

고온 플라즈마를 이용한 과불화화합물의 처리 특성 연구

문기학 · 김재용[†]

충북대학교 환경공학과
(2018년 12월 7일 접수, 2018년 12월 17일 심사, 2018년 12월 19일 채택)

Study on Treatment Characteristics of Perfluorinated Compounds Using a High Temperature Plasma

Gi-Hak Moon and Jae-Yong Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Chungcheongbuk-do 28644, Korea
(Received December 7, 2018; Revised December 17, 2018; Accepted December 19, 2018)

초 록

본 연구에서는 반도체 제조 공정에서 발생하는 과불화화합물을 고온 플라즈마를 활용하여 분해하고자 하였고, 분해 특성을 조사하였다. 실험에 사용된 PFCs 가스는 200 L/min의 유량에 농도 5,000 ppm으로 주입하였다. 인입 전력에 따른 분해 효율 분석 결과 CF₄ 및 SF₆ 모두 12.8 kW의 전력에서 최고 효율을 나타내었고 그 이상의 전력에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. PFCs의 재결합 방지를 위한 반응수 주입 실험 결과 약 14 mL/min의 유량에서 최고 효율을 나타내었으며 14 mL/min을 기준으로 유량이 증가하거나 감소함에 따라 모두 처리효율이 감소하였다. 연구 결과 고온 플라즈마를 활용한 PFCs의 분해 특성을 파악할 수 있었고 또한 반도체 제조 공정에서 발생하는 PFCs 및 온실가스 처리에 대한 기초를 마련하였다.

Abstract

In this study, the decomposition characteristics of perfluorinated compounds generated in semiconductor manufacturing process were investigated by using a high temperature plasma. The analysis results revealed that CF₄ and SF₆ showed the highest efficiency at 12.8 kW power, but no significant difference was observed at the power above. Experimental results showed that the maximum efficiency was obtained at the flow rate of about 14 mL/min and the treatment efficiency decreased as the flow rate increased or decreased with respect to the flow rate of 14 mL/min. As a result, the decomposition characteristics of perfluorocompounds (PFCs) using a high temperature plasma could be grasped, and also the basis for the treatment of PFCs and greenhouse gases generated in the semiconductor manufacturing process could be obtained.

Keywords: Perfluorocompounds, Greenhouse gas, High temperature plasma, Semiconductor

1. 서 론

1.1. 연구 배경

지속적인 산업발달 및 인구증가로 인하여 산업공정, 농업, 에너지 부분에서의 온실가스의 발생량이 점차 늘어나고 있으며 대기 중 온실가스 농도의 증가는 지구 온난화라는 광범위하고 지속적인 문제를 야기하고 있다. 지구온난화는 지구 표면온도가 점차 올라가는 현상으로 평균 해수면 상승, 해안 저지대 침수, 태풍, 폭염, 홍수 및 가뭄 등 자연재해의 발생 빈도 및 강도를 증가시키고 생물종 멸종 및 생태계 교란 등 광범위하고 지속적인 문제를 발생시킨다[1]. 세계 각국에서는 온실가스 증가로 인한 기후변화 문제의 심각성을 인식하고 기후변화

문제에 대응하기 위해 1992년 기후변화협약(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change)을 체결하여 온실가스 감축을 위한 노력을 지속적으로 진행하고 있다[2]. 1997년 교토 의정서에 따르면 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 6대 온실가스라 지정하여 이에 대한 감축의 필요성을 언급, 선진국에 감축의무를 부과하였고 최근 열린 파리기후변화협정에서는 세계 각국이 온실가스 배출량을 단계적으로 감축하기로 합의하였다. 우리나라의 경우 교토의정서에서는 개발도상국으로 분류되어 온실가스에 대한 감축의무가 부과되지 않았지만 파리기후변화협정에서 단계적으로 감축하기로 참여함에 따라, 감축 노력이 없었을 때 배출될 것이라 예상되는 2030년 온실가스 발생량(BAU, Business As Usual) 대비 37% 감축을 목표로 설정하였다[3]. 국내의 온실가스 배출 부분을 보면 전체 온실가스 배출량 중의 87%가 에너지 부문에서 배출되며 반도체 생산과 같은 산업공정 부문에서 배출되는 온실가스가 7.9% 정도로 에너지와 산업공정에서 대부분의 온실가스가 발생한다. 가스별 온실가스 배출 비율

[†] Corresponding Author: Chungbuk National University, Department of Environmental Engineering, Chungcheongbuk-do 28644, Korea
Tel: +82-43-261-2471 e-mail: jykim4@korea.com

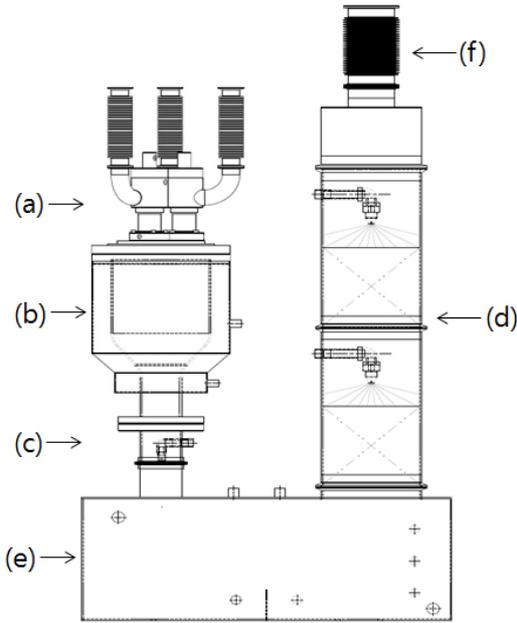


Figure 1. Plasma wet scrubber.

을 보면 대부분이 CO₂ 형태로 배출되며 총 배출량의 91.1%를 차지하고 그 외 가스들의 비중은 CH₄ 3.9%, N₂O 2.2%, HFCs 1.2%, SF₆ 1.4%, PFCs 0.4% 순으로 발생한다. 이를 전년도와 비교하였을 때 CO₂, CH₄, N₂O의 배출량은 감소한 반면 HFCs, PFCs, SF₆의 배출량은 증가하였다[4,5]. HFCs, PFCs, SF₆와 같은 온실가스들은 인위적인 합성으로 발생하는 가스들로 CO₂에 비해 안정된 화합물로 대기 잔류수명이 길기 때문에 지구온난화지수(Global Warming Point, GWP)가 높고 이에 배출되는 양이 CO₂에 비해 적을지라도 지구온난화에 영향을 미치는 기여도는 매우 크다[6]. 국내의 경우 반도체나 액정표시장치 산업은 국가 기반 산업으로 제조공정에서 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition, CVD), 식각(Etching), 세정(Cleaning) 공정에서 CF₄, C₂F₆, C₃F₈, C₄F₁₀, CHF₃, SF₆, NF₃ 등과 같은 온실가스 및 과불화화합물(Per-fluorinated Compounds, PFCs)이 사용되기 때문에 반도체나 액정표시장치 생산이 지속적이고 증가하고 있어 이를 제조하는데 이용되는 온실가스의 양도 증가할 것으로 예상된다[7]. 제조공정에서 발생하는 온실가스를 줄이기 위해서는 온실가스를 대체하기 위한 대체물질의 개발, 또는 재사용으로 인한 발생량 줄이기, 발생하는 온실가스를 처리 등의 연구가 필요하며 현재 제조공정에서 사용되는 온실가스의 대체물질이 없는 실정에서 제조공정에서 필수적으로 사용되는 온실가스를 재사용 또는 처리하는 기술에 대한 연구 및 개발이 필요한 시점이다[8]. 현재 반도체 공정에서 발생하는 PFCs의 처리방법으로는 LNG 연료를 주입하여 고온에서 연소시킨 후 나온 불산을 wet scrubber를 통해 처리하는 burn-wet type이 대표적이다. 하지만 이 burn-wet type은 낮은 효율과 높은 연료비 및 유지비용 등으로 운용에 어려움이 많으며 이에 최근 고온 플라즈마를 이용한 plasma-wet type에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. Plasma-wet type은 플라즈마 전극에 플라즈마 발생 gas와 전압을 인가하여 고온의 플라즈마 아크를 형성하고, 형성된 플라즈마 아크에 PFCs를 통과시켜 분해한다. 대용량 처리가 힘들다는 단점이 지적되어왔지만 매우 높은 효율로 PFCs를 처리할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 plasma scrubber의 PFCs 분해 특성을 알아보고자 전원공급장치의 전력에 따른 처리효율, 그리고

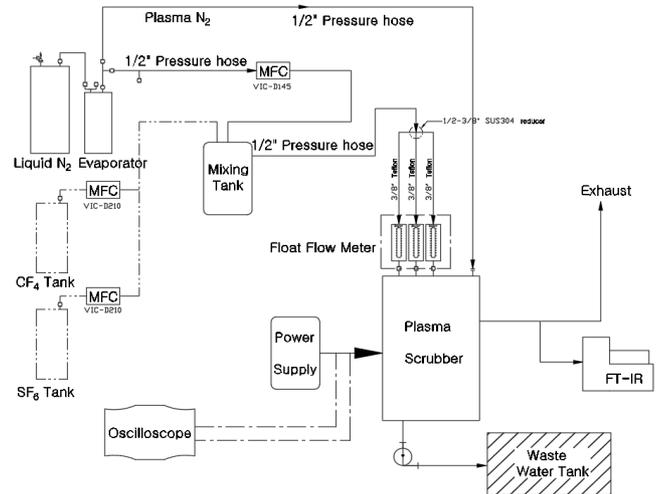


Figure 2. Experimental device configuration diagram.

반응기 내 물 주입으로 플라즈마 방전에 의해 분해된 PFCs의 역반응 방지 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 장비

Figure 1에 Plasma wet scrubber의 장치 개요를 나타내었다. PFCs 가스는 플라즈마 토치(a)로 주입되어 발생하는 아크 플라즈마에 의해 플라즈마 반응기(b)에서 분해되며 재결합 방지를 위한 물(이하 반응수) 주입으로 인해 불산이 발생한다. 발생하는 가스는 매우 고온이기 때문에 별도 Quencher를(c) 만들어 냉각하였다. 발생된 불산은 wet scrubber 장치(d)를 통해 수용액 상태로 장비 하단 순환 탱크(e)에 저장되어 별도 폐수탱크로 배출된다. wet scrubber에 사용되는 세정액은 불산 가스가 물에 대한 용해도가 매우 높은 점을 이용하여 순환 탱크 내 불산 용액을 별도 펌프를 사용해 계속 순환시켜 사용한다. 순환 탱크 내 수위가 일정 높이 이상 차게 되면 폐수 탱크로 배출되며, wet scrubber에서 처리된 clean gas는 장비 배출구(f)에서 배출된다.

2.2. 실험 장치 및 구성

Figure 2에 실험 장치 구성도를 나타내었다.

처리하고자 하는 물질로서 반도체 제조 공정에서 발생하는 PFCs 가스 중 대표적 난분해성 가스인 SF₆와 CF₄를 대상으로 하였다. 처리 대상 가스는 각각 질량유량계(VIC-D210)를 통해 유량을 조절하였으며 혼합 질소 gas와 mixing tank에서 혼합하여 반응기로 주입하였다. PFCs의 가스관은 직경 5 mm의 우레탄관을 사용하였다. 질소가스의 혼합 이유는 반도체 제조 공정 현장과 실험 조건의 환경을 맞추기 위함이다. 반도체 제조 공정에서 사용된 후 배출되는 폐가스는 질소에 희석되어 진공 펌프를 통해 배출된다. 혼합 질소 가스 역시 질량유량계(VIC-D145)를 이용하여 유량을 조절하였고 액체질소를 기화장치를 통해 기화시켜 사용하였다. 또한 기화기에서 배출되는 압력이 15 kgf/cm²의 고압임을 감안해 압력 레귤레이터를 부착하여 5 kgf/cm²로 감압하였고 가스관으로 고압호스를 사용하였다. 그리고 혼합가스가 반응기에 투입되기 직전 float 유량계를 설치하여 최종적으로 투입되는 PFCs 가스의 유량을 한 번 더 확인하였다. 플라즈마 발생에 필

Table 1. Utilities and Equipment in Test

Description	Detail	Remark
CF ₄ gas	5,000 ppm	
SF ₆ gas	5,000 ppm	
Dilution N ₂	For CF ₄ : 100 LPM For SF ₆ : 200 LPM	
Plasma N ₂	20 LPM	
Reactor Cooling Water	3 LPM	
Quenching Water	3 LPM	
Power Supply Cooling Water	3 LPM	
Gas Measure Equipment	FT-IR	Frontier Spectrometer
Power Measure Equipment	Oscilloscope	InfiniiVision3000 X-Series

요한 플라즈마 발생용 질소는 별도 유량조절 밸브와 유량 센서를 이용하여 유량을 조절 · 확인하였다. 플라즈마 반응기는 cerakwool 단열재로 덮인 회전형 플라즈마 아크 반응기를 제작하여 실험에 사용하였다. Figure 3에 반응기 형태와 플라즈마 발생 사진을 나타내었다.

Table 1에 실험에 사용된 utility 및 장비를 정리하였다. 모든 실험에서 CF₄ 가스는 약 100 Lpm의 질소가스에 1% 혼합하여 주입하였고, SF₆의 경우 200 Lpm의 질소가스에 1% 혼합하여 각각 5,000 ppm의 농도로 실험을 진행하였다. 또한 플라즈마 torch 냉각수 및 반응기 quenching, 플라즈마 전원공급장치에 사용되는 냉각수는 모두 3 Lpm으로 주입하였다. 처리 후 배출되는 가스의 농도 측정은 배출구 배관에 별도 측정구를 가공하여 Fourier-Transform infrared spectroscopy (FT-IR)로 보내 가스의 농도를 측정하였다. 실험에 사용된 FT-IR은 미국 A社의 Frontier Spectrometer를 사용하였고, 내부 가스 cell은 PFCs의 처리 전, 후 농도 측정을 위해 1, 15 cm 길이의 cell을 사용하였다.

2.3. 전력량에 따른 PFCs 분해 효율

플라즈마 전원공급장치의 전력량에 따른 PFCs의 처리 효율을 알아보고자 플라즈마 반응기에 대한 인입전력을 10 kW부터 0.5 kW 단위로 증가시키며 처리 효율을 비교하였다. 반응수는 13 mL/min, 배출가스의 농도 측정은 FT-IR에서 실시간으로 측정하였다. Test는 신뢰성을 높이기 위해 각 변수마다 5회 측정 실시하였다.

2.4. 반응수 주입량에 따른 처리 효율

반응수 주입량에 따른 PFCs의 처리 효율을 분석하고자 SF₆보다 훨씬 안정적이며 분해에 필요한 에너지가 높은 CF₄의 분해 메커니즘을 파악하였다. CF₄는 화학활성종과의 반응성이 매우 낮으므로, 고온에서 반응식 (1)~(6)과 같이 전자(e)와 충돌하여 CF_n (CF₃, CF₂, CF)과 같은 형태로 분해된다[9].

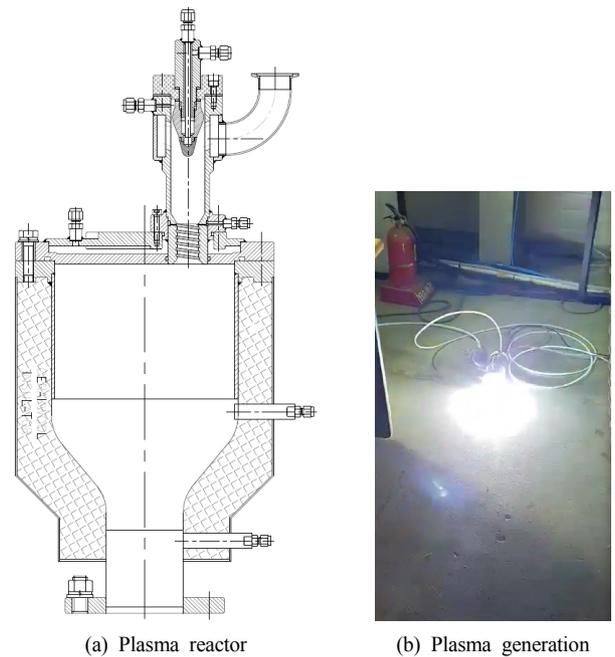
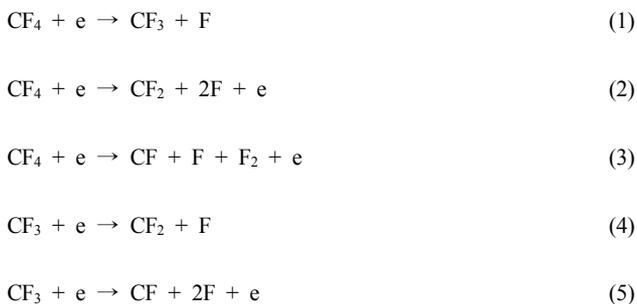
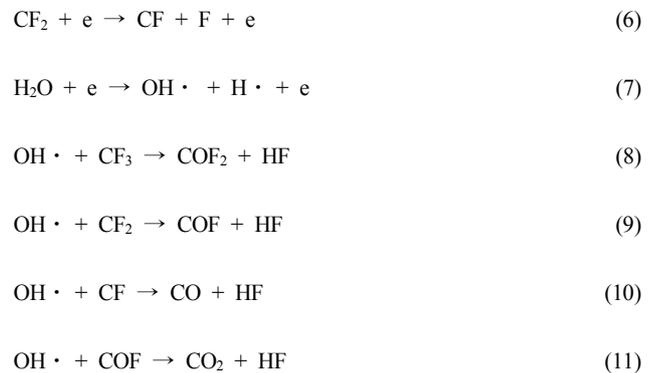


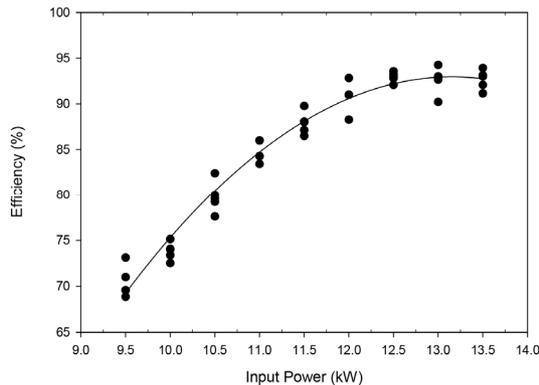
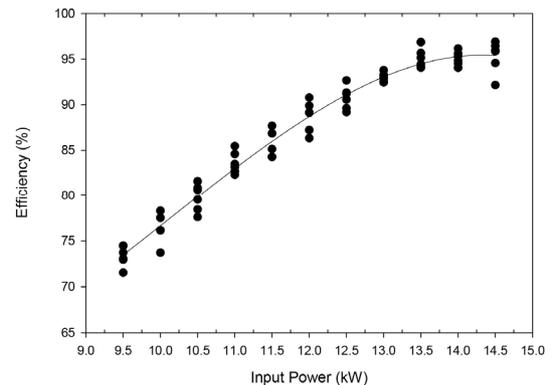
Figure 3. Plasma reactor and plasma generation.



주입되는 반응수는 전자(e)에 의하여 반응식 (7)과 같이 화학활성종인 OH·, H· 라디칼을 생성하고 전자에 의하여 CF₄에서 분해된 CF_n 계열과 H₂O에서 생성된 OH라디칼은 반응식 (8)~(11)과 같이 반응한다[10,11]. 이러한 반응 메커니즘을 활용하여 반응수를 CF₄의 경우 4

Table 2. Decomposition Efficiency according to Input Power

CF ₄ Test (100 Lpm)						
Power (kW)	1st (%)	2nd (%)	3rd (%)	4th (%)	5th (%)	Average (%)
9.5	68.87	69.58	73.13	69.49	71.18	70.47
10	72.52	75.13	74.06	73.38	72.52	73.52
10.5	82.4	79.2	77.6	79.59	81.6	80.08
11	83.42	84.28	86	84.28	88.58	85.31
11.5	89.76	88.06	86.49	87.12	90.01	88.24
12	88.27	92.82	91	90.98	91.54	90.92
12.5	93.26	93.57	92.07	92.79	90.21	92.38
13	94.26	92.89	92.65	90.21	93.09	92.62
13.5	91.14	92.07	93.63	93.13	93	92.59
SF ₆ Test (200 Lpm)						
Power (kW)	1st (%)	2nd (%)	3rd (%)	4th (%)	5th (%)	Average (%)
9.5	71.54	74.46	73.73	74.48	73.06	72.96
10	78.28	73.72	76.16	77.52	78.28	76.15
10.5	80.64	77.60	78.43	81.60	80.87	79.52
11	84.59	82.32	83.16	82.69	85.46	83.50
11.5	85.14	84.28	84.28	86.86	84.28	87.69
12	86.33	89.89	89.16	87.22	90.78	89.11
12.5	91.32	89.61	90.56	91.23	89.18	92.67
13	93.17	93.78	92.54	92.88	93.26	92.44
13.5	94.20	94.05	95.13	96.85	95.66	94.43
14	94.51	95.31	96.15	94.05	94.82	95.61
14.5	92.15	94.56	96.90	95.87	96.44	95.95

Figure 4. Efficiency of CF₄ decomposition by input power.Figure 5. Efficiency of SF₆ decomposition by input power.

mL/min의 유량에서 10 mL/min의 유량으로 1 mL/min의 간격으로 조정하며 실험을 진행하였고 SF₆의 경우 20 mL/min에서 26 mL/min까지 1 mL/min의 간격으로 조정하며 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인입전력에 따른 처리효율 비교

Table 2에 인입 전력에 따른 PFCs 처리효율 분석 결과를 나타내었다.

인입전력에 따른 처리효율을 비교하기 위해 인입전력의 범위를 9.5

kW에서 0.5 kW의 간격으로 증가시켜가며 CF₄, SF₆의 처리효율을 비교하여 분석하였다. 실험 결과 초기 9.5 kW의 전력에서 CF₄와 SF₆는 각각 평균 70.5, 73.4%의 효율을 보였고 전력량을 늘릴수록 효율 또한 증가하는 것을 확인하였다. CF₄의 경우는 전력량 증가에 따른 증가폭이 SF₆에 비해 낮은 것으로 나타났고, 12.5 kW의 전력에 도달하였을 때 처리효율 92.4%를 기준으로 전력증가에 따른 처리효율 증가가 거의 없었다. SF₆의 경우 13.5 kW의 전력에 도달하였을 때의 처리효율 95.1%를 기준으로 전력 증가에 따른 처리효율 증가폭이 적은 것으로 확인됐다. 이는 인입 전력이 높아질수록 PFCs의 분해 효율이 증가하나, 약 90% 이상 범위에서는 분해된 PFCs가 반응수와 반응하는 효

Table 3. Decomposition Efficiency According to Water Injection

CF ₄ Test (100 Lpm)						
Water (mLPM)	1st (%)	2nd (%)	3rd (%)	4th (%)	5th (%)	Average (%)
4	83.83	82.17	83.03	84.80	84.66	83.70
5	87.37	86.50	87.53	85.64	88.01	87.01
6	90.36	88.61	89.28	89.12	87.54	88.98
7	93.57	92.58	92.92	91.08	92.61	92.55
8	94.15	93.27	93.86	92.89	93.16	93.47
9	92.85	93.01	93.05	92.46	92.17	92.71
10	92.11	91.59	90.68	91.50	92.42	91.66

SF ₆ Test (200 Lpm)						
Water (mLPM)	1st (%)	2nd (%)	3rd (%)	4th (%)	5th (%)	Average (%)
20	83.16	84.84	83.49	85.01	84.55	84.21
21	87.35	86.13	85.98	88.74	87.87	87.21
22	92.82	91.22	91.84	91.06	91.59	91.71
23	93.02	94.03	93.50	92.57	92.68	93.16
24	95.23	94.86	95.07	95.26	94.76	95.04
25	94.13	94.36	93.86	94.11	94.44	94.18
26	93.14	93.65	93.01	93.93	93.80	93.50

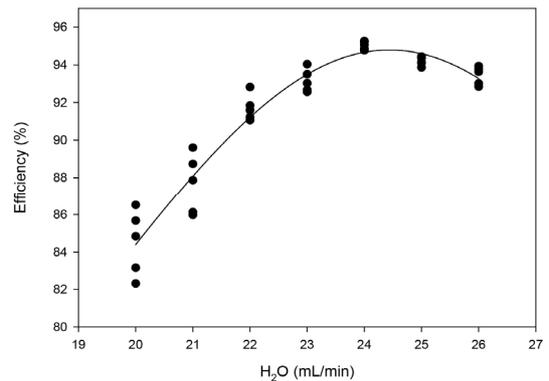
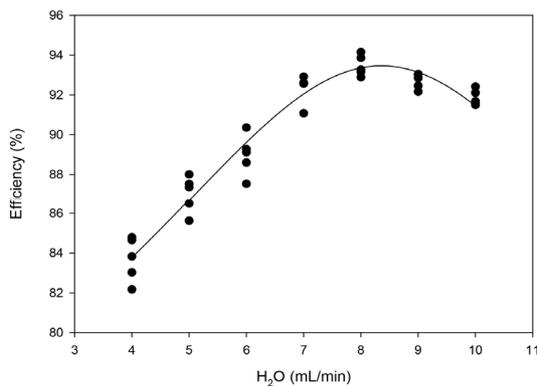


Figure 6. Efficiency of CF₄ decomposition by water injection.

Figure 7. Efficiency of SF₆ decomposition by water injection.

율이 떨어지게 되고 이에 분해된 PFCs가 다시 과불화화합물의 형태로 재결합하기 때문에 판단된다. 이에 더 높은 처리효율을 얻고자 한다면, 반응수(H₂O) 외에 수소 가스(H₂)를 첨가하거나 혹은 다른 환원 매개체를 찾는 것이 바람직하다고 사료된다. CF₄ 100 Lpm과 SF₆ 200 Lpm의 최적 인입 전력 조건은 각각 12.5, 13.5 kW로 사료되며, Figures 4, 5에 각각 CF₄, SF₆의 인입 전력에 따른 처리 효율 변화를 나타내었다.

3.2. 반응수 주입량에 따른 처리효율 비교

Table 3에 반응수 주입량에 따른 PFCs 처리효율 분석 결과를 나타내었다.

플라즈마 전원공급장치의 인입전력은 3.1. 인입 전력에 따른 처리 효율 비교 실험결과를 바탕으로 각각 최적의 인입 전력인 CF₄ 12.5 kW, SF₆ 13.5 kW를 인입하여 반응수 주입량에 따른 처리효율을 분석하였다. 처리 결과 4 mL/min의 유량에서 CF₄의 처리 효율이 평균 83.7%로 나타났으며 반응수 주입 유량이 많아질수록 처리효율이 점

차 증가하다 8 mL/min의 유량에서 처리 효율이 평균 93.47%로 최대치를 나타내고, 8 mL/min 이상의 유량에서는 점차 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. SF₆의 경우에는 20 mL/min의 유량에서 평균 처리 효율이 약 84.21%로 나타났으며 반응수 주입량이 증가할수록 효율이 증가하는 경향을 보였다. 약 24 mL/min의 유량에서 평균 95.04%의 최대 처리 효율을 나타내었으며 24 mL/min 이상의 유량에서는 효율이 점차 감소하였는데, 반응수의 주입량이 적정량보다 낮을 때 낮은 처리율을 보이는 것은 플라즈마에 의해 분해된 화합물이 PFCs 가스가 충분히 불산으로 바뀌지 못하고 재결합하여 유출되는 가스 내의 CF₄ 및 SF₆의 농도가 높아지는 것으로 분석된다. 반응수의 주입량이 적정량 보다 많을수록 처리 효율이 떨어지는 것은, 반응수의 주입량이 많아질수록 플라즈마가 갖는 에너지 중 일부가 CF₄ 및 SF₆를 분해하는데 이용되지 못하고 반응수의 증발에 사용되는 에너지로 빼앗기게 되며, 또한 반응수에 의한 플라즈마 반응기 내부의 온도 저하로 인해 처리 효율이 낮아지는 것으로 판단된다. Figures 6, 7에 각각 CF₄, SF₆의 반응수 주입량에 따른 효율 변화를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 반도체 제조 공정에서 발생하는 과불화화합물의 처리 특성을 파악하기 위해 고온 플라즈마를 활용하여 다양한 조건에서 CF₄와 SF₆의 분해 효율을 확인하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 인입 전력에 따른 CF₄와 SF₆의 처리 효율 분석 결과 CF₄ 약 12.5 kW, SF₆의 경우 13.5 kW를 기준으로 그 이상의 전력 인입 시 처리 효율에 큰 차이가 없었고 그 이하의 전력 인입 시 처리 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. PFCs의 처리 효율을 더욱 증가시키기 위해서는 반응수에 의한 온도 및 에너지 저하를 방지하기 위하여 수소(H₂) 혹은 다른 반응 화합물의 투입을 고려하여야 할 것으로 판단된다. 결과적으로 반도체 제조 현장에서 장비 운용 시 전력 소비량에 따른 운전비용을 감안하였을 때 전원공급장치의 출력은 CF₄ 100 Lpm의 경우 12.5 kW, SF₆ 200 Lpm의 경우 13.5 kW가 가장 최적 전력일 것으로 사료된다.

2) 반응수 주입량에 따른 CF₄와 SF₆의 처리 효율 분석 결과 CF₄의 경우 8 mL/min, SF₆의 경우 24 mL/min의 반응수 주입량에서 처리 효율이 최대치를 나타내었다. 반응수는 매우 적은 유량으로만 주입되어 운전비용에는 거의 영향을 미치지 않지만, 장비의 전체적인 효율을 고려하였을 때 PFCs의 농도 및 유입량에 따른 반응수의 주입량은 매우 미세하게 조절이 가능하여야 하며 또한 적정량의 반응수를 변화 없이 일정하게 주입해야 할 것으로 사료된다.

References

1. B. Innocent, D. Liaigre, D. Pasquier, F. Ropital, J. M. Léger, and K. B. Kokoh, Electro-Reduction of Carbon Dioxide to Formate on Lead Electrode in Aqueous Medium, *Journal of Applied Electrochemistry*, **39**(2), 227-332 (2009).
2. S. W. Park, Post-2020 Climate Regime and Paris Agreement, *Environmental Law and Policy*, **16**, 285-322 (2016).
3. J. H. Kim, Study on the Decomposition Treatment of Semiconductor Waste Gas (CF₄) Using Plasma Torch, Ph.D Dissertation, Jeon-ju University, Jeon-ju, Korea (2018).
4. S. J. You, GHG Emission Status, Forecast and Reduction Potential, *Proceedings of Green Growth : Seeking National Growth Strategy*, November 13, Sejong, Korea (2008).
5. N. K. Hong, The Second biennial update report of the Republic of Korea : under the united nations framework convention on climate change, Greenhouse Gas Inventory and Research Center, **1**, 23-24 (2017).
6. H. W. Park, W. B. Cha, and S. H. Uhm, Highly Efficient Thermal Plasma Scrubber Technology for the Treatment of Perfluorocompounds (PFCs), *Appl. Chem. Eng.*, **29**(1), 10-17 (2017).
7. I. J. No, P. K. Shin, D. W. Park, H. K. Kim, S. H. Lee, J. K. Park, D. H. Kang, and J. S. Kim, Gliding arc Plasma Application for PFCs Gas Decomposition, *Korean Institute of Electrical Engineers*, **7**, 16-18 (2008).
8. C. H. Lee and Y. N. Jeon, Removal of Hydrogen Fluoride from Waterjet Plasma Wastewater by Electrocoagulation, *Environ. Eng. Res.*, **34**(10), 702-708 (2012).
9. S. J. Yu and M. B. Chang, Oxidative Conversion of PFC via Plasma Processing with Dielectric Barrier Discharges, *Plasma Chem. Plasma Proc.*, **21**(3), 311-327 (2001).
10. C. M. Du and J. H. Yan, Electrical and Spectral Characteristics of a Hybrid Gliding Arc Discharge in Air-Water, *IEEE T. Plasma Sci.*, **35**(6), 1648-1650 (2007).
11. Y. C. Hong, H. S. Kim, and H. S. Uhm, Reduction of Perfluorocompound Emissions by Microwave Plasma-Torch, *Proceedings of the Joint International Plasma Symposium of 6th APCPST, 15th SPSM, OS 2002 and 11th KAPRA 2003*, **435**, 329-334 (2003).