

유량에 따른 대기압 유전체 전위장벽방전(DBD) 플라즈마 젯 발생에 관한 연구

정병호*

남부대학교 전기공학과 교수

A Study of Atmospheric-pressure Dielectric Barrier Discharge (DBD) Volume Plasma Jet Generation According to the Flow Rate

Byeong-Ho Jeong*

Professor, Dept. of Electrical Engineering, Nambu University

요약 유전체 전위장벽방전방식에 의한 플라즈마 젯의 볼렛 형상은 인가되는 유량과 전기장의 크기에 따라 달라지고 이러한 변화는 DBD 플라즈마 젯의 밀도차이에 의한 스펙트럼 분포의 차이로 나타난다. 발생된 플라즈마 젯의 스펙트럼의 분석을 통한 활성종의 발생과 강도의 차이는 장치를 활용하는데 있어서 중요한 요소이다. 본 논문에서는 Ar가스를 이용한 대기압 볼륨 DBD방식의 플라즈마 젯 발생장치를 제안된 설계방법에 따라 구성하였다. 플라즈마 젯의 발생을 위한 유량의 의존도를 규명하기 위한 Ar가스의 유동해석을 시뮬레이션을 통해 확인하였고 프로토타입 시스템에서는 MFC를 통한 유량제어를 통해 최적의 플라즈마 젯 볼렛형상을 발생시키고 발생된 플라즈마 젯의 특성을 분석하기 위해 스펙트럼미터를 이용한 플라즈마 젯의 특성을 분석하였다. 제안된 시스템의 설계방법을 통한 장치에서 최적의 플라즈마 젯 형상 확립방법과 EOS 상에서 활성종에 대한 결과를 확인하였다.

키워드 : 플라즈마 젯, 전위장벽방전, 스펙트럼, 반응기, 생체응용

Abstract The bullet shape of the plasma jet using the atmospheric-pressure dielectric barrier discharge method changes depending on the applied fluid rate and the intensity of the electric field. This changes appear as a difference in spectral distribution due to a difference in density of the DBD plasma jet. It is an important factor in utilizing the plasma device that difference between the occurrence of active species and the intensity through the analysis of the spectrum of the generated plasma jet. In this paper, a plasma jet generator of the atmospheric pressure volume DBD method using Ar gas was make a prototype in accordance with the proposed design method. The characteristics jet fluid rate analysis of Ar gas was accomplished through simulation to determine the dependence of flow rate for the generation of plasma jets, and the characteristics of plasma jets using spectrometers were analyzed in the prototype system to generate optimal plasma jet bullet shapes through MFC flow control. Through the design method of the proposed system, the method of establishing the optimal plasma jet characteristics in the device and the results of active species on the EOS were verified.

Key Words : Plasma jet, DBD, Spectrum, Reactor, Biological application

This study was supported by research funds from Nambu University, 2022.

*Corresponding Author : Byeong-Ho Jeong(energy@nambu.ac.kr)

Received May 22, 2023

Revised June 10, 2023

Accepted July 20, 2023

Published July 28, 2023

1. 서론

대기압 플라즈마 제트(Plasma jet)의 활용분야는 의료바이오와 미용산업분야와 같은 의생명분야, 반도체, 디스플레이산업분야 등과 같은 제조산업분야에 널리 활용되고 있다[1]. 최근에 의료바이오분야에서는 고정밀 살균처리의 특성을 이용하여 생체 응용에 이용가능성에 대한 연구가 확대, 진행되고 있으며 특히, 의료바이오분야에서의 응용방법이나 대상에 따라 플라즈마 제트의 특성에 따른 특성분석 및 특성 해석에 대한 요구가 발생하고 있다[2]. 플라즈마 제트를 생체 응용에 이용하는 경우에는 적절한 플라즈마 제트의 불렛(Bullet) 형상, 활성종의 강도나 오존발생에 대한 대응이 필요하다. 따라서 플라즈마 제트의 형상과 활성종의 강도를 조절하기 위한 반응기의 설계구조 및 활성기체의 압력을 조절하여 장치의 효율성을 높이는 과정이 추가되어야 한다.

대기압 플라즈마 제트의 발생은 전기에너지에 의해 생성된 전기장 내에서 전기장이 실시간으로 기체의 전자를 가속시켜 발생된 기체 간의 충돌에 의해 발생되며 플라즈마 제트를 생성하기 위해 인가되는 전기에너지의 밀도는 플라즈마 제트의 상태에 영향을 미친다[3]. 플라즈마 제트의 발생원은 인가되는 전기장의 전력에 따라 직류 및 저주파 방전, 마이크로파 방전, RF방전으로 구분된다[4]. 유전체의 절연파괴에 의해 전극사이에서 전류가 흐르는 현상을 방전(Electric discharge)이라고 하며 유전체가 기체인 경우에 기체의 방전에 의해 플라즈마 제트가 발생한다. 이러한 절연파괴영역에서는 높은 전기장 내에서 가속된 전자가 주위의 중성기체분자와 충돌하여 이들 중성기체분자를 전리시켜 전자와 양의이온으로 분리되는 과정에서 전자사태(Electronic avalanche)가 발생하며 전류가 급격하게 증가한다. 플라즈마 제트는 기체 속도보다 빠른 속도로 전파되는 전자사태에 의해 기체가 불렛 형태로 나타난다[5]. 플라즈마 제트를 발생시키기 위해서는 공급되는 기체의 항복전압을 초과해야 하며 이 전압은 전극사이의 간극과 인가되는 압력에 의존한다. 이때, 사용되는 기체는 특정한 불활성 기체를 방전기체로 사용하며 다양한 형태의 플라즈마 제트의 반응기의 구조에 적절한 형태로 인가된다. 방전기체는 유량 및 유속의 변화가 반응기의 구조에 의해 변동되지만 MFC(Mass flow controller)의 제어를 통해 최적의 유량에 따른 불렛 형상을 형성시킬 수 있다.

본 논문에서는 생체응用に 적용하기 위해서 대기압 불

림 DBD(Volume dielectric barrier discharge)방식의 플라즈마 제트를 발생시키는 시스템의 설계에 따라 프로토타입을 제작하여 실험을 진행하였다. 불렛 형상은 플라즈마 제트의 유량에 따라 달라지고 이와 더불어 플라즈마 제트의 밀도에 의한 스펙트럼의 차이가 발생한다. 이를 검증하기 위한 유동해석 시뮬레이션을 수행하고 이를 실험적인 결과와 비교분석하였다. 또한, 시뮬레이션 및 실험을 통해 인가되는 Ar가스의 유동해석과 실제 발생된 플라즈마 제트의 분석을 통해 전기적, 기계구조적인 연구를 실험적으로 검증하고 발생된 플라즈마 제트의 생체응用に 적용할 수 있도록 플라즈마 밀도의 차이에 대한 스펙트럼 분석을 수행하였다. 분석된 결과는 의료바이오분야에 적용 가능한 플라즈마 제트의 형상해석과 함께 제작된 플라즈마 제트 발생시스템은 의공학분야에 직접 활용가능한 장치로서의 적용가능성을 확인하였다.

2. DBD 플라즈마 제트의 특성

2.1. 대기압 DBD플라즈마 제트 반응기 구조

DBD 플라즈마 제트의 발생구조는 고전압에 의한 방전 경로에 절연 물질이 존재하는 것을 특징으로 하며 두 개의 전극 사이에 유전체를 삽입하여 고전압 펄스로 인한 아크 방전을 억제하고 유전체 전극에서 형성되는 표면전하의 충/방전을 이용하여 플라즈마를 발생시키는 방식이다[6]. 일반적으로 유리, 석영, 세라믹, 에나멜, 운모, 플라스틱, 실리콘 고무 또는 테프론과 같은 유전체 물질이 사용된다. 플라즈마를 대기압에서 고전압 진폭으로 동작하기 위한 방전 갭은 일반적으로 0.1~10[mm] 범위이며

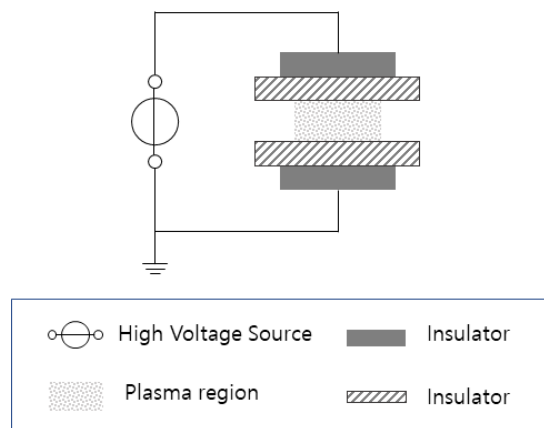


Fig. 1. Basic plasma reactor structure of DBD

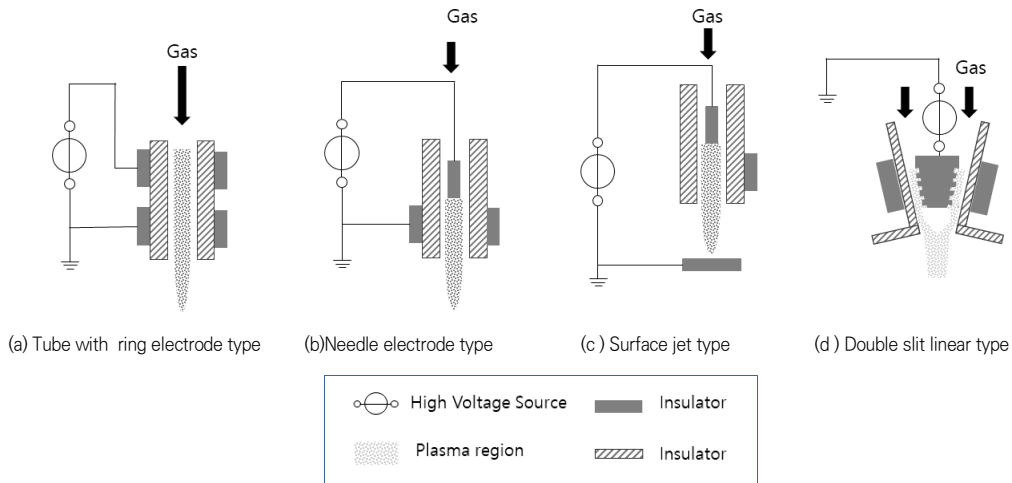


Fig. 2. Reactor structure of various DBD-based plasma jet generation

방전 배열의 용량 특성 때문에 고전압 교류나 고전압 펄스가 필요하다. 이러한 고전압의 진폭은 1 ~ 100[kVrms]가 적용된다[7]. Fig. 1은 볼륨 DBD플라즈마 젯 발생을 위한 반응기의 구조를 나타낸다.

인가된 고전압 정현파에 의해 시작되는 양의 반주기 동안은 반응공간과 전극사이에서 형성되는 전기장에 의해 유전체의 표면전하가 충전되고, 그 다음 음의 반 주기 동안은 전극사이의 전기장의 위상이 일치하여 전극사이의 전기장세기는 증가하여 방전 전기장의 크기가 충족되면 절연파괴가 발생하여 마이크로 방전 스트리머(Micro-discharge streamer)가 전극 사이의 전체면적에서 발생하며, 이는 반응기의 유전체 특성이나 입력 주파수의 영향을 받게 된다. 일반적인 전계 E는 약 150[Td], 마이크로방전시간(Micro discharge time)은 1~10[ns], 전자밀도는 $10^{13} \sim 10^{14}$ [cm^{-3}]이다[8].

Fig. 2는 DBD 방식 기반의 다양한 플라즈마 젯 발생 반응기 구조를 나타낸다. DBD는 방전 공간 이외에 금속 전극 사이의 전류경로에 하나 이상의 절연층이 존재하며 교류전원을 사용하며, 하나 또는 두 개의 금속전극으로 구성되는 구조를 특징으로 하고 있다. 안정적인 플라즈마 젯의 발생을 위하여 전극을 분리하는 간격은 수 [mm]로 제한되며 공급되는 기체는 이 간격 사이를 통과하는 구조로 이루어진다[9].

DBD방식의 전원은 500~500[kHz]정도의 주파수를 갖는 수 kVrms의 교류고전압에서 동작하며 동작 기체의 조성, 전압크기, 여기 주파수 등의 변수에 따라 방전은 필

라멘트 형태 혹은 글로우 형태가 된다. 전기회로적인 해석을 위한 DBD의 배열은 용량성 요소로 간주하여 해석한다. 유전체 층은 반전 전류를 차단하고 아크상태로 전이를 피할 수 있게 되므로 연속모드나 펄스모드에서 동작이 가능하도록 지원하는 역할을 수행한다[10].

2.2 대기압 볼륨 DBD플라즈마 젯 반응기 모델링

가스처리를 위한 DBD반응기는 원통형 튜브구조를 주로 적용하며 튜브자체가 절연물질이 되고 외부전극을 접촉시키는 구조가 주로 사용된다. 전극은 금속전극, 메시전극이나 증착 또는 페이스트된 금속필름을 사용하기도 한다[11].

DBD플라즈마 젯 반응기의 등가회로를 통해 해석할 수 있다. DBD구조는 직렬 연결된 용량성 회로로 구성되고 하나는 장벽 C_d 와 가스 겹 C_g 로 구성되고 총캐패시턴스는 C_{cell} 로 표시되며 전기적 등가회로의 구성은 Fig. 3과 같다.

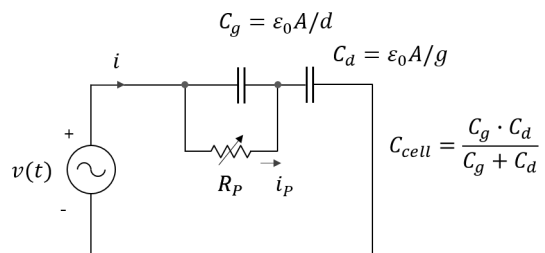


Fig. 3. DBD Plasma jet equivalent circuit

등가회로에서 R_p 는 에너지의 병렬손실 요소를 저항으로 나타낸 회로요소이다. KVL을 적용하면 인가전압 $v(t)$ 은 V_g 와 V_d 의 전압강하의 합과 같고 인가된 전압의 진폭이 임의의 항복전압 보다 낮게 되면 방전전압 V_b 가 낮아져 플라즈마의 발생은 없다. 방전의 개시는 방전전압 V_b 가 항복전압 이상이 인가될 때 발생한다. 또한 가스의 종류, 압력의 크기, 방전 갭의 거리의 변수에 따른 공간적, 시간적 파라미터에 의해 결정되고 이는 파센 곡선에 의해 나타난다. Fig. 4는 이러한 파라미터요소에 대한 특성을 파센곡선(Paschen's curve)을 통해 나타낸다[12].

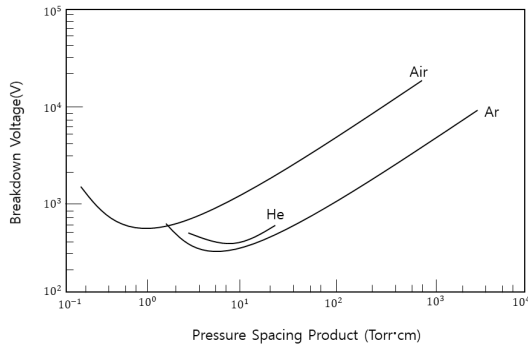


Fig. 4. Paschen's curve

Fig. 3의 등가회로에 따른 플라즈마 발생 전류와 전압은 각각 식 (1), (2)과 같다.

$$i_p = \frac{dQ_p}{dt} = \frac{1}{1 - C_{cell}/C_d} \left[i(t) - C_{cell} \frac{dV(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

$$V_g = V(t) - \frac{Q(t)}{C_{cell}} \quad (2)$$

DBD 전극 간의 전기장에 인가된 전압에 따라 하전되는 전하량의 변화를 이용하여 반응기에서 소모되는 부하 전력을 측정하며 이것은 반응기를 구성하는 유전 물질의 정전용량과 비례한다[14]. 플라즈마 방전의 또 다른 중요한 변수는 2차 방전계수(Secondary emission coefficient) γ 이며 유전체 표면에서 발생하는 전자와 광자의 개수의 비율로 정의되지만 대기압 조건에서 DBD의 유전체 표면에서 나온 전자의 경우, 높은 기체의 압력에 의하여 후산란(Back-scattering)되는 전자들이 존재하기 때문에 모

든 전자들이 방전에 기여하지 못한다. 따라서 2차 방전 계수 γ 는 식 (3)과 같다.

$$\gamma_{eff} = \gamma \cdot \left[\frac{v_d}{v_d + 0.25 \langle v \rangle} \right] \quad (3)$$

여기서, v 는 캐소드에서 나와 중성기체나 이온에 도달하기까지 전자의 평균온도, v_d 는 전자드리프트 속도(Electron drift velocity)를 각각 의미한다. 따라서 E가 전기장의 세기이고 p 가 기체 압력일 때, 파센곡선(Paschen's curve)에 따라 효율은 E/p의 함수로 나타나게 된다[14].

플라즈마 켓의 생성은 공급 기체의 항복전압 V_b 를 초과해야 하며 이 전압은 전극 간격 d 와 압력 p 는 식 (4)과 같다.

$$V_b = \frac{B(p \cdot d)}{\ln[A(p \cdot d)] - \ln[\ln(1 + 1/\gamma_{se})]} \quad (4)$$

기체방전 조건에 대해서는 α (First ionization coefficient, or first townsend coefficient)은 식 (5)의 관계식을 만족하게 된다.

$$\alpha = pA \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \quad (5)$$

플라즈마는 방전 시 관내를 관통하는 기체속도와 비교하여 빠른 속도로 전파하는 볼렛(Bullet) 형태로 형성된다. 플라즈마 켓 발생장치의 거시적 관점에서 대기압 플라즈마 켓은 반응기의 출구를 통해 나오는 기다란 연속 플라즈마 플룸(Plume)으로 나타나며 이러한 플룸의 길이는 인가전압, 동작 주파수 그리고 반응기를 관통하는 유량과 관련이 있다. 플룸은 일반적으로 실제 흐르는 가스의 속도인 수 ms^{-1} 보다 훨씬 높은 수 만 ms^{-1} 의 속도로 전파되는 빠른 발광 구조의 시퀀스로 생성된다. 또한, 생성된 플룸은 전파경로를 따라 약한 전도성 플라즈마로 간주된다[15].

2.3 대기압 볼륨 DBD플라즈마 켓 발생기 설계

대기압 볼륨 DBD 플라즈마는 방전 시 높은 에너지를 가진 고농도 전자의 충돌현상으로 반응활성종이 생성된

다. DBD의 한 쪽 전극에 교류(AC) 또는 펄스(Pulse) 형태의 전력을 인가하면 전극을 감싸고 있는 유전체에 전하(Electric charge)가 축적되고 이후 전극의 극성이 바뀌면 유전체에 축적되었던 전하가 방출되면서 전극 사이에 플라즈마가 형성된다. 전기장 속에서 가속되는 전자 에너지는 전자의 MFP(Mean free path)에 비례하는데, 낮은 기압에서 전자가 더 많은 에너지를 얻을 수 있어서 중성 가스의 이온화에 의한 플라즈마 발생이 용이하다.

DBD플라즈마 젯 발생장치의 반응기를 설계하기 위하여 응용장치에 적합한 형태를 최적화 설계과정이 요구된다. 장치의 최적화 설계를 위한 설계흐름도를 통해 주요 구성요소에 대한 그룹화와 어셈블리과정을 최적화하여 성능의 안정화를 도모해야 한다. DBD플라즈마 젯 발생 시스템의 설계는 Fig. 5과 같은 흐름으로 이루어진다. 설계방식은 적용대상에 대한 분석, 수집된 데이터에 기반한 구조설계, 기술기준의 반영, 용량 결정, 시스템 모델링 및 시뮬레이션과정, 프로토타입의 제작 등의 과정을 통해 이루어진다.

2.4 플라즈마 젯 발생장치의 구성

플라즈마 젯 발생을 위한 시스템의 설계프로세서에 따라 제안된 시스템은 크게 전원공급장치(Power supply), 플라즈마젯 반응기(Plasma jet reactor), MFC 및 가스(MFC&Ar gas), 피드백측정장치(Measurement instrument) 등으로 구분되며 전체 시스템에 대한 구성은 Fig. 6에 나

타냈다.

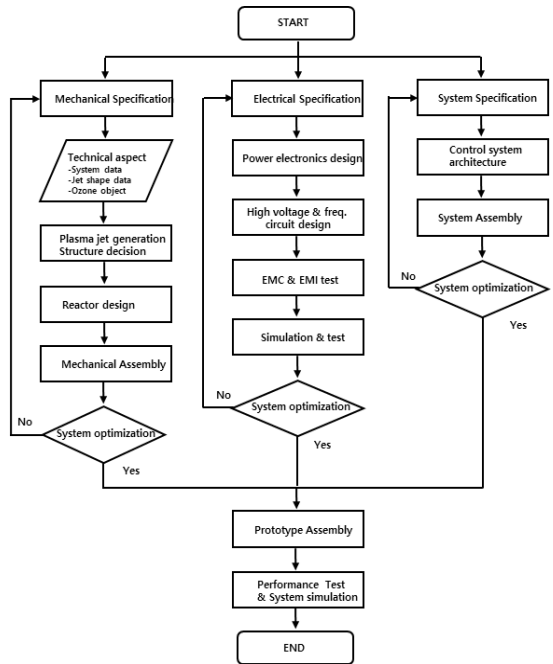


Fig. 5. DBD plasma jet generation system design flow diagram.

플라즈마 젯 발생을 위한 물리적인 형상은 Fig. 7과 같다. 반응기의 규격은 석영관으로 내경 6[mm], 외경 8[mm], 길이 100[mm]이다. 전극으로 적용된 동박의 넓

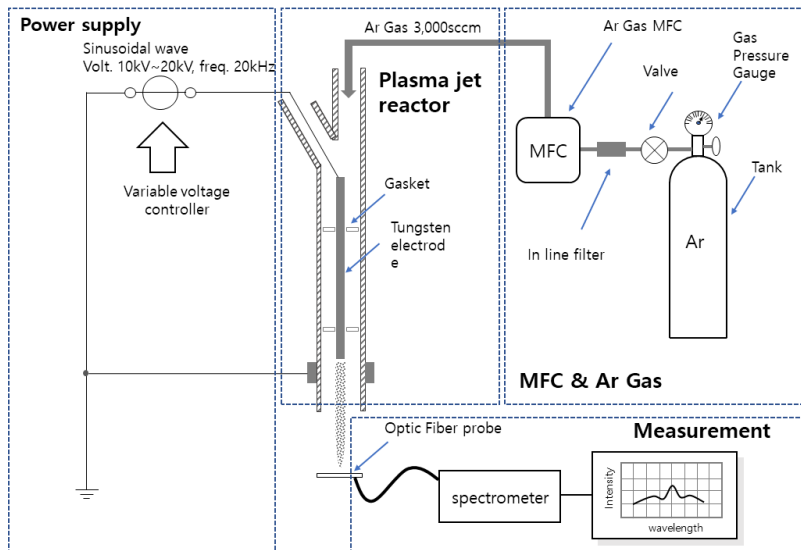


Fig. 6. Proposed overall system configuration

이 5[mm], 전극지름 2[mm]이며 양의 전극의 재질은 텅스텐이다. 또한 기계 구조적인 측면에서 석영관끝단-동박간거리 5[mm]의 간격을 유지하며 동박으로부터 극간 거리는 5[mm]이다.

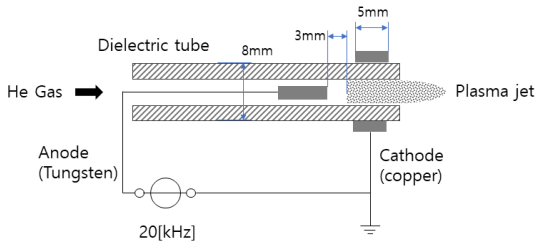


Fig. 7. Proposed structure of plasma jet reactor

반응기 구조 설계에 따른 사양은 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Physical specification

Items		Stack materials and size(mm)
Quartz pipe	Inner diameter x outer diameter x length	$\phi 6.0 \times \phi 8.0 \times 100$
Electrode	Electrode diameter x copper foil width	$\phi 2 \times 5.0$
	Copper foil-electrode distance	5.0
Materials		Tungsten

유전체로 활용된 쿼츠는 0.5[mm]에서 3.8[K]의 유전 상수를 갖는다. 플라즈마 DBD의 켓의 발생 형태는 밀도 제어를 위해 주어진 면적 대비 발생된 플라즈마 켓의 형태로 구성하고 스트링 제어된 플라즈마 켓을 구성하였다.

대기압 DBD 켓 발생을 위한 시스템의 전원장치는 입력 전압을 고전압으로 승압하기 위한 고압변압기의 2차 측 권선수를 증가시켜 동작하므로 전체시스템의 크기가 커지고 복잡해지는 단점이 있으므로 이런 단점들을 개선하기 위해 상용 AC 전원으로부터 입력을 받아 인버터 전원을 형성하는 DC 전압을 승압시키는 방식의 Fig. 8의 토폴로지를 설계 및 적용하였다.

교류 220[V]/60[Hz]인 입력전압이 인가되고, 전압배기(Voltage doubler)를 이용하여 전압을 승압하는데 승압된 전압은 커패시터 C1과 C2에 분압 충전된다. C1, C2는 점 O에서의 전위가 항상 일정하게 유지된다고 말할 수 있을 만큼 용량이 충분히 커야한다. Q1, Q2는 전력용 반도체 스위치(TR or MOSFET)이며, D1, D2는 환류다이오드이며 1차 측 전압은 트랜스포머를 통해 2차 측으로 유도된다.

단상하프브리지 인버터 토폴로지에 의한 출력파형은 Fig. 9.을 통해 나타냈다. 출력전원은 12[kV]/20[kHz]의 정현파 전원을 공급한다.

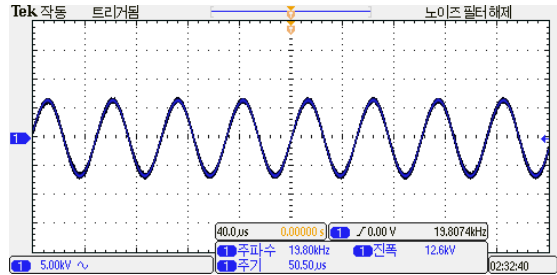


Fig. 9. Power source waveform for the DBD generation plasma jet

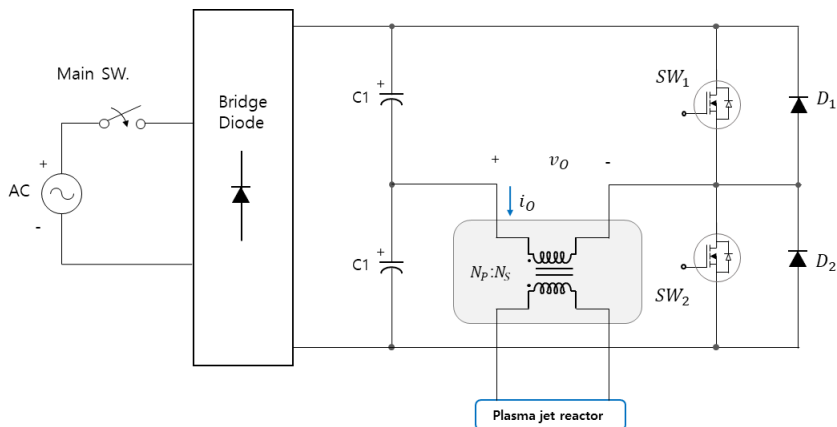


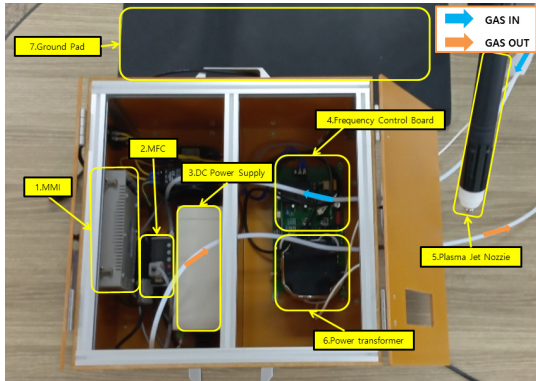
Fig. 8. System topology design for high voltage power source

MMI 및 MFC 전원은 DC 24V 사용으로 24V용 SMPS 추가하였다. 시스템에 대한 전원 노이즈로 인한 통신 왜곡현상을 막기 위해 노이즈 필터 추가하였고 MFC의 사양은 Table 2와 같으며 유량은 10SCCM(standard cubic centi meter)에서 5SLM(Standard liter per minute)의 범위에서 동작한다.

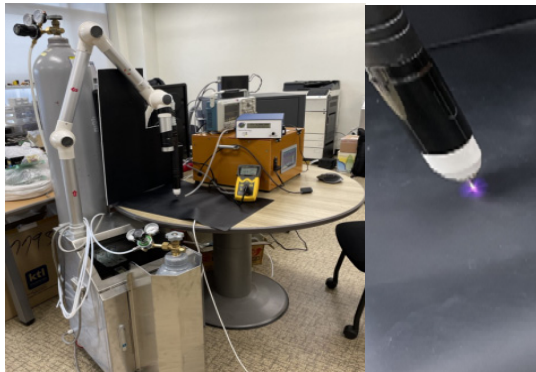
Table 2. MFC specification

Items	Specification
Flow Ranges	10SCCM ~ 5 SLM(Ar)
Control Range	2~100% of Full Scale
Response Time	≤ 1sec
Pressure Resistance	980 Kpa
Power Supply	+24Vdc/ Max. 500mA

시스템 설계방법에 따라 설계 및 제작된 시작품은 Fig. 10에 나타낸 바와 같다.



(a) Plasma jet generation system configuration



(b) Photo of the plasma jet generation

Fig. 10. Photo of prototype of DBD plasma jet generation

3. 실험 및 고찰

3.1 DBD플라즈마 젯 시뮬레이션

플라즈마 젯의 유량에 따른 형상을 시뮬레이션 모델링을 위해 유동 해석을 위한 모델링을 수행하였다[16]. 반응 기관 내부의 유동에 따른 비압축성 유체의 전달현상을 나타내는 지배방정식을 무차원으로 표시하면 연속방정식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} v_i = 0 \quad (6)$$

운동량방정식은 식 (7)과 같다.

$$\frac{Dv_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \right) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (7)$$

에너지방정식은 식 (8)과 같다.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(1 + \frac{\epsilon}{\nu} \frac{Pr}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (8)$$

이들 지배방정식을 일반형으로 표시하면 식 (9)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (9)$$

각각의 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_ϕ 와 생성항 S_ϕ 은 다른 형태로 나타내며, 유한체적법(FVM: Finite volume method)을 사용한 검사체적(Control volume)에 대한 식 (9)의 차분방정식을 구하면 식 (10)과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (10)$$

플라즈마 젯의 해석에서는 범용 열·유체해석 프로그램(COMSOL Multiphysics 4.2a)을 사용하여 해를 구하였다.

모델링 및 격자생성을 위해 격자생성 전용 프로그램을 통하여 모델과 계산격자를 생성하였다. 계산의 편의를 위

해 외부의 가상영역을 정하는 한편 2D 축대칭 모델로 해석하였다. 격자 형상은 직사각형(Rectangular)이며, 반복 계산은 입구의 유입 질량으로 무차원화된 질량 잔차값이 0.0001이 이내가 되도록 수렴 조건을 설정하였다.

경계조건에서 유체는 공기로 간주하였고 밀도는 1.21 [kg/m³], 정압비열은 1.004[kJ/kg.K], 점도는 1.789E-5[kg/m·s]이다. 난류모델은 k-ε 모델(2 equation model, Standard wall function)이고 입구조건은 INLET면에서 유량 1~2[l/min] & 1~2[atm]이다. WALL에 대한 조건에서 표면온도는 단열조건으로 간주하였다. 출구조건은 $\frac{\partial P}{\partial X_j} = 0$ 이며 운전조건 압력은 1.013[bar], 30[°C]로 설정하였다. 중심축에 대한 경계조건 정의는 축대칭 면으로 정의하였다.

Fig. 11, 12, 13은 운전모드에 따른 유동해석 결과는 플라즈마 젯 유동 특성을 나타낸 그림으로 Velocity Contour, Velocity Vector, Dynamic Pressure 및 Total Pressure 운전조건별 해석결과이며, 운전모드별 플라즈마 발생부의 위치는 유사하나 관 내부에서 특성은 각기 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

경계조건은 INLET 경계면에서, 유량 1[l/min] & 1[atm], 1.5[atm], 2[atm], INLET 경계면에서, 유량 1.5[l/min] & 1[atm], 1.5[atm], 2[atm], INLET 경계면에서, 유량 2[l/min] & 1[atm], 1.5[atm], 2[atm]이다. 외부조건은 35[°C], 1[atm]으로 설정하였다.

운전모드 1[l/min], 1[atm] 조건에서 해석결과는 Fig. 11에 나타내었다.

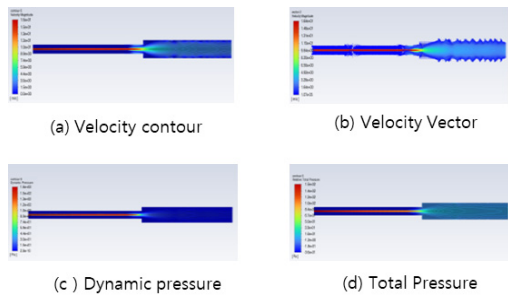


Fig. 11. Result of condition at 1[l/min], 1[atm]

운전모드 1.5[l/min], 1[atm] 조건에서 해석결과는 Fig. 12에 나타내었다.

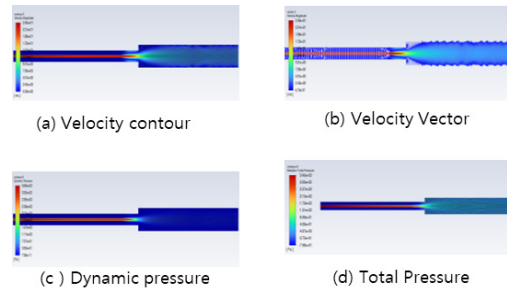


Fig. 12. Result of condition at 1.5[l/min], 1[atm]

운전모드 2[l/min], 1[atm] 조건에서 해석결과는 Fig. 13에 나타내었다.

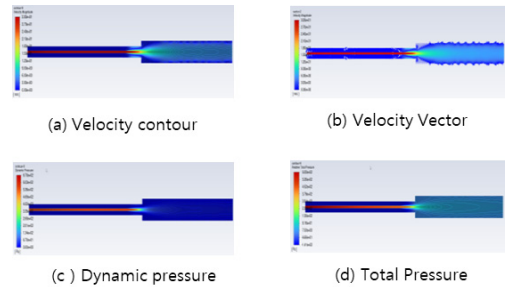


Fig. 13. Result of condition at 2[l/min], 1[atm]

3.2 플라즈마 젯의 스펙트럼분석

플라즈마 젯의 스펙트럼분석기를 이용한 분석 방법에서는 광섬유로 플라즈마젯을 유입시키기 위해 접지전극을 이용한 스펙트럼분석기를 이용하여 측정하였다. 가시광선 영역에서 유입된 광소스를 필터링하고 평균값으로 환산하여 정수값으로 표현할 수 있다. 평균값은 특정영역의 범위를 지정하여 평균값을 산출하거나 또는 피크값을 산출하여 지정할 수 있다.

플라즈마 젯의 발생은 다양한 파라미터의 영향을 받게 되므로 고주파 필터링을 수행하는 가시광영역에서의 평균값을 이용하는 것이 유리하다. Spectrum 분석 실험을 위한 측정 장비는 AvaSpec-ULS2048CL-EVO를 이용하였다. 측정파장은 200-1100[nm]이고 분해능(Resolution)은 0.06-20[nm], AD converter는 16bit, 6[MHz]이다. MFC를 이용하여 1[l/min]에서부터 5[l/min]의 유량의 변동을 제어하여 발생된 플라즈마 젯의 스펙트럼을 분석함으로써 다양한 파라미터를 통해 제한된 플라즈마 젯의 활성종(Reactive species)을 OES(Optical emission

spectroscopy)를 확인하였다.

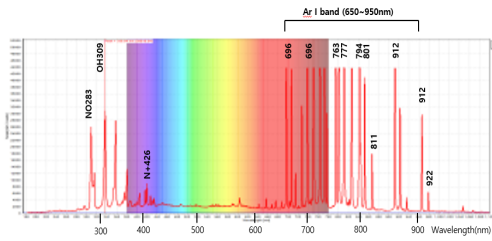


Fig. 14. OES in the UV-NIR range and species identification refer to Ar

Fig. 13에서 확인할 수 있는 바와 같이 650~950[nm]에서 Ar 방출 밴드가 형성됨을 확인 할 수 있으며 Ar기체의 이온화 에너지로 인해 OH라디칼이 생성됨을 확인할 수 있다.

Table 3은 유량에 따른 스펙트럼의 분석결과를 나타낸다. 플라즈마의 강도는 4[l/min]까지 증가하다가 5[l/min]에서 감소하는 현상까지 확인할 수 있다.

Table 3. Spectral analysis results based on flow rate

Flow Rate	Results
1L/min	
2L/min	
3L/min	
4L/min	
5L/min	

4. 결론

대기압 볼륨 DBD방식을 적용한 플라즈마 젯 발생 장치의 설계 및 구성을 통해 프로토타입을 제작하여 플라즈마 젯의 발생을 실험하였다. 실험 결과를 통해 인가된 전압의 크기가 플라즈마 젯에 미치는 영향을 분석하였고, MFC를 이용하여 플라즈마 젯 발생을 위한 Ar 가스를 인가하여 플라즈마 젯의 유량에 따른 발생형태와 그에 따른 스펙트럼 분석을 수행하였다. 스펙트럼의 크기는 유속의 크기에 따라 변동하는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인할 수 있었고, 이에 따라 활성종의 크기는 4[l/min]에서 최적화됨을 확인할 수 있었다. 향후, 다양한 파라미터를 통해 발생된 플라즈마 젯의 스펙트럼 분석을 통해 활성 산소종(Reactive Oxygen Species)에 대한 분석을 수행함으로써 의료용 플라즈마 젯의 적용가능성에 대해 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] O Eichwald, O Ducasse, N Merbahi, M Yousfi & D Dubois. (2006). Effect of order fluid models on flue gas streamer dynamics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(1), 99. DOI : 10.1088/0022-3727/39/1/015
- [2] Ronny Brandenburg. (2017). Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments. *Plasma Sources Science and Technology*, 26(5), 1-29. DOI : 10.1088/1361-6595/aa6426
- [3] Shatha M. Al Qaseer, Mohammed K. Khalaf, & Serwa I.Salih. (2021). Optimal Power of Atmospheric Pressure Plasma Jet with a Simple DBD Configuration for Biological Application, *Journal of Physics: Conference Series*, 21VCPS 2021, 1-15. DOI : 10.1088/1742-6596/1999/1/012058
- [4] B L Sands, B N Ganguly, & K Tachibana. (2008). A streamer-like atmospheric pressure plasma jet. *Appl. Phys. Lett*, 92 (15), 151503. DOI : 10.1063/1.2909084
- [5] M. Babija, T. Gotszalka, Z.W. Kowalskia, K. Nitscha, J. Silberringb & M. Smoluchb. (2014). Atmospheric Pressure Plasma Jet for Mass Spectrometry. *Proc. of the 8th International Conference NEET 2013, Zakopane, Poland*. 1260-

1262. DOI : 10.12693/APhysPolA.125.1260
- [6] C. Tendero, C. Tixiera, P. Tristanta, J. Desmaisona & P. Leprince. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2-30. DOI : 10.1016/j.sab.2005.10.003
- [7] L. Gan, S. Zhang, D. Poorun, D. Liu, X. Lu, M. He, X. Duan & H. Chen, (2018). Medical applications of nonthermal atmospheric pressure plasma in dermatology, *J. Deutschen Dermatol. Gesellschaft*, 16(1), 7-13. DOI : 10.1111/ddg.13373
- [8] Sherlie Portugal¹, Subrata Roy & Jenshan Lin¹, (2017). Functional relationship between material property, applied frequency and ozone generation for surface dielectric barrier discharges in atmospheric air, *Scientific reports*, 7(1), 1-11. DOI : 10.1038/s41598-017-06038-w
- [9] Lee, W. Y. et al. (2013). Characteristics of Plasma Discharge according to the Gas-flow Rate in the Atmospheric Plasma Jets. *Journal of the Korean Vacuum Society*, 22(3), 111-118. DOI : 10.5757/jkvs.2013.22.3.111
- [10] Bishwa Chandra Adhikari Pradeep Lamichhane Jun Sup Lim Linh N. Nguyen & Eun Ha Choi, (2021). Generation of reactive species by naturally sucked air in the Ar plasma jet, *Results in Physics*, 22, 103911. DOI : 10.1016/j.rinp.2021.104863
- [11] Ju-hoon Park, Jeong-sook Park, Jae-hyeouk Lee & Byeong-ho Jeong. (2022). Space Sterilization Effect Through High-Density Plasma Ozone Using DBD Device, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(5), 2771-2778. DOI : 10.1007/s42835-022-01165-5
- [12] Park, J. H., Park, J. S., Lee, J. H., & Jeong, B. H. (2022). Space Sterilization Effect Through High-Density Plasma Ozone Using DBD Device. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(5), 2771-2778. DOI : 10.1007/s42835-022-01165-5
- [13] Kyoung-Bo Kim, Jongpil Lee, Moojin Kim. (2022). Development of CNT Coating Process using Argon Atmospheric Plasma . *Journal of Industrial Convergence*, 20(10), 33-38. DOI : 10.22678/JIC.2022.20.10.033
- [14] Shaohui Jin, Lanlan Nie¹, Rusen Zhou, Jingyi Luo¹ & Xinpei Lu. (2022). An Ionization-Driven Air Plasma Jet, *Front. Phys.*, 528. DOI : 10.3389/fphy.2022.928402
- [15] Gyu Tae Bae. Hyo Jun Jang. Eun Young Jung. Ye Rin Lee. Choon-Sang Park. Jae Young Kim. & Heung-Sik Tae. (2022). Development of an Atmospheric Pressure Plasma Jet Device Using Four-Bore Tubing and Its Applications of In-Liquid Material Decomposition and Solution Plasma Polymerization, *Polymers 2022*, 14(22), 4917. DOI : 10.3390/polym14224917
- [16] Gritter, L. T., Crompton, J. S., & Koppenhoefer, K. C. (2017). Simulation of Atmospheric Air Micro Plasma Jet for Biomedical Applications. In *Proceedings of the 2017 COMSOL Conference in Boston*.

정병호(Byeong-Ho Jeong)

[정회원]



- 1999년 8월 : 조선대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 조선대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2006년 9월~2009년 2월 : (주)기영 미다스 선임연구원

- 2009년 3월~현재 : 남부대학교 전기공학과 교수
- 관심분야 : 플라즈마, 의료기기, 전력전자
- E-Mail : energy@nambu.ac.kr