

## DBD 반응기에서 플라즈마 방전형태에 따른 PFC<sub>s</sub> 가스의 분해 특성

### Decomposition Characteristics of PFC<sub>s</sub> for Various Plasma Discharge Methods in Dielectric Barrier Discharge

김관태\* · 김용호 · 차민석 · 송영훈 · 김석준 · 류정인<sup>1)</sup>

한국기계연구원 환경기계기술연구부, <sup>1)</sup>충남대학교 기계공학과

(2004년 6월 8일 접수, 2004년 9월 23일 채택)

Kwan-Tae Kim\*, Yong-Ho Kim, Min-Suk Cha, Young-Hoon Song,  
Seock-Joon Kim and Jeong-In Ryu<sup>1)</sup>

*Eco-machinery Engineering Dept., Korea Institute of Machinery & Materials,*

<sup>1)</sup>*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University*

(Received 8 June 2004, accepted 23 September 2004)

#### Abstract

Perfluorocompounds (PFC<sub>s</sub>), such as tetrafluoromethane (CF<sub>4</sub>) and hexafluoroethane (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>), have been widely used as plasma etching and chemical vapor deposition (CVD) gases for semiconductor manufacturing processes. Since these PFC<sub>s</sub> are known to cause a greenhouse effect intensively, there has been a growing interest in reducing PFC<sub>s</sub> emissions. Among various CF<sub>4</sub> decomposing techniques, a dielectric barrier discharge (DBD) is considered as one of a promising candidate because it has been successfully used for generating ozone (O<sub>3</sub>) and decomposing nitrogen oxide (NO).

Firstly, optimal concentration of oxygen for CF<sub>4</sub> decomposition was found to figure out how many primary and secondary reactions are associated with DBD process. Secondly, to find effective discharge method for CF<sub>4</sub> decomposition, a streamer and a glow mode in DBD are experimentally compared, which includes (i) coaxial-cylinder DBD, (ii) DBD reactor packed with glass beads, and (iii) a glow mode operation with a helium gas. The test results showed that optimal concentration of oxygen was ranged 500 ppm ~ 1% for treating 500 ppm of CF<sub>4</sub> and helium glow discharge was the most efficient one to decompose CF<sub>4</sub>.

**Key words** : PFCs (Perfluorocompounds), Tetrafluoromethane (CF<sub>4</sub>), DBD (Dielectric Barrier Discharge), Streamer mode, Glow mode

#### 1. 서 론

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)42-868-7348, E-mail : ktkim@kimm.re.kr

PFC<sub>s</sub> 가스는 다수의 불소가 포함된 가스로 CF<sub>4</sub>,

C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>와 같이 탄소를 포함한 경우와 NF<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>와 같은 무기성 가스로 구분할 수 있다. PFC<sub>n</sub> 가스는 반도체 산업의 여러 공정에서 폭 넓게 사용되고 있으며, 이들은 지구 온난화 지수가 크고 대기 중 생존기간이 긴 특성으로 인하여 배출가스에 대한 분해기술을 비롯하여 회수 및 대체물질 개발에 관한 연구가 필요한 실정이다(International SEMATECH Technology Transfer, 1999, 1998). 현재 PFC<sub>n</sub> 분해기술은 수소를 이용한 고온소각이나 아아크 또는 RF와 같은 고온 플라즈마를 이용한 기술이 개발되고 있는데, 이들 기술의 안정성 및 전력비용 등에 대한 문제점으로 인하여 저온 플라즈마를 이용한 DBD 기술이 최근 대체기술로서 관심이 높아지고 있다. 유전체 장벽을 이용한 DBD 기술은 오존을 발생시키거나 질소산화물 및 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC<sub>n</sub>)과 같은 유해가스 처리 공정에 널리 이용되어온 대표적인 상압 플라즈마원으로, 화학적 활성도가 큰 N, O, OH, O<sub>3</sub> 등의 화학 활성종(chemically active species)을 다량으로 발생시키는 장점을 가지고 있다. 그러나 PFC<sub>n</sub> 가스 중 CF<sub>4</sub>는 이들 화학 활성종과의 반응성이 매우 낮으며, CF<sub>3</sub>, CF<sub>2</sub>, 그리고 CF와 같은 형태로 분해 되어야 비로서 화학 활성종과의 반응성이 높은 것으로 알려져 있어(Kogoma *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2001), CF<sub>4</sub>를 효과적으로 분해하기 위하여는 전자와의 1차적인 반응이 화학 활성종과의 2차 반응에 앞서 기본적으로 이루어져야 한다. 표 1에 DBD 플라즈마를 이용한 CF<sub>4</sub>가스의 분해 메커니즘을 나타내었으며, 전자는 “e”로 표시하였다(Yu *et al.*, 2001). 본 연구에서는 CF<sub>4</sub>와 같은 난분해성 가스의 분해에 적합한 반응공정 및 반응기 개발을 위하여 동축 원통형(coaxial-cylinder type)의 DBD 반응기를 이용하여

다음과 같은 연구를 수행하였다. 첫째, DBD 반응기의 스트리머 모드에서 바탕가스(질소)에 산소를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우의 반응 메커니즘에 대하여 비교하였으며, 이때 CF<sub>4</sub> 분해율에 기여하는 최적의 산소농도 범위가 존재함을 확인하였다. 둘째, CF<sub>4</sub> 분해에 효과적인 방전모드(스트리머 또는 글로우)를 알아보기 위하여 DBD 반응기에 유리구슬을 충전한 경우와(Kabashima *et al.*, 2001; Yamamoto *et al.*, 1997) 헬륨을 바탕가스로 한 글로우 모드에 대하여 실험을 수행하고, 질소를 바탕가스로 한 스트리머 모드의 결과와 비교하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 반응기는 그림 1의 동축 원통형 DBD 반응기로 내경 27 mm, 길이 350 mm의 석영관을 유전체로 이용하였다. 기존의 반응기가 과도한 투입전력에 따른 발생 열로 유전체의 전기적 전도도가 증가하고 비교적 쉽게 절연이 파괴되는 문제점이 있어, 다양한 실험조건을 위해 냉각수를 공급하여 방전에 따른 발생 열을 냉각하며 운전하였다.

Table 1. CF<sub>4</sub> decomposition mechanisms by DBD plasma.

Primary reaction	Secondary reaction
e+CF <sub>4</sub> → CF <sub>3</sub> +F <sup>-</sup> (1)	CF <sub>3</sub> +O → COF <sub>2</sub> +F 3.16 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (5)
e+CF <sub>4</sub> → CF <sub>3</sub> +F <sup>-</sup> (2)	COF <sub>2</sub> +O → CO <sub>2</sub> +F <sub>2</sub> 5.30 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (6)
e+CF <sub>3</sub> → CF <sub>2</sub> +F <sup>-</sup> (3)	CF <sub>2</sub> +O → CFO+F 2.17 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (7)
	CFO+O → CO <sub>2</sub> +F 4.98 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (8)
e+CF <sub>2</sub> → CF+F+e (4)	CF+O → CO+F 1.24 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (9)
	CO+O → CO <sub>2</sub> 6.52 × 10 <sup>-11</sup> cm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> (10)

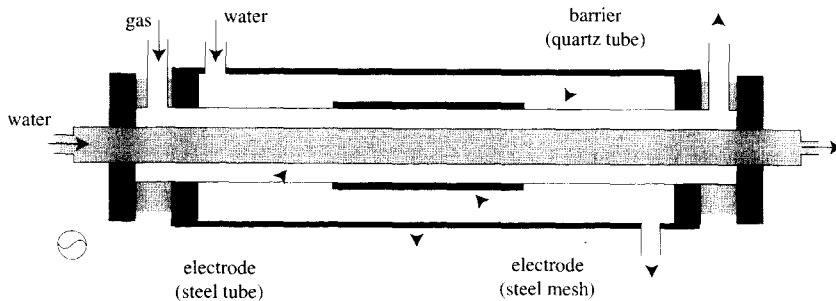


Fig. 1. Schematic diagram of a coaxial-cylinder DBD reactor.

유전체 외면은 스테인레스 메시로 감싸 외부전극으로 하였으며, 내부전극은 외경 21 mm (또는 25 mm)의 스테인레스 관을 이용하였다. 따라서 내부전극과 유전체사이 3 mm (또는 1 mm) 공간을 통하여 혼합가스를 2 liter/min (1 pm) 규모로 공급하였으며, 혼합가스는 질소 바탕가스에 CF<sub>4</sub>의 농도 (vol. %)가 500 ppm이 되도록 이들 가스를 BROOKS사(일본)의 질량 유량계 (Mass Flow Controller, MFC)로 각 각 조절하여 회석하였다. 이때 사용된 CF<sub>4</sub>는 (DAIKIN사, 일본) 순도 99.999%의 것을 사용하였으며, 또한 첨가제인 산소의 영향을 알아보기 위해서는 이들 혼합가스에 산소농도가 1,000 ppm이 되도록 역시 질량 유량계 (MFC)를 이용하여 산소를 공급하였다.

그리고 반응기에 공급되는 전력은 고전압 교류전원 (다원산전 (주), 10 kHz, 10 kV, 2 kW)을 사용하여 0.75-1.5 kW까지 변화시켰으며, 투입된 전력계측은 전류의 물리적인 적분기인 축전기 (capacitor)를 반응기와 직렬로 연결하여 반응기 전체에 투입되는 전하량을 측정하여, 이를 Q-V 선도 (전하량-전압선도, Lissajous diagram)를 이용한 (Rice *et al.*, 1982) 자동화된 계측 시스템을 구성하여 수행하였다. 이때 전하량 계측은 2 μF 용량의 축전기 (Capacitor)를 사용하였으며, 인가전압은 고전압 프루브 (North Star, VD-60, 10,000×)와 오실로스코프 (Tektronix TDC TDS 210)로 계측되어 GPIB (General-Purpose Interface Bus) 통신을 통해 Labview로 제어되는 PC로 전송되고, 실시간 후처리되어 전력 값을 계산하였다. 또한 처리가스의 농도변화와 부산물 계측에는 on-line으로 연결된 광로 (optical path) 8 m의 가스 셀을 장착한 적외선 분광계 (Fourier Transform Infrared, FTIR: BRUKER 33, 독일)를 사용하였다 (Song *et al.*, 2003).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 질소 바탕가스의 스트리머 모드에서 CF<sub>4</sub> 분해 특성

##### 3.1.1 첨가제인 산소가 CF<sub>4</sub> 분해에 미치는 영향

그림 2는 전극간 간격이 3 mm인 반응기를 이용하여 바탕가스가 질소인 경우와 질소에 산소 농도가 약 0.1% 되도록 혼합한 경우의 CF<sub>4</sub> 분해효율을 공급 전력에 따라 나타내었다. 본 실험에서 반응기의 방전

공간은 미세한 스트리머들로 가득찬 상태를 확인할 수 있었으며, CF<sub>4</sub>의 분해효율은 공급전력 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 바탕가스가 질소인 경우, CF<sub>4</sub>의 분해효율은 0.75 kW에서 8.6%, 1.5 kW에서 23.2%가 되므로 전체공급 혼합가스의 유량 2 lpm을 고려하면 1.5 kW의 공급전력에서 에너지 밀도 (Specific Energy Density)는 약 34 kJ/L가 됨을 알 수 있다. 이와 같이 DBD 반응기의 방전공간에 많은 에너지가 투입되었음에도 불구하고 질소 스트리머 모드에서 CF<sub>4</sub> 분해효율은 아주 낮은 것으로 나타났다. 한편 0.1%의 산소가 혼합된 바탕가스의 경우 분해효율이 약 10% 증가한 것으로 나타났는데, 이것은 O

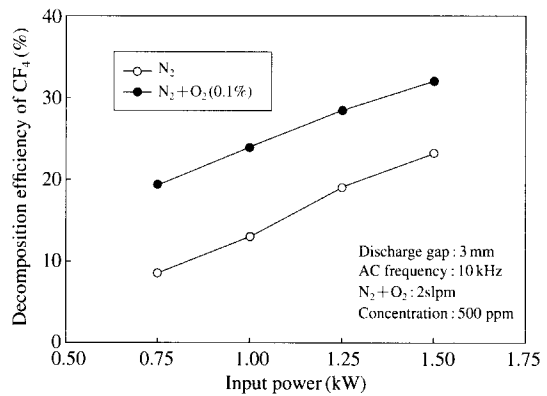


Fig. 2. Comparison of CF<sub>4</sub> decomposition efficiencies in N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> background gases as a function of input power.

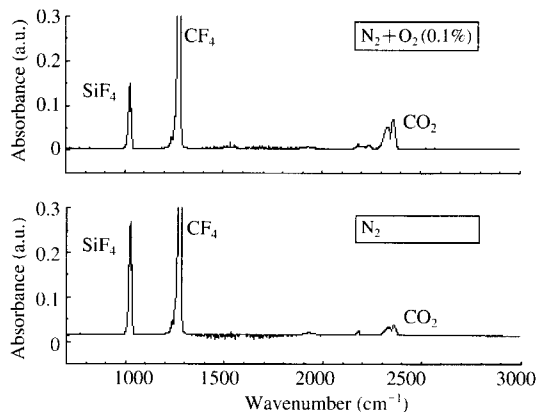


Fig. 3. Comparison of FTIR spectra at 1.5 kW input power in N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> background gases.

라디칼이 직접적으로  $CF_4$ 와 반응을 하기는 힘들지만  $CF_3$ 를  $COF_2$ 로 산화시키는 역할을 하기 때문이다(Reaction 5, 표 1). 즉, O 라디칼에 의한  $CF_3$ 의 안정화는  $CF_3$ 와 F의 재결합을 방지하여, 결국  $CF_4$  분해효율에 기여하는 것으로 판단된다. 또한  $COF_2$ 는 다른 O 라디칼과의 지속적인 산화반응으로 인하여  $CO_2$ 로 변환되며(Reaction 6, 표 1), 이러한 현상은 그림 3의 FTIR 스펙트럼에서도 확인이 가능하였다.

따라서  $CF_4$  분해효율을 최대화하기 위한 최적의  $O_2$  농도에 대한 실험을 수행하였으며, 그림 4(a)에서 보는 바와 같이  $O_2$  농도가 500 ppm에 이를 때까지  $CF_4$ 의 분해율은 점차 증가하는 것으로 나타났다. 예

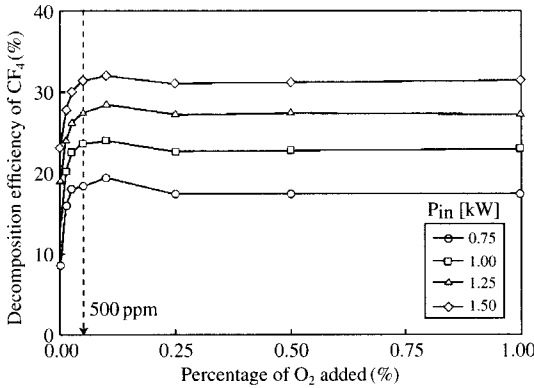


Fig. 4(a). Characteristics of decomposition efficiencies for various input powers as a function of oxygen concentration (0 ~ 1%).

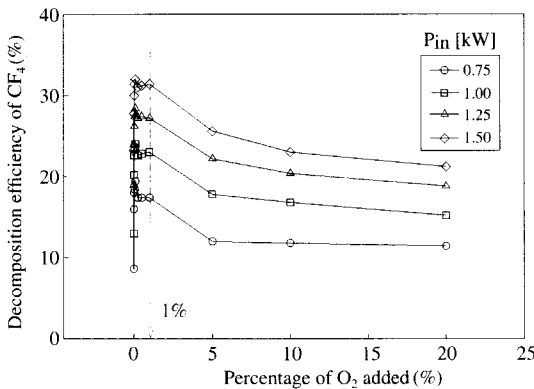


Fig. 4(b). Characteristics of decomposition efficiencies for various input powers as a function of oxygen concentration (1 ~ 20%).

를 들면, 투입전력 1.5 kW에서  $O_2$ 를 혼합하지 않은 경우 23%인 분해율이,  $O_2$ 가 500 ppm 혼합된 경우 32%로 증가하였다. 또한  $O_2$  농도를 500 ppm ~ 1%로 증가시킨 경우  $CF_4$  분해율은 크게 달라지지 않았으며, 계속하여 1 ~ 20%까지  $O_2$  농도를 증가시키면 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 오히려 분해율은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 과잉 산소분자에 의한 전자농도의 감소로 인하여  $CF_4$ 의 1차 반응이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.

### 3. 1. 2 전극간 간격이 $CF_4$ 분해에 미치는 영향

그림 5는 DBD 반응기의 전극간 간격(d)을 3 mm에서 1 mm로 변화시켜 3 mm의 경우와 동일한 조건에서 실험을 수행하고(산소 0.1% 포함)  $CF_4$  분해율을 SED에 따라 비교한 그림이다. 1 mm의 경우도 3 mm와 마찬가지로 실험중 반응기의 방전공간은 스트리머로 가득 찬 방전상태를 보였으며, 실험결과 3 mm보다 분해율이 낮은 것으로 나타났다.

이와 같은 실험결과와 원인을 자세히 분석하기 위하여 본 연구에서는 Rosocha(Rosocha, 1997)가 주장한 유효 플라즈마 체적(Effective Plasma Volume;  $V_s/V_r$ )이란 개념을 활용하였다. 이는 스트리머 상태로 투입된 에너지가 전체 반응기에 투입된 에너지와 균형을 이룬다는 energy balance 즉,  $\epsilon_r V_r = \epsilon_s V_s$ 의 관계를 이용한 것으로, 여기서  $\epsilon_r$ 은 반응기 단위 체적당 에너지밀도,  $V_r$ 은 반응기 체적,  $\epsilon_s$ 는 스트리머 단위 체적당 에너지밀도, 그리고  $V_s$ 는 스트리머 체적을 의

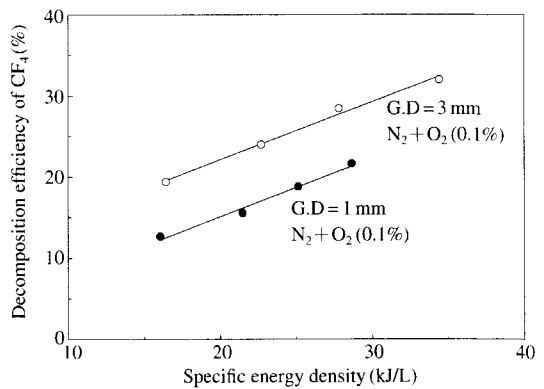


Fig. 5. Comparison of decomposition efficiencies between d=1 and 3 mm as a function of SED when background gas is  $N_2 + O_2$  (0.1%).

미한다. 따라서 유효 플라즈마 체적을  $F = V_s / V_r = \epsilon_r / \epsilon_s$ 와 같이 정의하면,  $d = 3 \text{ mm}$ 와  $d = 1 \text{ mm}$ 의 유효 플라즈마 체적비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_3}{F_1} = \left( \frac{\epsilon_{r,3} / \epsilon_{s,3}}{\epsilon_{r,1} / \epsilon_{s,1}} \right) = \left( \frac{\epsilon_{r,3}}{\epsilon_{r,1}} \right) \left( \frac{E_{s,1}}{E_{s,3}} \right)$$

위식에서  $\epsilon_s$ 는 방전 간극의 평균 전기장 ( $E_s$ )에 따라 변하는 것으로 가정하였고, Lissajou diagram을 이용하여 구한 방전전력은 (Rice *et al.*, 1982)  $\epsilon_{r,3} = 23 \text{ kJ/L}$ ,  $\epsilon_{r,1} = 22 \text{ kJ/L}$ 로서  $\epsilon_{r,3}$ 가  $\epsilon_{r,1}$ 보다 다소 높은 것으로 나타났다.  $E_s$  평가에 이용되는 gas gap voltage ( $V_g$ )는 applied voltage ( $V_a$ )와 discharge current ( $I_d$ )에 의하여 결정되며, 그 관계식은 다음과 같다. 여기서  $V_m$ 은 유전체에 걸리는 memory 전압을 의미한다.

$$V_g(t) = V_a(t) - V_m(t)$$

$$V_m(t) = \frac{1}{C_{die}} \int_{t_0}^{t+t_0} I_d(t) dt + V_m(t_0) = \frac{C_{cap} V_{cap}(t)}{C_{die}} + V_m(t_0)$$

1 kW 투입전력의 경우 간극별로  $V_a$ ,  $I_d$ , 그리고  $V_g$ 를 그림 6(a), 6(b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이,  $d = 1 \text{ mm}$ 에서의 applied voltage가  $d = 3 \text{ mm}$ 의 경우보다 크에도 불구하고 gas gap voltage는 거의 비슷한 것으로 나타났으며, 이 값 ( $V_g$ )을 이용하여  $E_s (= V_g / d)$ 를 계산한 결과  $E_{s,1} \sim 3E_{s,3}$ 임을 알 수 있었다. 따라서  $\epsilon_r$ 과  $E_s$ 를 이용하여  $F$ 를 계산하면  $F_3$ 가  $F_1$ 보다 약 3배 정도 크게 되며, 이와 같이 증가된 유효 플라즈마 체적은 처리가스가 반응기 내에서 직접적인 방전에 의한 플라즈마와 접촉할 확률을 높여주게 되어 전자에 의한  $\text{CF}_4$ 의 1차 반응을 활성화시켜 결국, 분해효율의 증가에 기여하는 것으로 판단된다.

### 3. 2 방전형태에 따른 $\text{CF}_4$ 분해 특성 비교

$\text{CF}_4$ 와 같이 플라즈마 상태에서 라디칼의 영향보다 직접적인 전자의 영향이 중요한 처리가스에 대해서는 처리가스가 스트리머를 직접적으로 통과하도록 하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 플라즈마 반응기 내에서의 유효 플라즈마 체적을 극대화하여야 한다. 이와 같이 유효 플라즈마 체적을 크게 하려면 반응 공간을 모두 플라즈마로 채우거나 플라즈마가 발생되는 영역만을 반응공간으로 이용하는 두 가지 방법이 있을 수 있는데, 전자의 경우에는 상압 글로우 (glow) 방전을 (Gherardi *et al.*, 2001), 후자의 경우에

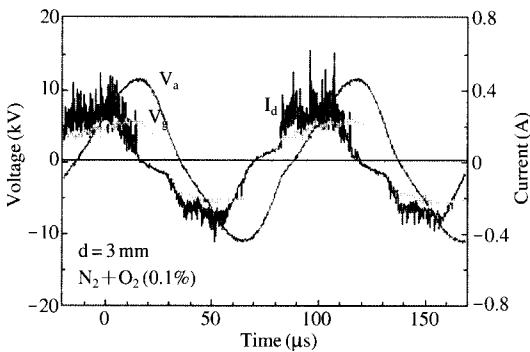


Fig. 6 (a). Waveforms of  $V_a$ ,  $I_d$ , and  $V_g$  measured at  $d = 3 \text{ mm}$ .

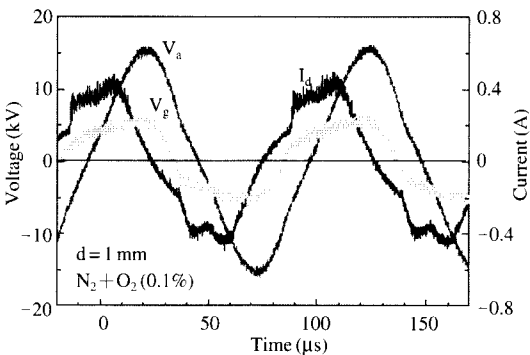


Fig. 6 (b). Waveforms of  $V_a$ ,  $I_d$ , and  $V_g$  measured at  $d = 1 \text{ mm}$ .

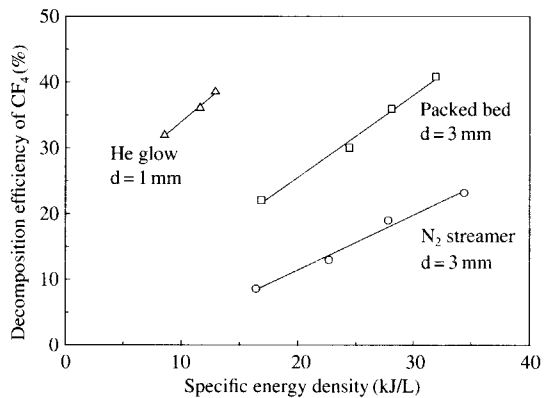


Fig. 7. Comparison of decomposition efficiencies by using  $\text{N}_2$  streamer in DBD,  $\text{N}_2$  streamer in Packed Bed, and He glow in DBD.

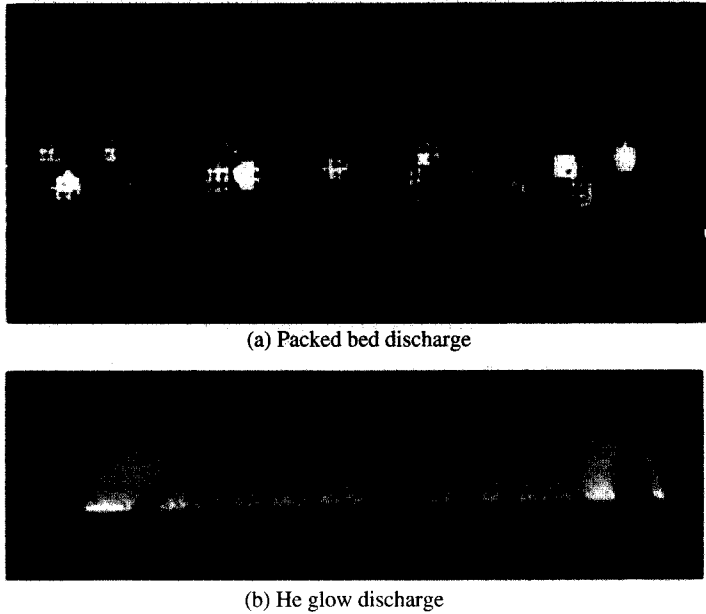


Fig. 8. Comparison of discharge pattern between (a) Packed bed discharge and (b) He glow discharge.

는 스트리머가 발생하는 영역으로 가스의 흐름을 유도하는 방법을 생각할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 헬륨 바탕가스의 상압 글로우 방전과 반응기의 방전공간을 지름 1 mm인 유리구슬로 채워 구슬 사이의 좁은 공간에서만 스트리머 방전이 일어나도록 한 경우에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 글로우 방전의 경우 방전 간극은  $d=1\text{ mm}$ , 충전형의 경우에는  $d=3\text{ mm}$ 인 반응기를 이용하였다.

그림 7은 상기의 실험결과를 그림 2의  $\text{N}_2$  스트리머 모드와 함께 비교한 그림으로, 유리구슬이 충전된 packed bed 반응기의 경우가 일반 스트리머 모드보다 제거효율이 향상됨을 알 수 있는데, 이는 플라즈마와  $\text{CF}_4$  가스와의 접촉가능성을 높여 전자와의 1차 반응을 촉진시킨 결과로 판단되며, 앞서 언급한 유효 플라즈마 체적 개념이 성공적으로 실증되었음을 의미한다. 또한 질소 대신 헬륨을 바탕가스로 사용한 글로우 방전의 경우 가장 높은 분해효율을 보였으며, 이와 같은 글로우 방전은 반응기 전체 체적을 플라즈마로 균일하게 가득 채운 상태로 유효 플라즈마 체적이 거의 1에 가깝다고 할 수 있다.

유효 플라즈마 체적의 증가가  $\text{CF}_4$  분해효율 향상에 기여함을 시각적으로 제시하기 위하여 서로 다른

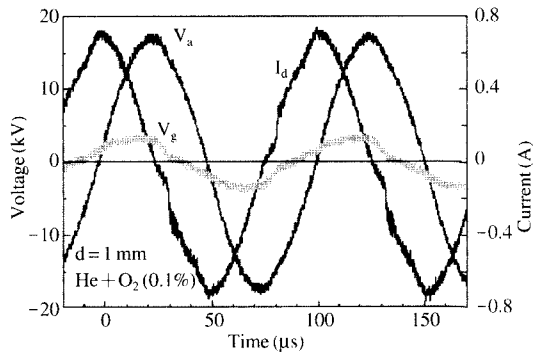


Fig. 9. Waveforms of  $V_a$ ,  $I_d$ , and  $V_g$  for He glow discharge.

플라즈마 모드를 촬영하였으며, 그림 8에서 보는 바와 같이 헬륨 플라즈마의 경우 밝기가 질소 플라즈마에 비해 상대적으로 밝으면서도 공간적으로도 균일함을 알 수 있다. 이와 같이 밝기가 균일하다는 것은 반응공간도 질소 플라즈마에 비해 더 넓다고 볼 수 있으며, 글로우의 특징으로 인하여 전자들의 평균 에너지는 그다지 높지 않으나 증가된 유효 플라즈마 체적으로 인하여 상대적으로 높은  $\text{CF}_4$  분해효율을

얻은 것으로 판단된다.

그림 9는 헬륨을 바탕가스로 사용한 경우의 파형으로 일반 스트리머 모드에서 나타나는 마이크로 방전 패턴이 나타나지 않고 글로우 방전의 특성으로 인한 연속적인 전류파형이 나타나며, 헬륨을 사용한 경우에는 스트리머 방전보다는 글로우 방전이 일어남을 육안을 통해서나 전류파형을 통해서도 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

CF<sub>4</sub>와 같은 난분해성 가스의 분해에 적합한 반응 공정 및 반응기 개발을 목적으로 동축 원통형의 DBD 반응기를 이용하여, CF<sub>4</sub> 분해에 효과적인 방전 모드(스트리머 또는 글로우) 및 형태에 대하여 살펴 보았으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 질소바탕가스의 스트리머 모드에서 반응기에 많은 에너지가 투입되었음에도 불구하고 질소 화합물(NO)이나 다른 VOC<sub>s</sub>(Toluene, TCE, CH<sub>3</sub>CN 등)에 비하여 CF<sub>4</sub> 분해효율은 매우 낮은 것으로 나타났다.
- 2) 바탕가스에 일정량의 산소가 혼합된 경우, 1차적인 반응에 의해 생성된 CF<sub>3</sub>와 산소 첨가에 따른 O 라디칼과의 산화반응으로 인하여 CF<sub>4</sub> 분해효율은 증가하며, 최적의 산소농도 범위는 500 ppm ~ 1%임을 확인하였다. 그러나 O<sub>2</sub> 농도를 계속하여 1% ~ 20%까지 증가시키면 오히려 분해효율은 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 과잉 산소 분자에 의한 전자 농도 감소로 인하여 CF<sub>4</sub>의 1차 반응이 감소되기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 반응기의 전극간 간격을 3 mm에서 1 mm로 변화시켜 3 mm의 경우와 동일한 조건에서 실험을 수행하고(산소 0.1% 포함) 분해율을 비교한 결과 3 mm의 경우가 높은 것으로 나타났는데, 이는 유효 플라즈마 체적의 증가와 반응 공간내 플라즈마 상태의 질적 차이에서 기인하는 것으로 판단된다
- 4) 헬륨을 바탕가스로 한 글로우 방전이나 유리구슬을 충전한 Packed Bed 반응기에서 스트리머 모드보다 상대적으로 높은 분해효율을 얻었는데, 이와 같은 결과 역시 증가된 유효 플라즈마

체적으로 인하여 반응기 내에서 CF<sub>4</sub> 가스와 플라즈마와의 접촉 가능성이 높아져 전자에 의한 1차적인 반응의 활성화로 분해효율이 증가한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 연구는 2003년도 국가지정연구실사업(NRL)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- Gherardi N. and F. Massines (2001) Mechanisms Controlling the Transition from Glow Silent Discharge to Streamer Discharge in Nitrogen, IEEE Trans. Plasma Sci., 29, 536.
- International SEMATECH Technology Transfer (1998) Current Status of Technology: Perfluorocompound (PFC) Emissions reduction, #98053508A-TR.
- International SEMATECH Technology Transfer (1999) Long-Term Evaluation of the Litmas "Blue" Plasma Device for Point-of-Use (POU) Perfluorocompound and Hydro fluorocarbon Abatement, #99123865B-ENG.
- Kabashima, H., H. Einaga, and S. Futamura (2001) Hydrogen Generation from Water, Methane, and Methanol with Non-thermal Plasma, Proc. 36<sup>th</sup> IEEE-IAS Annual Meeting, China, Oct. 2.
- Kogoma, M., T. Abe, and K. Tanaka (2002) PFCs Abatement System by the Atmospheric Pressure Glow Plasma, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Sym. High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Puhajarve, Estonia, 303-307.
- Rice R.G. and A. Netzer, Eds.,(1982) Handbook of Ozone Technology and Applications (Ann Arbor Science Publishers, Michigan, Vol. 1, Chap. 2.
- Rosocha, L.A. (1997) Processing of Hazardous Chemicals using Silent-Electrical-Discharge Plasmas, Chap. 11 in Plasma Science and the Environment (AIP Press, New York, USA).
- Song, Y.H., M.S. Cha, Y. Kim, K.T. Kim, S.J. Kim, S.O. Han, and K.I. Choi (2003) Synergetic Effects of Non-thermal Plasma and Catalysts on VOC<sub>s</sub> Decomposition, J. Adv. Oxid. Technol., 6, 17.
- Yu, S.J. and M.B. Chang (2001) Oxidative Conversion of PFC

via Plasma Processing with Dielectric Barrier Discharges, *Plas. Chem. Plas. Proc.*, 21(3), 311-327.  
Yamamoto, T., J.S. Chang, K. Kostov, Y. Okayasu, T. Kato, T. Iwaizumi, and K. Yoshimura (1997)  $\text{NF}_3$  Treat-

ment by Ferroelectric Packed-Bed Plasma Reactor, *Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Sym. Non-Thermal plasma Techniques*, Salvador, Brazil.