effect of SEI on the CF₄ destruction efficiency and energy efficiency.

4.1~11.3 kJ/L(0.62~1.74 kW)로 조절하여 실험을 진행하였다. SEI를 4.1 kJ/L에서 11.3 kJ/L로 증가하였을 때 CF₄ 분해율은 91%에서 97.5%로 증가하였으나, 주입되는 에너지양의 증가로 인하여 에너지 효율은 약 65 g/kWh에서 약 25 g/kWh로 감소하였다. SEI가 증가할수록 플라즈마 내에 CF₄와 전자와의 반응이 증가하며, 위터젯으로부터 생성되는 OH 라디칼의 양이 증가하여 반응성이 증가하였으나, 주입되는 에너지양을 고려하였을 때 적절한 SEI를 공급하는 것이 최적의 조건인 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 위터젯 글라이딩 아크 플라즈마를 설계 및 제작하여, 고효율의 CF₄를 분해 특성을 파악하였다.

기준조건(공기 9 L/min, CF₄ 0.2 L/min, 위터젯 주입량 25.5 mL/min, SEI 7.2 kJ/L)에서의 CF₄ 분해율과 에너지 효율은 각각 97%, 39 g/kWh를 확인하였다.

CF₄ 분해에 미치는 변수별 연구로는 운전상태 변화에서 위터젯과 플라즈마를 결합 하였을 때 최적의 조건이었으며, 플라즈마, 위터젯을 각각 하였을 때와 비교하였을 때 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 위터젯 주입량 변화에서는 위터젯의 주입량이 증가함에 따라 OH 라디칼의 생성이 증가하여, CF₄ 분해율이 증가하는 것으로 보아 25.5 mL/min에서 최적의 조건으로 보여진다. CF₄ 초기 농도 변화에서는 농도가 증가할수록 전자와 가스의 반응이 감소되는 것으로 보아 CF₄의 농도가 2.2%일 때 최적의 조건으로 보여진다. 전체 가스량은 증가할수록 방전이 안정적으로 형성되나, 고유량의 경우 체류시간의 감소로 전체 가스량이 9.2 L/min에서 최적 조건으로 보여진다. 주입에너지량은 증가할수록 CF₄ 분해율은 증가하나 에너지 효율을 고려하면 SEI가 7.2 kJ/L에서 최적의 조건으로 보여진다.

감 사

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

참고문헌

1. Chang, M. B. and Lee, H. M., "Abatement of Perfluorocarbons with Combined Plasma Catalysis in Atmospheric-pressure Environment," *Catal. Today.*, **89**, 109-115(2004).
2. Xie, H., Sun, B. and Zhu, X., "Abatement of Perfluorocompounds with Microwave Plasma in Atmospheric Pressure Environment," *J. Hazard. Mater.*, **168**, 765-769(2009).
3. Yu, N. S., Azatyan, V. V., Bolodian, I. A., Navzenya, V. Y., Kopylov, S. N., Shebeko, D. Y. and Zamishevski, E. D., "The Influence of Fluorinated Hydrocarbons on the Combustion of Gaseous Mixtures in a Closed Vessel," *Combust. Flame.*, **121**(3), 542-547 (2000).
4. Narengerile., Saito, H. and Watanabe, T., "Decomposition of Tetrafluoromethane by Water Plasma Generated Under Atmospheric Pressure," *Thin Solid Films.*, **518**, 929-935(2009).
5. Kim, D. Y. and Park, D. W., "Decomposition of PFCs by Steam Plasma at Atmospheric Pressure," *Surf. Coat. Technol.*, **202**, 5280-5283(2008).

6. Yu, S. J. and Chang, M. B., "Oxidative Conversion of PFC Via Plasma Processing with Dielectric Barrier Discharges," *Plasma Chem. Plasma Process.*, **21**(3), 311-327(2001).
7. Kuznetsova, N. Y. K. I. V., Gutsol, A. F., Fridman, A. A. and Kennedy, L. A., "Effect of "overshooting" in the Transitional Regimes of the Low-current Gliding Arc Discharge," *J. Appl. Phys.*, **92**(8), 4231-4237(2002).
8. Shmelev, V. M. and Margolin, A. D., "Propagation of an Electric Discharge over the Surface of Water and Semiconductor," *High Temp.*, **41**(6), 735-741(2003).
9. Watanabe, T. and Tsuru, T., "Water Plasma Generation Under Atmospheric Pressure for HFC Destruction," *Thin Solid Films.*, **516**, 4391-4396(2008).
10. Kuroki, T., Tanaka, S., Okubo, M. and Yamamoto, T., "Low Pressure Pulse-modulated and Radio-frequency Plasma for CF₄ Decomposition," *IEEE.*, **4**, 2900-2905(2005).
11. Hong, Y. C., Kim, H. S. and Uhm, H. S., "Reduction of Perfluoro-compound Emissions by Microwave Plasma-torch," *Thin Solid Films.*, **435**, 329-334(2003).
12. Sun, J. W. and Park, D. H., "CF₄ Decomposition by Thermal Plasma Processing," *Korean J. Chem. Eng.*, **20**(3), 476-481(2003).
13. Du, C. M., Yan, J. H. and Cheron, B., "Decomposition of Toluene in a Gliding Arc Discharge Plasma Reactor," *Plasma Source Sci. Technol.*, **16**, 791-797(2007).
14. Du, C. M. and Yan, J. H., "Electrical and Spectral Characteristics of a Hybrid Gliding Arc Discharge In Air-water," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **35**(6), 1648-1650(2007).
15. Su, Z. Z., Ito, K., Takashim, K., Katsura, S., Onda, K. and Mizuno, A., "OH Radical Generation by Atmospheric Pressure Pulsed Discharge Plasma and Its Quantitative Analysis by Monitoring CO Oxidation," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **35**, 3192-3198(2002).