

# 대기압 플라즈마 이중 제트의 플라즈마 전위

강한림 · 김정현 · 김현철 · 한상호 · 조광섭\*

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2012년 9월 20일 받음, 2012년 10월 26일 수정, 2012년 10월 30일 확정)

한 쌍의 대기압 플라즈마 제트 장치의 전극에 인가하는 교류 전압의 극성에 따라서 발생하는 플라즈마 칼럼의 전위를 고전압 프로브를 사용하여 계측하였다. 고전압이 인가되는 플라즈마 제트 장치에서 발생하는 플라즈마 칼럼은 고전압 인가측의 전위는 높고 플라즈마 칼럼을 따라서 선형적으로 전위가 감소한다. 이러한 플라즈마 칼럼은 단위 길이당 저항이 수  $M\Omega/m$ 에서 수십  $M\Omega/m$ 의 저항체이다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치의 전극에 극성이 다른 전압으로 발생하는 플라즈마 전위의 극성은 인가 전압의 극성과 동일하다. 따라서 서로 다른 극성의 전압을 인가한 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에서 방출되는 플라즈마의 대기 중의 병합점에서 상호 인력이 작용하며, 병합점의 전위는 수십 V로 낮다. 동일한 극성의 전압을 인가하여 방출되는 한 쌍의 플라즈마 제트는 상호 동일한 극성의 전위에 의하여 상호 척력이 작용하며, 병합점에서의 전위는 수백 V로 높다. 이러한 한 쌍의 플라즈마 제트에서 방출되는 플라즈마를 인체에 조사하는 경우는 전기적인 충격이나 열적인 손상은 플라즈마의 전위와 전류의 곱인 플라즈마 전력의 크기에 비례한다.

주제어 : 플라즈마, 방전, 대기압 플라즈마, 플라즈마 제트, 전기적 충격

## I. 서 론

생의학 적용을 위한 대기압 플라즈마 연구가 국내 및 국외에서 활발하게 진행되고 있다. 플라즈마 장치에서 발생하는 플라즈마는 생체나 인체의 피부 및 살균, 지혈, 암 세포 자멸 유도, 외과 의료용 수술, 등에 적용하기 위하여 생의학 분야 전반으로 확대되고 있다 [1-6]. 플라즈마의 응용은 플라즈마 입자들 중에 라디칼(radical)들과 생체 분자의 반응에 의한 효과로 알려져 있다 [7-11]. 고전압을 인가하여 발생하는 대기압 플라즈마는 전기적으로 높은 전압과 전류 값을 갖는다 [12-15]. 인간이 느낄 수 있는 최소 감지 전류(perception current)는 전압 주파수(voltage-frequency)에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다 [16]. 상용 전압주파수인 60 Hz에서 최소감지전류는 교류전류(AC) 약 1 mA정도이다. 주파수가 증가할수록 최소감지전류도 증가한다. 이러한 최소감지전류 이상의 전류는 전기적 및 열적으로 인체에 위험요소로 작용한다 [17]. 플라즈마 제트장치를 인체나 생체에 적용하기 위해서 전기적인 충격과 열적인 피해를 고려해야 한다. 전기적인 충격은 전류뿐만이 아니라 전압도 중요한 변수가 된다. 생체에 가해지는 전력(전류×전압)은 전기적 충격량으로 해석된다 [18,19]. 대기압

플라즈마의 발생은 고전압이 요구되므로 플라즈마의 전위도 전기적 충격에 중요한 변수이다.

본 연구에서는 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에서 발생하는 플라즈마의 전위를 계측한다. 두 개의 플라즈마 제트 장치에 인가되는 고전압의 극성에 따라서 발생하는 플라즈마의 전기적인 특성을 규명한다. 한 쌍의 플라즈마 칼럼 사이에서 발생하는 스트리머를 관측한다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치를 결합하여 발생하는 플라즈마의 위치에 따른 전위를 계측한다. 두 개의 플라즈마 발생 장치에서 방출되는 혼합된 플라즈마 칼럼을 얻는다. 인가전압의 극성에 따라 방출되는 플라즈마 칼럼의 전기적 특성을 확인하고 전기적 충격이 없는 플라즈마 칼럼의 발생을 조사한다. 발생된 플라즈마 전류에 따라서 생체에 미치는 전기적인 충격과 열적 손상을 알아보기 위하여 플라즈마 자체의 전위 및 시료의 온도 변화를 조사한다.

## II. 이중 플라즈마 제트 발생 장치 및 실험

대기압 플라즈마 제트를 생체에 적용하는 경우, 플라즈마 칼럼의 전위는 플라즈마 전류와 함께 전기적 충격으로

\* [전자우편] gscho@kw.ac.kr

작용한다. 인체에 작용하는 전기적 충격을 조사되는 플라즈마 제트의 전위에 대하여 조사한다. 이 연구에서는 두 개의 이중 플라즈마 제트의 발생으로부터 전위차의 변화를 확인하고, 이를 전기적 충격이 없는 플라즈마의 발생에 적용하고자 한다. 2-1절에서는 두 개의 플라즈마 칼럼간의 전위차로 인하여 발생하는 스트리머(streamer)를 관측한다. 2-2절은 플라즈마 제트 칼럼의 전위를 직접 계측한다. 2-3절은 인가되는 전압의 극성에 따라서 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에서 발생하는 플라즈마의 병합점에서의 전위를 직접 계측한다. 그리고 2-4절은 한 쌍의 플라즈마 제트를 시료에 조사하여 시료의 온도를 계측하여 전압 인가 방식에 따른 열적인 문제를 조사한다.

1. 플라즈마 제트 칼럼 사이의 스트리머 발생

유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위변화를 조사

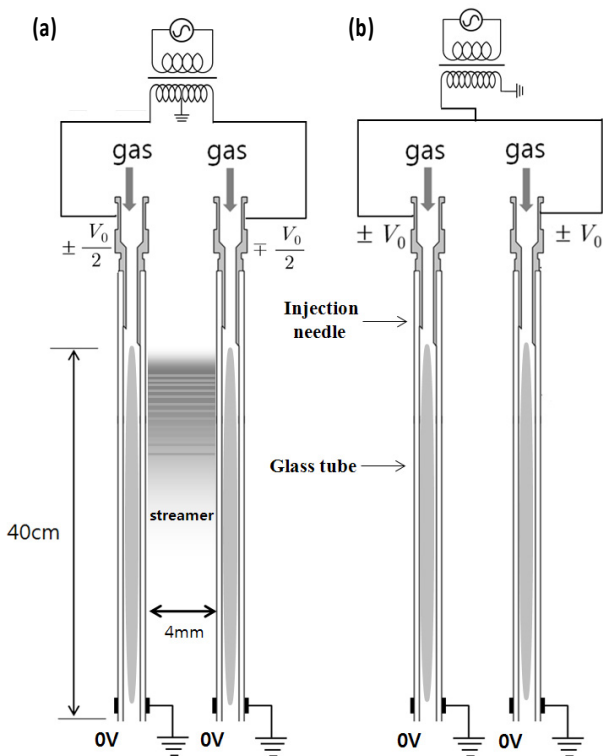


Figure 1. Two parallel plasma columns generated with two plasma jets. The streamer discharge will be appeared between two plasma columns operated with different voltage polarity in (a) and The streamer will not be appeared between two plasma columns operated with the same voltage polarity in (b).

한다. 바늘전극을 유리관의 한쪽에 설치하고 반대쪽 유리관 끝의 외부에 접지 전극을 설치한다. 유리관 재질은 보로실리케이트(borosilicate)이고 외경은 3.2 mm, 내경은 2.8 mm이다. 유리관의 전체 길이는 400 mm이다. 플라즈마 제트 장치는 의료용 주사기 바늘을 전극으로 사용한다. 바늘은 외경 2.80 mm, 내경 2.20 mm, 길이 13.0 mm이다. 실험에 사용하는 가스는 아르곤(Ar)이며, 유량계(flow meter)에 의하여 가스의 양을 조절한다. 주사기 바늘에 가스를 주입하고, 바늘 전극에 수십 kHz 주파수의 교류 전압(수 kV)을 인가하면 유리관 내부에 플라즈마가 발생한다. 전압을 인가하는 바늘전극 주변의 플라즈마의 전위는 높고(수 kV) 접지부분의 전위는 접지 전압(0 V)으로 낮을 것으로 예견된다. 고전압을 인가하여 플라즈마가 형성된 두 개의 유리관 사이에 스트리머의 발생 여부를 관측하여 플라즈마 칼럼의 전위 분포를 예측한다.

Fig. 1은 두 유리관 사이에 발생하는 스트리머의 관측 실험장치 개요도이다. Fig. 1(a)는 극성이 반대인 전압을 인가하는 장치이고, Fig. 1(b)는 극성이 같은 전압을 인가하는 장치이다. 두 플라즈마 제트장치의 유리관 사이 거리는 4 mm로 유지한다. 유리관 끝단의 외부에 구리 테이프(copper tape)를 이용하여 접지 전극을 설치한다. 두 장치에 인가되는 전압은 4.5 kV이며 플라즈마 전류는 13 mA이다. 구동주파수는 25 kHz이다. 주입 가스는 아르곤(Ar) 기체이며 유량은 7 lpm (liter per minute)이다. 한 쌍의 제트 장치에 고전압의 인가 방식에 따라서 유리관 내부에 발생하는 플라즈마 칼럼 사이에 스트리머 방전의 유무를 관찰한다.

Fig. 2는 두 개의 유리관 사이에 발생한 스트리머를 관찰한 사진이다. Fig. 2(a)는 Fig. 1(a)의 실험장치와 같이 두 전극에 서로 다른 극성의 전압을 인가하여 유리관 사이에 스트리머가 발생한 사진이다. Fig. 2(b)는 Fig. 1(b)의 실험 장치와 같이 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에 동일한 극성의 전압을 인가하여 얻어진 방전 사진이다. Fig. 2(a)는 한쌍의 제트 장치의 전극에 각각 교류 전압 ±6.3 kV와 ∓6.3 kV를 인가하였다. 유리관 내부에 플라즈마 칼럼이 형성되고, 두 개의 플라즈마 칼럼의 유리관 사이에 스트리머 방전이 관측된다. 전체 유리관 길이 400 mm의 플라즈마 칼럼 중에 전극부의 상단으로부터 하단으로 70 mm 지점까지 스트리머가 발생한다. 고 전압이 인가되는 상단부의 스트리머의 세기는 강하고, 70 mm 하단으로 내려 갈수록 스트리머의 강도는 약해진다. 대기압에서 스트리머가 발생하

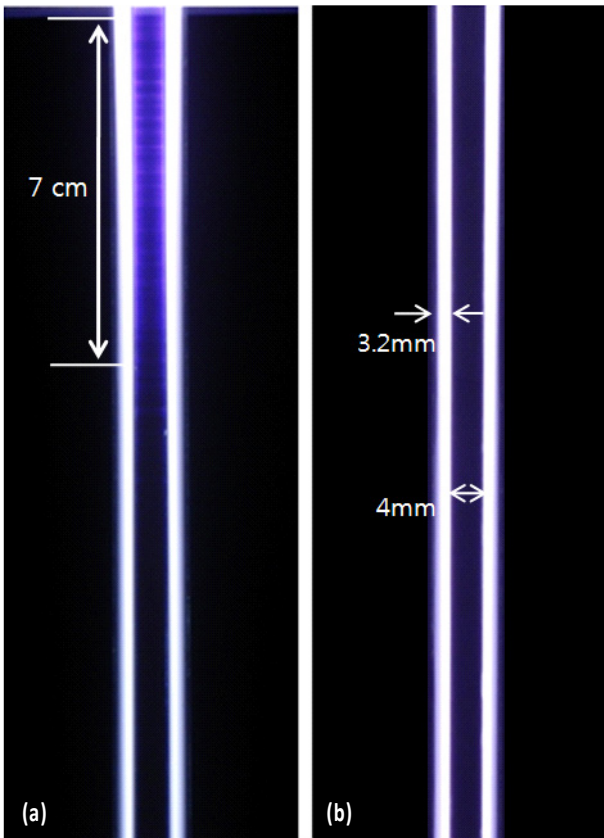


Figure 2. Photographs of plasma jet columns. The streamer is generated between two plasma columns of glass tube operated with different polarities of voltage in (a) and the streamer is not appeared when the jets are operated with the same polarity of voltage in (b).

려면 플라즈마 칼럼 사이에 약 3 MV/m의 전기장이 요구된다 [20]. 유리관의 간격 4 mm인 두 개의 플라즈마 칼럼의 상단의 전위차는 12.6 kV이므로 전기장은 3.15 MV/m이다. 따라서 두 플라즈마 칼럼 사이에 스트리머 방전 조건에 도달한다. 두 유리관 사이에 발생하는 스트리머의 세기가 상단부에서 플라즈마 칼럼을 따라서 하단부로 갈수록 줄어드는 것으로부터 유리관 사이의 전위차가 줄어드는 것으로 판단된다. 즉, 유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위가 하부로 갈수록 작아진다. 두 유리관 사이의 상단에서 하단으로 70 mm 부분까지 스트리머가 발생하므로, 하단의 70 mm 부분의 전위차가 스트리머 발생 조건의 전기장 세기를 갖는 것으로 판단된다. 따라서 유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위는 고전압 인가부인 상단은 6.3 kV이고, 하단으로 갈수록 전위가 낮아져서 70 mm부분은 6 kV 이하로 줄어들고, 플라즈마 칼럼을 따라서 아래로 갈수록

전위는 점점 감소하여 접지부분은 0 V가 된다. Fig. 2(b)는 서로 같은 극성의 전압을 인가했을 때의 유리관 내부의 방전 사진이다. 전극에 인가한 동일 극성의 전압은 6.3 kV이다. 두 개의 플라즈마 칼럼이 동일 극성의 전위이므로 유리관 사이의 전위차가 없다. 따라서 유리관 사이에 스트리머 방전이 발생되지 않는다. 이 실험에서도 유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위는 고전압부가 높고 하부로 갈수록 전위가 낮아져서 접지부분의 전위는 0 V가 된다.

위의 실험을 통하여 유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위를 예견한다. 고전압이 인가된 전극부의 플라즈마의 전위는 높고, 플라즈마 칼럼을 따라서 전위는 점점 낮아진다. 이는 플라즈마 칼럼 자체가 저항체로 생각된다. 위의 실험에서 인가된 전압이 4.5 kV<sub>rms</sub>이고 전류가 8.3 mA이면, 길이가 400 mm인 플라즈마 저항( $R=V/I$ )은 542 k $\Omega$ 이 된다. 단위 길이당 저항은 1.35 M $\Omega$ /m가 된다. 이러한 저항값이 플라즈마 칼럼을 따라서 일정하다고 가정하면, 칼럼의 위치에 따른 전위의 변화를 알 수 있다. 위의 실험에서 극성이 다른 전압을 인가하면 양측의 유리관 내부의 플라즈마 칼럼의 전위차에 의하여 스트리머가 발생한다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에 동일한 극성의 고전압을 인가하면 양측의 전위차가 없으므로 스트리머가 발생하지 않는다. 위와 같이 플라즈마 제트에 의하여 발생된 플라즈마 칼럼의 전위의 변화를 다음 절에서 직접 고압 프로브로 측정하여 직접 확인한다.

## 2. 플라즈마 칼럼의 전위 측정

앞 절의 스트리머 발생 실험 결과로부터 플라즈마 칼럼의 전위 변화를 추정하였다. 이 절에서는 플라즈마 칼럼의 전위를 직접 계측한다. 높은 주파수의 교류형 고전압의 측정은 고전압 프로브를 사용한다. 고전압 프로브는 고전압부에 직접 접촉하여 전압을 계측한다. 따라서 유리관 내부에 발생한 플라즈마의 전압을 측정하기 위하여 유리관에 구멍을 뚫고, 고전압 프로브를 직접 플라즈마에 접촉하여 전압을 계측한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 유리관 양단에 플라즈마 제트장치의 전극을 설치하여 유리관 내부에 플라즈마 칼럼을 형성하여 각 위치의 플라즈마 전위를 계측하기 위한 장치 및 계측 결과이다. Fig. 3(a)는 유리관의 한쪽의 원통면에 15 mm의 간격으로 5개의 구멍을 설치한다. 유리관 양 끝단에 바늘

전극을 삽입하고 전압을 인가하여 유리관 내부에 플라즈마 칼럼을 형성한다. Fig. 3(b)는 유리관 양단에 아르곤 기체를 주입하고, 양단의 전극에 극성이 다른 전압 450 V를 인가하여 얻어진 방전 사진이다. 그림에서 유리관에 설치한 구멍을 통하여 약 2 mm의 길이로 플라즈마가 방출된다. Fig. 3(c)는 플라즈마 칼럼의 각 위치의 전압을 고전압 프로브를 이용하여 구멍을 통하여 플라즈마에 직접 접촉하여 전위를 측정한 결과이다. 플라즈마 칼럼의 전위를 각각의 구멍 ①~⑤에서 측정된 전위  $V_p$ 는 ① 281.0 V, ② 162.5 V, ③ 83.97 V, ④ 142.6 V, ⑤ 276.5 V이다. 양단의 전극에 인가한 전압은 450 V이다. 따라서 양쪽의 전압이 높고, 유리관 중앙부의 플라즈마 전위가 낮다.

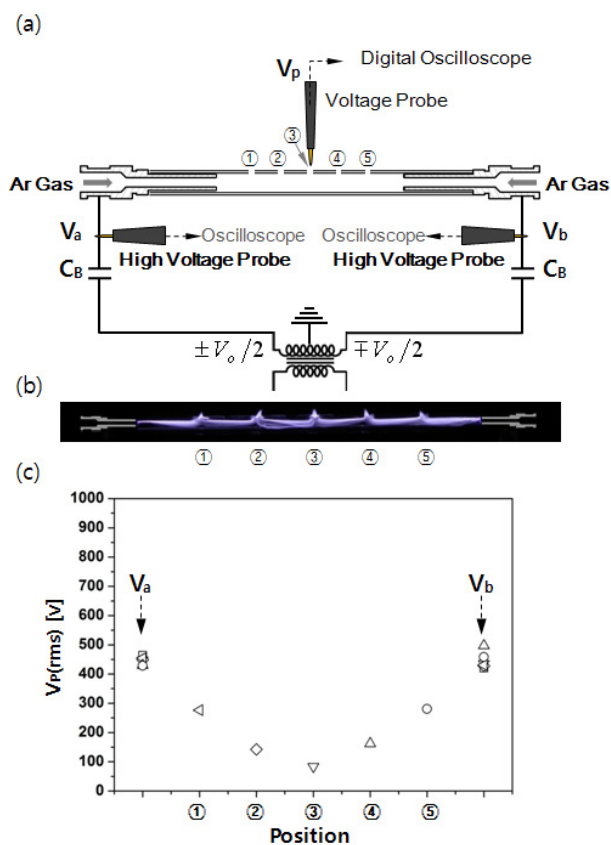


Figure 3. The potential of plasma column is measured. The column is formed inside the glass tube by the plasma jet installed at both ends of tube. One side end is applied with  $\pm V_0/2$  the opposite end is  $\mp V_0/2$  in (a). The picture of discharge plasma flowing out through the holes in (b). In (c), the graph shows the plasma potential of plasma column at each position of holes.

Fig. 4는 유리관 양단에 플라즈마 제트 장치를 설치하고, 좌측의 전극은 900 V의 교류 전압을 인가하고 우측의 전극은 접지한 경우이다. Fig. 4(a)에서 유리관 양단에 아르곤 기체를 주입한다. Fig. 4(b)는 유리관 내부에 발생된 플라즈마 방전 사진이다. 유리관의 한쪽면에 설치된 구멍들로부터 플라즈마가 외부로 약 2 mm 길이로 방출된다. Fig. 4(c)는 각 구멍에서 측정된 플라즈마 전위이다. 측정된 플라즈마 전위  $V_p$ 는 좌측에서부터 순차적으로 ① 727.6 V, ② 608.2 V, ③ 512.8 V, ④ 406.1 V, ⑤ 194.7 V이다. 전압을 인가하는 전극에서 접지쪽으로 갈수록 전위는 거의 선형적으로 감소한다.

위의 Fig. 3과 Fig. 4의 실험에서 한 쌍의 플라즈마 제트

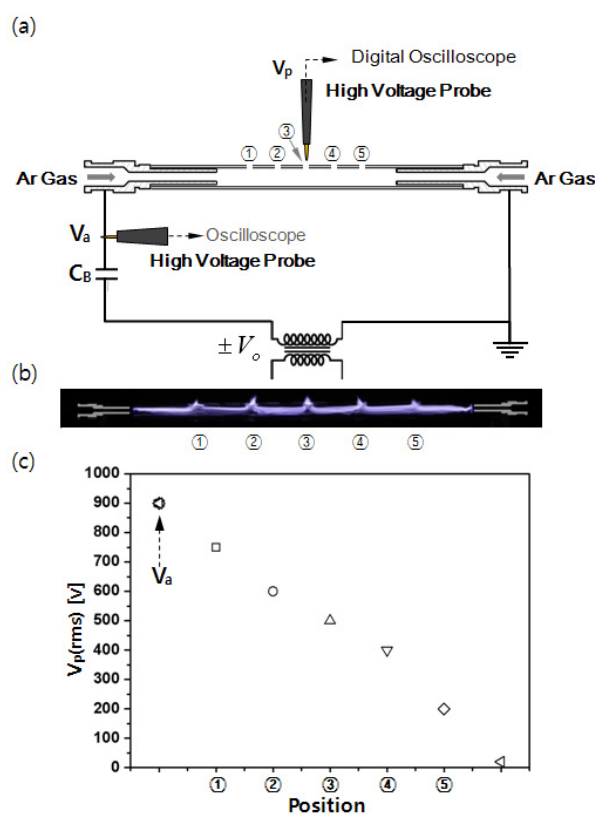


Figure 4. The measurement of plasma column potential at 5-holes on the glass tube with high voltage probe. The plasma column is formed inside the glass tube by plasma jet device connected to both ends of glass tube. One side is applied with voltage of  $\pm V_0$  the opposite is grounded in (a). The picture of discharge plasma flowing at 5-holes in (b). The graph shows the potential of plasma column measured at each position of holes in (c).



전극에 인가하는 전압에 따라서 플라즈마의 전위를 직접 계측하였다. 유리관 내부에 형성된 플라즈마 칼럼이 저항체임을 확인한다. Fig. 3에서 인가된 전압이 450 V<sub>rms</sub>이고 전류가 0.85 mA이면, 길이가 45 mm인 플라즈마 저항(R=V/I)은 530 kΩ이 된다. 단위 길이당 저항은 11.8 MΩ/m으로 계산된다. Fig. 4에서 인가된 전압이 910 V<sub>rms</sub>이고 전류가 0.89 mA이면, 길이가 90 mm인 플라즈마 저항(R=V/I)은 1.02 MΩ이 된다. 단위 길이 당 저항은 11.3 MΩ/m으로 계산된다.

### 3. 이중 플라즈마 제트의 병합점의 전위

위의 실험들을 통하여 플라즈마 칼럼의 전위의 변화를 조사하였다. 본 절에서는 플라즈마 제트 장치에서 발생하는 플라즈마를 생체에 조사하는 경우, 전기적인 쇼크가 없는 장치의 활용을 위하여 한 쌍의 플라즈마 제트 장치를 제안한다. 플라즈마를 인체에 조사하는 경우에 전기적인 충격과 열적인 충격이 고려되어야 한다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에 같은 극성 또는 다른 극성의 전압을 인가하여 방출되는 플라즈마의 전위를 조사한다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에서 방출되는 플라즈마를 한 지점에서 병합한다. 고전압 프로브를 이용하여 병합된 플라즈마의 전위를 직접 계측한다.

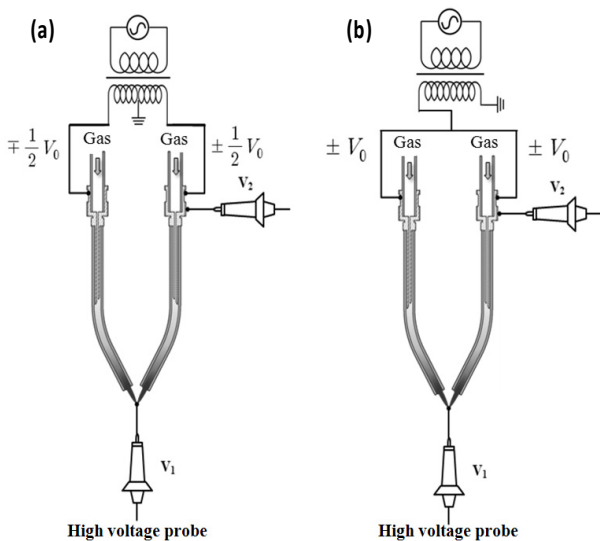


Figure 5. The schematics of double plasma jets operated by the different voltage polarity in (a) and by the same polarity of voltage in (b).

Fig. 5의 실험 장치는 Fig. 1의 장치와 같은 조건에서 바늘전극을 테프론 튜브(Teflon tube)에 삽입한다. 테프론 튜브 끝에서 방출되는 플라즈마를 한 지점에 모은다. Fig. 5(a)는 한 쌍의 플라즈마 제트장치에 서로 다른 극성의 전압을 인가하는 경우이다. Fig. 5(b)는 한 쌍의 플라즈마 제트장치에 서로 같은 극성의 전압을 인가하는 경우이다. 각각의 장치에 헬륨(He)가스 5 lpm을 주입한다. 인가전압과 구동 주파수는 각각 3 kV<sub>rms</sub> 및 40 kHz이다. 같은 극성의 전압을 인가하는 경우와 다른 극성의 전압을 인가하는 경우에 병합점에서의 플라즈마 칼럼의 전위를 계측한다. 그리고 병합점에서 플라즈마의 형태와 인체 접촉을 통하여 전기적인 쇼크를 조사한다.

Fig. 6은 한 쌍의 플라즈마 제트장치의 양단 전극에 인가하는 전압의 극성에 따라서 테프론 끝에서 방출되는 플라즈마의 사진과 인체(손가락) 접촉 사진이다. Fig. 6(a)는 서로 다른 극성의 전압을 인가하였을 때 발생된 플라즈마의 사진이다. 이때의 플라즈마 전류는 1.07 mA이다. 두 개의 플라즈마는 병합점에서 상호 도통되는 형태를 보여준다. 한 쌍의 플라즈마 전위의 극성이 다르므로, 병합점에서 상호 인력(Attraction force)이 작용하는 형태를 보여준다. 따라서 병합점에서 하나의 폐회로를 이루고 대기 중의 오픈 공간으로의 플라즈마의 방출은 극히 미약하다. Fig. 6(a)의 하단 사진은 손가락을 접촉한 사진이다. 플라즈마가 손가락으로 유도된다. 인체에 유도되는 플라즈마로 인하여 전류의 증가분은 0.57 mA이다. 이는 병합점을 통하여 폐회로를 형성하여 대부분의 전류 1.07 mA가 폐회로를 통하여 흐르고, 전류의 증가분인 0.57 mA가 인체로 흐른다. 병합점의 전위는 58 V이다. 따라서 인체의 전기적인 충격량을 플라즈마 전력인 전압과 인체에 유입되는 전류의 곱이라고 하면, 전력량은 0.033 W이다. 실제로 손가락에는 아무런 전기적인 쇼크가 감지되지 않는다.

Fig. 6(b)는 동일한 극성의 전압을 인가하였을 때 방전 사진이다. 인가 전압의 극성이 같은 한 쌍의 플라즈마 제트로부터 방출되는 병합점에서의 길이는 15 mm이다. 전압의 극성이 같기 때문에 두 플라즈마 사이에 척력(Repulsive force)이 작용하여 병합점에서 상호 반발하는 형태를 보인다. 이때의 인가전압은 각각 3.02 kV이며, 전류는 1.18 mA이다. Fig. 6(b)의 하단의 그림과 같이 방출되는 플라즈마를 손가락에 조사하면, 순간 전류의 증가분은 1.8 mA가 되며, 순간적으로 전기적인 충격을 받는다. 결과적으로 손

가락으로 흐르는 전체 전류는 2.98 mA가 된다. 병합점의 전압이 503 V이고, 손가락으로 흐르는 전류가 2.98 mA이므로, 손가락에 미치는 전력은 1.49 W가 된다. 손가락에

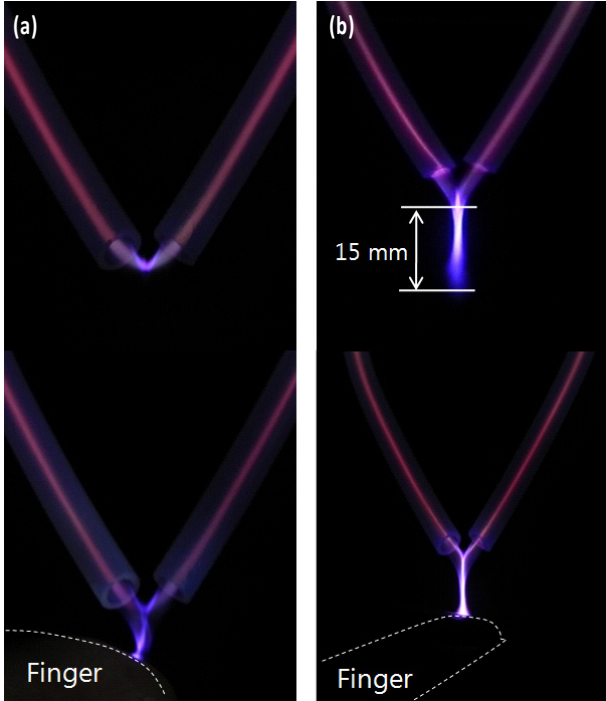


Figure 6. The pictures of discharge plasma column in the double plasma jets operated with the different voltage polarity in (a) and with the same voltage polarity in (b). The plasma columns generated by double plasma jets inside the teflon tubes. The merged plasma plume is exposed on the finger at lower pictures.

미치는 전기적인 쇼크로 인하여 짧은 시간동안 계측이 가능하다.

전압 인가방식에 대한 병합점에서의 플라즈마 칼럼 전위의 오실로스코프 신호를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7(a)는 서로 다른 극성의 전압을 인가하였을 경우 병합점에서의 플라즈마 전압이다. 바늘 전극에 3 kV<sub>rms</sub>의 극성이 다른 전압을 인가하였을 경우 병합점에서의 플라즈마 전압은 58 V<sub>rms</sub>이다. Fig. 7(b)는 전극에 동일한 극성의 전압을 인가한 경우의 전위이다. 인가 전압 3 kV<sub>rms</sub>에 대하여 병합점의 플라즈마 전압은 503 V<sub>rms</sub>이다. 같은 극성의 전압을 인가했을 때에 비하여 다른 극성의 전압을 인가했을 때 병합점의 플라즈마 전압이 낮다.

한 쌍의 플라즈마 제트 장치에서 발생하는 플라즈마의 특성을 조사하였다. 극성이 다른 전압을 인가하는 경우에 병합점에서 방출되는 플라즈마의 전위의 극성이 다르므로 상호 인력이 작용하며, 양측 제트 장치가 병합점을 통하여 폐회로를 형성한다. 인가 전압 2.9 kV에 대하여 병합점의 전위는 58 V이며, 전류는 1.07 mA가 폐회로를 이루며 대기 밖으로의 플라즈마 방출은 거의 없다. 병합점에 손가락을 근접하면, 손가락으로 유도되는 전류는 0.57 mA이며, 손가락에 전기적인 충격은 거의 느끼지 않는다. 손가락에 미치는 전기적인 쇼크를 전력에 비례한다고 가정하면, 손가락에 미치는 전력은 0.033 W가 된다. 한 쌍의 제트 장치에 극성이 같은 전압을 인가하는 경우, 병합점에서 극성이 같은 전위를 갖는 플라즈마 사이에 척력이 작용하여 병합점에서 대기 중으로 플라즈마가 방출된다. 전압 3.02 kV를

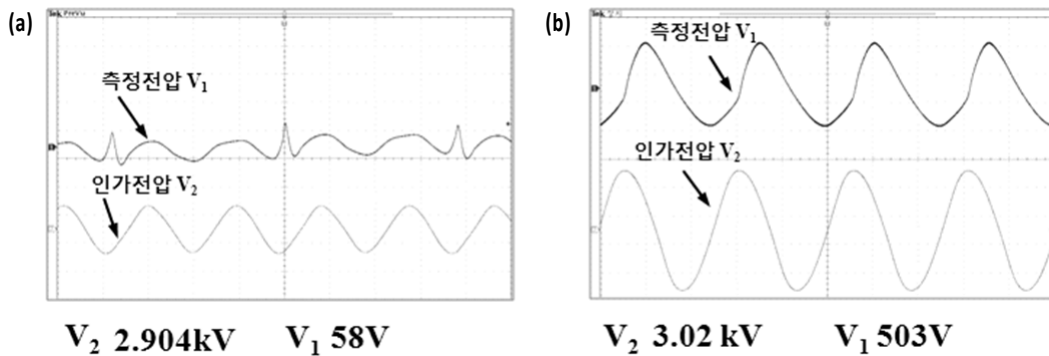


Figure 7. Oscilloscope signals of voltage measurement at the merged plasma plume with double plasma jets operated by the different voltage polarity in (a) and by the same polarity in (b). The voltage of plasma plume at the merged point is 58 V<sub>rms</sub> when the voltage of 2.9 kV<sub>rms</sub> is applied to the needle electrode in (a). When 3 kV<sub>rms</sub> is applied to the electrode, the voltage of plasma column at the merged point is 503 V<sub>rms</sub> in (b).

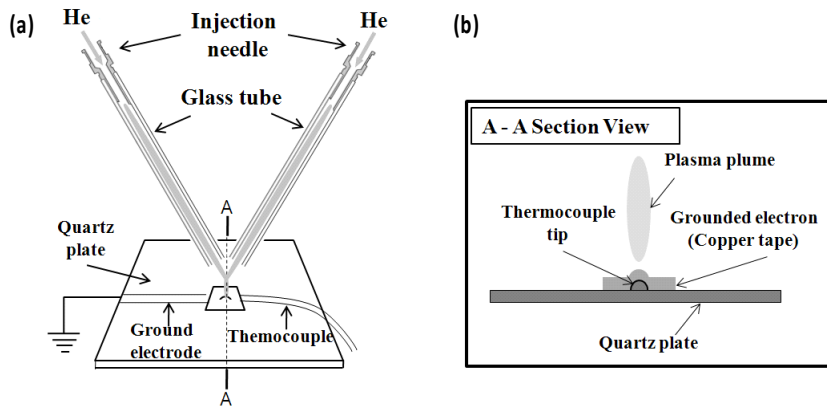


Figure 8. Measurement of temperature on the substrate irradiating the plasma plume of double plasma jets.

인가하는 경우, 플라즈마 전류는 1.18 mA가 대기 공간으로 방출된다. 이때 병합점의 전위는 503 V이며, 손가락에 조사되는 전류는 2.98 mA, 그리고 손가락에 미치는 전력은 1.49 W가 된다. 이러한 경우에는 손가락에 미치는 전기적 충격이 매우 크다. 이 실험에서 인체에 전기적인 충격이 없는 플라즈마 제트 장치를 Fig. 3과 같이 제안한다.

#### 4. 플라즈마 제트를 조사한 기판의 온도 변화

플라즈마 제트장치에 인가하는 전압의 극성에 따라 방출되는 플라즈마를 기판에 조사하여 기판의 온도를 측정한다. 같은 극성의 전압을 인가하였을 때와 다른 극성의 전압을 인가하였을 때 발생한 플라즈마의 전류에 대하여 기판의 온도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)는 기판에 조사하는 한 쌍의 플라즈마 제트의 장치이다. 방전 가스는 헬륨(He)가스를 사용한다. Fig. 8(b)는 기판 온도 측정 장치의 측면 Fig. 이다. 석영 유리판위에 기판 온도 측정용 구리 테이프(copper tape)를 설치하고 접지한다. 구리 테이프 하단에 열전대(thermo-couple)를 설치한다. 플라즈마를 석영판 위의 구리 테이프에 조사하여 온도의 변화를 측정한다.

Fig. 9는 열전대를 이용하여 구리 테이프 위에 조사되는 플라즈마 전류에 대한 기판의 온도를 측정한 결과이다. 방출된 플라즈마의 전류 8.5~12 mA에 대하여 기판의 온도를 측정한다. 플라즈마를 조사하면 기판의 온도가 상승하며, 약 5분 정도의 시간이 지나면 정상상태의 포화 온도가 된다. 접지된 구리 테이프를 통하여 대부분의 전류가 기판으로 유도된다. 서로 다른 극성의 전압을 인가하였을 때,

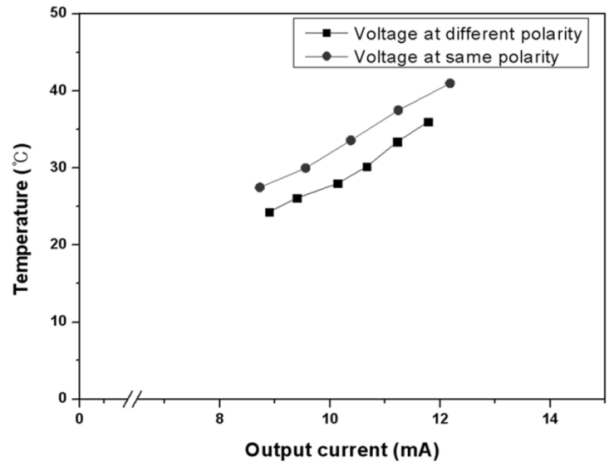


Figure 9. Temperature of substrate exposed by the plasma plume of double plasma jets according to the operation of voltage polarity.

정상상태의 기판 온도는 25~30°C이다. 같은 극성의 전압을 인가하였을 때 기판의 온도는 27~43°C이다. 동일한 전류의 플라즈마에 대하여 같은 극성의 전압을 인가했을 때의 기판의 온도가 다른 극성의 전압을 인가했을 때의 기판의 온도보다 약 5°C 정도 높다. 이는 앞 절의 실험결과에서 같은 극성의 전압을 인가한 플라즈마의 전위가 48 V이고, 다른 극성을 인가한 플라즈마의 전위는 380 V이므로, 기판에 조사되는 플라즈마의 전력이 각각 0.052 W와 1.02 W의 차이로 인한 온도의 차이로 해석된다. 이와 같이 한 쌍의 플라즈마에 인가하는 전압의 극성에 따라서 접지되는 생체에 조사되는 플라즈마의 전력의 차이는 전기적인 충격뿐만 아니라 열적 손상(thermal damage)도 예상된다.

### III. 결과 및 논의

유리관 내부에 발생한 플라즈마 칼럼의 전위를 조사하였다. 한 쌍의 플라즈마 제트 발생장치로부터 형성된 스트리머의 관찰을 통해 플라즈마의 전위 분포를 확인하였다. 그리고 고전압 프로브로 사용하여 직접 플라즈마의 전위를 측정하였다.

한 쌍의 플라즈마 제트장치 전극에 각각  $\pm 6.3$  kV와  $\mp 6.3$  kV를 인가하면 전극부 하단에 이르는 플라즈마 칼럼 사이에 스트리머가 발생한다. 이는 대기압에서 두 플라즈마 칼럼사이의 전압 차에 의하여 스트리머의 발생을 위한 고전기장이 형성되기 때문이다. 스트리머는 전극부로부터 멀어질수록 점점 약해지고 전극으로부터 플라즈마 칼럼 하단의 일정한 지점 이하에서는 발생하지 않는다. 즉, 플라즈마 자체의 저항으로 인하여 플라즈마 칼럼을 따라서 전압강하가 일어난다. 전극부의 플라즈마 전위는 전극에 인가된 전압에 해당하고, 플라즈마 칼럼을 따라서 전극으로부터 멀어질수록 플라즈마 전위는 낮아진다. 인가 전압과 전류값을 고려하면 플라즈마 칼럼의 저항은 플라즈마 칼럼의 길이 400 mm에 대하여 약 542 k $\Omega$ 이며, 단위 길이당 저항은 약 1.35 M $\Omega$ /m이다. 플라즈마 칼럼의 전위를 직접 측정하기 위하여 유리관에 구멍을 뚫어서 고전압 프로브를 직접 플라즈마에 접촉하여 전위를 측정하였다. 플라즈마 전위의 직접 측정에서 길이 90 mm의 플라즈마 칼럼의 저항은 약 1.02 M $\Omega$ 이고, 단위 길이당 저항은 약 11.3 M $\Omega$ /m이다.

한 쌍의 제트 장치의 전극에 인가하는 전압의 극성에 따라서 플라즈마 칼럼의 극성이 달라진다. 서로 다른 극성의 전압을 인가하면 플라즈마 방출의 병합점에서의 전위는 수십 V가 된다. 동일한 극성의 전압을 인가하면 병합점에서의 전위는 수백 V가 된다. 시료 표면에 플라즈마를 조사하여 시료의 온도를 측정할 결과 인가전압의 극성이 다를 때의 기관의 온도가 낮다. 플라즈마 조사에 의한 전기적인 쇼크나 열적인 충격은 조사되는 플라즈마의 전위 및 전류의 크기에 관계된다. 이 실험들을 통하여 플라즈마 제트 장치에서 방출되는 플라즈마에 대한 생체 응용과 관련하여 전기적인 충격과 열적인 충격을 예상할 수 있다.

### IV. 결론

플라즈마 제트 장치에서 형성되는 플라즈마 칼럼의 전위를 고전압 프로브를 사용하여 직접 측정하였다. 플라즈마 칼럼은 단위 길이당 저항은 수 M $\Omega$ /m에서 수십 M $\Omega$ /m의 저항체임을 확인하였다. 고전압이 인가된 부분의 플라즈마 전위는 인가 전압에 해당하는 고 전위를 갖고, 플라즈마 칼럼을 따라서 전압강하에 의하여 접지쪽으로 갈수록 전위가 낮아진다. 이러한 플라즈마 칼럼의 전위 분포의 변화에 따라서 전기적인 충격이 없는 한 쌍의 플라즈마 제트 장치를 조사하였다. 한 쌍의 플라즈마 제트 장치에 인가하는 전압의 극성에 따라서 방출되는 플라즈마의 전기적인 충격과 열적인 충격을 조사하였다. 한 쌍의 플라즈마 제트에 서로 다른 극성의 전압을 인가하여 발생한 플라즈마의 병합점에서 서로 다른 극성의 플라즈마 전위에 의하여 상호 인력이 작용하며, 병합점의 전위는 수십 V로 낮다. 동일한 극성의 전압을 인가하여 방출된 플라즈마는 병합점에서 동일한 극성의 플라즈마 전위에 의하여 상호 척력이 작용하며, 병합점의 플라즈마 전위는 수백 V로 높다. 이러한 낮은 전위의 플라즈마를 인체에 조사하면 전기적인 충격이 없으며 열적 충격도 낮다. 이와 같이 서로 다른 극성의 전압을 인가하는 한 쌍의 플라즈마 제트 장치는 생체 적용이 가능함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단에서 지원을 받아 수행된 과학연구센터(SRC) 사업(No. 20110000852)과 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 신재생 에너지기술개발 사업(No. 20113020010080) 지원을 받아 수행한 연구 과제임.

### 참고문헌

- [1] G. Cho, H. Lim, J. H. Kim, D. J. Jin, G. C. Kwon, E. H. Choi, and H. S. Uhm, IEEE Trans. Plasma Sci. **39**, 1234 (2011).
- [2] H. S. Uhm, J. Korean Vac. Soc. **15**, 117 (2006).



- [3] G. Fridman, M. Peddinghaus, H. Ayan, A. Fridman, M. Balasubramanian, A. Gutsol, A. Brooks, and G. Friedman, *Plasma Chem. Plasma Process.* **26**, 425 (2006).
- [4] V. N. Vasilets, A. Gutsol, A. B. Shekhter, and A. Fridman, *High Energy Chemistry* **3**, 229 (2009).
- [5] X. P. Lu, Z. H. Jiang, Q. Xiong, Z. Y. Tang, and Y. Pan, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 151504 (2008).
- [6] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, *Plasma Process. Polym.* **5**, 503 (2008).
- [7] H. W. Herrmann, I. Henins, J. Park, and G. S. Selwyn, *Phys. Plasmas* **6**, 2284 (1999).
- [8] T. Nakamura, O. Saito, T. Ko, and T. Maruyama, *J. Oral Rehabit.* **28**, 1080 (2001).
- [9] S. Wang, V. Schulz-von der Gathen, and H. F. Dobeles, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 8272 (2003).
- [10] C. Cheng, P. Liu, L. Xu, L. Y. Zhang, and R. J. Zhan, *Chin. Phys. Soc.* **15**, 1544 (2006).
- [11] H. S. Uhm, E. H. Choi, and G. S. Cho, *J. Kor. Phys. Soc.* **60**, 896 (2012).
- [12] M. G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Nosenko, T. Shimizu, J. van Dijk, and J. L. Zimmermann, *New J. Phys.* **11**, 115012 (2009).
- [13] M. G. Kong and X. T. Deng, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **31**, 1 (2003).
- [14] A. Shashurin, M. N. Shneider, and M. Keidar, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 034006 (2012).
- [15] A. Shashurin, M. N. Shneider, A. Dogariu, R. B. Miles, and M. Keidar, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 231504 (2009).
- [16] D. H. Kim, C. H. Kim, Y. B. Yoon, D. H. Lee, W. G. Lee, and J. H. Jeong, *Electrical safety engineering* (Sin Kwang Munhwasa, Paju, 2008), pp. 23-48.
- [17] J. H. U. Brown and J. F. Dickson III, *Advances in Biomedical Engineering* (Academic Press Inc., Missouri, 1973), pp. 223-248.
- [18] H. K. Lim, D. J. Jin, J. H. Kim, S. H. Han, and G. S. Cho, *J. Korean Vac. Soc.* **20**, 14 (2011).
- [19] B. L. Sands, B. N. Ganguly, and K. Tachibana, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 241503 (2008).
- [20] J. H. Colete and J. V. Merwe, *IEEE Transactions on Education* **41**, 2 (1998).

## Plasma Potential of Atmospheric Plasma Double Jets

Han-Lim Kang, Jung-Hyun Kim, Hyun-Chul Kim, Sang-Ho Han, and Gunagsup Cho\*

*Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701*

(Received September 20, 2012, Revised October 26, 2012, Accepted October 30, 2012)

The electric potential of plasma column is measured with the high voltage probe in a pair of atmospheric plasma jets operated by AC-voltage. According to the polarity of voltage applied to the electrodes, the polarity of plasma column potential has the same polarity of applied voltage. The high potential of plasma column at the side of high voltage electrode is decreased linearly along the plasma column to the ground side. Therefore, the plasma column seems to be a kind of resistor whose resistivity is a few 10s M $\Omega$ /m. In the experiment of double-jets system, the polarity of plasma potential is verified to be the same polarity to the applied voltage. When the different voltage polarities are applied to the electrodes of double plasma jets, the attractive force is acted between two plumes at the merged plasma and the plasma potential is measured to be low as a few 10s V. When the same polarity of voltage is applied to the electrode, the repulsive force is acted and the plasma potential is measured to be high as a several 100s V at the merged plumes. In the exposure of plasma plume on the bio-substrate with the double plasma jets, the electric shock and thermal damage might be proportional to the plasma power which is the multiplication of the plasma potential and the plasma current.

Keywords : Plasma, Discharge, Atmospheric plasma, Plasma jet, Electric-Shock

\* [E-mail] [gscho@kw.ac.kr](mailto:gscho@kw.ac.kr)