

방전에너지 제어용 외부 커패시터를 이용한 대기압 마이크로 플라즈마 소스 개발

(Development of a Microplasma Source under Atmospheric Pressure using an External Ballast Capacitor)

하창승* · 이제현 · 손의정 · 박차수 · 이호준**

(Chang-Seung Ha · Je-Hyun Lee · Eui-Jeong Son · Cha-Soo Park · Ho-Jun Lee)

Abstract

A pulse driven atmospheric plasma jet controlled by external ballast capacitor is developed. Unlike the most commonly use DBD sources, the proposed device utilizes bare metal electrode. The discharge energy per pulse can precisely be determined by changing voltage and capacitance of the ballast capacitor. It is shown that the device can provide wide range of plasma, from stable glow mode to near arc state. Current-voltage waveforms, optical emission spectra and discharge images are investigated as a function of an injection energy. The OES shows that He and oxygen lines are increased as a function of the external ballast capacitor. Ozone and rotational temperature have similar tendency with a power consumption. The feeding gas is He and the applied DC voltage is from 400V to 800V when the gap distance is 500 μ m.

Key Words : Atmospheric Pressure Micro Plasma, Pulse Power, External Ballast Capacitor

1. 서 론

대기압 플라즈마의 응용이 확대됨에 따라, 다양한

-
- * 주저자 : 부산대학교 전자전기공학과 박사과정
 - ** 교신저자 : 부산대학교 전자전기공학부 교수
 - * Main author : He is currently working toward the Ph.D. degree of Electrical Engineering at Pusan National University
 - ** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Pusan National University
Tel : 051-510-1544, Fax : 051-510-1498
E-mail : hedo@pusan.ac.kr
- 접수일자 : 2013년 2월 7일
1차심사 : 2013년 2월 14일
심사완료 : 2013년 4월 23일

목적의 대기압 플라즈마 발생장치가 요구되고 있다 [1-2]. 표면처리나 의료용 등 다양한 목적으로 개발되고 있는 대기압 플라즈마 발생장치는 대부분이 DBD (Dielectric Barrier Discharge) 방식으로 수십 Hz의 저주파에서 수십 MHz의 AC전원을 이용하여 플라즈마를 발생시킨다[3]. DBD 방식으로 플라즈마를 발생시킬 경우 유전체에 의하여 방전 전류가 제한되기 때문에 글로우(Glow) 방전이 유지된다. 따라서 발생된 플라즈마가 안정적이다. 또한 Neon Transformer나 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp) 구동회로 등 현재 산업계에서 광범위하게 적용되고 있는 전원장치를 사용할 수 있기 때문에 진입장벽이 낮다[4]. 하지만

DBD 방식으로 플라즈마를 발생시킬 경우 그 구조적인 한계로, 플라즈마 방전에너지가 구조에 의해 결정된다. 즉 유전체 사이에서 방전이 일어나기 때문에 구조적으로 커패시터라고 볼 수 있다. 따라서 방전 에너지는 전극간의 면적과 방전개시전압 혹은 유지전압에 의해 결정되면서 플라즈마 제어가 제한적이다[5].

본 연구에서는 유전체를 사용하지 않는 금속전극을 사용하여 DBD 플라즈마의 구조적 한계를 극복하고자 한다. 하지만 유전체 없이 전극 사이에서 플라즈마를 발생시킬 경우 발생된 플라즈마가 글로우 방전에서 아크 방전으로 이행되기가 매우 쉽다. 아크 방전으로의 이행을 제한하기 위하여 본 그룹에서는 500ns 이하의 좁은 폭의 펄스전원으로 플라즈마를 구동시키는 방법을 제안하였다[6]. 하지만 플라즈마 그 자체로의 특성은 매우 뛰어났으나 구동 가스가 헬륨 (He)으로 국한된 점, 펄스폭이 250ns~500ns로 매우 제한적인 점 등으로 실제 산업계에 응용하기에는 불완전하다는 문제가 지적되었다[7-8]. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 외부에 연결된 커패시터에 방전 에너지를 저장하여 방전 시 커패시터로부터 에너지를 주입받는 방식의 플라즈마 발생장치를 제안한다. Unipolar-type의 펄스 구동 플라즈마 발생장치로 방전에너지는 인가전압과 커패시터의 용량으로 결정되어 펄스 당 방전에너지는 매우 간단하고 정밀하게 제어된다. 방전 시 스위칭(Switching) 소자를 이용하여 플라즈마 발생부와 회로부를 나누기 때문에 플라즈마는 bare electrode 구조에서도 안정적으로 유지된다. 또한 방전에너지의 제어가 가능하기 때문에 전압이나 전극간의 간격을 조절하여 He, Ar, O₂ mixture gas, air 등 다양한 구동 가스에서 방전이 가능하다[9]. 외부 커패시터를 이용해서 플라즈마를 발생시킬 경우 외부 커패시터의 용량과 인가전압변화로 방전 에너지 및 방전 전류를 제어할 수 있기 때문에 Glow방전에서 Arc에 가까운 플라즈마까지 제어할 수 있다. 따라서 DBD 플라즈마에 비해 방전 영역이 매우 넓고 응용분야 또한 다양하다. 일례로 상온에 가까운 플라즈마에서는 Bio-Medical 응용이 가능하고 400K~800K 영역에서는 SiO₂ 상압증착, PDMS 표면처리와 같은 표면처리 공정이 가능하다. 1,500K 이상에서는 마이크로

방전가공과 같은 고온 공정이 가능하다[10-11].

본 연구에서는 펄스 구동으로 방전에너지가 제어되는 대기압 플라즈마 발생장치를 제안하고 에너지를 조절함에 따라 마이크로 플라즈마가 Glow 방전에서 Arc에 근접한 방전으로 이행됨을 확인하였다.

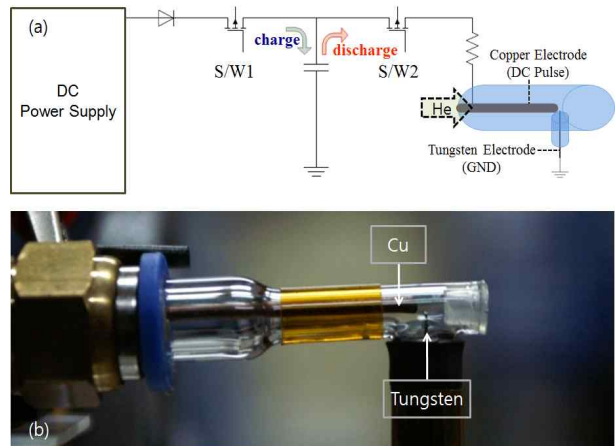


그림 1. (a) 외부 커패시터를 이용한 대기압 플라즈마 발생장치의 개략도. (b) 대기압 마이크로 플라즈마 발생장치의 실제사진. 구리전극과 텅스텐전극 사이에서 플라즈마가 발생한다.

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the energy controllable microplasma source under atmospheric pressure. (b) Photograph of the microplasma source

또한 구동전원 특성 및 플라즈마의 전기, 광학적 특성에 관한 연구를 행하였다. He을 구동가스로 사용하였고 ICCD Camera를 이용하여 방전양상과 시간에 따른 방전이동 경로를 측정하였다. 플라즈마가 발생된 상태에서 가스 flow와 커패시터의 용량을 변화시켰으며 이와 동시에 오존(Ozone) 발생량과 T_r(Rotational Temperature)을 측정하여 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1 (a)는 외부 커패시터를 이용한 대기압 플라즈마 발생장치의 개념도이다. 그림 1 (b)는 제작된 대기압 플라즈마 발생장치의 실제사진이다. 구리 (Anode)전극과 텅스텐(Cathode)전극 사이에서 플라즈마가 발생된다. 원통형의 양극(Anode)은 구리이고

전극 직경은 6mm이다. 원통형의 음극(Cathode)은 tungsten으로 직경이 0.3mm이고, 두 전극사이의 최단 거리는 0.5mm이다. 본 연구에서 개발된 플라즈마 발생장치는 글로우 방전에서 아크 방전에 근접한 다양한 마이크로 방전이 가능 한 만큼 다양한 응용을 목표로 하고 있으며, 산업계의 다양한 응용을 고려할 경우 방전 온도를 높일 필요성이 있다[12]. 방전 온도를 높이기 위하여 방전 전극의 단면적을 매우 좁게 설계하였으며 전류 밀도가 높아짐에 따라 방전 온도의 상승 효과를 가져왔다[13]. 글로우 방전 시 경우에는 따라서는 플라즈마 밀도를 낮추기 위하여 방전부에 외부저항(Ballast Resistance)을 연결하였으며, 100Ω~500kΩ을 사용하였다. 그림 1 (a)는 외부 커패시터를 이용한 플라즈마 생성원리를 설명하는 개략도이다. 먼저 스위치1이 on 되고 스위치2가 off 되면, DC 전원공급 장치로부터 고전압이 인가되어 외부 커패시터에 $(CV^2)/2$ 형태로 에너지가 저장된다. 커패시터에 에너지가 저장된 후, 스위치1이 off 되고 스위치2가 on 되는 순간 커패시터에 저장된 에너지가 방전부에 인가되어 방전이 일어나게 된다. 방전이 일어날 때에는 전원부에서 에너지를 직접 투입하는 것이 아니라 커패시터에 저장된 에너지가 사용되기 때문에 전원부는 안정적으로 구동된다. 스위칭 소자로는 높은 전류에도 구동이 가능한 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하였다. 플라즈마 구동에 사용된 커패시터의 용량은 68pF~1nF이다. 10nF 이상의 커패시터를 사용할 경우 방전기체 온도가 매우 높아지면서 전극손상을 야기시킨다. 따라서 본 연구에서는 커패시터의 용량을 1nF으로 제한하였다. 아크 방전 역시 방전기체 온도가 10,000K 이상 올라가기 때문에 발생부 전극의 손상을 가져온다[14]. 그림 1 (b)는 제작된 플라즈마 발생장치의 방전부 실제 사진이다. 텅스텐(Tungsten) 음극 전극부는 유리관 아래쪽 외부에서 내부로 연결되어 있다. 텅스텐 전극 주위를 밀봉하여 He 기체는 전극의 앞쪽으로 흐른다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 방전 시에 양극에서 측정된 전압파형과 음

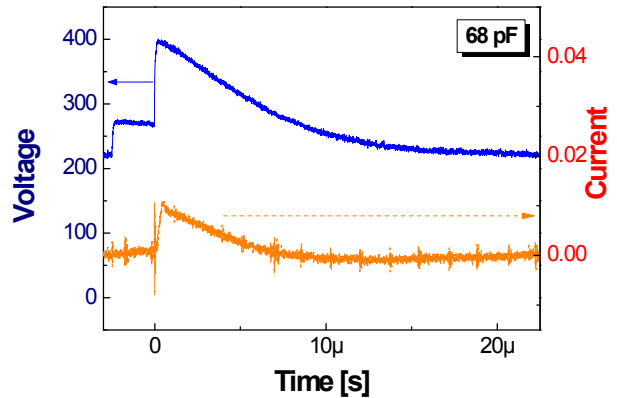


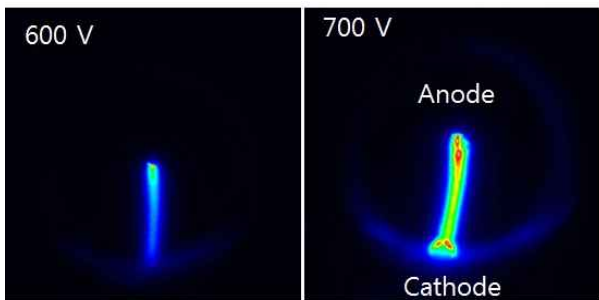
그림 2. 외부 커패시터가 68pF인 플라즈마의 전류-전압파형. 파란색 실선이 Anode 전극 전압, 주황색 실선이 전류를 나타낸다. 주파수는 40kHz이다.

Fig. 2. Voltage and current waveforms of the plasma with an external ballast capacitor of 68pF. Blue line is voltage and orange line is current. Frequency is fixed at 40kHz

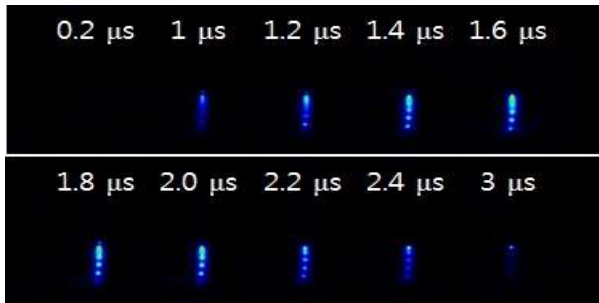
극에서 측정된 전류파형(Wavesurfer 434, Lecroy)이다. 외부 커패시터가 68pF인 플라즈마의 전류-전압 파형이다. 파란색 실선은 방전부의 Anode 전압, 주황색 실선은 전류를 나타낸다. 방전전류가 최고 0.02A 이하로 제한되어 glow 방전을 유지하고 있다. 이 때 인가전압은 400V, 주파수 40kHz, 외부 저항 10kΩ, 커패시터 용량 68pF, 가스 Flow 1SLM(Standard Liters Per Minute)으로, 한 펄스당 방전에너지는 대략 50~80μJ 정도이다. IGBT의 gate(S/W1)에 인가한 충전시간은 1.5μs이고, 1μs의 휴지기를 준 다음, S/W2의 방전시간은 1μs로 설정하였다. 그림 2에서 시간 0s를 기준으로, -2.5μs에서 충전이 시작된다. 충전이 시작되면 스위칭 소자인 IGBT의 inner capacitance에도 함께 충전되어 anode 전압이 일정 전압으로 상승한다. S/W1 turn on시, anode 전압이 충전되는 정도는 외부 커패시터의 용량과 Transistor의 inner capacitance의 용량 및 방전부 고유의 capacitance 특성에 의해 결정된다. 0초에 S/W2가 turn on 되면, 수백 ns 이내로 방전이 시작된다. 외부 커패시터에 저장된 에너지는 완전히 방전 소진되지 못하고 200V에 멈춰있다. 이는 커패시터에 저장된 에너지 소비와 함께 Anode 전극에 인가되는 전압이 떨어지게 되고 플라즈마 유지에 필



(a)



(b)



(c)

그림 3. 방전형상을 보기위한 ICCD Camera 측정.
 (a) ICCD 카메라 측정을 위한 장치의 위치설정.
 양극인 구리전극 부근에서 방전 Path가 휘어진다.
 (b) 인가전압 상승과 함께 방전 에너지가 증가하게
 되어 휘도가 높아지게 된다. (c) 방전의 시변
 이미지. 양극 전압인가를 기준으로 200 ns 이후
 양극에서 방전이 시작되어 음극으로 확장된다. 전극
 사이에 Striation이 보인다.

Fig. 3. Photographs of the ICCD images. (a) Experimental setting of the microplasma for ICCD photographic. (b) Emission intensity becomes stronger as the applied voltage is increased. (c) Temporal evolution of emission intensity distribution. After 200 ns, plasma is ignited from the anode and expands cathode. There is striation between the electrodes

요한 전계 조건을 갖추지 못하면서 방전이 멈추었기 때문이다. S/W2가 turn off 된 1 μ s 이후에도 방전은 RC 방전의 형태로 지속된다. 이는 외부 커패시터에서 미처 소진되지 못한 에너지가 S/W 2의 inner capacitor의 충전과 함께 방전되기 때문이다.

방전 양상을 분석하기 위해 ICCD 카메라(PI-MAX2, Princeton Instrument)로 방전 이미지를 측정하였다. 68pF, 2 SLM에서 측정되었으며, 그림 3 (a)는 ICCD 카메라 측정을 위한 장치의 위치설정을 보여준다. 장치의 측면에서 플라즈마를 측정하였다. 전극구조상 방전 path가 양극 부근에서 휘어지기 때문에 측정 시 그림 3 (b)와 같이 anode 부근에서 이미지가 중첩되고 중첩된 이미지로 인하여 휘도가 높다. 따라서 anode 부근의 실제 휘도는 높지 않지만 측정 시 이미지가 중첩되어 휘도가 높은 것처럼 보인다. 측정된 ICCD 이미지로 미루어 볼 때 플라즈마는 주기적 신호에 따라 방전 path 및 휘도가 같은 위치에서 같은 세기로 반복되고 있음을 보여준다. 인가전압을 600V인 경우와 700V인 경우를 각각 측정하였다. 그림 3 (b)와 같이 인가전압 상승과 함께 방전에너지가 증가하게 되어 휘도가 높아지게 된다. 높은 휘도는 상대적으로 높은 밀도를 의미한다. 그림 3 (c)는 방전의 시변 이미지이다. 방전 시 사용된 외부콘덴서의 용량은 68pF이고, 인가전압 DC 650V, 2SLM이다. 노출 시간은 20ns로, 총 이미지 측정시간은 3 μ s이다. Anode 전극에 전압인가를 기준으로 200ns 이후 양극에서 방전이 시작되어 음극으로 확장된다. 긴 방전 path로 인하여 striation 이 보인다[15].

외부 커패시터의 용량변화에 따른 방전특성 변화를 알아보기 위해 그림 4와 같이 OES(Optical Emission Spectroscopy, SpectraPro 300i, Princeton Instrument) 분광분석을 실시하였다. 외부 커패시터의 용량이 증가함에 따라, He과 Oxygen Atom의 광 방출 Line을 중심으로 광세기는 증가한다. 인가전압은 400V, 주파수 40kHz, 외부저항 10k Ω , Gas Flow 1SLM에서 커패시터를 각각 (a) 68pF, (b) 100pF, (c) 1nF으로 변경하며 측정하였다. 발생된 대기압 플라즈마 노출시간은 5ms이고, 측정된 광의 세기는 플라즈마 내에서 여기된 He 원자가 하방 천이(de-excited)되

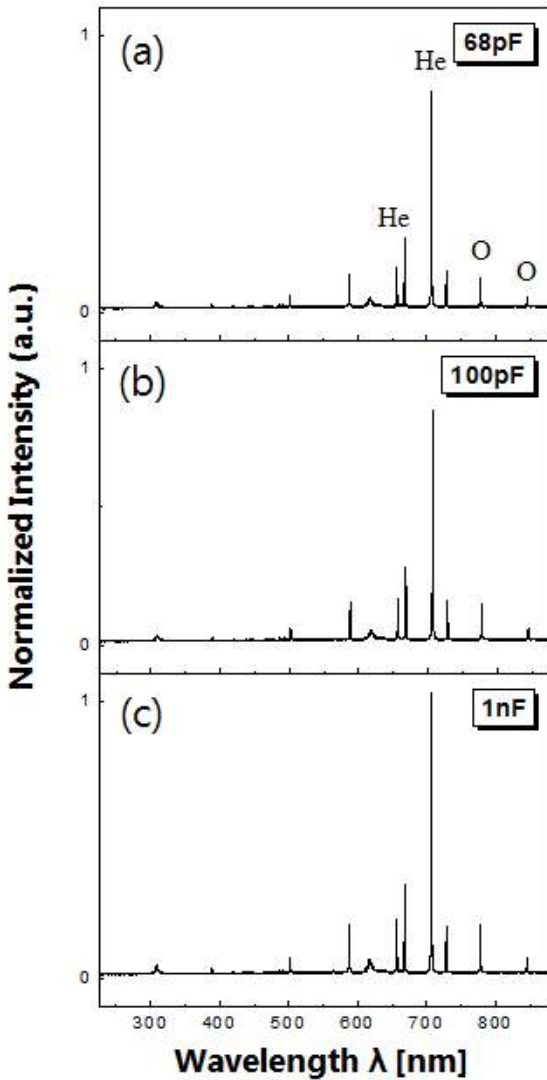


그림 4. 발생된 플라즈마의 분광분석. 외부 커패시터의 용량이 증가함에 따라, He과 Oxygen Atom의 광 방출 line을 중심으로 광세기는 증가한다.
 Fig. 4. Optical emission spectrum accumulated in the discharge region. The emission spectrum shows that He and oxygen lines are increased as a function of the external ballast capacitor

면서 방출하는 빛 중의 하나인 706nm($1s3s(^3S) \rightarrow 1s2p(^3P)$)를 기준으로 정규화 하였다. 커패시터의 용량이 증가하면 펄스 당 방전에너지가 증가하므로 플라즈마의 밀도는 높아진다. 구동 가스가 He이기 때문

에, He line(587nm, 667nm, 706nm)들이 상대적으로 높게 나타난다. 777nm와 845nm의 산소 line은 기중에 존재하는 O_2 분자가 플라즈마에 의해 분해되면서 나타나게 된다. 오존(Ozone)이나 질소에서 방출되는 광량은 상대적으로 낮게 측정되었다. 헬륨과 산소원자를 중심으로 볼 때, 외부 콘덴서의 용량이 증가함에 따라, 광의 세기도 함께 증가한다. 이는 플라즈마의 밀도가 상대적으로 높아짐을 의미한다.

분광분석 시 방전 조건과 같은 조건으로 Rotational Temperature(이하 T_r)와 오존(O_3) 발생량을 측정하였고 소비전력을 계산하였다. 플라즈마의 기체온도는 표면처리나 세포처리등 다양한 응용분야에서 중요한 조건이 된다.

T_r 은 $N(J) \sim (2J+1) \text{Exp}(-ghc/k_B T_{rot})$ 의 밀도 분포식 혹은 Spectrum 세기 이론식으로 정의될 수 있다. 여기서 J 는 회전에너지 양자 수, g 는 degeneracy를, 그리고 h, c, k_B 는 각각 플랑크 상수와 빛의 속도, Boltzmann 상수이다. T_r 의 Rotational-Translational 에너지 변환은 빠르게 평형상태에 도달한다. 따라서 측정된 T_r 은 중성기체 온도와 비슷한 값을 가진다[16-17]. 플라즈마 기체 온도를 간접적으로 진단하기 위해 질소(nitrogen)의 emission band (391.4nm) 부근의 N_2^+ ($B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$)를 측정하고 계산하여 T_r 을 도출하였다[18-19]. N_2^+ 의 T_r 은 중성기체와 분자와의 잦은 충돌로 인하여 기체온도가 같게 된다. 대기압에서 플라즈마를 발생할 경우 플라즈마가 대기 중의 산소와 반응하면서 오존이 발생된다. 발생된 오존은 응용분야에 따라 필요할 수도 있고 제거대상이 될 수도 있다. 그림 5의 올리브 색 원이 T_r 를 나타내고 주황색 사각형은 오존발생량을 나타낸다. 검은색 삼각형은 계산된 소비전력이다. T_r 는 capacitor가 68pF에서 1nF 까지 증가하는 동안 대략 690K에서 730K사이의 온도를 나타낸다. 온도가 700K 정도로 일반 글로우 방전보다 높은 것은 앞서 언급한 바와 같이 전극의 단면적을 줄여 전류밀도를 높였기 때문이다. 이 때 측정된 오존 발생량은 커패시터 용량에 따라 각각 70ppb에서 117ppb이다. 커패시터의 용량이 증가하면 방전전류가 증가하게 되고, 소비전력이 증가하게 된다. 또

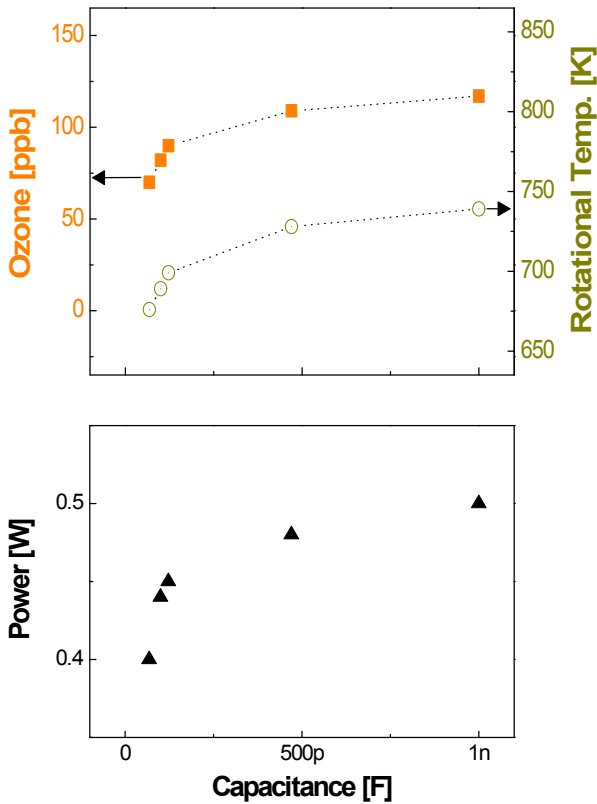


그림 5. Ballast Capacitor 증가에 따른 오존 발생량과 Rotational Temperature 및 소비전력. 방전이 지속되기 위해서는 일정 세기 이상의 전계세기가 요구된다. 본 연구에서는 대략 500kV/m 이상의 전계세기가 유지되어야 방전이 유지된다. 하지만 커패시터는 저장된 에너지 소모와 함께 전위 또한 낮아지기 때문에 방전이 시작되면 방전공간의 전계 역시 빠르게 약화된다. 따라서 본 연구에서는 200V 정도에서 방전이 멈추게 되었다. 결국 저장된 에너지를 충분히 소모시키지 못하였으며 외부 커패시터의 용량이 증가할수록 에너지 전달 효율이 떨어지게 되었다.

Fig. 5. Ozone production, Rotational temperature, and Power consumption. To maintain discharges, The electric field must over certain level. In this study, the discharge is maintained when the electric field over 500kV/m. However, the voltage of the external capacitor goes down as the capacitor release the stored energy. So the electric field between electrodes is weakened and the discharge is stopped at 200V. Since the stored energy isn't exhausted, The discharge efficiency of the external capacitor goes down as the capacitance of the capacitor is increased

한 방전전류가 증가하면서 플라즈마의 온도 또한 증가하게 되어 T_r 이 증가하는 현상을 가져온다. 오존의 경우 플라즈마 발생부의 20mm 앞에서 측정되었다. 온도가 700K 정도의 고온상태이므로 오존이 잘 분해되어 오존밀도는 낮다[20]. 하지만 커패시터의 용량을 증가시키면서 오존의 밀도가 소폭 증가하였다. 이는 플라즈마 밀도가 증가하여 플라즈마 내부의 많은 여기종과 O_2 가 반응하면서 오존이 더 많이 생성된 것으로 본다[21]. 소비전력과 T_r , 오존발생량은 비슷한 경향성을 가진다. 소비전력의 경우 $P = 0.5CV^2f[W]$ (C : 커패시터 용량, V : 인가 전압, f : 방전주파수)로 계산되어 C변화에 따른 소비전력의 관계는 단순한 일차함수임을 보여준다. 하지만 계산된 소비전력은 외부 커패시터가 증가함에 따라 그림 5와 같이 포화하게 된다. 방전이 지속되기 위해서는 일정 세기 이상의 전계세기가 요구된다. 본 연구에서는 대략 500kV/m 이상의 전계세기가 유지되어야 방전이 유지된다. 하지만 커패시터는 저장된 에너지 소모와 함께 전위 또한 낮아지기 때문에 방전이 시작되면 방전공간의 전계 역시 빠르게 약화된다. 따라서 본 연구에서는 200V 정도에서 방전이 멈추게 되었다. 결국 저장된 에너지를 충분히 소모시키지 못하였으며 외부 커패시터의 용량이 증가할수록 에너지 전달 효율이 떨어지게 되었다.

4. 결 론

본 논문에서 외부 커패시터를 이용하여 방전에너지를 미세하게 제어하는 대기압 플라즈마 발생장치를 제안하였다. 68pF~1nF의 외부 커패시터에 방전 에너지를 저장하면서 플라즈마 발생 시 회로의 전원부와 발생부를 독립시켜 전원부의 안정성을 도모하였다. 외부 커패시터의 용량에 따라 플라즈마는 글로우 방전에서 아크 방전까지 제어가 가능하고, 이는 전류·전압 측정과 ICCD camera를 통한 이미지 측정을 통하여 확인할 수 있다. 발생된 플라즈마의 이미지 분석 결과, 플라즈마가 인가된 펄스 전압에 따라 규칙적으로 발생하고 0.5mm의 긴 방전전극으

로 인하여 striation 현상이 보인다. 분광분석 결과, He, O 등의 emission line의 광 방출량은 외부 커패시터의 용량이 증가함에 따라 함께 증가하고 또한 오존 방출량과 소비전력, T_r 도 외부 커패시터의 증가에 따라 함께 증가한다. 하지만 외부 커패시터가 증가할수록 커패시터에 저장된 에너지가 방전 에너지로 전달되는 효율은 떨어진다. 이는 외부 커패시터의 고유한 특성에 의한 현상으로 인가전압을 높이거나 Transistor의 Gate 제어용 펄스 신호의 duty 비율과 주파수 조절을 통해 극복할 수 있다. 본 연구의 대기압 플라즈마 발생장치는 한 가지 장치에서 다양한 mode의 플라즈마를 발생시키기 때문에 Bio-medical, 표면처리, 방전가공, DLC (Diamond-like Carbon) film coating 등 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 본다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2010-0011136)

References

- [1] H. J. Lee, C. H. Shon, Y. S. Kim, S. Kim, G. C. Kim, and M. G. Kong, "Degradation of adhesion molecules of G361 melanoma cells by a non-thermal atmospheric pressure microplasma", *New Journal of Physics* 11 115026 (2009).
- [2] Han Sup Uhm, "Atmospheric Plasma and Its Applications", *KCI*, Vol.15, No.2, pp. 117-138, (2006.3).
- [3] Alexander Fridman, and Lawrence A. Kennedy, "Plasma Physics and Engineering", New York: Taylor and Francis Books, pp. 573-613, (2004).
- [4] G. Nersisyan and W. G. Graham, "Characterization of a dielectric barrier discharge operating in an open reactor with flowing helium", *Plasma Sources Sci. Technol.* 13, 582-587, (2004).
- [5] Ulrich Kogelschatz, "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications", *Plasma Chemistry and Plasma Processing* Vol. 23, No. 1, (2003.3).
- [6] Joon-Young Choi, Ho-Jun Lee, Dong-Hyun Kim, Hae June Lee, Chung-Hoo Park, "The Development of Non-thermal Micro Plasma Source Under Atmospheric Pressure by Means of Submicrosecond Pulse Voltage Waveforms", *Trans. KIEE*. Vol. 56, No. 10, (2007.10).
- [7] Chang-Seung Ha, Joon-Young Choi, Ho-Jun Lee, Dong-Hyun Kim, and Hae June Lee, "Images of Nanosecond Pulse-Driven Low Temperature Atmospheric Pressure Plasma Using Dielectric-Free Parallel Electrodes", *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*. Vol. 36, No. 4, (2008.8).
- [8] Chang-Seung Ha, Joon-Young Choi, Dong-Hyun Kim, Chung-Hoo Park, Hae June Lee, and Ho-Jun Lee, "Properties of dielectric-barrier-free atmospheric pressure microplasma driven by submicrosecond dc pulse voltage", *Appl. Phys. Lett.* 95 061502, (2009).
- [9] Chang-Seung Ha, Dong-Hyun Kim, Hae June Lee, Ho-Jun Lee, Sang Rye Park, Gyo Cheon Kim, "Development of a air plasma driven by energy controlled DC pulse", 63rd Gaseous Electronics Conference pp. 104, October 2010.
- [10] Chang-Seung Ha, Ji-Han Son, Cha-Soo Park, Dong-Hyun Kim, Hae June Lee, Ho-Jun Lee, "Electrical and optical characterization of DBD atmospheric pressure plasma and it's applications", *KIEE*, pp. 1530-1531, (2011.7).
- [11] Hyun-Seok Tak, Seung-Yul Shin, Myung-Chang Kang, Chang-Seung Ha, Ho-Jun Lee, Dae-Yeol Lee, "Effects of RC Discharging and Pulse Generation for Micro EDM of Al₂O₃/CNTs Hybrid Materials" *KSMTE*, pp.46-50, (2009.10).
- [12] Chang-Seung Ha, Dong-Hyun Kim, Hae June Lee, and Ho-Jun Lee, "Discharge Images of a Dielectric-Barrier-Free Atmospheric-Pressure Microplasma Controlled by an External Ballast Capacitor", *IEEE Transactions ON PLASMA SCIENCE*. Vol. 39, No. 11, (2011.11).
- [13] Hassan El-Hofy, "Advanced Machining Processes", New York: McGraw-Hill, pp. 115-187, (2005).
- [14] Hyun-Seok Tak, Chang-Seung Ha, Dong-Hyun Kim, Ho-Jun Lee, Hae-June Lee, and Myung-Chang Kang, "Comparative study on discharge conditions in micro-hole electrical discharge machining of tungsten carbide (WC-CO) material", *Tans. Nonferrous Met. Soc. China* 19 s114-s118, (2009).
- [15] Chae Hwa Shon and Jae Koo Lee, "Striation phenomenon in the plasma display panel", *Phys. Plasmas* vol. 8, No. 3, (2001.3).
- [16] Min-A Song, "A Study on the Plasma Temperature Measurement by Optical Diagnostics", Thesis for a master's degree, Dong-A University, December, (2009)
- [17] Se Youn Moon, "Study on Discharge Modes and Characteristics of Large-Area Plasma Produced at Atmospheric Pressure", Thesis for a doctor's degree, Korea Advanced Institute of Science and Technology, (2006).
- [18] K. Sahli, L. Hochard, and A. M. Pointu, "Temperature measurements in oxygen negative glow using a synthetic low-resolution spectrum", *Meas. Sci. Technol.* 4. 685, (1993).
- [19] G. Gardet, G. Moulard, M. Courbon, F. Rogemond, and M. Druetta, "Evaluation of the rotational temperature in N₂ discharges using low-resolution spectroscopy", *Meas. Sci. Technol.* 11 333, (2000).
- [20] J. Kitayama, and M. Kuzumoto, "Analysis of ozone generation from air in silent discharge", *J. Phys. D: Appl.*

Phys. 32 3032-3040, (1999).

[21] James Y. Jeong, Jaeyoung Park, Ivars Henins, Steve E. Babayan, Vincent J. Tu, Gary S. Selwyn, Guowen Ding, and Robert F. Hicks, "Reaction Chemistry in the Afterglow of an Oxygen-Helium, Atmospheric-Pressure Plasma", J. Phys. Chem. A Vol.104, No. 34, (2000).



손익정 (孫義定)

1986년 6월 2일생. 2005년 동의대학교 전기공학과 졸업. 현재 부산대학교 전자전기공학과 대학원 재학(석사).

Tel : (051)510-1544

Fax : (051)510-1498

E-mail : vhxmwkd2@naver.com

◆ 저자소개 ◆



아창승 (河昌昇)

1983년 10월 18일생. 2007년 부산대 공대 전자전기통신공학부 졸업. 2009년 동대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.

Tel : (051)510-1544

Fax : (051)510-1498

E-mail : cseungha@pusan.ac.kr



박지수 (朴且洙)

1952년 8월 16일생. 1982년 경남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 부산대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2005년 동대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~2008년 한국전력공사 부산사업본부 지점장. 현재 동의과학대학교 전기과 부교수.

Tel : (051)860-3203

Fax : (051)860-3327

E-mail : packcs@dit.ac.kr



이제현 (李齊賢)

1986년 9월 10일생. 2005년 동의대학교 전기공학과 졸업. 현재 부산대학교 전자전기공학과 대학원 재학(석사).

Tel : (051)510-1544

Fax : (051)510-1498

E-mail : ljh_30@naver.com



이호준 (李晷駿)

1966년 10월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부산대 공대 전자전기공학부 교수.

Tel : (051)510-2301

Fax : (051)513-0212

E-mail : hedo@pusan.ac.kr