

유연전극을 이용한 대기압 부유전극 유전체 장벽 방전 플라즈마

김준현* · 박창진** · 김창구***†

*아주대학교 나노정보기술융합연구소
16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206
**아주대학교 화학공학과, 에너지시스템학과
16499 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206
(2019년 3월 5일 접수, 2019년 3월 23일 채택)

Atmospheric Pressure Floating Electrode-Dielectric Barrier Discharges (FE-DBDs) Having Flexible Electrodes

Jun-Hyun Kim*, Chang Jin Park** and Chang-Koo Kim***†

*Institute of NT-IT Fusing Technology, Ajou University, 206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea

**Department of Chemical Engineering and Department of Energy Systems Research, Ajou University,
206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16499, Korea
(Received 5 March 2019; accepted 23 March 2019)

요 약

유연전극 기반의 대기압 부유전극 유전체 장벽 방전 (floating electrode-dielectric barrier discharge, FE-DBD) 시스템을 개발하여 플라즈마 특성을 분석하였다. 유연한 파워전극(powered electrode)을 구성하는 유연유전체로 polytetrafluoroethylene (PTFE), polydimethylsiloxane (PDMS), polyethylene terephthalate (PET)를 사용하여 플라즈마를 발생하였을 때 플라즈마의 광학적 세기와 전자온도는 파워전극에 인가하는 전압이 증가할수록 증가하였고, 전압이 일정할 때는 PTFE < PDMS < PET 순으로 증가하였다. 이는 유전체의 종류와 전압에 따른 축전용량의 변화로 설명할 수 있었고, 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD 플라즈마의 특성은 유연한 파워전극을 구성하는 유전체와 파워전극에 인가되는 전압을 변화함으로써 조절될 수 있음을 의미한다. 유연전극 대기압 FE-DBD 시스템은 피부 곡면을 따라 플라즈마가 발생될 수 있으므로 플라즈마 메디신(plasma medicine)에 유용할 것으로 기대한다.

Abstract – An atmospheric pressure floating electrode-dielectric barrier discharge (FE-DBD) system having flexible electrodes was developed and its plasma characteristics was investigated. Polytetrafluoroethylene (PTFE), polydimethylsiloxane (PDMS), and polyethylene terephthalate (PET) were used as flexible dielectrics for flexible powered-electrodes. The optical intensity and electron temperature of the atmospheric pressure FE-DBD plasma increased with the voltage applied to the powered electrode, and increased in the order of PTFE < PDMS < PET at a fixed voltage. This behavior was explained in terms of the change in the capacitance of the flexible dielectrics with the dielectric type and voltage, implying that the plasma characteristics of an atmospheric pressure FE-DBD having flexible electrodes can be controlled by modulating the flexible dielectrics for the flexible powered-electrode and the voltage applied to the powered electrode. Because an atmospheric pressure FE-DBD system can generate a plasma along the curvature of skins, it is expected to have useful applications in plasma medicine.

Key words: Atmospheric pressure floating electrode-dielectric barrier discharge, Plasma, Flexible electrode, Dielectrics, Plasma medicine

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: changkoo@ajou.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

플라즈마(plasma)는 부분적으로 이온화된 기체로 정의되며 전자(electron), 이온(ion), 아직 이온화되지 않은 중성입자로 구성된다. 플라즈마는 발생하는 압력에 따라 저압 플라즈마와 대기압 플라즈마로 나뉘어진다. 저압 플라즈마는 반도체소자, MEMS (microelectromechanical systems) 소자, 광소자와 같은 다양한 소자제조공정에서 고종횡비(high aspect ratio) 구조물을 얻기 위해 많이 사용되고 있다[1-6]. 저압 플라즈마는 플라즈마 발생이 용이하고 안정적인 반면 진공시스템의 사용이 필수적이어서 장비구축이 고가이고 복잡하다. 대기압 플라즈마는 진공장비가 필요하지 않아 시스템 구축이 저렴하며 연속공정이 가능하여 공정처리속도가 빨라서 다양한 분야에서 이용되고 있다.

최근에 대기압 플라즈마에서 발생하는 활성종인 활성산소종(reactive oxygen species, ROS)과 활성질소종(reactive nitrogen species, RNS)을 지혈, 살균, 상처치료 등에 적용하는 시도가 보고되면서 대기압 플라즈마를 생물학 또는 의학에 이용하는 소위 플라즈마 메디신(plasma medicine) 분야에 많은 관심이 모아지고 있다[7-11]. ROS는 매우 불안정하기 때문에 주위 물질들과 쉽게 반응하여 안정된 상태를 이루려는 특징이 있어 세포의 지질, 아미노산과 같은 유기 분자를 손상 및 파괴하여 살균과 소독에 효과적이다[10]. RNS는 상처 치유에 도움이 되는 사이토카인(cytokine)의 합성과 섬유아세포(fibroblast)의 증식을 촉진하여 상처 치유를 유도하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다[10].

대기압 플라즈마를 플라즈마 메디신에 적용하기 위해서는 플라즈마 발생시 생체 조직에 열 손상을 주지 않아 인체 표면에 직접 노출될 수 있는 저온 대기압 플라즈마이어야 한다. 플라즈마 메디신에 사용되는 저온 대기압 플라즈마로는 플라즈마 제트(plasma jet)와 유전체 장벽 방전(dielectric barrier discharge, DBD) 플라즈마가 대표적이다.

플라즈마 제트[12-14]는 노즐(nozzle)이 달린 반응기에 매우 빠른 속도로 기체를 주입하여 축전결합(capacitively coupled) 방식으로 플라즈마를 발생하여 분사하는 방식의 플라즈마이다. 플라즈마 제트는 다양한 가스를 사용할 수 있어 플라즈마의 화학적 변화를 조절할 수 있고, 노즐을 통해 기체가 방출되기 때문에 활성종의 플럭스(flux)가 높다. 그러나 플라즈마가 분사되는 영역이 수 mm 정도여서 처리 영역이 매우 좁고 다량의 외부 가스가 사용되어야 한다.

DBD 방식[14-17]은 두 개의 전극과 유전체로 구성된 단순한 구조이다. DBD의 한 쪽 전극에 교류(alternating current, AC) 또는 펄스(pulse) 형태의 파워를 인가하면 전극을 감싸고 있는 유전체에 전하(charge)가 축적되고 이 후 전극의 극성이 바뀌면 유전체에 축적되었던 전하가 방출되면서 전극 사이에 플라즈마가 형성된다. 특히 DBD는 파워를 인가하지 않은 접지전극을 인체 피부로 대체하여도 플라즈마가 발생하며 이를 부유전극 DBD (floating electrode-DBD, FE-DBD)[18-20]라고 한다. FE-DBD는 대기 중의 공기로도 방전이 가능하여 외부가스 주입 없이 피부 표면에서 플라즈마가 발생하고 플라즈마 발생 면적도 플라즈마 제트에 비해서 월등히 넓다.

인체 피부의 멸균과 상처 치료에 플라즈마 기술을 적용하기 위해서는 수 mm 정도의 국소 면적이 아닌 비교적 넓은 면적에서 플라즈마를 발생시켜야 하기 때문에 DBD 플라즈마가 효과적이다. 또한, 다양한 곡면을 지닌 인체 피부의 효과적인 멸균 및 상처 치료를

위해서는 DBD 전극과 인체 피부가 최대한 접촉이 잘 되도록 유연전극(flexible electrode)을 이용한 DBD 개발이 필요하다. 그러나 지금까지 보고된 DBD의 플라즈마 메디신 응용에서 유연전극을 이용한 DBD는 보고된 바가 거의 없다.

본 연구에서는 효과적인 살균 및 상처치료를 위해 피부 곡면을 따라 플라즈마가 발생할 수 있도록 유연전극 기반의 대기압 DBD 플라즈마 시스템을 개발했고, 유연전극을 구성하는 유전체의 종류에 따른 플라즈마 특성을 분석하였다. 대기압 DBD 시스템은 FE-DBD 방식이 되도록 제작하여 플라즈마가 피부에 직접 노출되도록 하였다. 플라즈마 특성으로 RNS와 ROS의 광학적 세기를 비교하였고, 이를 이용하여 전자온도(electron temperature)도 추산하여 서로 비교하였다.

2. 실험

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD 시스템의 개략도이다. FE-DBD는 파워가 인가되는 파워전극(powered electrode)과 피부로 대체된 부유전극(floating electrode)으로 구성되었다. 이 때 피부는 인체 피부와 매우 흡사한 돼지 피부가 사용되었다. 파워전극은 부유전극의 모양에 따라 구부러질 수 있는 유연전극(flexible electrode)이 되도록 유연커버(flexible cover), 금속 포일(foil), 유연유전체(flexible dielectric) 순서로 적층된 구조로 되어 있으며, 이 전극의 면적은 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 였다. 유연커버는 파워전극에 외부 전원이 공급될 때 플라즈마가 부유전극 쪽으로 발생하지 않고 반대방향으로 발생하는 것을 억제하기 위하여 사용되었는데, 5 mm 두께의 유연한 polydimethylsiloxane (PDMS)를 사용하였다. 금속은 전도성이 우수한 구리(Cu)를 사용하였으며 두께가 0.08 mm인 호일로서 잘 구부러질 수 있도록 하였다. 유연유전체는 플라즈마가 발생할 때 아크(arc)로의 전이를 억제하고 분극현상을 통해 글로우 방전(glow discharge)이 되도록 사용되었고, 유연성을 유지

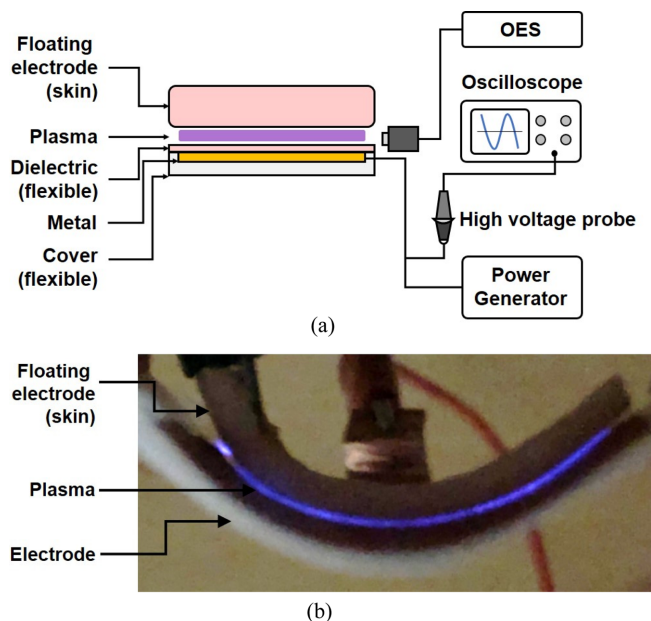


Fig. 1. (a) Schematic of the atmospheric pressure FE-DBD system having a flexible electrode. (b) Photograph of the FE-DBD plasma operating in room air.

하기 위하여 고분자를 사용하였다. 유연유전체의 종류에 따른 플라즈마 특성 차이를 파악하기 위하여 0.1 mm 두께의 polytetrafluoroethylene (PTFE), polyethylene terephthalate (PET), PDMS를 각각 유연유전체로 사용하였고, 이를 구리 필름 상부에 부착하였다.

플라즈마를 발생시키기 위한 파워 제너레이터(power generator)는 금속 호일에 연결하였으며, 25 kHz의 AC 소스를 이용하여 전압을 6~15 kV까지 조절하였다. 전압은 고전압 프로브(high voltage probe)가 장착된 오실로스코프(oscilloscope, Tektronix, TDS3034)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD 장치를 이용하여 발생한 플라즈마의 실제 사진이다. 부유전극의 구부러진 면을 따라 파워전극도 잘 구부러졌고 두 전극 사이에 균일한 플라즈마가 발생되었음을 볼 수 있다.

플라즈마는 별도의 가스를 주입하지 않고 대기 중의 공기만을 이용하여 방전하였다. 유연한 파워전극과 피부 사이에서 발생하는 플라즈마의 광학적 세기 및 라디칼(radical)의 상대적 크기는 optical emission spectroscopy(OES, GetSpec, 2048TEC)를 사용하여 얻었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 대기압 FE-DBD의 파워전극을 구성하는 유연유전체가 각각 PTFE, PDMS, PET 일 때 파워전극에 인가하는 전압에 따른 플라즈마의 OES 스펙트럼이다. 기체를 따로 주입하지 않고 대기 중에서 발생된 플라즈마는 300 nm와 450 nm 사이의 파장에서 질소 라디칼(radical) 피크(peak)가 나타나며 777 nm와 845 nm 사이의 파장에서 산소 라디칼 피크가 나타났다[21,22]. 산소 기체를 따로 주입하지 않고 플라즈마가 발생되었기 때문에 바닥상태(ground state)에서 흥분상태(excited state)로의 전이에너지가 더 낮은 질소가 산소보다 더 많은 라디칼을 생성할 수 있다. 이로 인하여 OES 스펙트럼에서 질소 피크의 세기가 산소 피크의 세기보다 컸다. 3가지 유연유전체(PTFE, PDMS, PET) 모두 전압이 증가할수록 OES 스펙트럼의 피크 세기가 증가하였다. 이를 조금 더 명확하게 관찰하기 위하여 여러 유연유전체를 사용했을 때 질소 라디칼이 나타나는 파장에서 전압에 따른 OES 스펙트럼의 피크 세기를 비교하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 OES 스펙트럼에서 가장 세기가 큰 질소 피크인 359 nm 파장의 피크 세기를 전압과 유연유전체의 종류에 따라 나타낸 그래프이다. 유연유전체로 PTFE, PDMS, PET를 사용했을 때 모두 파워전극에 인가하는 전압이 증가함에 따라서 피크 세기가

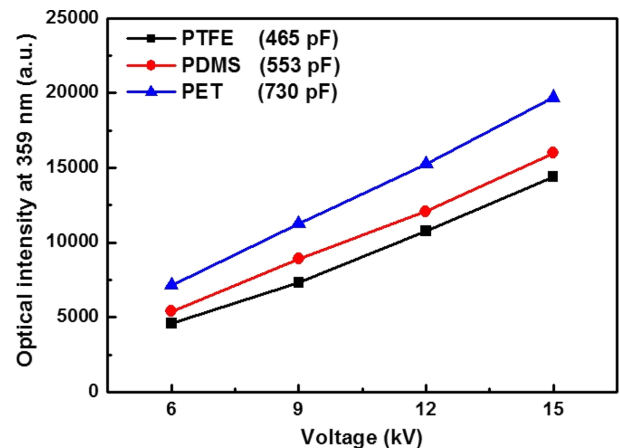


Fig. 3. Optical intensity of the atmospheric pressure FE-DBD plasma as a function of voltage applied to the powered electrode. The flexible dielectrics for the powered electrode were PTFE, PDMS, and PET, respectively.

비슷한 비율로 증가하였다. 또한 전압이 일정할 때 피크 세기는 PTFE < PDMS < PET 순으로 컸다. DBD 시스템에서 플라즈마 세기는 유전체의 축전용량(capacitance)에 비례한다고 알려져 있으며[18,23], 유전체의 축전용량은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$C = \epsilon_0 k \frac{A}{t} \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 진공의 유전율(permittivity)로 8.85×10^{-12} F/m²이고 k 는 유전체의 유전상수(dielectric constant)이다. A 와 t 는 유전체의 면적과 두께로 본 연구에서는 각각 2500 mm²와 0.1 mm였다. PTFE, PDMS, PET의 유전상수는 각각 2.1, 2.5, 3.3이며, 이를 통해 계산된 PTFE, PDMS, PET의 축전용량은 각각 465, 553, 730 pF 이었다. 따라서 전압이 일정할 때 FE-DBD 플라즈마의 OES 스펙트럼 피크 세기는 파워전극을 구성하는 유연유전체의 축전용량이 클수록 강했으며, 축전용량이 가장 큰 PET에서 피크의 세기가 가장 컸다.

DBD 플라즈마 시스템에서 외부 전원이 파워전극에 인가되면 파워전극을 구성하는 유전체의 분극현상에 의해 유전체 표면에 전자가 축적되고 음(negative) 전위가 형성된다. 이러한 현상은 메모리 전압(memory voltage)이라고 알려져 있으며 유전체의 축전용량이 클수록 표면에 축적되는 전자의 양이 증가한다[24]. 표면에 축적된 전자는 외부에서 인가되는 전원에 의하여 형성되는 전기장에서 가

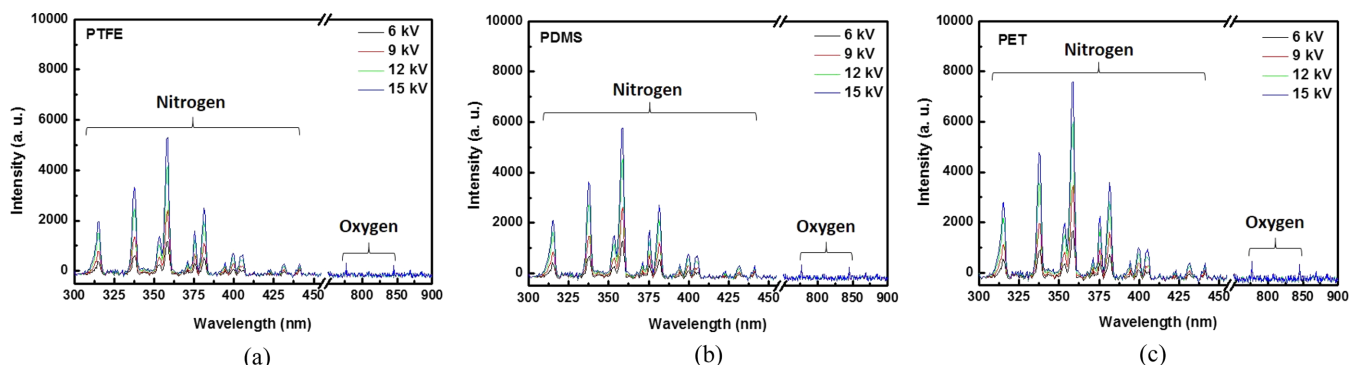


Fig. 2. OES spectra of the atmospheric pressure FE-DBD plasmas having flexible dielectrics of (a) PTFE, (b) PDMS, and (c) PET. The voltage applied to the powered electrode was varied from 6 to 15 kV.

속되어 대기 중의 기체와 충돌하고 충돌한 기체가 여기, 해리, 이온화되어 플라즈마가 발생된다.

본 연구에서 사용된 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD에서 발생된 플라즈마는 파워전극을 구성하는 유연유전체의 종류와 파워전극에 인가되는 전압에 따라 플라즈마 세기가 달라졌고 이는 각 경우에서 전자 에너지 차이가 있음을 의미한다. 일반적으로 전자의 에너지는 전자온도(electron temperature)로 나타내며, 전자온도가 클수록 기체 분자 혹은 원자에 전달되는 에너지가 크기 때문에 기체의 해리도가 증가하고 그로 인해 활성종의 생성이 많아진다고 알려져 있다 [25,26]. 저압 플라즈마에서는 일반적으로 랭뮤어 탐침(Langmuir probe)을 이용하여 전자온도를 직접 측정한다. 그러나 대기압 플라즈마에서는 입자간 충돌수가 많기 때문에 랭뮤어 탐침을 이용한 전자온도 측정은 불가능하다[27]. 대기압 플라즈마에서는 탐침을 이용한 직접적인 측정이 아닌 간접적인 방법으로 전자온도를 계산하는데, Boltzmann plot 방법이 대표적이다. Boltzmann plot 방법은 분광학적 측정법을 이용한 전자온도 계산 방법으로, 플라즈마에서 방출되는 빛의 스펙트럼 중 비교적 큰 에너지 차이를 갖는 둘 이상의 스펙트럼의 상대적 세기를 이용하여 전자온도를 계산하는 방법이다[27,28]. 즉, 플라즈마에서 여기되어 상위 에너지 준위로부터 하위 에너지 준위로 전이되어 방출하는 빛의 파장과 세기를 이용한 방법으로 분광학적 측정법으로 전자온도를 계산하기 위한 Boltzmann plot은 식 (2)를 통해 얻는다.

$$\ln\left(\frac{\lambda_{ki} I_{ki}}{A_{ki} g_k}\right) = -\frac{E_k}{kT_e} + C \quad (2)$$

여기서 λ_{ki} 와 I_{ki} 는 각각 상위 에너지 준위 k 에서 하위 에너지 준위 i 로 전이될 때 방출되는 빛의 파장과 세기이다. A_{ki} 는 에너지 준위 k 에서 에너지 준위 i 로 전이될 때 전이 확률(transition probability), g_k 는 에너지 준위 k 에서의 통계 가중치(statistical weight)이다. 전이 확률 A_{ki} 와 통계 가중치 g_k 는 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 제시한 값을 사용하였다[29,30]. E_k 는 여기된 상위 에너지 준위, k 는 볼츠만 상수(1.38×10^{-23} J/K), T_e 는 전자온도, C 는 상수이다.

Fig. 4는 대기압 FE-DBD의 파워전극을 구성하는 유연유전체가 각각 PTFE, PDMS, PET 일 때 여러 전압에서 발생한 플라즈마의 Boltzmann plot이다. Boltzmann plot은 FE-DBD 플라즈마의 OES 스펙트럼에서 질소에 해당하는 317.7, 340.8, 345.1, 359.4, 367.6, 377.6, 383.0, 393.0, 397.7, 404.7, 431.9, 441.3 nm 파장의 피크를

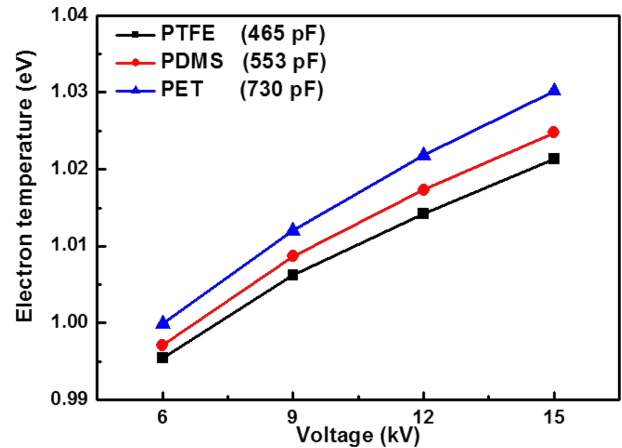


Fig. 5. Electron temperature of the atmospheric pressure FE-DBD plasma as a function of voltage applied to the powered electrode. The flexible dielectrics for the powered electrode were PTFE, PDMS, and PET, respectively.

분리하여 식 (2)로 계산하여 얻었다. Fig. 4의 추세선의 기울기로부터 전자온도를 얻을 수 있는데, 모든 추세선의 회귀계수(regression coefficient)는 0.92 이상으로 신뢰도가 높았다.

Fig. 5는 대기압 FE-DBD 파워전극의 유연유전체를 달리 하였을 때 파워전극에 인가하는 전압에 따른 플라즈마의 전자온도를 나타낸다. 3가지 유연유전체(PTFE, PET, PDMS) 모두 전압이 6 kV에서 15 kV까지 증가함에 따라 전자온도가 1 eV 부근에서 3~5% 정도 미세하게 증가하였다. 이는 전극의 구조와 공정조건에서 다소 차이가 있기는 하지만 DBD 시스템에서 6~12 kV 전압으로 질소 플라즈마를 방전 시 전자온도가 1~2 eV 정도이고 전압에 따른 전자온도의 변화가 미미하다는 보고와 비슷하다[30-32]. 한편, 전압이 일정할 때 플라즈마의 전자온도는 PTFE < PDMS < PET 순으로 커졌는데 이는 Fig. 3에서 나타낸 OES 스펙트럼의 질소 피크(359 nm)의 세기 변화 순서와 같다. 즉, 일정 전압에서 대기압 FE-DBD 플라즈마의 전자온도는 파워전극을 구성하는 유연유전체의 축전용량이 클수록 증가하였다. 축전용량이 커질수록 메모리 전압이 더욱 크게 형성되어 전기장의 세기가 증가하는 것으로 알려져 있다[31,33]. 따라서 파워전극을 구성하는 유연유전체의 축전용량이 클수록 플라즈마의 전자온도가 증가하였다. 이는 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD에서 파워전극을 구성하는 유연유전체와 파워전극에 인가하는 전압을 조절함으로써 플라즈마 특성을 변화할 수 있음을 의미한다.

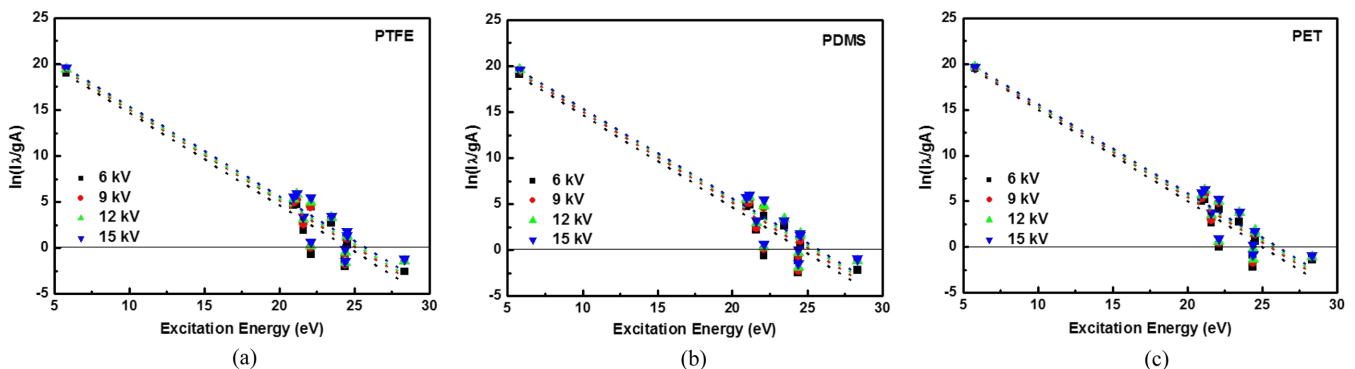


Fig. 4. Boltzmann plots of the atmospheric pressure FE-DBD plasmas having flexible dielectrics of (a) PTFE, (b) PDMS, and (c) PET. The voltage applied to the powered electrode was varied from 6 to 15 kV.

4. 결 론

효과적인 살균 및 상처치료를 위하여 피부 곡면을 따라서 플라즈마가 발생될 수 있는 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD 플라즈마 시스템을 개발하였고, 유연전극을 구성하는 유전체의 종류에 따른 플라즈마 특성을 분석하였다. 기체를 따로 주입하지 않고 대기 중에서 발생된 플라즈마의 OES 스펙트럼은 질소와 산소 라디칼 피크를 나타냈으며 질소 라디칼 피크의 세기가 산소 라디칼 피크의 세기보다 컸다. 파워전극에 인가하는 전압이 증가할수록 유전체로 PTFE, PDMS, PET를 사용했을 때 모두 OES 스펙트럼의 피크 세기가 증가하였다. 전압이 일정할 때 피크 세기는 PTFE < PDMS < PET 순으로 커졌는데 이는 유전체의 축전용량이 PTFE < PDMS < PET 순으로 커졌기 때문이었다. OES 스펙트럼을 이용하여 Boltzmann plot 방법으로 플라즈마의 전자온도를 계산하였고 이 역시 PTFE < PDMS < PET 순으로 증가하였다. 이는 FE-DBD의 파워전극을 구성하는 유연유전체의 축전용량이 클수록 메모리 전압이 더욱 크게 형성되고 전기장의 세기가 증가하여 플라즈마의 전자온도가 증가하였기 때문이었다. 이 연구를 통하여 유연전극 기반의 대기압 FE-DBD에서 파워전극을 구성하는 유연유전체와 파워전극에 인가하는 전압을 조절하여 플라즈마 특성이 변화될 수 있음이 제시되었다.

감 사

이 연구는 한국연구재단의 중견연구지원사업(과제번호 2018 R1A2B6002410)과 경기도의 경기도 지역협력연구센터사업(GRRC 아주2016B03, 광-의료 융합기술 연구센터)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Schaepkens, M., Oehrlein, G. S., Hedlund, C., Jonsson, L. B. and Blom, H. O., "Selective SiO₂-to-Si₃N₄ Etching in Inductively Coupled Fluorocarbon Plasmas: Angular Dependence of SiO₂ and Si₃N₄ Etching Rates," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **16**, 3281-3286(1998).
- Kim, J.-H., Cho, S.-W., Park, C. J., Chae, H. and Kim, C.-K., "Angular Dependences of SiO₂ Etch Rates at Different Bias Voltages in CF₄, C₂F₆, and C₄F₈ Plasmas," *Thin Solid Films*, **637**, 43-48(2017).
- Cho, S.-W., Kim, C.-K., Lee, J.-K., Moon, S. H. and Chae, H., "Angular Dependences of SiO₂ Etch Rates in C₄F₆/O₂/Ar and C₄F₆/CH₂F₂/O₂/Ar Plasmas," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **30**, 051301-1-051301-6(2012).
- Lee, T. H., Lim, B. R., Yong, K. J., Kwon, W. S. and Park, M. W., "Effects of Oxygen Plasma Generated in Magnetron Sputtering of Ruthenium Oxide on Pentacene Thin Film Transistors," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 2502-2506(2017).
- Ji, S. H., Jang, W. S., Son, J. W. and Kim, D. H., "Characteristics of NiO Films Prepared by Atomic Layer Deposition Using Bis(ethylcyclopentadienyl)-Ni and O₂ Plasma," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 2474-2479(2018).
- Choi, J. H., Kim, S. J., Kim, H. T. and Cho, S. M., "Damage to Amorphous Indium-Gallium-Zinc-Oxide Thin Film Transistors under Cl₂ and BCl₃ Plasma," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**, 1348-1353(2018).
- Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N. and Fridman, A., "Applied Plasma Medicine," *Plasma Process. Polym.*, **5**, 503-533(2008).
- Ehlbeck, J., Schnabel, U., Polak, M., Winter, J., von Woedtke, T., Brandenburg, R., von dem Hagen, T. and Weltmann, K.-D., "Low Temperature Atmospheric Pressure Plasma Sources for Microbial Decontamination," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 013002-1-013002-18(2011).
- Graves, D. B., "The Emerging Role of Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Redox Biology and Some Implications for Plasma Applications to Medicine and Biology," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45**, 206330-1-206300-1-42(2012).
- Xiong, Z., Roe, J., Grammer, T. C. and Graves, D. B., "Plasma Treatment of Onychomycosis," *Plasma Process. Polym.*, **13**, 588-597(2016).
- Weltmann, K.-D. and von Woedtke, T., "Plasma Medicine – Current State of Research and Medical Application," *Plasma Phys. Control. Fusion*, **59**, 014031-1-014031-11(2017).
- Kolb, J. F., Mohamed, A. -A., Price, R. O., Swanson, R. J., Bowman, A., Chiavarini, R. L., Stacey, M. and Schoenbach, K. H., "Cold Atmospheric Pressure Air Plasma Jet for Medical Applications," *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 241501-1-241501-3(2008).
- Lu, X. P., Jiang, Z. H., Xiong, Q., Tang, Z. Y. and Pan, Y., "A Single Electrode Room-Temperature Plasma Jet Device for Biomedical Applications," *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 151504-1-151504-3(2008).
- Lee, H. W., Nam, S. H., Mohamed, A. H. Kim, G. C. and Lee, J. K., "Atmospheric Pressure Plasma Jet Composed of Three Electrodes: Application to Tooth Bleaching," *Plasma Process. Polym.*, **7**, 274-280(2010).
- Kogelschatz, U., "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications," *Plasma Chem. Plasma Process.*, **23**, 1-46(2003).
- Pavlovich, M. J., Chen, Z., Sakiyama, Y., Clark, D. S. and Graves, D. B., "Effect of Discharge Parameters and Surface Characteristics on Ambient-Gas Plasma Disinfection," *Plasma Process. Polym.*, **10**, 69-76(2013).
- Pei, X., Liu, J., Xian, Y. and Lu, X., "A Battery-Operated Atmospheric-Pressure Plasma Wand for Biomedical Applications," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 145204-1-145204-6(2014).
- Fridman, G., Peddinghaus, M., Ayan, H., Fridman, A., Balasubramanian, M., Gutsol, A., Brooks, A. and Friedman, G., "Blood Coagulation and Living Tissue Sterilization by Floating-Electrode Dielectric Barrier Discharge in Air," *Plasma Chem. Plasma Process.*, **26**, 425-442(2006).
- Fridman, G., Shereshevsky, A., Jost, M. M., Brooks, A. D., Fridman, A., Gutsol, A., Vasilets, V. and Friedman, G., "Floating Electrode Dielectric Barrier Discharge Plasma in Air Promoting Apoptotic Behavior in Melanoma Skin Cancer Cell Lines," *Plasma Chem. Plasma Process.*, **27**, 163-176(2007).
- Babaeva, N. Y. and Kushner, M. J., Intracellular Electric Fields Produced by Dielectric Barrier Discharge Treatment of Skin, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 185206-1-185206-12(2010).
- Walsh, J. L., Liu, D. X., Iza, F., Rong, M. Z. and Kong, M. G., "Contrasting Characteristics of Sub-microsecond Pulsed Atmospheric Air and Atmospheric Pressure Helium-Oxygen Glow Discharge," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 032001-1-032001-7(2010).
- Baroch, P., Saito, N. and Takai, O., "Special Type of Plasma Dielec-

- tric Barrier Discharge Reactor for Direct Ozonization of Water and Degradation of Organic Pollution," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 085207-1-085207-6(2008).
23. Ozkan, A., Dufour, T., Bogaerts, A. and Reniers, F., "How Do the Barrier Thickness and Dielectric Material Influence the Filamentary Mode and CO₂ Conversion in a Flowing DBD?," *Plasma Sources Sci. Technol.*, **25**, 045016-1-045016-11(2016).
 24. Valdivia-Barrientos, R., Pacheco-Sotelo, J., Pacheco-Pacheco, M., Benítez-Read, J. S. and López-Callejas, R., "Analysis and Electrical Modelling of a Cylindrical DBD Configuration at Different Operating Frequencies," *Plasma Sources Sci. Technol.*, **15**, 237-245(2006).
 25. Bose, D., Rauf, S., Hash, D. B., Govindan, T. R. and Meyyappan, M., "Monte Carlo Sensitivity Analysis of CF₂ and CF Radical Densities in a c-C₄F₈ Plasma," *J. Vac. Sci. Technol. A*, **22**, 2290-2298 (2004).
 26. Itagaki, N., Iwata, S., Muta, K., Yonesu, A., Kawakami, S., Ishii, N. and Kawai, Y., "Electron-Temperature Dependence of Nitrogen Dissociation in 915 MHz ECR Plasma," *Thin Solid Films*, **435**, 259-263(2003).
 27. Ohno, N., Razzak, M. A., Ukai, H., Takamura, S. and Uesugi, Y., "Validity of Electron Temperature Measurement by Using Boltzmann Plot Method in Radio Frequency Inductive Discharge in the Atmospheric Pressure Range," *Plasma and Fusion Research*, **1**, 028-1-028-9(2006).
 28. Xiao, D., Cheng, C., Shen, J., Lan, Y., Xe, H., Shu, X., Meng, Y., Li, J. and Chu, P. K., "Characteristics of Atmospheric-Pressure Non-Thermal N₂ and N₂/O₂ Gas Mixture Plasma Jet," *J. Appl. Phys.*, **115**, 033303-1-033303-10(2014).
 29. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>.
 30. Camacho, J. J., Poyato, J. M. L., Díaz, L. and Santos, M., "Optical Emission Studies of Nitrogen Plasma Generated by IR CO₂ Laser Pulses," *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, **40**, 4573-4590(2007).
 31. Kim, J. H., Choi, Y. H. and Hwang, Y. S., "Electron Density and Temperature Measurement Method by Using Emission Spectroscopy in Atmospheric Pressure Nonequilibrium Nitrogen Plasmas," *Physics of Plasmas*, **13**, 093501-1-093501-7(2006).
 32. Hong, Y., Niu, J., Pan, J., Bi, Z., Ni, W., Liu, D., Li, J. and Wu, Y., "Electron Temperature and Density Measurement of a Dielectric Barrier Discharge Argon Plasma Generated with Tube-to-Plate Electrodes in Water," *Vacuum*, **130**, 130-136(2016).
 33. Mangolini, L., Anderson, C., Heberlein, J. and Kortshagen, U., "Effects of Current Limitation through the Dielectric in Atmospheric Pressure Glows in Helium," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 1021-1030(2004).