

수소 가스를 첨가한 글라이딩 아크 플라즈마의 과불화화합물(PFCs) 가스 분해 특성

(Decomposition Characteristics of Perfluorocompounds(PFCs) Gas through Gliding Arc Plasma with Hydrogen Gas)

송창호* · 박동화 · 신백균**

(Chang-Ho Song · Dong-Wha Park · Paik-Kyun Shin)

Abstract

Perfluorocompounds (PFCs) gases were decomposed by gliding arc plasma generated by AC pulse power. N₂ gas of 10 LPM flow rate and H₂ gas of 0.5 LPM were introduced into the gliding arc plasma generated between a pair of electrodes with SUS 303 material, and the PFCs gases were injected in the plasma and thereby were decomposed. The PFCs gas-decomposition-characteristics through the gliding arc plasma were analyzed by FT-IR, where pure N₂ and H₂-added N₂ environment were used to generate the gliding arc plasma. The PFCs gas-decomposition-properties were changed by electric power for gliding arc plasma generation and the H₂ gas addition was effective to enhance the PFCs decomposition rate.

Key Words : Gliding Arc Plasma, PFCs Gas Decomposition, Gas Discharge

1. 서 론

산업 생산 활동이 급격히 늘어나면서 발생하는 환경 오염문제가 심각해짐에 따라 지구온난화 등의 폐해가 날로 증대되고 있으며, 최근 이러한 환경오염문제를 근본적으로 해결하기 위하여 전세계적인 대응이 진행되고 있다. 21세기 들어서는 이러한 환경오염방지 노

력이 그 폐해가 심각한 특정 물질을 법률적인 규제 대상으로 하는 등으로 확대되고 있어, 이를 해결하기 위한 기술적 및 산업적 대응이 큰 주목을 받고 있다.

환경유해가스 중 반도체나 LCD 공정 등에서 필수적으로 사용되는 과불화화합물(Perfluorocompounds: PFCs) 가스는 높은 안정성 및 지구온난화지수(Global Warming Potential: GWP)로 인하여 상대적으로 많이 배출되는 이산화탄소(CO₂) 가스에 비해 그 폐해가 더욱 심각하다.

PFCs 가스는 다수의 불소가 포함된 것이며, 현재 산업분야에서 대표적으로 사용되는 것은 CF₄, C₃F₈, C₂F₆와 같이 유기성 가스와 NF₃ 및 SF₆와 같이 무기성 가스로 분류할 수 있다[1]. 이러한 PFCs 가스는 이

* 주저자 : 인하대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 인하대학교 전기공학부 부교수
Tel : 032-860-7402, Fax : 032-863-5822
E-mail : shinsensor@inha.ac.kr
접수일자 : 2010년 12월 2일
1차심사 : 2010년 12월 8일, 2차심사 : 2010년 12월 21일
심사완료 : 2011년 1월 21일

산화탄소에 비해 배출량이 수천분의 1 정도이며, 발생되는 장소가 대부분 반도체 산업분야로 국한되어 있고, 특히 반도체 디스플레이 산업이 세계에서 가장 발달한 국내에서 더욱 심각한 상황이다. 따라서 배출가스에 대한 분해기술을 비롯하여 회수 및 대체물질 개발에 관한 연구개발이 절실하다[2]. 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 화학적 분해반응은 난분해성 물질인 PFCs를 강력한 에너지인 플라즈마를 이용하여 분해하는 방법으로, 플라즈마는 거의 모든 난분해성 물질을 분해할 수 있을 뿐만 아니라 현재 주로 사용하고 있는 비열평형 플라즈마와 열평형 플라즈마의 성질을 복합적으로 포함하고 있어 각 상태의 특징을 이용할 수 있는 장점이 있다[3-6].

글라이딩 아크 플라즈마는 서로 대향하는 1쌍 이상의 전극 사이로 흘러가는 가스에서 발생하는 가스방전의 일종으로, 1900년대 초부터 이미 질소비료를 생산하기 위한 기술로 이용되었다[7]. 하지만 그 화학반응에 대한 이론적인 연구는 1990년대 들어서야, Czernichowski가 화학 반응을 증명한 바 있다[8].

본 연구에서는 상기와 같이 폐해가 심각한 PFCs 가스 중 CF_4 , NF_3 및 SF_6 가스를 글라이딩 아크 플라즈마를 이용하여 분해시켰다. 일반적으로 글라이딩 아크 플라즈마는 O_2 와 N_2 가스가 혼합된 공기 분위기에서 발생시키지만, O_2 가스가 글라이딩 아크 플라즈마 내에 유입되는 PFCs 가스와 화학반응을 일으켜 2차 생성물 가스를 발생시킬 수 있음을 고려하여, 순수한 N_2 가스 및 H_2 가스가 미량 첨가된 N_2 가스를 분위기로 하여 글라이딩 아크 플라즈마를 발생시켰다[9]. AC 펄스 주파수를 20[kHz]로 고정시키고 방전전력을 변화시키면서 생성된 글라이딩 아크 플라즈마 내에 CF_4 , NF_3 및 SF_6 가스를 유입시켜 분해되는 특성을 FT-IR을 통해 분석하였다. CF_4 , NF_3 및 SF_6 가스가 분해되는 특성을 방전전력 및 분위기 가스 별로 비교분석하였다.

2. 실험방법

2.1 글라이딩 아크 플라즈마 발생 장치

그림 1과 같은 구성으로 글라이딩 아크 플라즈마를

발생시켰다. 글라이딩 아크 플라즈마 발생장치는 아크 플라즈마가 일어나는 반응기와 반응기 안으로 가스를 정량주입 시켜주는 MFC와 반응가스들 그리고 반응기를 거친 후 성분 분석을 하여주는 FTIR의 분석부로 3등분할 수 있다.

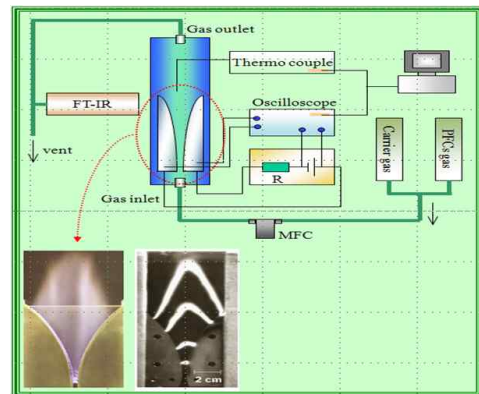


그림 1. 글라이딩 아크 플라즈마 장비의 개략도
Fig. 1. A schematic of the gliding arc plasma equipment

글라이딩 아크 방전 발생용 전원은 방전조절 변수를 다양화할 수 있는 RF pulse power supply를 이용하였으며, 반응전극으로는 부식에 의한 녹과 열에 의한 손상을 방지하기 위해 철과 크롬, 니켈 등이 약 6:2:1로 섞인 SUS 303 재질로 칼날모양의 극간의 간격이 벌어지는 전극을 한 쌍을 대칭으로 설치하였다. 또한, 전극 내부로의 분해가스 유입 및 아크 플라즈마 발생 상태를 육안으로 확인할 수 있도록 파이렉스 유리관을 반응기로 하였다. 정밀한 가스 유량 제어를 위해 파워 씨플라이의 자기장의 영향을 안 받는 곳에 위치한 MFC를 이용하여 N_2 가스와 H_2 가스 및 분해 대상인 PFCs 가스의 유입량 및 그에 따른 반응기 내 농도가 일정하게 제어하였다.

최종적으로 반응관으로 들어가는 가스는 SUS 전극에서 방전과 동시에 반응이 최대한 일어나게 하기 위해 절연재질의 세라믹 튜브로 만들어진 관을 이용하였으며 전극간격은 2.5[mm]로 고정하였다. 그림 2는 상기와 같이 발생시킨 글라이딩 아크 플라즈마의 사진이다.



그림 2. 글라이딩 아크 플라즈마
Fig. 2. A Picture of the Gliding Arc Plasma

2.2 PFCs 가스 분해

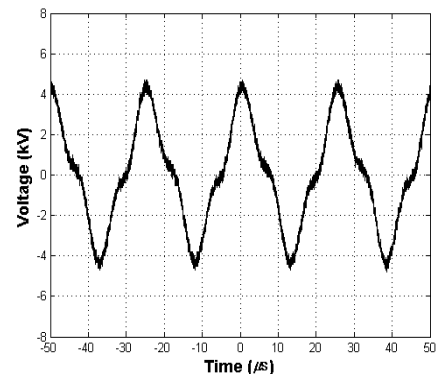
먼저 반응기 안으로 질소를 넣어주어 공기가 빠져나가고 FT-IR 측정장비에 reference를 잡기 위해 질소분위기를 만들어 준다. 질소의 양을 10 LPM으로 유지시켜주고, SF₆, CF₄, NF₃ 가스는 각각 실험 시마다 MFC를 이용하여 10LPM의 0.5[%]인 분당 50sccm 를 만들어준다. 글라이딩 아크 플라즈마 발생을 위한 입력 전력은 각각 0.4[kW], 0.8 [kW], 1.2 [kW], 1.6 [kW] 로 하여 순차적으로 인가하되 반응에 따른 측정이 오차가 없도록 일정시간 반응 간격 시간을 주어서 FT-IR의 분석 데이터를 얻는다. 같은 방법으로 각 가스마다 질소분위기의 가스에다가 첨가가스로 H₂ 가스를 0.5LPM를 N₂ 가스관과 합쳐주어 반응전극 안에 같은 방법으로 0.4 [kW], 0.8 [kW], 1.2 [kW], 1.6 [kW] 을 순차적으로 입력전력을 준뒤 FT-IR측정을 한다. 표 1은 글라이딩 아크 플라즈마를 이용한 PFCs 가스 분해 공정 조건이다. 그림 3 및 그림 4는 각각 아크 방전 전후에 디지털 오실로스코프로 측정된 전압파형 및 전류파형이다. 전압의 경우에는 아크방전 전과 후의 차이가 크기 않으나, 전류의 경우에는 아크 방전 전과 후에 현격한 차이를 보임을 알 수 있다. 그림 4의 전류파형에서 아크 방전 후 원으로 표기한 지점에서 강하고 우세한 진동성 전류들이 많아짐을 확인할 수

있으며, 이것은 아크 방전이 일어나는 순간에 전압은 급격히 하강하고 류가 급격히 상승하는 것을 나타낸다. 이러한 절차가 연속적으로 발생하는 데서 그 이유를 설명할 수 있다.

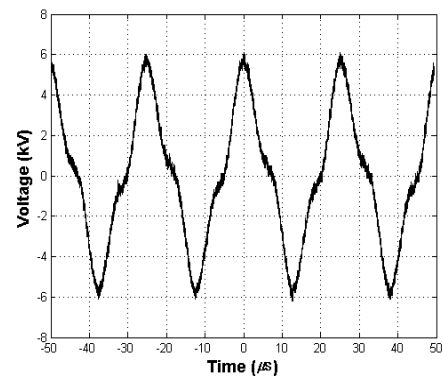
표 1. 글라이딩 아크 플라즈마 발생 조건 및 PFCs 가스 분해 조건

Table 1. Gliding Arc Plasma Generation and PFCs Gas Decomposition Conditions

항목	설정값
입력전력	0.4[kW]- 1.6[kW], 20[kHz]
분위기 가스	N ₂ , 10 LPM
H ₂ 가스	0.5 LPM
SF ₆ , CF ₄ , NF ₃ 가스	10 LPM의 0.5[%](50sccm)



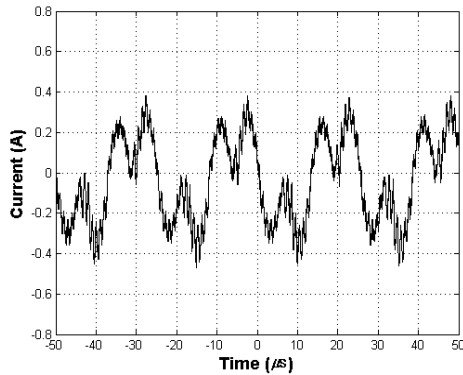
(a)



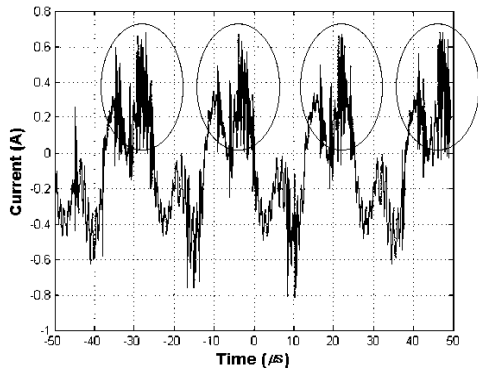
(b)

그림 3. 글라이딩 아크 플라즈마 발생 전후의 전압파형 : (a) 발생 전; (b) 발생 후

Fig. 3. Voltage waves before and after the arc discharge: (a) before arc discharge; (b) after arc discharge



(a)



(b)

그림 4. 글라이딩 아크 플라즈마 발생 전후의 전류파형 : (a) 발생 전; (b) 발생 후

Fig. 4. Current waves before and after the arc discharge: (a) before arc discharge; (b) after arc discharge.

3. 결과 및 고찰

3.1 글라이딩 아크 플라즈마 발생 장치

그림 5~7은 순수한 N_2 분위기 및 N_2 분위기에 H_2 가스를 첨가하여 발생시킨 글라이딩 아크 플라즈마에 내에 NF_3 (그림 5), SF_6 (그림 6) 및 CF_4 (그림 7) 가스를 50sccm의 유량으로 각각 흘려주고, 글라이딩 아크 플라즈마를 거쳐 배출되는 잔류가스 성분을 FT-IR로 분석한 결과이다. 글라이딩 아크를 발생시키는 분위기를 순수한 N_2 가스로 했을 경우보다, N_2 에 H_2 가스를 첨가하였을 때 PFCs 가스의 분해율이 현저히 높아

짐을 알 수 있으며, 이는 본 논문에서 시도한 NF_3 , SF_6 및 CF_4 가스에서 공통적으로 나타난 결과이다. 글라이딩 아크 플라즈마에 의해 분해된 세 가지 PFCs 가스 중에서는 그림 3에 나타난 바와 같이 NF_3 가스의 분해율이 가장 높음을 알 수 있으며, 특히 분위기가 H_2 가 첨가된 N_2 가스일 경우 분해율이 거의 100[%]에 가까울 정도로 매우 효율적인 환경유해가스 분해조건임을 알 수 있다. 이는 첨가된 H_2 가스가 글라이딩 아크 플라즈마 내의 화학반응 시 가역반응에 의해 NF_3 로 돌아가는 것을 막는 것에 의해 분해효율이 개선되는 것으로 생각된다. 따라서 N_2 분위기 가스 내에 H_2 가스를 첨가할 경우, 글라이딩 아크 플라즈마에 의한 PFCs 가스의 분해공정의 효율을 현저히 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

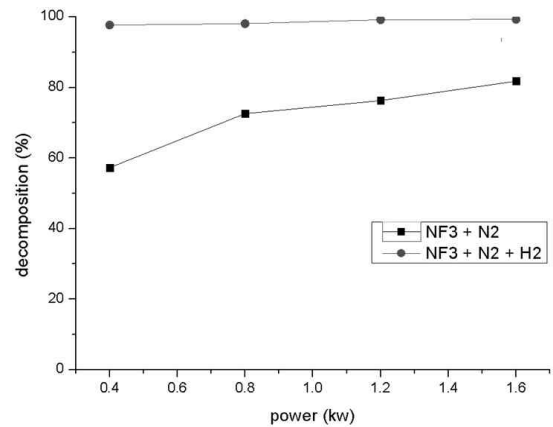


그림 5. NF_3 가스의 분해율
Fig. 5. Decomposition Rate of NF_3 Gas

글라이딩 아크 플라즈마 발생 전력에 관하여는 PFCs 가스에 따라 서로 다른 상관관계를 보임을 알 수 있다. NF_3 가스의 경우, 방전전력이 0.4~1.6[kW] 사이로 변화할 때, 그 분해율의 변화가 거의 없음을 볼 수 있으며, 특히 H_2 가스가 첨가된 N_2 가스 분위기의 글라이딩 아크 플라즈마 내에서는 0.4 [kW]의 낮은 방전전력에서도 매우 효율적인 분해성능을 보임을 알 수 있다. SF_6 가스의 경우에는 방전전력이 높아짐에 따라 그 분해율도 높아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 분위기 가스에 관계없이 유사한 경향으로 나타났다.

CF₄ 가스의 경우에는 분위기 가스에 관계없이, 다른 PFCs 가스에 비해 현저히 낮은 분해율을 보이고 있으며, 방전전력이 높아짐에 따라 분해율이 소폭 상승하는 경향이 있기는 하지만, 분해율 자체가 매우 낮아 그 효과가 미미함을 볼 수 있다.

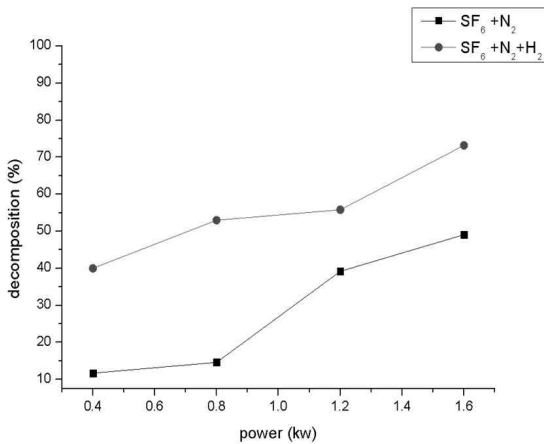


그림 6. SF₆ 가스의 분해율
Fig. 6. Decomposition Rate of SF₆ Gas

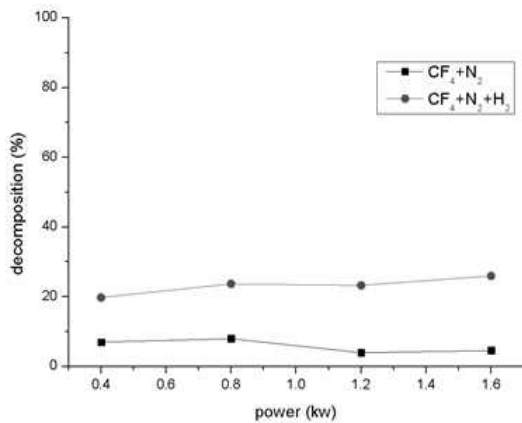


그림 7. CF₄ 가스의 분해율
Fig. 7. Decomposition Rate of CF₄ Gas

4. 결 론

주파수는 고정시키고 방전전력을 변화시키면서 교류 펄스 전원을 인가하여 발생시킨 글라이딩 아크 플

라즈마를 이용하여 과불화화합물 (PFCs) 가스인 NF₃, SF₆ 및 CF₄를 분해하였다. 방전 분위기 가스인 N₂ 에 스에 미량의 H₂ 가스를 첨가함으로써 세 가지 PFCs 가스 모두에서 그 분해율이 현저히 개선됨을 확인하였다. NF₃ 가스의 경우, 방전전력이 매우 낮은 영역에서도 H₂가 첨가된 N₂ 가스의 글라이딩 아크 플라즈마에 의해 100[%]에 가까운 분해율을 보임으로써, 본 연구에서 제안하는 공정이 매우 효율적임을 확인하였다. SF₆ 가스의 경우 방전전력의 증가에 따라 그 분해율도 상승되는 것으로 나타났으며, 분위기에 H₂ 가스 첨가하는 것 뿐만 아니라, 방전전력 및 주파수 등의 입력 변수 등을 변화시켜 그 분해율을 90[%] 이상으로 높일 수 있을 것으로 사료된다. 대표적인 난분해성 가스인 CF₄ 가스의 분해에서는 상대적으로 낮은 분해율을 보였지만, H₂ 가스 첨가에 의해 분해율을 현저히 개선할 수 있었으며, 향후 다른 조건의 변화 등을 통하여 보다 최적화된 공정조건을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 지정 인하대학교 열플라즈마환경 기술연구센터의 2010년도 지원에 의한 것입니다.

References

- [1] 김관태, 김용호, 차민석, 송영훈, 김석준, 류정인, "DBD 반응기에서 플라즈마 방전형태에 따른 PFCs 가스의 분해 특성", 한국대기환경학회지 제20권 제5호, pp.625-632, 2004.
- [2] D.A. Frank-Kamenski, "Diffusion and heat transfer in chemical Kinetics", Moscow, Nauka, pp. 491, 1987.
- [3] O. Mutaf-Yardimci, A.V. Saveliev, A.A. Friedman, L.A. Kennedy, "Thermal and nonthermal regimes of gliding arc discharge in air flow", J. Appl. Phys., Vol. 87, No. 4, pp. 1632-1641, 2000.
- [4] J. Yan et al., "Destruction of PCDD/Fs by gliding arc discharges", J. Env. Sci., Vol. 19, No. 11, pp. 1404-1408, 2007.
- [5] L. Yu, X. Tu, X. Li, Y. Wang, Y. Chi, and J. Yan, "Destruction of acenaphthene, fluorene, anthracene and pyrene by a dc gliding arc plasma reactor", J. Haz. Mat., Vol. 180, No.1-3, pp. 449-455, 2010.
- [6] A. Indarto et. al, "Advanced VOCs decomposition method by gliding arc plasma", Chem. Eng. J., Vol. 131, No. 1-3,

pp. 337-341, 2007.

- [7] A.A Naville, P.A. Guye, and C.E. Guye, French patent No. 350120, 1904.
- [8] A. Czernichowski, "Gliding arc: Applications to engineering and environment control.", Pure Appl. Chem. Vol. 66, No. 6, pp. 1301-1310, 1994.
- [9] L. Yu, X. Li, X. Tu, Y. Wang, S. Lu, and J. Yan, "Decomposition of naphthalene by dc gliding arc discharge", J. Phys. Chem., A, Vol. 114, No. 1, pp.360-368, 2010.

◇ 저자소개 ◇



송창호 (宋彰浩)
 1980년 7월 16일생. 2009년 경원대학교 전자공학과 졸업. 2009년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)860-7393
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : hungaryelec@naver.com



박동화 (朴東化)
 1954년 12월 24일생. 1977년 인하대학교 화학공학과 졸업. 1985년 일본 동경공업대학 대학원 화학공학과 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대학 대학원 화학공학과 졸업(박사). 1979~1982년 삼성 엔지니어링사업부 엔지니어. 1990년~현재 인하대학교 생명화학공학과 조교수/부교수/교수. 1991~2001년 수도권 매립지 관리공단 자문위원. 1992~1993년 Univ. Minnesota 연구교수. 1996~1998년 한국화학공학회 편집위원. 2001~2002년 Stanford Univ. 연구교수. 2005~현재 지식경제부 지정 지역혁신센터(RIC) 인하대학교 열플라즈마환경기술연구센터 센터장.
 Tel : (032)860-7468
 Fax : (032)872-0959
 E-mail : dwpark@inha.ac.kr



신백균 (申白均)
 1966년 12월 6일생. 1990년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1992년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 독일 Univ. Erlangen-Nuernberg 대학원 전기전자공학부 졸업(박사). 2004년~현재 인하대학교 전기공학부 조교수/부교수. 2008~2010년 인하대학교 IT공과대학 부학장. 2008년~현재 한국조명·전기설비학회 평의원.
 Tel : (032)860-7402
 Fax : (032)863-5822
 E-mail : shinsensor@inha.ac.kr