

고이온화에너지를 이용한 육불화황 (SF₆) 분해가능성 연구 A Study on Destruction Potential of Sulfur Hexafluoride (SF₆) Using High Ionization Energy

류재용* · 김종범 · 최창용 · 이상준¹⁾ · 곽희성 · 윤영민
한국원자력연구원, ¹⁾평택대학교 환경에너지기술융합연구소
(2012년 6월 14일 접수, 2012년 7월 2일 수정, 2012년 7월 20일 채택)

Jae-Yong Ryu*, Jong-Bum Kim, Chang-Yong Choi, Sang-Joon Lee¹⁾,
Hee-Sung Kwak and Young-Min Yun

Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI),

¹⁾Environment & Energy Convergence Technology R & D center Pyeongtaek University

(Received 14 June 2012, revised 2 July 2012, accepted 20 July 2012)

Abstract

Destruction and removal efficiency (DRE) of SF₆ was tested with varying degrees of ionization and initial concentrations of SF₆. The applied dose of ionization energy varied from 0 to 400 kGy. The initial concentration of SF₆ gas also varied from 1,000 ppm to 2,500 ppm. In order to assess the effect of a residence time on DRE (Destruction and Removal Efficiency, %), experiments were also conducted at different irradiation times of 3, 5, 10, 15, and 20 sec, respectively. The DRE of SF₆ increased with an increasing amount of dose and current. Regardless of initial concentration of SF₆, 90% level of DRE was achieved by applying over 10 mA of electrical current.

Key words : Sulfur Hexafluoride (SF₆), Etching process, High ionization energy, Global Warming

1. 서 론

과학기술의 급진적 발전과 산업화의 영향으로 대기 중 온실가스 농도는 급속히 증가하고 있으며, 이것이 지구온난화의 원인으로 인식되고 있다. 20세기 후반부터 지구온난화 문제에 적극적으로 대처하기 위해 다양한 기후변화 협약을 체결하고 있다. 그 결

과 다양한 형태, 규율의 기후변화 협약을 실행 및 진행 중이다(Yoo *et al.*, 2011). 이산화탄소(CO₂)는 지구온난화를 유발하는 주된 물질로 전체 온난화물질의 약 50%에 이르지만, PFCs (Perfluorinated compounds) 또한 GWP (Global Warming Potential)가 이산화탄소에 비해 매우 높고, 메탄(CH₄)이나 아산화질소(N₂O)보다도 수백배 이상 높아 매우 중요한 Non-CO₂계 온난화 물질이라고 불린다. PFCs 가스는 반도체 산업에서 반도체 소자, 반도체 직접회로 혹은 액정 디바이스의 가공공정 등에서 사용되고 있으며 그 중 에칭(Etching) 및 박막(Film)공정에서 세정을

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)63-570-3345, E-mail : jaeyong03@gmail.com

위해 사용되는 육불화황(Sulfur Hexafluoride: SF₆)은 교토의정서에서 6대 온실가스 중 지구온난화 지수(GWP)가 가장 높은 물질로 정의하고 있다(박정주 등, 2007; IPCC, 2001). 또한, 대기 중 수명이 3200년으로 극히 오랜 기간 분해되지 않고 대기 중에 잔존하기 때문에 연간 방출되는 양이 작더라도 오랜 기간 누적되면 그 파장이 매우 클 수 있다(Tsai, 2007; Chang *et al.*, 2004). SF₆의 전 세계적인 사용규모는 연간 약 7,500톤으로 사용량은 지속적인 증가 추세이다. 용도에 따라 반도체 제조공정, 유리 제조공정, 경금속 주조공정의 사용량이 전체의 20% 정도를 차지하고, 중전기기의 사용량이 전체의 80%를 차지하고 있다. 우리나라의 Non-CO₂계 온난화물질의 배출 특성을 살펴보면, 반도체 산업의 발달로 인한 불소화합물의 배출이 크게 증가한 것으로 나타났고, 그 중 SF₆에 의한 온실가스 배출 추이는 1995년 이후 2002년까지 그 증가율이 104.3%에 달할 정도로 증가 추세를 보이고 있다(유동현, 2004). 김정식 등(2007)은 2007년 우리나라가 하와이의 마우나로아보다 10 ppt 이상의 고농도를 나타내는 경우가 많아 지역적 배출원의 영향을 많이 받는다고 보고하였고, 이동근(2011)은 2009년 산업공정부분이 온실가스 총배출량의 9.3%를 점유하고 있고, 그 중 SF₆ 사용이 47.2%로 할로카본 및 SF₆의 소비가 많아짐에 따라 배출량도 증가하였다고 보고하였다.

현재 SF₆를 처리할 수 있는 방법으로는 분리, 회수, 분해 등이 있다. 최근에는 심냉분리법(cryogenic capture), 압력순환흡착법(pressure swing adsorption), 플라즈마 분해법(plasma decomposition) 등의 처리방법이 있으며, 막분리법을 이용한 회수 및 재사용에 대한 연구도 개발 중에 있다(Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2009). 그러나, 재활용 및 회수기술은 처리가스의 범위와 처리용량이 제한적이고(Lee *et al.*, 2011), 연소식은 1,400°C 이상의 고온이 필요하며, SOx 등 2차 대기오염물질이 다량 발생하는 단점을 가진다. 플라즈마 처리기술로는 처리용량의 한계, 높은 전력사용으로 인한 효율성 저하 및 화염의 안정성에 문제점을 가지고 있다. 촉매(흡착)장치 또한 많이 활용되고 있지만 SF₆ 가스의 처리가 효율적으로 되고 있지 않고 대용량 처리가 곤란하며 2차 오염물질 발생 및 흡착물질 공급단가에 의해 경제성이 크게 의존된다(이상준, 2010).

고이온화에너지 기술은 고분자, 섬유, 식품, 의약품 등 다양한 분야에서 적용되고 있으며(Jang *et al.*, 2003), 환경분야 기술로는 상하수도 및 산업폐수처리, 대기오염제어기술로서 악취제거 및 휘발성 유기화합물(VOCs)제거에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다(Bae *et al.*, 2004). 이 기술은 10⁻¹⁸~10⁻¹²초 사이에 전자들이 생성되어 대상물질로 조사(irradiation)가 이루어지고 10⁻⁸~10⁻¹초 사이에 수많은 종류의 고농도 라디칼, 이온 등이 형성되어 제어대상물질과 반응하므로 제어속도가 매우 빠르다(Park *et al.*, 2005). 특히 연소식이나 플라즈마를 이용하는 제어기술에 비하여 저온(상온)에서 운영이 가능함에 따라 에너지 사용량이 적고, 여러 가지 물질이 복합적으로 배출되는 산업시설에 경제적으로 적용될 수 있다고 보고되고 있다(Hirota *et al.*, 1995). RCO(Regenerative catalytic oxidizer)나 RTO(Regenerative thermal oxidizer), CTO(Catalytic thermal oxidizer)와 비교하였을 때 초기 투자비용은 비슷하지만 1/4 수준의 운영비가 소요된다는 보고도 있다(Kim, 2007). 본 연구에서는 고이온화에너지 기술을 이용하여 반도체 에칭공정에서 배출되는 PFCs 가스 중 SF₆를 분해하는 연구를 수행하였다. 아래의 그림 1은 모든 가능한 SF₆ 가스의 분해 반응을 나타낸 것으로 SF₆ 가스를 고온의 산소 분위기에서 처리하는 다른 기술들은 SOx를 발생시키나, 고이온화에너지 기술은 연소에 의한 분해반응이 아니고, O₂를 첨가하지 않으며, 상온에서 처리하기 때문에 SOx 발생을 근본적으로 차단할 수 있는 특징이 있다. 하지만 고이온화에너지를 이용한 PFCs 분해에 관련된 연구는 전 세계적으로 아직 진행된 바 없어 본 연구의 목적은 SF₆ 가스를 가장 효율적으로 처리하기 위해 조사(흡수)선량과 조사시간, 초기농도와 조사강도가 SF₆ 가스의 분해에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구이다.

2. 연구방법

2.1 실험 장치의 구성

2.1.1 조사 반응기

본 연구에서는 반도체 에칭공정에서 배출되는 Non-CO₂ 온실가스 중 온실효과가 가장 큰 육불화황(SF₆) 가스를 분해하기 위한 목적으로 고이온화에너지

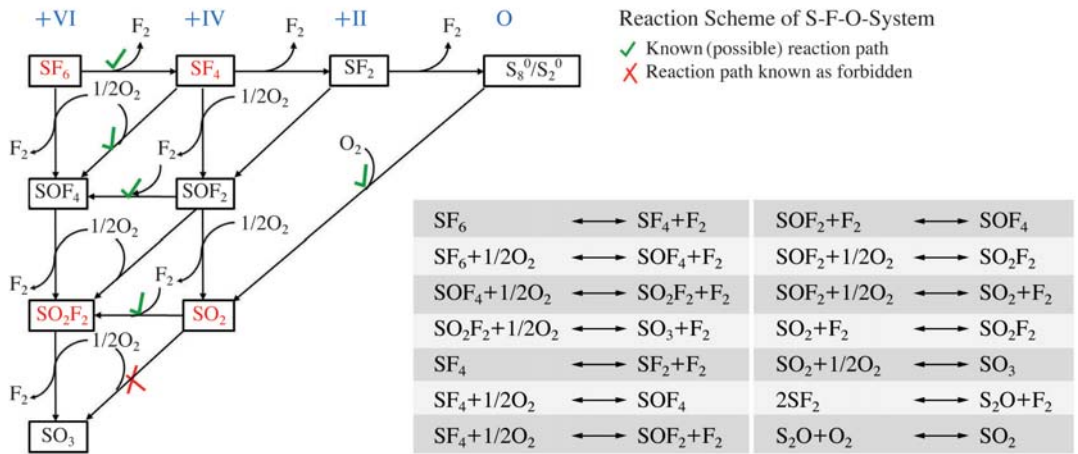


Fig. 1. SF₆ decomposition mechanism (Clean Systems Korea, 2011).

지 기술 (High Ionization Energy technology)을 활용한 실험 장치를 구성하였다.

반응기는 고이온화에너지 조사 시 에너지 손실을 최소화 시키고, 반응기 내부의 정압에 충분히 견딜 수 있는 50 μ m 두께의 박막 티타늄을 사용하였다. 반응기 형태는 직육면체 (110 mm \times 694 mm \times 202 mm)이며, 반응기와 배관 (ID 50.8 mm)은 모두 내식성이 있는 stainless steel (SUS304)로 제작하였다. 반응기 내부의 급격한 온도증가를 방지하고 일정한 온도를 유지하기 위해 물을 순환시켜 반응기를 냉각할 수 있도록 하였고, 반응기를 보호하고 티타늄 박막교체를 위해 반응기 상단에 보호관 (SUS310, 280 mm \times 830 mm \times 10 mm)을 설치하였다. 반응기 전면에 내부 온도 및 배기가스 온도 측정을 위한 센서를 설치하였다. 전단과 후단에 각각 유입과 배출되는 가스의 와류를 최소화하기 위해 확대관을 적용하고, 입, 출구 모두 stainless steel관 (SUS304, ID 50.8 mm)으로 제작하였으며, 밸브를 설치하여 개폐가 가능하도록 하였다.

2.1.2 반응기 유량제어 시스템

모사가스의 공급을 위해 SF₆와 N₂ 압력 용기에 각각 레귤레이터를 설치하였다. 부식성을 가지는 물질이 없는 것으로 판단되고, 설치 상 편의를 위해 테프론 재질 (ID 6.35 mm)의 배관으로 연결하였다. 회분식 반응기 시스템에서 일정한 농도의 대상물질을 반응기로 공급하기 위해 제어시스템을 직접 제작하였

다. 반응기 유량제어시스템은 외부에 시스템의 작동상태를 실시간으로 파악할 수 있는 모니터와 반응기의 온도와 각 장치별 전류의 흐름과 상태를 실시간으로 파악할 수 있는 표시장치, 전체 시스템의 전원을 제어하는 버튼으로 구성하였다. 하단에는 회석가스 (N₂: 99.999%)의 유량에 따라 대상물질 (SF₆: 99.999%)의 농도가 조절되도록 MFC (mass flow controller)를 설치하고 각 압력 용기마다 가스의 압력을 조절하기 위해 레귤레이터를 설치하였다. 혼합 챔버 (mixing chamber)를 설치하여 대상물질 (SF₆)이 충분히 혼합되도록 구성하였다. 가스혼합장치 (Mixture tank, SUS 310 L, 1.6 L급, 700 mm \times 200 mm \times 110 mm)는 N₂와 SF₆ 가스가 혼합되어 일정 농도의 반도체 모사배기가스로 제조되어 조사 반응기로 주입되게 하였다. 고이온화에너지 기술을 활용한 SF₆ 분해 실험 장치의 구성을 그림 2에 나타내었다.

2.1.3 고이온화에너지 발생 장치

본 연구에서는 1 MeV 전자빔 가속기 (maximum power 40 kW, ELV-4 type, EB Tech Co. Ltd., Korea)가 사용되었으며, 반도체 배기가스 중 SF₆의 제어특성 연구를 위한 회분식 시스템 (batch system)으로 수행되었다. 흡수선량은 50~400 kGy (2~20 mA)의 범위로 단계별로 조사되었으며, 본 연구에서 사용된 ELV-4 type 고이온화에너지 발생 장치의 구체적인 사양을 표 1에 나타내었다.

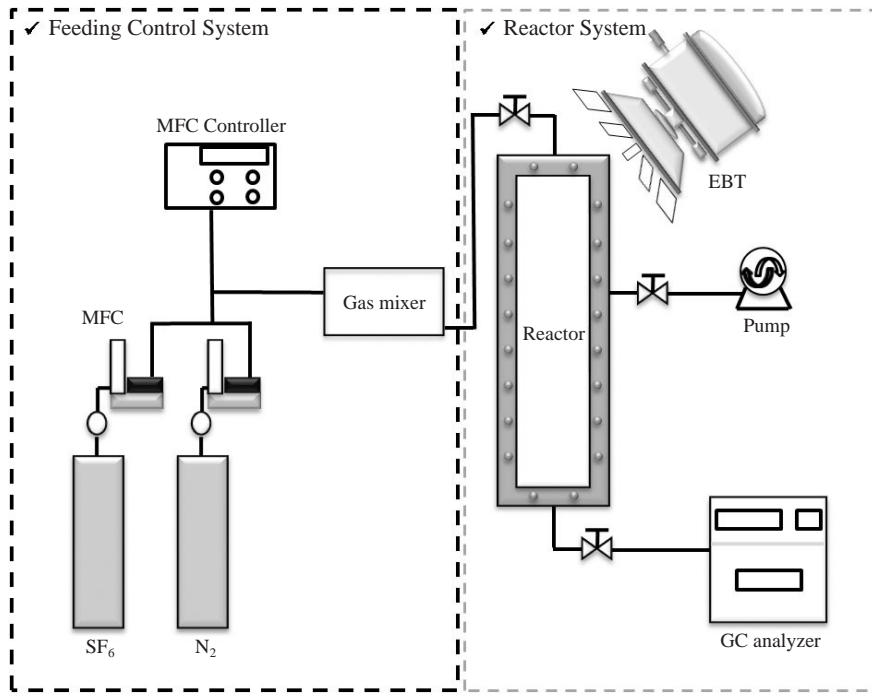


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

Table 1. Specification of a high ionization energy generator used in this study.

Parameter	Value
Electron energy	0.6~1.0 MeV
Energy instability	± 5%
Maximum beam power	40 kW
Maximum beam current	40 mA
Acceleration voltage ripple	± 2%
Non-uniformity of the current linear density along the extraction window	± 10%
Beam extraction window (mm)	980 × 75
Differential pressure of SF ₆	1.1 MPa
Volume of the insulation vessel	2.43 m ³
Total mass of equipment	1300 kg
Consumption power	65 kVA

2. 2 흡수선량 측정

흡수선량(Absorbed Dose)은 조사 대상물질에 흡수된 에너지 분포를 평가하는 주요인자이다. 흡수선량은 물질에 조사(irradiation)된 대상물질의 단위질량당 흡수된 전리 방사선 에너지를 의미하며, SI단위계로서 Gy(gray, 1 Gy=1 J/kg)가 사용된다. 반응기의

흡수선량을 측정하는 방법에는 기상, 액상 및 고상의 선량계(dosimeter)를 사용하는 방법이 있으며, 일반적으로 취급 및 보관이 용이한 고상의 선량계가 주로 이용되고 있다(Son, 2011). 흡수선량의 측정은 고상 선량계 중의 하나인 CTA(cellulose triacetate) 필름(FTR-125, Fuji Photo Film Co., Japan)을 이용한 방법으로 흡수선량을 측정하였다. CTA 필름의 흡광도 측정은 UV/VIS Spectrophotometer(UVIKONxs, SECOMAM, France)를 사용하여 280 nm의 파장 범위에서 1시간 30분 이내에 측정하였으며, 태양광에 의한 간섭을 배제하고자 조사 후의 CTA 필름은 흡광도 측정 전까지 알루미늄 호일을 이용하여 보호하였다(최장승, 2011). 고이온화에너지 인출창과 반응기 사이에 70 mm간격을 두고 반응기 창으로부터 깊이 25 mm에 CTA 필름을 2등분하여 부착하고 반응기에 1 MeV, 5 mA의 조건으로 20 sec 동안 조사하였다.

흡수선량 측정결과 1 MeV, 5 mA, 20 sec 조건에서 반응기(batch system)의 흡수선량은 115.4 kGy로 계산되었다. 사용된 반응기의 부피는 15.3 L(110 mm × 690 mm × 202 mm)이고, 체류시간(T=V/F)은 18.4

Table 2. Current (mA) as a function of adsorbed dose (kGy).

kGy	mA	kGy	mA
10	0.47	110	4.71
20	0.94	120	9.42
30	1.41	130	14.13
40	1.88	140	18.84
50	2.35	150	23.55
60	2.83	160	28.26
70	3.30	170	32.97
80	3.77	180	37.68
90	4.24	190	42.39
100	4.71	200	47.10

Table 3. Adsorbed dose (kGy) as a function of exposure current (mA).

mA	kGy	mA	kGy
1	21.23	11	233.57
2	42.47	12	254.80
3	63.70	13	276.04
4	84.93	14	297.27
5	106.17	15	318.50
6	127.40	16	339.74
7	148.64	17	360.97
8	169.87	18	382.20
9	191.10	19	403.44
10	212.34	20	424.67

sec로 계산된다.

본 연구에 사용된 반응기의 흡수선량(kGy)의 변화값을 조사강도(mA)와 조사시간(sec)에 따른 흡수선량(kGy)의 변화 값을 표 2와 표 3에 나타내었다.

흡수선량의 calibration은 매 실험 시 마다 측정하기에 어려움이 있어 조사실험을 진행하기 전 CTA 필름을 이용하여 체류시간과 mA에 따른 흡수선량을 측정하고 그 계산 값을 각 실험의 조건에 따라 적용하였다.

2. 3 실험방법

본 실험에서는 매 실험 시 마다 유량제어시스템에서 혼합된 모사가스를 일정시간 흘려 반응기 내부의 SF₆ 농도를 안정되게 하고 반응기 전, 후단의 밸브를 닫아 반응기 내에 모사가스를 채운 후 고이온화에너지 조사하였다.

본 실험을 수행하기 위한 흡수선량(adsorbed dose, kGy)과 조사강도(mA) 및 기타 실험조건을 표 4에

Table 4. Experimental methods and conditions.

Contents	Experimental conditions
Adsorbed dose (kGy)	50, 100, 200, 300, 400
Current (mA)	2, 5, 10, 15, 20
SF ₆ Conc. (ppm)	1000, 2000, 2500
Reactor specification	Capacity: 110 × 690 × 202 mm (15.3 L) Reactor temperature : room temperature
Irradiation time-Batch (sec)	3, 5, 10, 15, 20

Table 5. Analytical condition for Gas Chromatography.

Column	Length	30 m
	Thickness	0.32 μm
Inlet temperature	29°C	
Inlet pressure	3.038 psi	
Oven temperature	25°C	
Split ratio	65 : 1	
Sample loop temp	25°C	
Column flow	5 mL/min	
Run time	10 min	
Temperature	250°C	
Detector	ECD	
Carrier gas	Nitrogen	
Make up gas	Zero Air	
Makeup flow	60 mL/min	

나타내었다.

시료의 채취는 반응기 후단에 시료 채취를 위한 T형 sampling port를 장착하고, sampling port에서 sampling pump (maximum flow 14 L/min)를 이용하여 테프론 백 (SKC, 232-03, 3 L)에 포집 후 분석을 실시하였다.

반응기 후단에서 배출되는 배기가스 중의 SF₆의 분해정도를 파악하기 위하여 Gas Chromatograph (Agilent Technologies, 7890A, USA)를 사용하여 농도를 분석하였으며 Gas Chromatograph의 컬럼은 GS-GASPRO (30 m × 0.32 μm)를 사용하였다. 아래의 표 5에 Gas Chromatography의 분석조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

고이온화에너지에 의한 SF₆ 제거 실험은 회분식 시스템에서 흡수선량에 따른 SF₆의 분해, 조사선량과

조사시간에 따른 SF₆의 분해, 조사강도 및 초기농도에 따른 SF₆의 분해에 대해 검토하였다. 본 실험의 결과들은 최소 5회 이상 반복 실험의 결과를 평균값과 표준편차로 나타낸 것이다.

아래의 그림 3은 회분식 시스템에서 초기농도가 2,500 ppm인 SF₆ 가스의 흡수선량에 따른 SF₆ 가스의 분해효율(DRE, Destruction and removal efficiency)을 나타내었다. 흡수선량(kGy)은 앞의 표 2에서 나타내었듯이 CTA 필름을 이용하여 측정된 값을 조사강도별로 계산하여 적용하였다. 이 때의 조사시간은 약 18.4 sec로 하였다. 흡수선량을 50 kGy를 적용하였을 때 SF₆ 가스의 분해효율은 약 30% 정도로 낮은 분해효율을 나타내었으나, 100 kGy에서는 75%, 200 kGy에서는 92%, 300 kGy에서는 93%, 400 kGy에서는 약 95%의 분해효율을 나타내었듯이 흡수선량을 점점 증가시키수록 SF₆의 분해효율도 같이 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험의 결과는 다른 유사 연구를 수행한 연구결과와도 일치하였다. Kim (2007)은 흡수선량의 증가에 따라 대상물질의 제어효율이 증가한다는 연구결과를 발표하였다. 손영식(2007)은 단위 에너지 당 제어효율을 의미하는 G-value의 값은 흡수선량이 증가함에 따라 감소한다고 보고 하였고, 손윤석(2012)은 흡수선량의 증가에 따라 제어효율은 증가하지만 에너지 효율은 감소한다고 보고하여 본 연구 결과와 유사한 경향을 보인다. 그뿐만 아니라, Kim(2010)의 연구결과에 따르면 전류를 높일수록 전자의 방출계수가 증가한다고 보고한 바 있다. 즉, 본 연구에서 방출되는 전자의 수를 조사강도(mA)의 상승에 의해 증가시키게 되면 SF₆와 전자의 충돌확률이 증가하게 되어 분해효율이 향상된 것으로 사료된다.

아래의 그림 4는 SF₆ 가스의 반응기내 조사시간(irradiation time)에 따른 분해효율을 나타낸 것으로 실험을 수행하면서 조사시간을 달리하여 실험한 결과를 분해효율로 나타내었다. 조사강도가 5 mA일 때 조사시간이 3, 5, 10, 15, 20 sec로 증가함에 따라 분해효율은 66.75%에서 75.79%로 소폭상승을 보였다. 10 mA와 15 mA, 20 mA에서도 10%에서 20% 정도의 상승률을 보여, 조사강도에 따른 분해효율과의 차이를 뚜렷하게 나타냈다. 조사시간의 상승은 전자와 제어물질의 충돌확률을 높이기 때문에 분해효율이 상승되어야 한다고 생각되지만 본 연구의 실험에서는

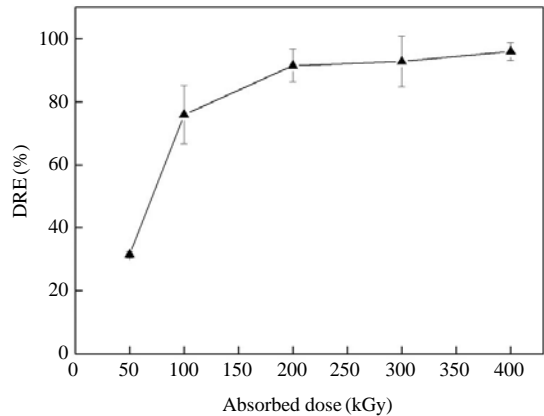


Fig. 3. Destruction and removal efficiency (DRE) of SF₆ as a function of adsorbed dose (Injected concentration of SF₆ : 2,500 ppm).

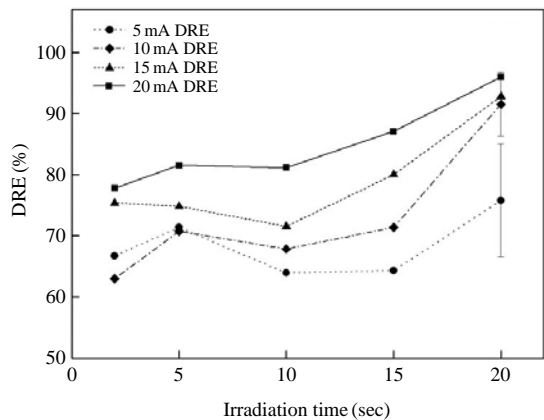


Fig. 4. Destruction and removal efficiency of SF₆ as a function of electrical current and irradiation time.

조사시간의 증가에 따른 분해효율 상승은 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. SF₆와 같이 강력한 난분해성 물질의 경우 조사시간의 상승보다는 각각의 조사강도(mA)에서 발생하는 순간적인 전자의 운동에너지 크기와 S-F 결합의 bond energy가 분해효율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

그림 5는 SF₆의 초기농도와 조사강도 따른 분해효율을 알아보기 위하여 SF₆ 가스의 초기농도를 1,000 ppm, 2,000 ppm, 2,500 ppm으로 설정하고 조사강도를 2 mA, 5 mA, 10 mA, 15 mA, 20 mA로 설정하였을 때 조사강도와 초기농도에 따른 SF₆의 분해효율을

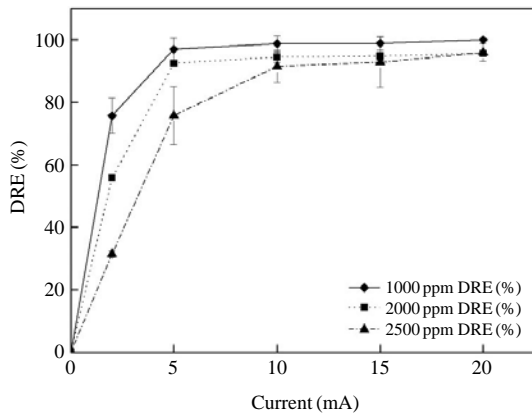


Fig. 5. Destruction and removal efficiency of SF₆ as function of gas initial concentration and electrical current.

나타낸 것이다. 이 때의 조사시간은 18.4 sec로 하였다. 조사강도가 2 mA일 때 1,000 ppm에서는 76%, 2,000 ppm에서는 56%, 2,500 ppm에서는 30%로 초기 농도가 높을수록 분해효율이 낮게 나타났다. 조사강도가 10 mA일 때 1,000 ppm에서는 99%, 2,000 ppm에서는 94%, 2,500 ppm에서는 92%로 비슷하게 나타났다. 10 mA 이상이었을 때, SF₆ 가스의 초기농도에 상관없이 효율이 거의 90% 이상이였다. 하지만 조사강도가 낮을 때는 SF₆ 가스의 초기농도가 높을수록 효율이 많이 감소함을 나타내었다. 본 연구 결과는 같은 기술을 이용하여 휘발성 유기화합물 처리에 관한 연구(Kim, 2007) 결과와 유사함을 보였다. Kim (2007)에 의하면 제어대상물질의 농도와 분해효율은 반비례한다고 보고하고 있다. 즉, 본 연구에서 SF₆ 농도가 증가함에 따라 효율이 감소하는 이유는 SF₆의 농도가 높아짐에 따라 상대적으로 반응기 바닥부분에서 전자의 충돌확률이 낮아지고, 전자의 투과력이 감소하여 분해효율이 감소하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 고이온화에너지를 이용하여 난분해성 물질인 SF₆ 가스를 고효율로 분해가능하다는 것을 보여주었다. SF₆ 가스의 흡수선량, 조사시간 및 초기농도 등에 따른 분해효율 외에도 고이온화에너지 기술을 이용한 SF₆ 가스 분해 시 F와 SF_x (x=1~5) 계열의 다양한 부산물들이 발생할 것으로 예상된다. 따라서, 고이온화에너지에 의해 분해되는 SF₆ 가스의 메카니즘 규명을 명확히 하기 위해 부산물들의 분석

이 필요하다. 그뿐만 아니라, SF₆ 가스의 분해효율을 더욱더 경제적으로 향상시키기 위해서 첨가제 주입 등의 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 반도체 제조공정 중 에칭공정에서 세정을 위해 사용되는 SF₆의 처리를 목적으로 고이온화에너지에너지를 이용하여 SF₆의 분해효율을 높이기 위한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 흡수선량에 따른 SF₆의 분해효율은 흡수선량이 증가할수록 SF₆ 가스의 분해효율도 증가한다. SF₆ 가스의 농도가 2,500 ppm일 때 흡수선량이 200 kGy 이상에서 90% 이상의 분해효율을 얻을 수 있었다.
2. 고이온화에너지에 의한 분해효율은 조사시간에 대한 효과보다 조사강도에 따른 효과가 더 큰 것으로 나타났다. 조사시간이 증가함에 따라 분해효율도 상승하였으나, 조사강도에 따른 분해효율 상승이 더 많음을 알 수 있었다.
3. SF₆의 초기농도가 고농도일수록 분해효율은 감소하는 것으로 나타났지만 10 mA 이상의 조사강도에서 초기농도와 관계없이 90% 이상의 분해효율을 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 시행하는 차세대 에코 이노베이션 기술 개발 사업과 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김정식, 유희정, 김상백, 문동민, 이진복, 김명수 (2007) 육불화황(SF₆) 연속관측시스템 구축 및 농도 변화 특성, 한국대기환경학회, 2007 추계학술대회 논문집, 281-282.
 박정주, 동종인, 박인희, 조연행 (2007) 전력기기에서의 SF₆ 가스발생특성 및 배출 계수 산정연구, 한국대기환경학회, 2007 추계학술대회 논문집, 54-55.

- 손영식, 김조천, 박강남, 손윤석, 김기형, 김기준, 선우영 (2007) 전자빔을 이용한 Methane의 분해 특성 연구, 한국대기환경학회, 2007 추계학술대회 논문집, 479-480.
- 손윤석, 김정환, 정진호, 김조천 (2012) 전자빔 하이브리드 기술을 이용한 악취물질 제어연구, 한국대기환경학회, 2012 춘계학술대회 논문집, pp. 34.
- 유동현 (2004) 산업공정부문 온실가스 배출전망, 에너지경제연구원 기본연구보고서.
- 이동근 (2011) 온실가스 배출 통계 개선을 위한 기초연구, 통계개발원 수시과제 연구보고서.
- 이상준 (2010) 화염-플라즈마를 이용하여 반도체 공정 발생 1,000 LPM 규모의 PFCs 처리기술 개발에 관한 연구, Clean Systems Korea 환경부 차세대 핵심환경기술개발 사업 최종보고서.
- 최장승 (2011) 염색폐수처리시설 악취물질의 하이브리드형 라디칼 고도산화 처리기술 개발, 한국염색기술연구소 환경부 차세대 핵심환경기술개발 사업 연구보고서.
- Bae, J.S., H.Y. Kim, B.N. Kim, Y.S. Won, and D.H. Han (2004) Continuous dry process for simultaneous removal of SO₂ and NO_x in existence of ammonia and water under electron beam irradiation, *Applied Chemistry*, 8(2), 693-696.
- Chang, M.B. and H.M. Lee (2004) Abatement of perfluorocarbons with combined plasma catalysis in atmospheric-pressure environment, *Catal. Today*, 89(1-2), 109-115.
- Clean Systems Korea (2011) Internal Technical Document.
- Hirota, K., H. Matzing, H.R. Paur, and K. Woletz (1995) Analyses of products formed by electron beam treatment of VOC/air mixtures, *Radiation Physics and Chemistry*, 45(4), 649-655.
- IPCC (2001) *The Scientific Basis*, Cambridge, England, Cambridge University Press. Chapter 4, pp. 244.
- Jang, J.H., J.S. Bae, B.N. Kim, W.S. Park, S.D. Kim, and Y.S. Won (2003) Decomposition of aromatic VOCs in flow reactor by electron beam irradiation, *Applied Chemistry*, 7(1), 353-356.
- Kim, K.J. (2007) A study on the coupling effect of electron beam and catalyst for control of volatile organic compounds, Ph. D. dissertation, Konkuk university.
- Kim, P.H. (2010) A Study on Trimethylamine Control Characteristics using Advanced Oxidizing Technique, Thesis of Master of Science, Konkuk university.
- Lee, H.J., H.K. Lee, H.S. Choi, and S.H. Lee (2011) Recovery of SF₆ from gas mixtures with low concentration of SF₆, *Membrane Journal*, 21(3), 256-262.
- Lee, H.J., M.W. Lee, H.K. Lee, and S.H. Lee (2011) Separation and recovery of SF₆ gas from N₂/SF₆ gas mixtures by using a polymer hollow fiber membranes, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(1), 47-53.
- Lee, S.H., N.K. Park, S.H. Yoon, W.C. Chang, and T.J. Lee (2009) Catalytic decomposition of SF₆ by hydrolysis and oxidation over γ -Al₂O₃, *Clean Technology*, 15(4), 273-279.
- Park, K.N., K.J. Kim, J.C. Kim, W.Y. Sun, and H.N. Song (2005) Removal efficiency of toluene by EBeam-catalyst coupling system, *J. KOSAE*, 21(6), 667-673.
- Son, Y.S. (2011) A technique for removing odorous sulfur compounds using an electron beam hybrid system, Ph. D. dissertation, Konkuk university.
- Tsai, W.-T. (2007) The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis, *Journal of Fluorine Chemistry* 128(11), 1345-1352.
- Yoo, H.J., J.S. Kim, J.S. Lee, D.M. Moon, J.B. Lee, J.H. Kim, S.H. Kim, and I.Y. Lee (2011) Measurement and characterization of atmospheric SF₆ at Korea GAW center in 2007, *J. KOSAE*, 27(1), 1-15.