

## 헬륨 대기압 유전체 격벽 방전기의 타운젠트-글로우 방전 모드 전이 연구

배병준\* · 김남균\* · 윤성영\*\* · 신준섭\* · 김곤호†

\*서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

\*\*국가핵융합연구소 플라즈마기술연구센터

### Observation of Discharge Mode Transient from Townsend to Glow at Breakdown of Helium Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge

Byeongjun Bae\*, Nam-Kyun Kim\*, Sung-Young Yoon\*\*, Jun-Seop Shin\* and Gon-Ho Kim†

\*†Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

\*\*Plasma Technology Research Center, National Fusion Research Institute, Gunsan 54004, Korea

#### ABSTRACT

The Townsend to glow discharge mode transition was investigated in the dielectric barrier discharge (DBD) helium plasma source which was powered by 20 kHz / 4.5 kV<sub>rms</sub> high voltage at atmospheric pressure. The spatial profile of the electric field strength at each modes was measured by using the intensity ratio method of two helium emission lines (667.8 nm ( $3^1D \rightarrow 2^1P$ ) and 728.1 nm ( $3^1S \rightarrow 2^1P$ )) and the Stark effect. ICCD images were analyzed with consideration for the electric field property. The Townsend discharge (TD) mode at the initial stage of breakdown has the light emission region located in the vicinity of the anode. The electric field of the light emitting region is close to the applied field in the system. Immediately, the light emitting region moves to the cathode and the discharge transits to the glow discharge (GD) mode. This mode transition can be understood with the ionization wave propagation. The electric field of the emitting region of GD near cathode is higher than that of TD near anode because of the cathode fall formation. This observation may apply to designing a DBD process system and to analysis of the process treatment results.

**Key Words** : Atmospheric pressure dielectric barrier discharge, Townsend discharge, Glow discharge, Mode transition

### 1. 서 론

대기압 유전체 격벽 방전(DBD)은 대기압 조건에서 플라즈마 생성이 용이하고 넓은 표면 처리나 생물학적 살균 등에 필요한 생화학 활성종의 생성이 유리하여 환경 및 바이오와 농업 응용 분야에서 많이 활용되고 있다[1-2]. DBD는 직류 전류가 통하지 않는 유전체를 전극 사이에 놓아 방전이 아크로 전이되는 것을 막는 구조로 고전압을 인가하여 비교적 낮은 전류밀도의 플라즈마를 형성시킨다. 유전체가 있어 방전을 위해서 AC 및 RF 전압을 이용하므로 방전 플라즈마는 생성과

소멸을 반복하게 된다. 생성된 플라즈마는 기체 분자 및 원자에 에너지를 전달하여 다양한 활성입자들을 만들 수 있으며 타겟 시료의 표면에 전하와 전기장 및 UV를 제공하여 처리 효율을 높이게 된다. 따라서 DBD 플라즈마를 이용한 처리 시스템의 효율적 개발 및 운용을 위해서는 방전 주기 내의 플라즈마 생성 기전에 대한 이해는 필수적이다.

DBD 방전은 양극 부근에서 빛을 발하는 영역이 나타나는 타운젠트 방전(Townsend discharge: TD)에서 음극 부근에서 빛을 발하는 글로우 방전(Glow discharge: GD)으로 방전 모드가 전이한다고 알려져 있다 [3]. Martens [4]의 연구는 전류가 증가하면서 TD 모드에서 GD 모드로 전이가 일어날 수 있음을 보였다.

†E-mail : ghkim@snu.ac.kr

Jiang [5]은 방전 모드 전이가 인가 주파수 조건에 영향을 받을 수 있음을 예상하였다. 이들 연구로부터 DBD 방전이 TD에서 개시되어 GD로 전이하면서 안정화되는 과정이 있음을 알 수 있다. 하지만 이 모드의 전이는 매우 빠르게 진행되어 실제 관측하기는 어려움이 많았으며 각 모드의 특성 해석에 필요한 실험 결과가 많지 않다.

본 연구에서는 DBD 방전 특성을 살펴보기 위해 전극 간 공간 내 시간에 따라 얻은 빛 발광 분포 이미지와 광진단계로 측정된 전기장 분포를 통해 각 방전 모드 특성을 해석하였다. 이를 통해 헬륨 DBD 방전에서 방전 모드의 전이에 필요한 인자를 정의하고 각 인자의 특성이 어떻게 변화되고 유지되는가에 대하여 논의하였다.

## 2. 실험 장치

Fig. 1은 플라즈마 방전 시스템의 개략도이다. 상부 와 하부 전극은 반경 4.0 cm의 원판형 구리 전극이며 1.0 mm 두께의 알루미늄( $Al_2O_3$ ,  $\epsilon_r=9.8$ ) 유전체로 덮여 있다. 유전체 간 거리, 즉 방전 공간 높이는 4 mm 이다. 반응기는 로터리 펌프를 이용해 약  $3 \times 10^{-2}$  Torr의 기저 압력에서 헬륨( $N_50$ , 99.999%) 기체로 대기압 760 Torr에 맞추어 운전 압력 조건을 설정하였다. 운전 압력 설정 후 반응기는 외부와 고립 상태를 유지하였다. 헬륨은 준안정상태로서  $2^3S(19.82 \text{ eV})$ 와  $2^1S(20.62 \text{ eV})$

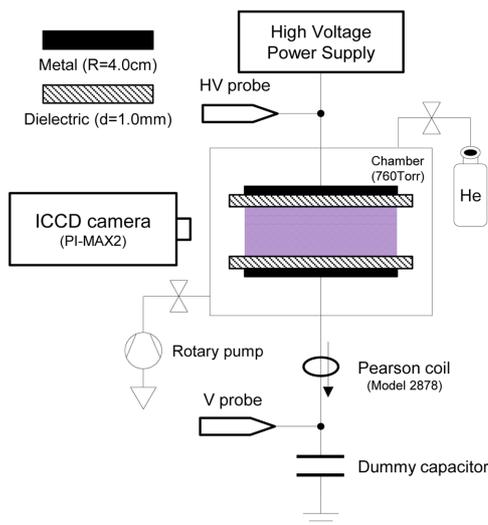


Fig. 1. Schematic of a helium atmospheric Pressure DBD system.

여기 상태가 비교적 오래 유지되므로 이 상태의 원자가 이온화에 참여하는 페닝 이온화(Penning ionization)와 단계 이온화(step ionization)가 일어날 수 있어 준안정상태의 헬륨은 방전에 중요한 인자가 된다. 또한 다원자 분자의 해리 현상이나 전기음성도에 따른 전자 부착(electron attachment) 현상이 없어 비교적 낮은 전기장에서 방전이 일어나는 특징이 있다.

전력은 상부 전극에 인가되며 고전압 인가 전 원 장치로 운전 주파수 20 kHz, 인가 전압 4.5 kV<sub>rms</sub>인 사각파 형태의 전압을 인가하였다. 하부 전극은 플라즈마 방전에서 만들어지는 전류를 측정하기 위해 22 nF의 커패시터를 직렬 연결하였다. 상부 전극에 인가되는 전압은 1000:1 고전압 프로브(Tektronix P6015A), 직렬 커패시터의 전압은 10:1 전압 프로브 (Tektronix P2220) 그리고 전류 측정은 피어슨 코일(Pearson No. 2878)을 사용하였고 이들 신호는 모두 오실로스코프(Tektronix DPO7104)를 통해 계측하였다. 측정된 신호 샘플은 Fig. 2에 나타내었다.

방전 시스템은 직렬 회로로 구성되어 있으므로 플라즈마 방전을 통해 제공되어 전극 유전체에 축적되는 하전량의 크기는 직렬 커패시터의 전하량과 같다. 전하량 Q는 직렬 커패시터에서 측정된 전압 V와 커패시터의 정전 용량 C로부터 계산할 수 있다. 방전으로부터 유전체에 축적된 전자의 일부는 유전체 내부 전도대(conduction band)에 표면 전자 층(Electron surface layer: ESL) [6]을 구성하고 방전 공간에 전기 포텐셜을 형성하여 메모리 효과를 유발한다. 따라서 방전 공간 전압, 즉 유전체 사이 공간에 형성되는 공간 전압  $V_{gap}$ 은 인가 전압과 방전 장치에 축적된 전하에 의해 형성되는 전기 포텐셜의 차이 값으로써 정의하고 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

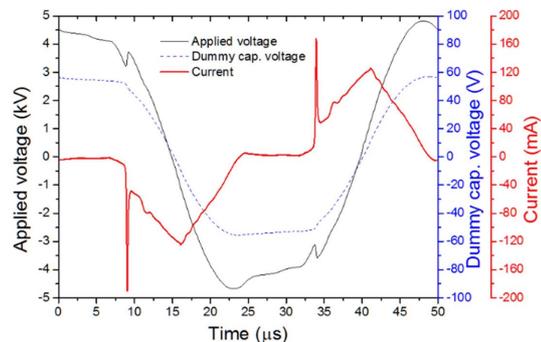


Fig. 2. Measured voltage and current signals; Applied voltage, voltage across a dummy capacitor and total electric current.

$$V_{\text{gap}} = V_{\text{applied}} - (2V_{\text{die}} + V_{\text{dummy}}) \quad (1)$$

위 식에서  $V_{\text{gap}}$  은 방전 공간 전압,  $V_{\text{applied}}$  는 인가 전압,  $V_{\text{die}}$  는 유전체에 인가되는 전압 그리고  $V_{\text{dummy}}$  는 직렬 커패시터에 인가된 전압을 각각 의미한다. 유전체는 두 개 전극에 각각 존재하므로  $V_{\text{die}}$ 의 두 배가 총 유전체에 인가되는 전압이다. 유전체에 인가되는 전압은 유전체를 평행판 축전기로 가정하면 정전 용량의 정의에 따라 아래 식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$V_{\text{die}} = \frac{C_{\text{dummy}} V_{\text{dummy}}}{C_{\text{die}}} \quad (2)$$

위 식에서  $C_{\text{dummy}}$  는 직렬 커패시터의 정전 용량,  $C_{\text{die}}$  는 평행판 축전기로 가정한 유전체의 정전 용량이다. 유전체의 정전 용량은 평행판 축전기의 정전 용량 계산식을 통해 아래 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$C_{\text{die}} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d_{\text{die}}} \quad (3)$$

위 식에서  $\epsilon_r$  은 유전체의 상대 유전율,  $\epsilon_0$  은 진공에서의 유전율,  $A$  는 방전 면적 그리고  $d_{\text{die}}$  는 유전체 두께를 각각 의미한다. Fig. 3에 측정된 인가 전압, 전류와 함께 계산한 방전 공간 전압을 나타내었다. 공간 전하 밀도가 낮아 전기장에 영향이 크게 없을 경우 전압이 인가되는 거리를 알면 공간 전압에 의한 공간 전기장 크기를 계산할 수 있다.

짧은 시간 동안의 이미지와 스펙트럼을 측정하기 위해 인가 전압 신호와 동기화시킨 ICCD 카메라(PI-MAX2)와 모노크로메터(SP-2500i)를 사용하였으며 카메라의 'gate width'는 0.1 us로 설정하였다.

방전 공간의 전기장은 플라즈마에서 방출되는 빛 신호를 이용해 측정하였으며 공간 분포 측정을 위해 약 100 um의 해상도를 갖는 렌즈 배열을 사용하였다(Fig. 4).

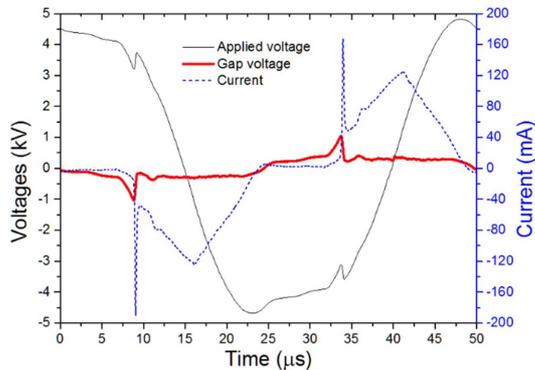


Fig. 3. Calculated gap voltage with measured applied voltage and current.

플라즈마에서 방출되는 빛은 주로 전기장에 의해 가속된 전자 충돌로 인해 원자 및 분자에서 방출되는 것이므로 측정된 빛 세기는 외부 전기장 세기에 의존하게 된다. 헬륨 대기압 플라즈마 내부 전기장은 두 개의 헬륨 원자 여기 방출 신호 667.8 nm ( $3^1D \rightarrow 2^1P$ )와 728.1 nm ( $3^1S \rightarrow 2^1P$ ) 파장의 빛 세기를 비교함으로써 계산할 수 있다[7]. 빛 세기의 비율을 사용하는 방법은 전자 밀도에 의한 의존성을 배제할 수 있는 장점이 있다. Ivković [7]의 모델을 차용하면 헬륨 대기압의 상온 조건에서 빛 세기 비율에 따른 전기장의 산출 수식은 아래와 같다.

$$E(\text{kV/cm}) = 2.224 - 20.18R + 45.07R^2 - 19.98R^3 + 3.369R^4 \quad (5)$$

위 식에서 E는 전기장, R은 728.1 nm 파장에 대한 667.8 nm 파장의 빛 세기 비율을 각각 의미한다.

빛 세기 비교법을 통한 전기장 측정 은 측정기기의 파장 별 측정 민감도를 보정해 주어야 하므로 민감도를 정확히 산출해야만 한다. 따라서 빛 세기 비교법을 이용한 전기장 측정 결과는 측정기와 상관 없는 물리적 현상을 이용하는 절대적 전기장 측정법을 통한 결과와 비교가 필요하며 본 연구에서는 전기장에 따라 원자 에너지 상태가 갈라지는 슈타르크 효과(Stark effect)를 통해 비교 데이터를 산출하였다. 헬륨 원자의 492.2 nm 파장의 빛 신호는 4d  $^1D$  에너지 상태에서 2p  $^1P^0$  에너지 상태로의 허용 전이 및 신호와 4f  $^1F$  에너지 상태에서 2p  $^1P^0$  에너지 상태로의 일부 금지 전이 및 신호로 구성된다. 이때 상위 에너지 상태인 4d  $^1D$ 와 4f  $^1F$ 는 외부 전기장이 존재하면 상호 간 에너지가 변동하며, 492.2 nm 빛 신호의 벌어짐 효과로 나타난다(Fig. 5). Kuraica [8-9]의 모델에 따르면 전기장과 헬륨의 492.2 nm 파장의 벌어짐 정도는 다음의 함수 관계로 나타난다.

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = 1.87 \times 10^{-5} E^3 + 8.8 \times 10^{-4} E^2 + 1.4 \times 10^{-3} E + 0.1316 \quad (4)$$

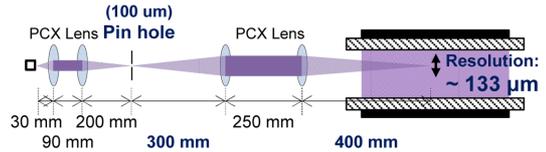


Fig. 4. A set of lenses focusing on a point for measurement of emitted light from a small region.

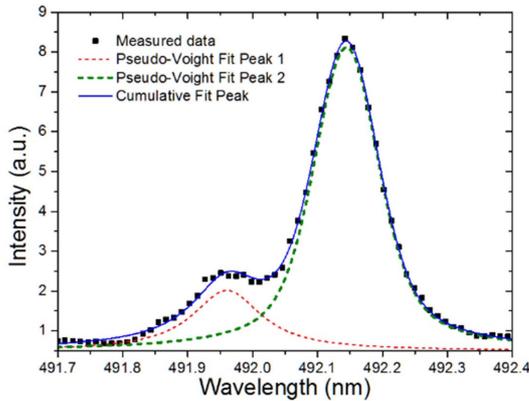


Fig. 5. Helium 492.2 nm line profile; measured intensity (dot), fitted intensity as allowed radiative decay (large dash line), fitted intensity as forbidden radiative decay (small dash line) and cumulative fitted intensity (solid line).

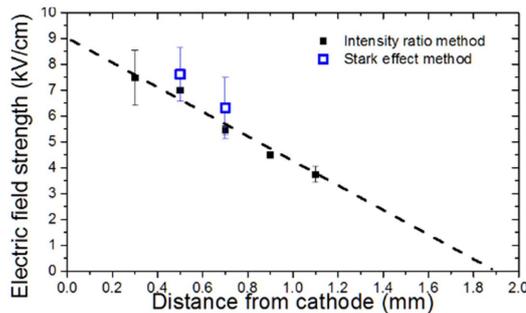


Fig. 6. Measured electric field strength by using two methods; intensity ratio method and Stark effect method.

위 식에서  $E$ 는 kV/cm 단위의 전기장,  $\Delta\lambda$ 는 헬륨 492.2 nm 의 허용 천이와 금지 천이 빛 신호 간 파장 차이를 각각 나타낸다. Fig. 6은 빛 세기 비교법과 슈타르크 진단법으로 측정된 전기장 비교 결과이다. 슈타르크 진단법으로 측정된 전기장이 빛 세기 비교법으로 측정된 전기장과 동일 위치에서 허용 범위 내 일치하는 값을 나타내므로 본 실험에서 사용한 빛 신호 측정기는 빛 세기 비교법을 통한 전기장 분포가 가능하다.

### 3. 실험 결과 및 해석

Fig. 7은 상부 전극이 음극, 하부 전극이 양극인 조건의 전류 피크 동안 ICCD 카메라를 이용해 0.1 us 시간 간격으로 방전 공간 방출 빛을 측정된 결과와 그 때의 전류 및 방전 공간 전압이다.

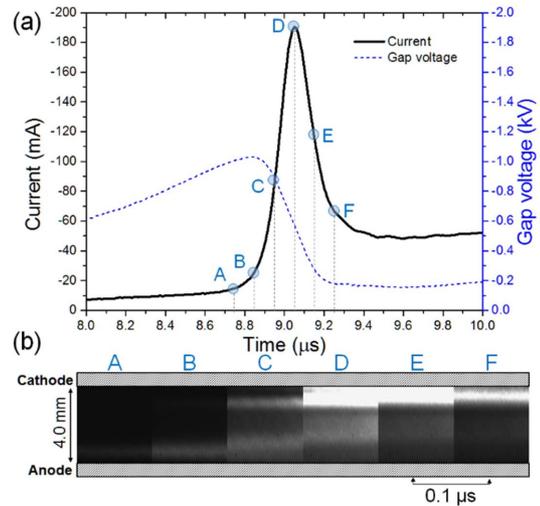


Fig. 7. Spatial-temporal distribution of light emission during the first sharp current peak for 0.1 us time interval.

초기 A ~ B 지점 이전에서 미약하게 상승하는 전류는 방전 공간 전압이 시간에 따라 증가함으로 나타나는 변위 전류와 공간 내 자유 전자의 가속으로 인한 전자 사태가 만드는 전류이다. 이 영역에서는 공간에 존재하던 전자가 외부 전기장에 의해 평균자유행정거리 동안 이온화 에너지 이상의 에너지를 얻어 중성입자를 이온화시키며 진행해 전자 사태가 일어난다. 이때의 방전은 전자 공급원이 없어 스스로 유지(self-sustain)되지 않고 전체적인 전자 밀도가 낮은 전류가 형성된다. 특히 전자들이 가속을 받아서 형성되는 방전으로 양극 근방에서 방전이 심화되어 양극 부근에서 빛 방출 영역이 존재하는 것이 관측된다. B 지점에서의 빛 세기 공간 분포는 Fig. 8(a)에 나타내었다. 음극 부근에 비해 양극 부근에서 밝은 빛이 나타나며 양극 부근의 빛으로부터 전기장을 측정된 결과는 Fig. 8(b)에 나타내었다. B 지점에서는 양극으로 갈수록 이온화로 인한 전하들로 인해 전기장이 일부 줄어드나 외부 전기장을 왜곡시킬 만큼의 공간 전하 밀도가 형성되지 않은 특징을 보였으며, 크기가 3 ~ 4 kV/cm으로 방전 공간에 전기장이 균일하게 분포하고 있음을 보여준다.

Fig. 7(a)에서와 같이 B지점에서의  $V_{gap}$ 은 약 1.1 kV의 최대값을 가지고 이후 급격히 감소한다. 이 전압을 전극 거리 4 mm 로 나누면 약 3 kV/cm의 전기장이 인가된 것으로 예상되고, 이는 Fig. 8에서 보여주는 측정값과 유사하다. 3 ~ 4 kV/cm의 전기장 값은 헬륨의

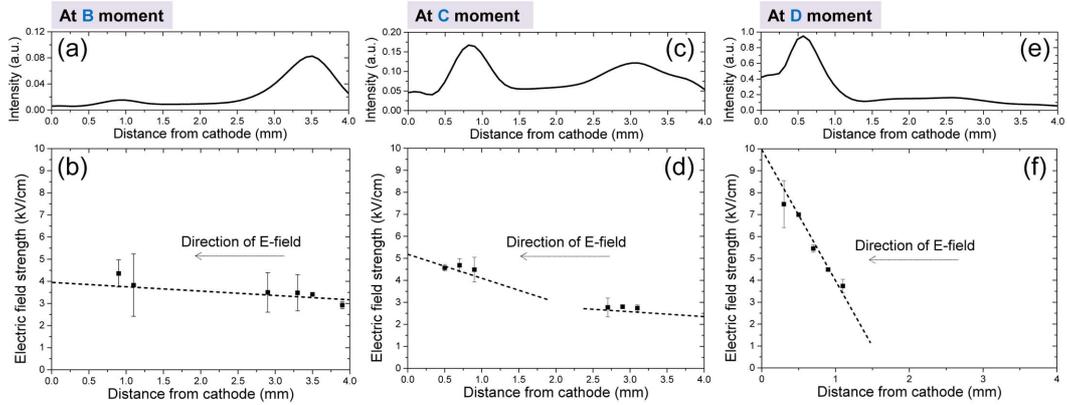


Fig. 8. Intensity and electric field distribution for b, c, d moments of Fig. 7.

유전 강도(dielectric strength) [10-11]인 약 5 kV/cm 보다 작게 나타나며 이는 유전체 ESL 내의 하전 전자들과 이전 방전에서 생성된 헬륨 준안정종(metastable)이 다음 방전까지 살아남아 단계 이온화(step ionization)가 가능하여 보다 낮은 전기장에서 방전이 일어날 수 있음을 보여준다. 본 방전기에서는 플라즈마가 소멸하고 다음 방전이 일어나기까지 약 9  $\mu$ s가 소요되는데 (Fig. 3) 주로 헬륨의 삼체 충돌(three-body collision:  $\text{He}^m + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$ )에 의해 결정되는 대기압 조건에서의 헬륨 준안정종의 수명(e-folding lifetime) [12]은 약 5.8  $\mu$ s 이므로 이전 방전에서 생성된 준안정종 중 약 21%가 다음 주기 방전 개시에 영향을 줄 수 있다.

방전 공간 전압이 떨어지기 시작하고 전류가 급격히 증가하는 C 지점이 되면 양극에서의 빛은 중심 영역으로 보다 이동하고 음극에서도 빛이 방출되는 영역이 존재하며 양극 쪽에 비해 더 밝아지는 분포를 갖는다 (Fig. 8(c) 참고). 이는 모드 전이가 일어나고 있음을 보여주는 결과로서 양극에서 개시된 이온들이 음극으로 이동을 하며 플라즈마를 만들고 이온들 충돌로부터 ESL에서 이차전자가 방출되기 시작하며 음극 쪽에서 플라즈마 형성이 심화되는 과정이다. 이 전이 과정을 통해 음극 쪽 플라즈마는 점차 심화가 되어서 Fig. 8(d)에서 보여주듯이 음극 근처 전기장이 왜곡되기 시작한다. 이는 음극 부근에서 이온화가 활발히 진행되어 공간 전하가 확산되고 플라즈마가 전기장 형성에 기여하기 때문으로 이 때 방전 모드가 변화하고 있음을 알 수 있다.

이후 D 지점이 되면 양극 부근에서 시작된 빛은 중심 영역까지 고루 분포하게 되고 음극 부근에서 매우 밝은 빛이 방출된다(Fig. 8(e)). 이 지점에서의 방전은

타운젠트 방전을 통해 형성된 이온이 음극 유전체 면에 충돌하여 음극에서 씨앗이 되는 전자들이 제공되므로 전류 밀도가 크게 형성되어 음극 앞에 전위 변화 공간, 즉 음전극 전압 강하 영역(cathode fall region)이 형성된다. 이 공간에서는 전극 면에서 방출된 이차 전자와 이온화로부터 생성된 전자들이 전기장에 의해 밀려나고 생성된 플라즈마 이온이 남아 높은 양의 공간 전하 밀도를 형성하므로 전기장 세기가 높다(Fig. 8(f)). 전기장 분포로부터 산출한 음전극 전압 강하 영역의 전압은 약 800 V가 되며 이는 Fig. 7에서 나타난 D 지점에서의 방전 공간 전압 값인 약 600 V와 유사하다. 즉 외부에서 인가되는 전압의 대부분이 이 영역에 인가되고 방전이 안정적으로 유지될 수 있으며 음극 강하 영역의 강한 전기장에 의해 가속된 전자에 의한 이온화 및 여기 반응이 활발하여 음극 부근에서 밝은 빛이 방출된다. 전기 포텐셜의 변화가 거의 없는 중심 영역에서는 전자와 이온이 비슷하게 존재하는 준중성상태의 플라즈마가 형성되므로 전기장의 세기가 매우 작아 본 측정 방법을 통해서는 전기장 측정이 어렵다. 또한 음극 강하 영역에서 플라즈마 생성량은 지속적으로 증가하게 되나 이는 공간 전압을 줄어뜨리게 하여(Fig. 7(a) 참고) 방전 전류는 더 이상 상승하지 않게 된다. 따라서 D 이후로의 방전은 글로우 방전이 안정화된 E~F 영역을 유지하게 된다.

#### 4. 결 론

대기압 유전체 격벽 방전에서 타운젠트 방전이 일어나 글로우 방전으로 전이되는 특징을 관찰하였다. 타운젠트 방전은 주로 양전극 부근에서 활발하게 일어나고

여기에서 만들어진 이온들이 음전극으로 이동하면서 글로우 방전으로 전이하게 된다. 글로우 방전이 개시되면서 음전극 근방에는 음극 전위 강하 영역(cathode fall region)이 형성되어 장치에 인가되는 전기장보다 더 큰 공간 전기장을 형성시켜 가속 전자에 의한 이온화를 증진시키고 글로우 방전 특성이 유지되게 한다. 이렇게 방전 모드가 변이하는데 걸리는 시간은 헬륨 이온의 이동도에 따라서 매우 빠르게 전이된다. 따라서 대부분의 DBD 방전에서 타깃 시료가 놓이는 영역에서 관찰되는 높은 전기장은 글로우 방전이 유지되는 글로우 모드의 특성임을 알 수 있다. 따라서 유전체 격벽 방전을 이용한 플라즈마 처리 장치 개발 시 대상체가 위치하는 영역의 극성과 인가 전압 특성 변화에 따른 각 방전 모드 유지 시간 변화 등을 고려하여야 한다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부 출연 재원으로 국가핵융합연구소 주요사업 중 ‘미래선도 플라즈마-농식품 선도 기술(Plasma Farming)개발’ 관련 사업 및 BK21 플러스 사업(No.21A20130012821)에서 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌

1. J. R. Roth, J. Rahel, X. Dai, and D. M. Sherman, "The physics and phenomenology of One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAug-DPTM) reactors for surface treatment applications," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 4, pp. 555-567, 2005.
2. Z. Xiong, X. P. Lu, A. Feng, Y. Pan, and K. Ostrikov, "Highly effective fungal inactivation in He+ O2 atmospheric-pressure nonequilibrium plasmas," *Phys. Plasmas*, vol. 17, no. 12, pp. 1-7, 2010.
3. Y. B. Golubovskii, V. a Maiorov, J. Behnke, and J. F. Behnke, "Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 1, pp. 39-49, 2002.
4. T. Martens, W. J. M. Brok, J. van Dijk, and a Bogaerts, "On the regime transitions during the formation of an atmospheric pressure dielectric barrier glow discharge," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 12, p. 122002, 2009.
5. W. Jiang, J. Tang, Y. Wang, W. Zhao, and Y. Duan, "Influence of driving frequency on discharge modes in a dielectric-barrier discharge with multiple current pulses," *Phys. Plasmas*, vol. 20, no. 7, pp. 1-7, 2013.
6. R. L. Heinisch, F. X. Bronold, and H. Fehske, "Electron surface layer at the interface of a plasma and a dielectric wall," *Phys. Rev. B*, vol. 85, no. 7, p. 075323, 2012.
7. S. S. Ivković, G. B. Sretenović, B. M. Obradović, N. Cvetanović, and M. M. Kuraica, "On the use of the intensity ratio of He lines for electric field measurements in atmospheric pressure dielectric barrier discharge," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 5, p. 055204, 2014.
8. M. M. Kuraica and N. Konjević, "Electric field measurement in the cathode fall region of a glow discharge in helium," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. March, p. 1521, 1997.
9. B. M. Obradović, S. S. Ivković, and M. M. Kuraica, "Spectroscopic measurement of electric field in dielectric barrier discharge in helium," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, p. 191501, 2008.
10. A. K. Vijn, "Electric strength and molecular properties of gaseous dielectrics," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-12, no. 4, pp. 313-315, 1977.
11. Richard C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook, Second Edition*, CRC Press, p.1246, 1997.
12. B. Niermann, A. Kanitz, M. Boke, and J. Winter, "Impurity intrusion in radio-frequency micro-plasma jets operated in ambient air," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 44, p. 325201, 2011.

접수일: 2016년 5월 23일, 심사일: 2016년 6월 2일,  
게재확정일: 2016년 6월 10일