



절연파괴 현상을 구동력으로 하는 마이크로젯 인젝터 개발

함휘찬^a, 김용현^a, 육승근^b, 여재익^{a*}

Dielectric Breakdown Induced-microjets Used for Intradermal Drug Delivery

Hwi-chan Ham^a, Yong-hyun Ghymn^a, Seung-keun Yook^b, Jai-ick Yoh^{a*}^a Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University^b Hanwha Systems Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 December 2019
Revised 12 December 2019
Accepted 18 December 2019

Keywords:

Microjet
Dielectric breakdown
Spark discharge
Needle-free
Drug-delivery

ABSTRACT

Drug delivery via microjets is a method that can potentially overcome the disadvantages of conventional needle injections. We implemented a microjet injection system that operates with spark-generated bubbles. The system consists of three components: a battery, power supply system, and microjet injector, which allows 10–20 discharges and microjet injections per second. In order to increase discharge efficiency, the circuit elements and electrode shapes were optimized and the flow inside the discharge chamber was operated to minimize the influence of metal colloids generated by electrode erosion. The microjet ejection was captured by a high-speed camera to correlate the energy of the spark discharge with microjet characteristics in order to make the system suitable for transdermal drug penetration.

1. 서론

마이크로젯(microjet)을 이용한 약물 전달은 기존의 바늘 주사의 대안으로써 기존에 알려진 바늘 주사의 단점을 극복 할 수 있는 하나의 방안이 될 수 있다^[1]. 이러한 방안을 구현하기 위한 시도의 일환으로, 레이저가 작동유체에 조사됨에 따라 발생한 마이크로젯을 활용한 비침습 약물 전달이 이전 연구에서 채택된 바가 있다^[2-5]. 이 시스템에서 레이저로 생성된 기포는 해당 부피를 팽창시키고 이에 따라 약물을 마이크로 제트 형태로 분사한다. 이러한 기존의 연구는 병원과 같은 의료용 레이저가 이미 도입된 환경에서 적용할 수 있으며 일반적으로 넓은 범위의 피부 표면에 약물 주입이 필요한 치료 환경에 적합하다. 더욱이, 탈모치료제 주입과 같이 환자의 직접 시술에 의해 약물이 투여되는 자가치료의 필요성이 증가하고 있다. 그러나, 종래의 레이저는 개별 환자

가 사용하기에는 비용이 많이 들기 때문에 그러한 요구를 충족시키는 것은 어렵다. 따라서, 우리는 수중 스파크 방전에 의해 발생한 기포의 팽창에 중점을 두어 24 V 배터리, 전압 증배기, 커패시터로 구성된 비교적 간단한 구성을 가지는 장치를 개발하였다. 그 결과, 기포 구동의 구동원이 레이저에서 수중 스파크 방전으로 대체되었다.

스파크는 비교적 높은 전압과 낮은 전류를 특징으로 하는 방전 유형이다^[6]. 스파크는 전극 사이에 인가된 전압이 항복 전압(breakdown voltage)보다 높을 때 발생한다. 일반적으로, 전극은 일정한 간격으로 유전체 물질 내부에 위치한다. 이 경우 전극 사이의 유전체가 이온화되고 빛과 소리의 방출과 함께 전도성 채널(conductive channel)이 생성된다. 스파크가 수중에서 발생하면 플라즈마 및 분자의 산란에 의한 발광이 발생한 이후 기포 팽창이 관찰된다. 이러한 스파크로 인해 생성된 버블의 팽창을 효과적으

* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-9334

E-mail address: jjyoh@snu.ac.kr (Jai-ick Yoh).

로 사용하여 마이크로젯을 만들 수 있다.

스파크 발생 기포는 여러 연구자들에 의해 연구되었다. 스파크 발생 기포의 거동은 Timoshkin et al.에 의해 잘 설명되었고 스파크 발생 기포의 팽창 및 붕괴는 Mackersie et al. [7,8]에 의해 보고되었다. 스파크로 인해 생성되는 기포의 열적 거동은 Vokurka 등 [9]에 의해 연구되었다. 수중 스파크 방전으로 발생된 진동 버블을 액추에이터(actuator)로 사용할 수 있는 가능성은 Dadvand 등 [10]에 의해 제안되었다. 스파크 발생 기포와 멤브레인(membrane) 사이의 상호 작용은 Turangan et al. 및 Gong et al.에 의해 보고된 바 있다 [11,12]. 수중방전으로 인해 버블이 발생될 때의 에너지 효율과 수중방전 시 얻어지는 음향 에너지(acoustic energy)가 Buogo et al.에 의해 연구되었다 [13,14]. 한편, 스파크 방전, 레이저 및 폭약과 같은 외부 소스에 의해 생성된 기포는 Gong 등의 스케일링 관계를 사용하여 비교되었다 [15].

본 논문에서는 스파크 생성 기포로 작동하는 마이크로 젯 분사 시스템을 구현하였다. 시스템의 구성을 배터리, 파워서플라이 시스템 및 마이크로젯 인젝터와 같은 3가지 구성 요소로 구성하여 초당 10-20회의 방전 및 마이크로젯 분사가 이루어지도록 하였다. 방전 효율을 증가시키기 위하여 회로 소자 및 전극 형상을 최적화하였고, 방전 챔버 내부에 유동을 주어 전극 부식에 의한 금속 콜로이드의 영향을 최소화하였다. 또한 스파크 방전의 에너지와 마이크로젯의 상관관계를 분석하기 위하여 마이크로젯을 고속 카메라로 포착하였다. 이로써 피부 침투에 적합한 방전 조건과 마이크로젯 속도를 얻어내었다.

2. 실험 셋업

2.1 인젝터 구성

마이크로젯 약물을 분사하는 인젝터는 Fig. 1과 같이 약물노즐과 압력챔버 및 약물노즐과 압력챔버를 분리하는 탄성 멤브레인으로 구성되어 있으며 압력챔버 내부에는 전극 한 쌍이 위치한다. 압력챔버는 작동유체로 사용되는 증류수가 포함되며 전극 한 쌍은 작동유체 내부에 잠겨져 있다.

전극의 각 양극에 5 ~ 10 kV의 매우 높은 전기적 포텐셜(electrical potential)을 인가하여 전극 사이의 구동 액체의 항복 전압에 도달할 경우, 구동액체 내에 줄발열(joule heating)이 발생하며 이에 따라 구동액체가 급격히 증발하여 절연과괴(dielectric breakdown) 현상이 일어나며 충격과 생성과 함께 급격한 기포의 성장이 나타난다 [7,8]. 기포의 성장은 압력챔버 하단의 탄성 멤브레인을 밀어내며 멤브레인은 약물 노즐의 약물을 밀어낸다. 이를 통해 노즐에서 약물이 고속 마이크로젯 형태로 분사된다.

전극의 양극(anode)과 음극(cathode) 사이의 간격은 1.0 mm이

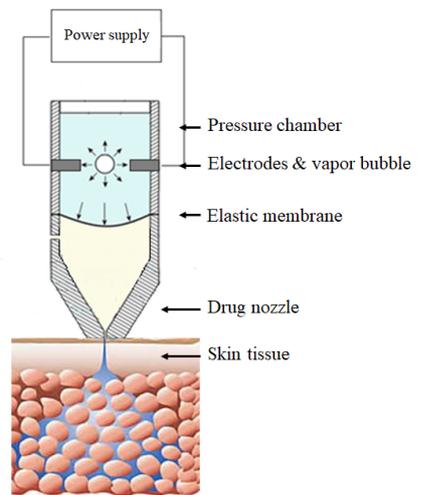


Fig. 1 Schematic of two a different power sources and drug chamber nozzles attached to a pressure chamber of an underwater spark discharged system



Fig. 2 Check patterned electrodes of which diameter is 4 mm. The number of each spike is 34

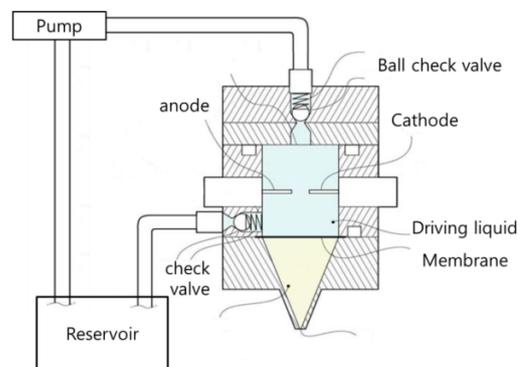


Fig. 3 Schematic of microjet injector with driving liquid circulation system

다. 전극을 구성하는 재료는 순수 구리이며 직경은 2 mm, 길이는 10 mm의 원통 형상이 있고 Fig. 2와 같이 전극의 끝부분에 스파이크(spike) 형상의 패턴이 있는 경우가 있으며 각 두 가지 경우의 방전 성능을 비교하였다. 압력챔버의 내부 직경은 8 mm이며 높이는 10 mm이다. 탄성 멤브레인의 재질은 실리콘이며 경도는 70 shore A, 두께는 0.2 mm이다. 압력챔버를 밀폐하거나 Fig. 3과 같이 압력 챔버 내부의 증류수를 외부 펌프에 의해 순환시켰으며 이러한 밀폐 여부에 따라 방전 성능을 비교하였다. 노즐의 각도는 10°이며 분사 홀의 직경은 200 μm이다. Fig. 4는 이러한 구성품

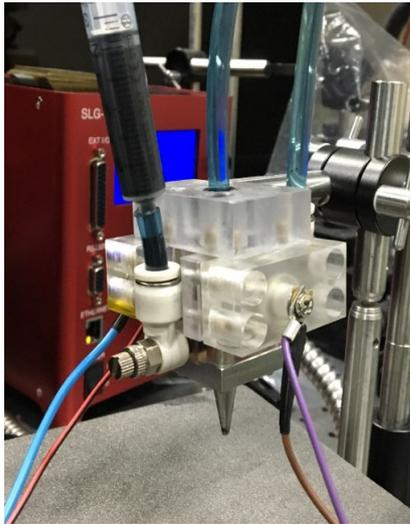


Fig. 4 The entire assembled injector

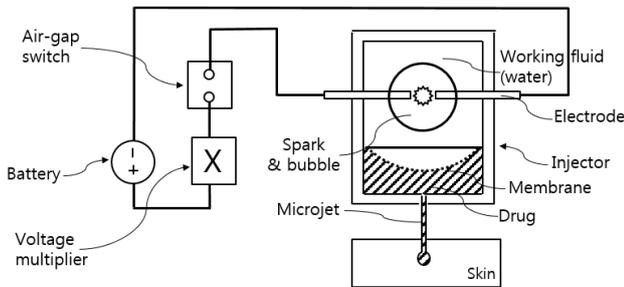


Fig. 5 Schematic of microjet injection system actuated by spark discharge

들이 체결된 상태의 인젝터이다.

2.2 파워서플라이 시스템

전극 양극에 가해지는 전기적 포텐셜 에너지는 Fig. 5에 도시한 파워서플라이 시스템으로 제공한다. 파워서플라이 시스템은 배터리와 DC-DC 전압증배기(voltage multiplier), 축전지(capacitor), 가스방전튜브(gas discharging tube)로 구성된다. 배터리에서 출력되는 24 DCV 전압은 전압증배기를 통해 5 kV의 전압으로 승압된다. 이는 6.0 kV의 최대 충전 전압, 1.2 μF의 충전량을 가지는 캐패시터 뱅크를 충전시킨다. 캐패시터는 전압이 인가되었을 때 0 V부터 5 kV까지 선형적으로 전압이 상승한다. 캐패시터 출력단에 연결된 가스방전튜브는 5.0 kV의 허용 전압을 가지기 때문에 캐패시터의 전압이 5.0 kV에 도달하였을 때 회로를 단락(short)시켜 전류가 전극에 인가되도록 한다. 캐패시터의 전압이 다시 5.0 kV로 충전될 때까지 가스방전튜브는 회로를 열어준다. 이러한 과정이 초당 10-20회 반복되어 압력챔버 내부에 기포를 해당 반복 속도로 생성시키고 마이크로젯을 반복하여 분사한다.

2.3 고속 이미지 촬영

시스템 성능을 분석하기 위해 본 연구에서 설정한 기준은 지속적인 마이크로 제트 속도이다. 제트 속도는 고속 카메라(Phantom v711)를 사용하여 측정하였다. 고속 이미지는 제트 속도를 촬영하기 위하여 112 × 600의 해상도, 49,026 fps의 촬영속도로 저장된다. 챔버 내부의 베어링볼과 미량 입자(0.25-0.50 μm)의 이동은 208 × 504의 해상도로 40,000 fps로 측정하였다. 픽셀 당 실제 측정 거리는 촬영된 이미지의 초점 거리에서 계산되며 이로 인해 속도를 계산하였다. 또한, 제트 속도는 제트가 처음 노즐을 떠날 때 즉시 측정하였다.

2.4 전압 파형 분석 및 방전 확률 측정

방전 성능을 분석하기 위하여 식 (1)과 같이 잔류에너지를 측정하였다. V_f 는 절연과괴 시 전압이며 V_r 는 잔류 전압(residual voltage)이다. 이러한 전압치는 전극 쌍에 전압 프로브(probe)를 연결하고, 프로브와 연결된 오실로스코프에서 출력하는 파형을 통하여 측정하였다. 프로브는 PINTEK HVP-39pro, 1000:1, 900 MΩ, 28 KVrms를 사용하였다. 오실로스코프는 Tektronix, TBS 1052B-EDU, 50 MHz, 1 GS/s를 사용하였다.

$$E_{deposit} = \frac{1}{2} CV_f^2 \dots\dots\dots (1)$$

3. 결과 및 논의

Fig. 6은 파워서플라이 시스템을 사용하여 압력챔버의 전극 쌍에 전압 펄스를 인가하고 이때 나타나는 절연과괴현상 및 기포 팽창을 초고속 카메라로 촬영한 것이다. 해당 촬영 이미지의 전극은 원통(flat electrode) 형상의 구리 재질이며 압력챔버는 밀폐 상태이다. 각 이미지 프레임 간격은 12 μs이다. 전극 쌍에 전기적 포텐셜은 인가하여 약 12 μs 이후 구동 액체가 이온화되어 플라즈마를 생성한다. 이후 구동액체가 증발하면서 기포가 팽창한다. 팽창과 동시에 전극 재료의 일부가 미립화되어 전극으로부터 떨어져나가는 현상이 발견되었으며 이는 전극의 순간적인 산화, 열적하중 및 충격파에 의한 마모로 발생 되는 것으로 추측하였다.

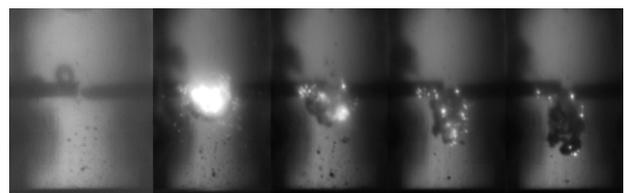


Fig. 6 Sequential image of dielectric breakdown in pressure chamber where the electrodes submerged into the distilled water. The frame interval was 12 μs

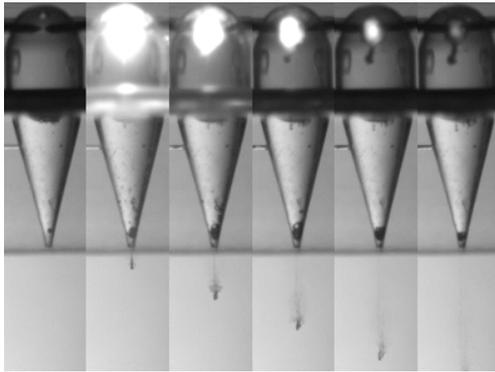


Fig. 7 Sequential image of microjet ejection due to the dielectric breakdown in pressure chamber. The frame interval was 42 μ s

Fig. 7은 압력챔버 내부의 절연파괴 및 기포 팽창으로 인해 분사되는 마이크로젯을 촬영한 것이다. 이때 압력챔버는 밀폐되어 있는 상태였으며 해당 이미지의 프레임 간격은 42 μ s이다. 그림에서 전극이 잠겨져 있는 공간은 압력챔버이며 압력챔버 하단의 다소 부풀어있는 공간은 탄성 멤브레인이다. 탄성 멤브레인은 압력챔버가 밀폐되어있으며 압력챔버와 약물노즐이 서로 체결되어있기 때문에 체결할 때 발생하는 압력에 의하여 아래방향으로 다소 팽창되어있다. 방전 시 전극사이의 플라즈마 발생과 함께 마이크로젯이 노즐에서 분사된다.

과워서플라이 시스템의 커패시터 충전전을 통하여 전극에 에너지를 인가할 경우 구동액체에 전달되는 에너지는 식 (1)과 같다. Fig. 8은 압력챔버 내부에 절연파괴 현상이 발생할 때 전극 쌍의 전압을 측정할 것이다. Pre-breakdown time은 가스방전튜브가 회로를 단락하여 전극에 인가된 전압이 커패시터 충전 전압에 도달한 순간부터 절연파괴시 전압에 이르기까지 걸리는 시간이다. 이러한 지연시간동안 전기적 포텐셜은 구동액체를 전기전해(electrolysis)하는데 소모되며 전극 양단에 인가된 전압은 감소하게 되고 결국 절연 파괴시 전압, V_f 가 감소한다^[16]. 따라서 식 (1)과 같이 pre-breakdown time 동안 감소된 파괴전압은 스파크 채널 생성에 전달되는 에너지, $E_{deposit}$ 이 감소 되었음을 의미한다. 다시 설명하자면 Fig. 8은 원통형 전극(flat electrode)과 스파이크 패턴 전극(spike patterned electrode)을 사용하였을 때 전극 쌍에서 전압을 측정할 결과를 보여준다. 두 경우 모두 밀폐된 압력챔버에서 방전하였으며 방전 200회 이후 전극의 마모에 의한 콜로이드생성 이후 측정할 것이다. 이를 통해 각 경우의 pre-breakdown time의 변화를 볼 수 있다. 원통형 전극을 사용했을 때 pre-breakdown time은 118 μ s이며 해당 시간 동안 인가된 전압이 강하여 절연파괴 시 전압 V_f 는 4.4 kV이다. 잔류전압 V_f 는 0 V이다. 따라서 식 (1)에 의해 $E_{deposit} = 1.9$ J이다. 스파이크 패턴 전극을 사용했을 때

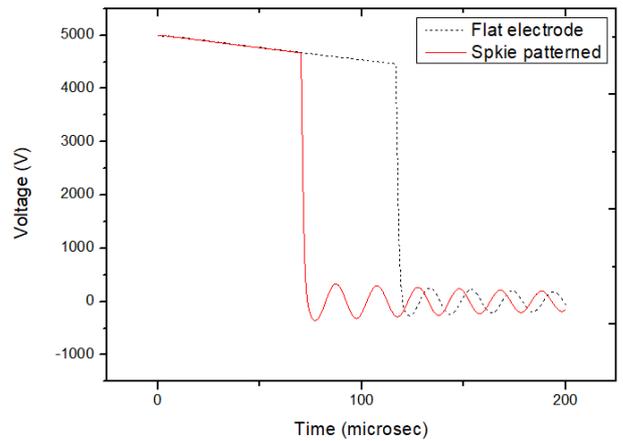


Fig. 8 Voltage measured at the electrodes where the electrode shape was flat (dashed line) and check patterned (solid line) in the sealed pressure chamber. This voltage was measured after 200 shots

pre-breakdown time은 82 μ s이며 해당 시간 동안 인가된 전압이 강하여 절연파괴 시 전압 V_f 는 4.7 kV이다. 따라서 식 (1)에 의해 $E_{deposit} = 2.2$ J이다. 원통형 전극에 비하여 스파이크 패턴 전극의 팁부분의 단면적이 작기 때문에 방전 시 전하밀도가 더 높게 집중되어 파괴 전압까지 걸리는 시간을 단축할 수 있었다고 사료하였다. $E_{deposit}$ 이 스파이크 패턴 전극에서 증가함에 따라 젯속도 또한 19 m/s 증가하였으며 표준편차는 감소하였다. Bane^[17]에 따르면 스파크 채널을 전극사이에 위치하는 얇은 원통 형상으로 표현할 수 있으며 절연파괴에 의한 열적 거동을 고려할 때 스파크 채널의 원통형 부피는 아래 식 (2)와 같다. 해당 부피를 전극 사이 겹 거리로 나누면 식 (3)과 같이 스파크 채널의 면적이다.

$$V_c = \frac{E_{deposit}}{c_v \rho_0 (T_c - T_0)} \dots\dots\dots (2)$$

$$A = \frac{E_{deposit}}{c_v \rho_0 (T_c - T_0) d} \dots\dots\dots (3)$$

Rizvi^[18]에 따르면 방전 시 절연파괴에 의한 에너지는 잔류에너지 V_f 와 전하밀도 및 스파크채널 면적의 곱과 같다고 하였으며 절연파괴 에너지는 아래 식 (4)와 같다. 해당 식의 방전 면적에 식 (3)을 대입하면 식 (5)와 같다. 이때 c_v 는 정적비열이며 ρ_0 는 구동액체의 밀도, T_c 는 스파크 채널의 온도이며 T_0 는 구동액체의 온도이다.

$$E_{deposit} = V_f q_s A \dots\dots\dots (4)$$

$$V_f = \frac{c_v \rho_0 (T_c - T_0) d}{q_s} \dots\dots\dots (5)$$

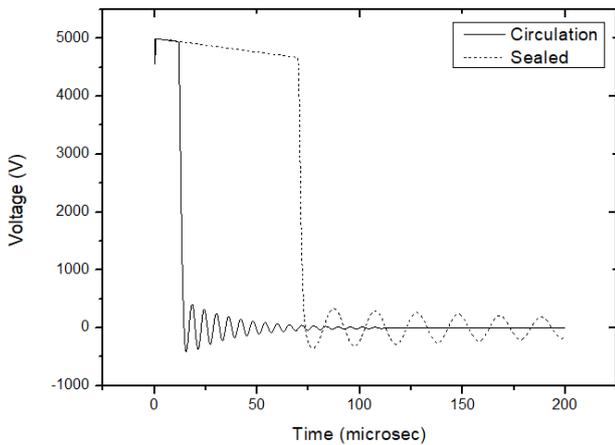


Fig. 9 Voltage measured at the electrodes when the pressure chamber was filled with colloid particles which were generated by electrodes erosion in the sealed pressure chamber (dashed line), and the voltage measured when the pressure chamber was flushed by water circulation (solid line). Each voltage was measured after 200 shots

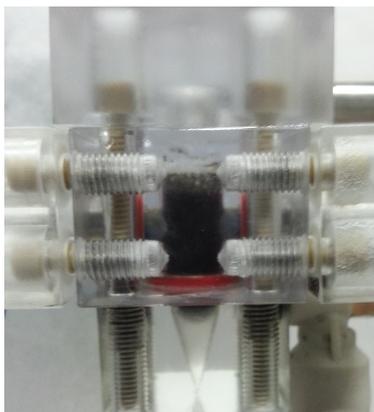


Fig. 10 The pressure chamber filled with colloid particles which were generated by electrodes erosion

이때 전하밀도 q_s 는 전극의 각 spike의 팁이 아주 작은 반구형태라고 가정했을 때 식 (6)과 같으며 이때 Q 는 전하량이며 r 은 전극 spike 팁의 반지름이다.

$$q_s = \frac{3Q}{2\pi r^3} \dots\dots\dots (6)$$

따라서 전극 팁의 반지름이 더 감소할수록 잔류전압 V_f 가 증가하며 식 (1)에서 알 수 있듯이 잔류전압과 방전 에너지는 비례한다. 따라서 전극의 형상이 spike 형상에 가까울수록 방전에너지가 증가하여 방전효율 또한 증가한다.

Fig. 9는 압력챔버가 밀폐되었을 때와 압력챔버 내부 구동액체를 외부 펌프를 사용하여 순환시켰을 때 전극 쌍에서 전압을 측정 한 것이다. 두 경우 모두 스파이크 패턴 전극을 사용하였으며 방전

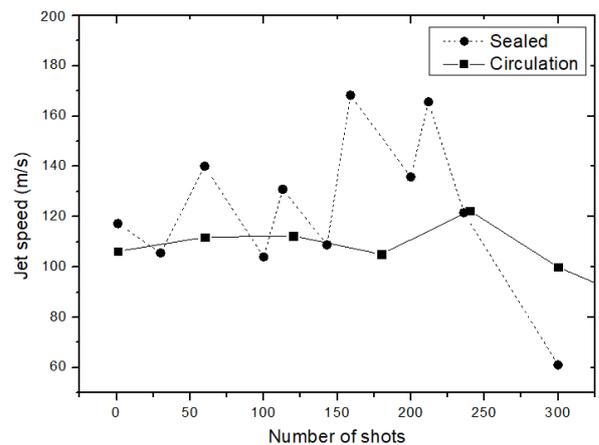


Fig. 11 Micro jet speed versus number of shot. Rectangular dots indicate the jetspeed measured when the pressure chamber was filled with colloid particles. Circle dots indicate the jet speed measured when the pressure chamber was flushed by water circulation

Table 1 Breakdown probability, pre-breakdown time and jet speed of each electrode and chamber condition.

Description	B.P. [%]	B.V. [kV]	Deposit energy [J]	Jet speed [m/s]
Flat electrode	33	4.4	1.9	105 ± 48
Patterned electrode in the sealed chamber	100	4.7	2.2	124 ± 38
Chamber circulated	100	4.9	2.4	111 ± 25
Diode attached	100	5.0	2.5	119 ± 19

200회 이후 측정 한 것이다. 방전 200회 이후 방전을 더 지속하면 Fig. 10과 같이 전극이 마모되어 발생한 콜로이드가 챔버에 분포하게 된다. Table 1에 정리한 것과 같이 각 경우의 파괴전압은 압력챔버가 밀폐되었을 때 4.7 kV이며 구동액체를 순환시켰을 때 4.9 kV이다. 따라서 $E_{deposit}$ 은 각각 2.2 J, 2.4 J이다. 그러나 젯속도는 구동액체가 순환할 때 13 m/s 감소하였다. 이는 압력챔버를 순환시킴에 따라 압력챔버가 외부 구동액체 저장소로 연결되었기에 따라 구동액체가 포함되는 공간이 넓어짐에 따라 생성되는 압력이 감소된 것으로 추측하였다. 그러나 전극 마모로 인한 금속 콜로이드가 구동액체 순환에 의해 외부로 방출되어 전극 사이 물질이 항상 균일한 상태를 이룰 수 있기 때문에 방전 성능이 균일해졌고 따라서 젯속도의 표준편차가 밀폐 압력챔버를 사용했을 때보다 13 m/s 감소하였다. Fig. 11은 밀폐된 압력챔버를 사용하였을 때와 구동액체를 순환시켰을 때의 방전 횟수에 따른 젯속도 변화를 보여준다. Rond^[19]는 절연과괴시 전압 V_f 와 방전 시 전극 사이의 저항 및 최대 전류 값의 관계를 실험적으로 도출하였으며 이에 따라 수중 방전에서 절연과괴에 의한 에너지는 아래 식(7)과

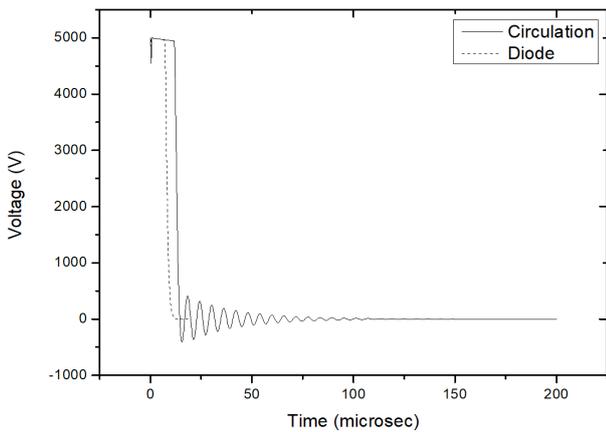


Fig. 12 Voltage measured at the electrodes when the pressure chamber was flushed by water circulation and when the diodes were attached at the anode side

같이 표현하였다.

$$E_{bk} = E + R \cdot I_{peak} \dots\dots\dots (7)$$

이때 E 는 intercept voltage이며 이는 잔류 전압 $V_f = 0$ V에 도달했다가 다시 0 V 이상으로 증가하는 현상이며 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 intercept voltage는 $E \approx 0$ 이라고 볼 수 있다. I_{peak} 은 전극을 통과하는 전류의 최대치이며 R 은 구동액체의 저항이다. 전극이 방전을 지속하여 마모될 경우 금속콜로이드 파티클이 발생하여 전극 사이 구동액체의 전기전도도가 증가하며 이는 구동액의 저항을 감소시킨다. 따라서 식 (7)에 의해 절연파괴에 의한 에너지 E_{bk} 가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 12는 가스방전튜브 출력단 양극과 음극에 다이오드(15 kV, 50 mA)를 병렬로 연결하여 전극 쌍에서 전압을 측정하는 것이다. 두 경우 모두 스파이크 패턴 전극을 사용하였으며 구동액체를 순환시켰고 방전 200회 이후 측정하는 것이다. Table 1에 정리한 것과 같이 각 경우의 파괴전압은 다이오드가 연결되지 않았을 때 4.9 kV이며 연결하였을 때는 5.0 kV이다. 따라서 $E_{deposit}$ 은 각각 2.4 J, 2.5 J이다. 방전 파형을 보았을 때 다이오드에 의하여 파괴전압 이후 전압 파동(fluctuation)을 없앨 수 있었다. 이는 다이오드가 한 방향으로 전류를 흐르게 하여 스파크 채널 생성 시 발생하는 역기전력을 차단하였기 때문일 것이라고 사료하는 바이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 다이오드가 연결되지 않을 경우 절연파괴 후 전압의 파동이 나타나며 이러한 현상이 나타나는 원인은 스파크 방전 시 기포 팽창의 진동(oscillation)^[10] 등 시간에 따라 변화하는 전극 사이 물질 상태에 따라 전위차의 방향이 변화하며 절연파괴에 사용되지 못한 전기에너지가 역방향으로 흐르기도 하며 순방향으로 흐르기도 하기 때문이다. 따라서 역기전력에 의해 역전압이 발생되는데 이때 다이오드를 통하여 전류가 순방향으로만

흐르도록 하여 전압의 진동 파형을 제거하였다. 이는 역전압으로 인해 발생할 수 있는 회로의 파괴를 방지할 수 있다. 젯속도는 다이오드의 연결 여부에 따라 8 m/s 증가하였고 젯속도의 표준편차는 6 m/s 감소하였다. 이러한 방전 성능에 따른 젯속도는 Table 1에 정리하였다. 레이저조사로 유도된 마이크로젯을 활용한 선행 문헌^[2]에서는 피부로 약물을 침투시키기 위한 마이크로젯 속도는 87.1 m/s이라고 하였으며 본 연구에서 절연파괴 방식으로 유도한 마이크로젯의 속도는 ~124 m/s이므로 피부 침투에 유효한 속도라고 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 스파크 생성 기포로 작동하는 마이크로 젯 분사 시스템을 구현하였다. 시스템의 구성을 배터리, 파워서플라이 시스템 및 마이크로젯 인젝터와 같은 3가지 구성 요소로 구성하여 초당 10-20회의 방전 및 마이크로젯 분사가 이루어지도록 하였다. 전극의 형상 및 구동액체의 유동조건을 최적화하여 방전 챔버 내부에 유동을 주어 전극 부식에 의한 금속 콜로이드의 영향을 최소화하고 스파크 채널에 사용되는 에너지를 증가시켰다. 전극 팁의 형상에 따라 변화하는 방전 특성은 스파크 채널 및 방전 시 열적 거동 모델링을 통하여 해당 모델링이 실험 데이터의 경향을 설명할 수 있음을 확인하였다. 금속 콜로이드에 의하여 구동액체의 전기전도도가 감소하며 이에 따라 절연파괴 에너지가 감소할 수 있음을 나타내었다. 또한 충방전 회로 소자를 최적화하여 방전 파형의 파동을 제거하였으며 이는 다이오드 소자를 통해 역기전력을 제거하여 회로 소자 파괴의 가능성을 감소시켰다고 보였다. 이로써 피부 침투에 적합한 방전 조건과 마이크로젯 속도를 얻어내었으며 이러한 속도는 기존 선행 연구에서 체내로 약물을 침투시키기 위하여 필요한 마이크로젯 속도 값의 범위에 속하였다. 마이크로젯을 발생시키기 위해 기존 선행문헌에서 사용된 레이저(Er:YAG, 2940 nm)의 소비전력은 약 2200 W^[20]이며 이는 마이크로젯을 발생시키기 위하여 전기에너지에서 빛에너지로 변환하고 이를 다시 운동에너지로 변환할 때의 비효율성에 기인한다. 그러나 절연파괴 방식의 경우 전기에너지를 바로 운동에너지로 변환시킬 수 있으므로 적절한 속도의 마이크로젯을 10 Hz로 반복 분사하기 위하여 소비전력 50-60 W가 사용된다($W = 1/2 C V^2 \times \text{초당 반복횟수}$).

후기

이 논문은 2019년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.

References

- [1] Kendall, M. A., 2010, Needle-free Vaccine Injection, Handbook of Experimental Pharmacology, 197:197-219, https://doi.org/10.1007/978-3-642-00477-3_7.
- [2] Jang, H. J., Hur, E., Kim, Y. K., Lee, S. H., Kang, N. G., Yoh, J. J., 2014, Laser-induced Microjet Injection into Preablated Skin for More Effective Transdermal Drug Delivery, J. Biomed. Opt., 19:11 118002, <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.11.118002>.
- [3] Jang, H. S., Yeo, S. G., Yoh, J. J., 2017, Skin Pre-ablation and Laser Assisted Microjet Injection for Deep Tissue Penetration, Las. Surg. Med., 49:4 387-394, <https://doi.org/10.1002/lsm.22608>.
- [4] Jang, H. S., Yeo, S. G., Yoh, J. J., 2016, Synchronization of Skin Ablation and Microjet Injection for an Effective Transdermal Drug Delivery, Appl. Phys. A, 122:4 1-8, <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9941-x>.
- [5] Jang, H. J., Hur, E., Kim, Y. K., Lee, S. H., Gang, N. G., Yoh, J. J., 2014, Towards Clinical Use of a Laser-induced Microjet System Aimed at Reliable and Safe Drug Delivery, J. Biomed. Opt., 19:5 058001, <https://doi.org/10.1117/1.JBO.19.5.058001>.
- [6] Hontañón, E., Palomares, J. M., Stein, M., Guo, X., Engeln, R., Nirschl, H., Kruis, F. E., 2013, The Transition from Spark to Arc Discharge and its Implications with Respect to Nanoparticle Production, J. Nanopart. Res., 15:9 1-19, <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1957-y>.
- [7] Timoshkin, I. V., Fouracre, R. A., Given, M. J., MacGregor, S. J., 2006, Hydrodynamic Modelling of Transient Cavities in Fluids Generated by High Voltage Spark Discharges, J. Phys. D: Appl. Phys., 39:22 4808-4817, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/22/011>.
- [8] Mackersie, J. W., Timoshkin, I. V., MacGregor, S. J., 2005, Generation of High-power Ultrasound by Spark Discharges in Water, IEEE Transac. Plasm. Sci., 33:5 1715-1724, <https://doi.org/10.1109/TPS.2005.856411>.
- [9] Vokurka, K., Plocek, J., 2013, Experimental Study of the Thermal Behavior of Spark Generated Bubbles in Water, Exp. Therm. Fluid Sci., 51 84-93, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.07.004>.
- [10] Dadvand, A., Khoo, B.C., Shervani-Tabar, M. T., 2009, A Collapsing Bubble-induced Microinjector: An Experimental Study, Exp. Fluid, 46:3 419-434, <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0568-3>.
- [11] Turangan, C. K., Ong, G. P., Klaseboer, E., Khoo, B. C., 2006, Experimental and Numerical Study of Transient Bubble-elastic Membrane Interaction, J. Appl. Phys., 100:5 054910, <https://doi.org/10.1063/1.2338125>.
- [12] Gong, S. W., Ohl, S. W., Klaseboer, E., Khoo, B. C., 2012, Interaction of a Spark-generated Bubble with a Rubber Beam: Numerical and Experimental Study, Phys. Rev. E, 86:2 026307, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.026307>.
- [13] Buogo, S., Plocek, J., Vokurka, K., 2009, Efficiency of Energy Conversion in Underwater Spark Discharges and Associated Bubble Oscillations: Experimental Results, Acta Acust. United Ac., 95:1 46-59, <https://doi.org/10.3813/AAA.918126>.
- [14] Buogo, S., Cannelli, G. B., 2002, Implosion of an Underwater Spark-generated Bubble and Acoustic Energy Evaluation Using the Rayleigh Model, J. Acous. Soc. Am., 111:6 2594-2600, <https://doi.org/10.1121/1.1476919>.
- [15] Gong, S. W., Ohl, S. W., Klaseboer, E., Khoo, B. C., 2010, Scaling Law for Bubbles Induced by Different External Sources: Theoretical and Experimental Study, Phys. Rev. E, 2010, 81:5 056317, <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.81.056317>.
- [16] Li, X. D., Liu, Y., Liu, S. W., Li, Z. Y., Zhou, G. Y., Li, H., Lin, F. C., Pan, Y., 2016, Influence of Deposited Energy on Shock Wave Induced by Underwater Pulsed Current Discharge, Phys. Plasm. 23:10 103104, <https://doi.org/10.1063/1.4964663>.
- [17] Bane, S. P., Ziegler, J. L., Shepherd, J. E., 2015, Investigation of the Effect of Electrode Geometry on Spark Ignition, Comb. Flame, 162:2 462-469, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.07.017>.
- [18] Rizvi, S. A. H., Smy, P. R., 1992, Characteristics of Incendive and Non-incendive Spark Discharges from the Surface of a Charged Insulator, J. Electros., 27:3 267-282, [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(92\)90019-P](https://doi.org/10.1016/0304-3886(92)90019-P).
- [19] Rond, C., Desse, J. M., Fagnon, N., Aubert, X., Vega, A., Duten, X., 2018, Influence of Applied Voltage and Electrical Conductivity on Underwater Pin-to-pin Pulsed Discharge, J. Phys. D: Appl. Phys., 52:2 025202, <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae681>.
- [20] B&B Systems, n.d., viewed 6 December 2019, <<http://www.bnbsys.co.kr/index.php?q=02110>>.



Hwi Chan Ham

Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University. His research interest is underwater spark discharge and pulsed flow.

E-mail: hamn2012@snu.ac.kr



Yong hyun Ghymn

Visiting researcher in the Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University. He is interested in high voltage physics, biomedical engineering and fabrication of IoT devices.

E-mail: udtseal48130@snu.ac.kr



Seung-keun Yook

Senior Engineer in Land R&D Center, Hanwha System.

E-mail: skyook@hanwha.com



Jai Ick Yoh

Professor in the Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University. His research interest includes physics of matters at extreme states.

E-mail: jjyoh@snu.ac.kr