

# 교류 펄스 전압을 이용한 평판형 대기압 유전격벽방전 플라즈마의 특성 분석

## A Study on the Dielectric Barrier Discharges Plasmas of Flat Atmospheric Pressure Using an AC Pulse Voltage

이 중 봉\* · 하 창 승\*\* · 김 동 현\*\*\* · 이 호 준\*\*\* · 이 해 준†  
(Jong Bong Lee · Chang-Seung Ha · Dong-Hyun Kim · Ho-Jun Lee · Hae June Lee)

**Abstract** - Various types of dielectric-barrier-discharge (DBD) devices have been developed for diverse applications for the last decade. In this study, a flat non-thermal DBD micro plasma source under atmospheric pressure has been developed. The flat-panel type plasma is generated by bipolar pulse voltages, and driving gas is air. In this study, the plasma source was investigated with intensified charge coupled device (ICCD) images and Optical Emission Spectroscopy (OES). The micro discharges are generated on the crossed electrodes. For theoretical analysis, 2-dimensional fluid simulation was performed. The plasma source can be driven in air, and thus the operation cost is low and the range of application is wide.

**Key Words** : Pulse voltage, Atmospheric pressure micro plasma, Fluid simulation, Optical emission spectroscopy, Dielectric barrier discharge

### 1. 서 론

대기압 플라즈마는 진공상태가 아닌에도 식각, 박막 증착, 표면처리 및 살균 등의 폭 넓은 응용분야를 제공한다 [1-3]. 특히, 플라즈마에서 나오는 산소 원자는 박막 증착과 표면처리에서 다양한 응용을 가능하게 한다[4]. 플라즈마의 다양성은 산업 응용분야에서 저압에서 뿐만 아니라 대기압 분야에서도 적용된다. 또한, 진공장비에 비해 낮은 제조비용의 이점이 있고 지속적인 사용 관점에서도 많은 장점을 지니고 있다. 이러한 대기압 플라즈마 기술 중, 소형 대기압 플라즈마 소스는 의료용, 특정부위의 표면 개질 또는 표면 에칭 및 절단 등의 응용 분야에서 현재 연구가 활발하게 진행되고 있으며 크게 성장할 수 있는 것으로 알려져 있다[5-9]. APPJ (Atmospheric Pressure Plasma Jet), Plasma pencil, Plasma needle 등과 같은 장비가 개발되어 있으며 소형 플라즈마 소스들은 주로 아크 플라즈마로 전이하는 것을 막기 위해 DBD (Dielectric Barrier Discharge) 형태를 사용하며 펄스 전원, AC전원 또는 RF 전원을 사용하여 발생시킨다.

DBD 방식은 쌍을 이루는 두 개의 전극 또는 한 개의 전극에 유전체 장벽을 설치하여 유전분극 현상을 이용하여

전하집적을 통한 역 전위 형성으로 방전이 정지되는 펄스 방전 때문에 아크 방전으로 전환되는 것을 막는 방식이다. 이 방식은 균일한 플라즈마를 얻을 수 있고 장치를 구동하기 위한 회로 구성이 비교적 간단하다. 이러한 플라즈마 장치의 장점은 현재 많이 이용되는 jet이나 pencil 형태와는 다르게 대면적이 가능하고, He이나 Ar 가스를 사용하지 않아 플라즈마 발생 유지 비용의 절감 효과를 가져 올 수 있다. 또한 유리기판 대신 flexible한 재료를 사용한다면 응용분야가 더욱 확대될 것이다. 현재는 살균, 의료, 표면처리에 목적을 두고 있다.

본 연구에서 사용된 플라즈마 장치는 유리기판 위에 프린팅 기법을 사용하여 전극과 유전체 그리고 전극을 차례대로 형성시켜 평판크로스형의 DBD 방전 형태이다. 플라즈마 장치에 대한 세부적인 수치와 동작방식을 소개하고 방전특성을 전압, 전류 특징 및 ICCD 이미지 그리고 optical emission spectroscopy 등을 통해 방전 매커니즘을 연구하였다.

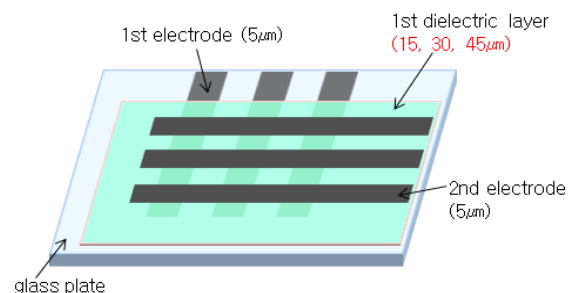


그림 1 대기압 플라즈마 장치  
Fig. 1 Atmospheric pressure plasma device

\* 준 회원 : 부산대학교 전자전기공학과 석사과정

\*\* 정 회원 : 부산대학교 전자전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회원 : 부산대학교 전자전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 부산대학교 전자전기공학과 교수

E-mail : haejune@pusan.ac.kr

접수일자 : 2011년 12월 22일

최종완료 : 2011년 12월 30일

### 2. 실험 방법

그림 1은 평판크로스 형태의 대기압 플라즈마 장치이다. 공정순서는 유리기판 위에 Ag electrode를 두께 5[ $\mu\text{m}$ ]로 printing하여 1차 전극을 형성하였고 그 위에 유전체 두께에 따른 특성을 보기 위하여 printing으로 도포 높이를 각각 달리하여 유전율이 10인 화이트백 유전체를 도포하였다. 여기서 유전체의 목적은 방전 시 정해진 전하의 양을 제한하여 아크 방전으로의 전이를 막고 방전이 전극 전체로 퍼지도록 하는 것이다. 이 유전체 위에 1차 전극과 교차되도록 2차 전극을 형성시켰다. 전극의 폭과 전극 사이의 간격은 400 [ $\mu\text{m}$ ]이다.

본 실험에 사용된 대기압 플라즈마 장치의 구동회로는 Switching Mode Power Supply(SMPS)에 DC-DC converter를 사용하여 1[kV]까지 승압이 가능하다. Counter와 ROM을 사용하여 펄스 출력이 가능한 회로를 이용하여 전압, 주파수, 듀티비를 각각 조정함으로써 공기 중에서의 micro방전을 최적화시키고자 하였다. 구동회로의 pulse 출력 조건은 전압 0 ~ 1000[V], 주파수 17.5, 25, 40, 50[kHz], 듀티비는 5, 10, 25, 40[%]이다.

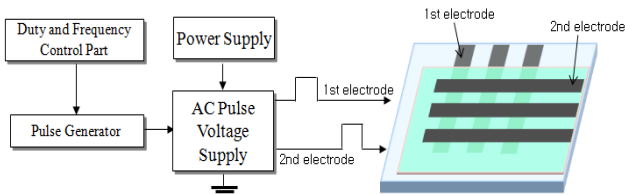


그림 2 대기압 플라즈마 장치의 구동 개략도  
Fig. 2 Schematic diagram of the device for driving

그림 2는 대기압 플라즈마 장치의 구동을 위한 개략도이다. 평판크로스 형태의 전극 양단에 pulse를 인가하여 인가 전압, 주파수, 듀티비 그리고 유전체 두께 변화에 따른 방전 특성을 분석하였다.

또한, 본 연구에서는 실험으로 진단하기 어려운 플라즈마 거동을 예측하기 위해서 2차원 플라즈마 유체 방정식을 계산하는 컴퓨터 시뮬레이션을 병행하였다. 시뮬레이션을 통해 전기장과 전자 밀도의 시간에 따른 변화를 예측할 수 있으며 이 값을 통해 방전의 원리와 각각의 파라미터가 방전에 미치는 영향에 대해서 분석하는 것이 가능하다.

### 3. 결과 및 고찰

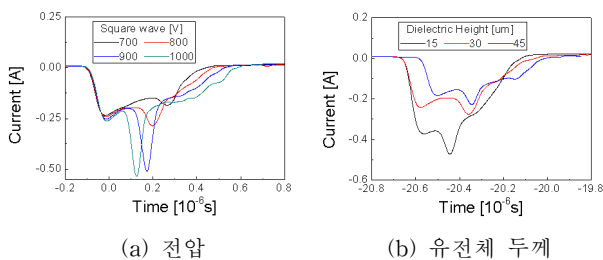


그림 3 전압, 유전체 두께 변화에 따른 방전 전류 특성  
Fig. 3 Discharge current characteristics with the variations of voltage and dielectric thickness

그림 3은 전압, 유전체 두께 변화에 따른 방전 전류 특성이다. (a)는 유전체높이 30[ $\mu\text{m}$ ], 주파수 50[kHz], 듀티비 25[%]일 때 인가전압 크기 변화에 따른 방전 전류 특성이다. 펄스 구동시 전압이 증가하면 전기장의 세기가 커지게 되므로 방전이 상대적으로 빠르고 강하게 일어나는 것을 알 수 있다. (b)는 인가전압 800[V], 주파수 50[kHz], 듀티비 25[%]일 때 유전체 높이변화에 따른 전류 특성이다. 유전체 높이가 낮아지면 전기장의 세기가 강해져서 방전전류의 형성이 빠르고 그 크기 또한 커지는 것을 알 수 있다.

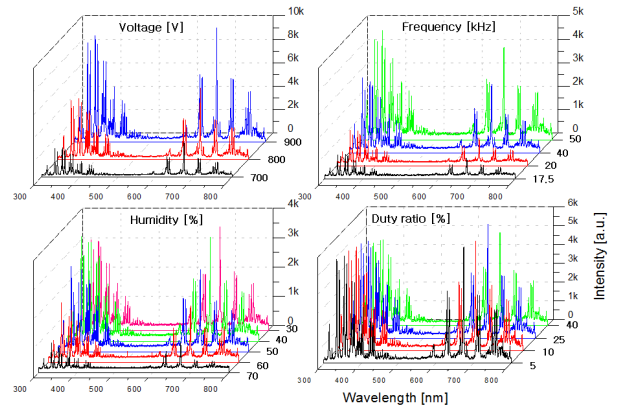


그림 4 전압, 주파수, 습도, 듀티비 변화에 따른 OES 특성  
Fig. 4 OES characteristics with the variations of voltage, frequency, humidity, and duty ratio

그림 4는 전압, 주파수, 습도 그리고 듀티비 변화에 따른 OES 특성이다. 각 그래프의 x축은 파장이고, y축은 각각 전압, 주파수, 습도 그리고 듀티비의 변화량이고, z축은 intensity를 나타내었다. 인가전압과 주파수가 증가할수록 전체 파장의 intensity가 커지는 것을 알 수 있고 듀티비 변화에 따른 영향은 미약하다. 그리고 습도가 증가하면 파장의 intensity가 낮아지는데 이는 대기 중의 전자친화적인 수분의 영향으로 전하보존효과가 사라져 벽전하의 영향이 미약하기 때문이다. 즉, 수분이 대기압 플라즈마 생성을 방해한다. 대기 중에서는 질소가 78[%], 산소가 21[%] 차지한다.

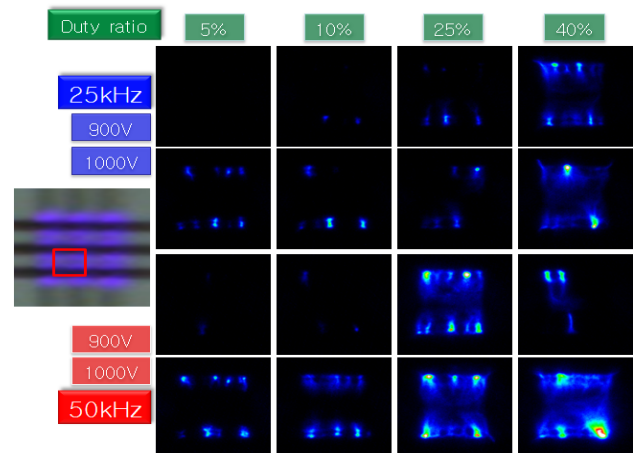


그림 5 ICCD shutter 모드 이미지  
Fig. 5 ICCD shutter mode images

그래서 질소 관련 성분들이 340 ~ 450[nm], 산소 관련 성분들이 600 ~ 780[nm] 영역에 나타나고 333[nm] 파장이 OH peak이다.

그림 5는 각각 전압, 주파수, 듀티비를 변화시키면서 사진의 붉은 표시 부분을 ICCD shutter 모드로 촬영한 이미지이다. 각각의 전압, 주파수 그리고 듀티비가 커질수록 휘도가 높고 방전이 강하게 일어남을 알 수 있다. 주파수, 전압에 따른 영향은 OES 특성과 ICCD 이미지가 동일한 반면, 듀티비의 영향은 OES 결과에서는 큰 차이가 없었지만 ICCD로 촬영한 적외선 이미지는 차이가 난다. 듀티비가 증가하면 펄스 인가 시간이 길어져 여기 상태의 지속시간이 길어져 휘도가 높아지게 된다. 즉, 전자가 일찍 소멸하고 나서도 상대적으로 확산 시간이 긴 이온과 여기 상태 입자들의 직접 충돌 및 다양한 3중 충돌에 의해 지속적으로 빛이 방출된다.

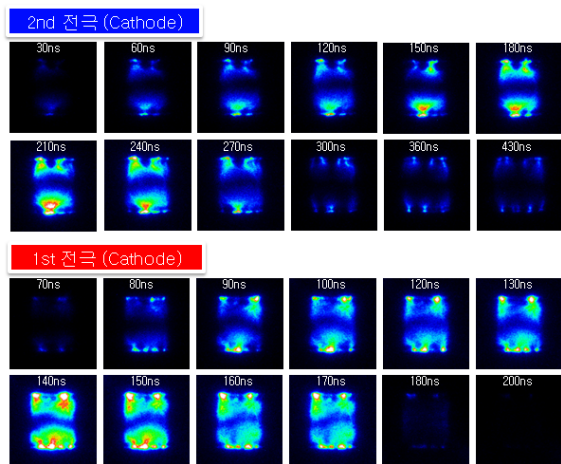


그림 6 ICCD gate 모드 이미지  
Fig. 6 ICCD gate mode images

그림 6은 ICCD gate 모드로 촬영한 이미지이다. 2차 전극이 cathode일 때가 1차 전극이 cathode일 때보다 휘도가 크며 방전지속시간이 길어지는 것을 알 수 있다. 이는 전기장의 분포의 차이로 인해 2차 전극이 cathode일 때가 1차 전극이 cathode일 때보다 전기장의 세기가 강하기 때문에 비교적 강한 방전이 일어남을 알 수 있다.

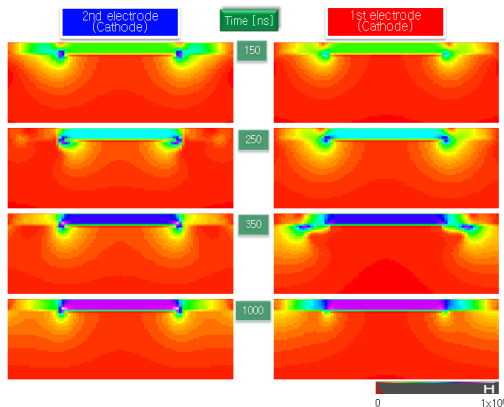


그림 7 2차원 시뮬레이션으로 계산한 전기장 분포도  
Fig. 7 Electric field distribution by two-dimensional fluid simulation

그림 7은 2차원 유체 시뮬레이션으로 계산한 시간에 따른 전기장 분포도이다. 1차 전극과 2차 전극이 cathode일 때 각각의 전기장의 분포가 다를 수 있고 2차 전극이 cathode일 때가 각각의 시간에 대해 전기장의 세기가 강함을 알 수 있다.

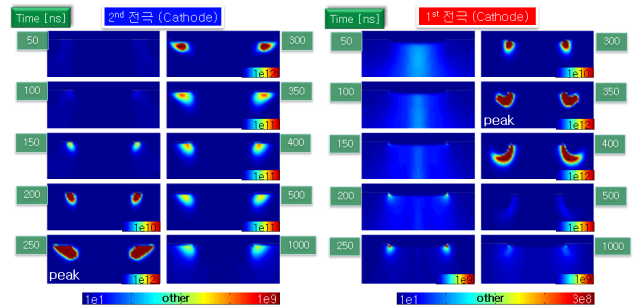


그림 8 2차원 시뮬레이션으로 구한 전자 밀도 분포도  
Fig. 8 Electron density distribution by two-dimensional fluid simulation

그림 8은 2차원 유체 시뮬레이션으로 계산한 시간에 따른 전자 밀도 분포도이다. 각각의 전극이 cathode일 때 scale 차이가 나서 그림에 명시된 scale로 하였다. [그림 7]의 전기장 분포도를 통해 알 수 있는 바와 같이 2차 전극이 cathode일 때가 전기장의 영향으로 방전이 빨리 발생하고 더 오래 지속되는 것을 알 수 있다. 이는 [그림 6]의 ICCD 이미지에서도 동일하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 평판형 DBD 대기압 플라즈마 장치와 구동회로를 제작하여 대기압/저온 마이크로 플라즈마를 지속적으로 발생시키는 방법을 제안하고 구동전원 특성 및 플라즈마의 전기, 광학적 특성에 관한 연구를 수행하였다. Fluid Simulation을 통하여 이론적 해석을 하였으며, ICCD와 OES를 사용하여 측정 및 분석을 하였다.

제작된 장치를 유전체 높이 및 인가되는 전압, 주파수 그리고 듀티비를 변화시키며 특성을 파악한 결과 유전체 높이가 낮아질수록, 인가전압이 증가할수록 전기장의 세기가 강해 방전전류의 형성이 빠르고 그 크기 또한 커진다. 장치의 플라즈마 생성이 어떠한 형태로 진행되는지 ICCD image와 simulation을 통해서 시간에 따라 진행되는 상황을 관찰한 결과 2차 전극이 cathode일 때가 1차 전극이 cathode일 때보다 전기장의 세기가 강하며 방전의 지속시간을 길어짐을 알 수 있다.

실험의 목적은 유니폼 마이크로 플라즈마 생성으로 살균, 의료, 표면처리 등 다양한 분야에 응용 목적을 두고 있으며 He이나 Ar 가스를 사용하지 않고 기중에서 방전을 발생시키므로 Air 플라즈마 발생 비용의 절감효과를 기대할 수 있다.

**감사의 글**

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 지원되었음.

**참 고 문 헌**

[1] E. E. Kunhardt, "Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas," IEEE Trans. Plasma Sci. Vol 28, 189 (2000)

[2] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki, and S. Okazaki, "Stable glow plasma at atmospheric pressure," J. Phys. D 21, 838 (1988)

[3] T. C. Montie, K. Kelly-Wintenberg, and J. R. Roth, IEEE Trans. Plasma Sci. 28, 41 (2000)

[4] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (Wiley, New York, 1994).

[5] M. Moravej, X. Yang, R. F. Hicks, J. Penelon, and S. E. Babayan, "A radiofrequency nonequilibrium atmospheric pressure plasma operating with argon and oxygen," J. Appl. Phys., vol. 99, no. 9, p. 093305, May (2006)

[6] E. Stoffels, A. J. Flikweert, W. W. Stoffels, and G. M. W. Kroesen, "Plasma needle: A non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio) materials," Plasma Sources Sci. Technol., vol. 11, no. 4, pp. 383 - 388, Aug. (2002)

[7] J. L. Walsh, J. J. Shi, and M. G. Kong, "Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets," Appl. Phys. Lett., vol. 88, no. 17, p. 171 501, Apr. (2006)

[8] B. Eliasson and U. Kogelschatz, IEEE Trans. Plasma Sci. 19, 1063 (1991)

[9] A. Schütze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, "The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources," IEEE Trans. Plasma Sci. 26, No. 6, 1685 (1998)

**저 자 소 개**



**이 종 봉 (李 鍾 鳳)**

1983년 3월 10일생. 2009년 부경대 공대 전기공학과 졸업, 현재 부산대학원 전자 전기공학과 석사과정  
Tel : 051-510-2746  
Fax : 051-510-1498  
E-mail : myterry@pusan.ac.kr



**하 창 승 (河 昌 昇)**

1983년 10월 18일생. 2007년 부산대 공대 전자전기통신공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정  
Tel : 051-510-1544  
Fax : 051-510-1498  
E-mail : cseungha@pusan.ac.kr



**김 동 현 (金 東 鉉)**

1961년 1월 9일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사), 2001년 동 대학원 전 기공학과 졸업(공학). 현재 부산대 PDP 연구소연구원  
Tel : 051-510-1544  
Fax : 051-510-1498  
E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr



**이 호 준 (李 晷 駿)**

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전 기공학부 졸업(공학). 현 부산대 공대 전 자전기공학부 정교수  
Tel : 051-510-2301  
Fax : 051-513-0212  
E-mail : hedo@pusan.ac.kr



**이 해 준 (李 海 準)**

1972년 2월 25일생. 1994년 서울대 공대 원자핵 공학과 졸업. 1996년 포항공대 대학원물리학과 졸업(석사), 1998년 포항공 대 대학원 물리학과 졸업(이박). 현재 부 산대 공대 전자전기공학부 부교수  
Tel : 051-510-3516  
Fax : 051-513-0212  
E-mail : haejune@pusan.ac.kr