

전기수력학 프린팅의 분사 특성 변화에 대한 실험적연구

김효준* · 정종렬** · 양중근** · 정재원 †

An experimental study for characteristic change of Electrohydrodynamic jetting

Hyojun Kim, Jongryul Chung, Jungkun Yang, Jaewon Chung

Key Words : Electrohydrodynamic(전기수력학), Jetting frequency(토출주파수), Nozzle size(노즐크기)

Abstract

Electrohydrodynamic (EHD) printing has gained significant interest after a direct writing with a resolution of a few tens nanometer was demonstrated using EHD. Basically, EHD use the electric field to generate droplet which is much smaller than nozzle diameter, so that high resolution printing is possible and the clogging problem can be alleviated as well. However, to adapt this technology to the real application, the fundamental studies are necessary to stabilize EHD jetting, to maximize jetting frequency, and to optimize the design of multi EHD nozzle, etc. In this study, by imaging EHD jetting using high speed camera and measuring the current, the effect of electric field intensity and back pressure on jetting frequency and jetting diameter were studied.

기호설명

A: 기호설명(m/s)

- H : 노즐과 기판 사이의 거리(mm)
- V : 인가 전압(V)
- E : 전기장(V/ μ m)
- I : 전류(A)
- Q : 유량(nL/min)
- d_i : 노즐의 내경(μ m)
- d_o : 노즐의 외경(μ m)
- ΔP : 정수압력(Pa)

1. 서 론

기존의 반도체 제조공정은 식각공정으로, 자원 활용의 비효율성, 공정 재료 선택의 제한, 설계변경의 불편함과 같은 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위한 대안으로 압전소자, 열팽창을 이용한 직접쓰기방식의 인쇄방법이 개발되었다. 하지만

수십 μ m인 해상도로 인해 적용범위가 제한적인 한계가 있다. 이와 관련하여 최근 전기수력학 프린팅을 이용하여 고해상도 인쇄를 구현¹ 하면서 이와 관련된 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

전기수력학 프린팅은 전기장을 이용하여 액적을 토출시키는 방법이다. 분사 노즐과 기판 사이에 전압이 인가되면 전기장이 생성되고 이로 인해 구형(Fig. 1 (a))이던 표면이 Cone 형상(taylor cone, Fig. 1 (b))으로 변형된다. 전기장의 크기가 증가하여 공급되는 유체에 의한 정수압력과 전기장에 의한 압력의 합이 표면장력에 의한 압력을 넘어서면 액적의 토출이 발생된다.(Fig. 1 (c))

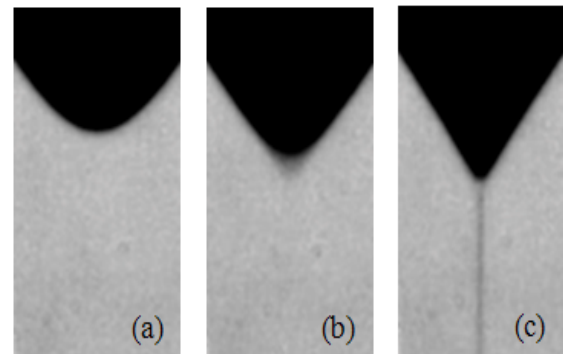


Fig. 1 Shape change by electric field

† 정재원, 고려대학교 기계공학부

E-mail : jwon@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3374 FAX : (02)3290-3751

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학부

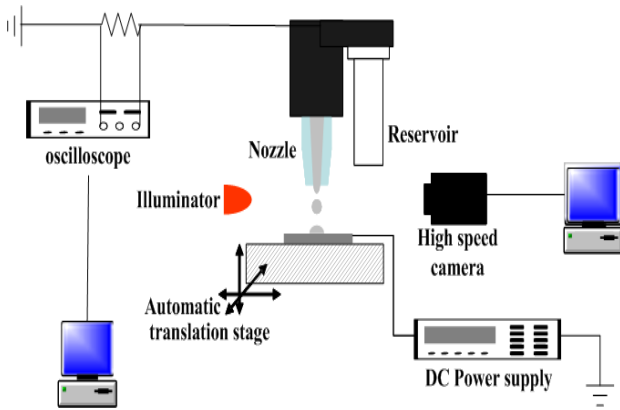


Fig. 2 Schematic diagram

이때 토출되는 액주의 직경은 Fig. 1 과 같이 노즐 직경에 비해 작기 때문에 같은 직경의 노즐을 사용하더라도 기존의 프린팅 방식에 비해 고해상도를 구현할 수 있다. 따라서, 기존 프린팅 방식에서 노즐의 직경을 줄일 때 자주 발생하게 되는 막힘(clogging)문제를 해결하면서, 액적의 크기를 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한, 전기장을 이용하여 액적 토출을 발생시킴으로써 프린팅헤드의 설계 및 제작이 비교적 간단한 장점이 있다. 하지만 기존의 잉크젯 프린팅에 비해 EHD 와 관련된 연구는 많이 진행되지 않았으며, 현장 적용을 위해서는 토출 안정화, 최대 토출빈도, 멀티노즐 구현 등이 선행되어야 한다. 이와 관련하여 R. Juraschek et al.은 전기장의 변화에 따른 토출 특성 변화와 그 이유를 연구하였으며², Hartman et al.은 Taylor cone 의 수치모델을 수립하였다.³ Chen et al.은 인가전압과 토출 빈도 사이의 관계를 실험적으로 연구하였으며⁴, Marginean et al. 은 토출 빈도와 토출액주 직경의 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다.⁵ Park et al.은 전기수력학 프린팅을 이용하여 수백 nm 의 dot 을 구현한 결과물을 발표하였다.¹

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 2 와 같다. 실험장치는 크게 유체공급부, 전압공급부, 데이터 취득부로 구성된다.

유체공급부는 Reservoir 와 연결부(1537, Upchurch), 스테인레스스틸 전극(U-145, Upchurch), 테플론노즐(Inner diameter : 75, 100, 150, 200 μm ,

Outer diameter : 794 μm (1/32 inch.) Upchurch) 로 구성하였으며, Reservoir 의 높이를 조절하여 노즐에 일정한 압력을 인가 하였다.

전원 공급부는 DC Power supply(2707, Brandenburg)를 이용하여, 금 코팅이 된 실리콘 웨이퍼 평판전극과 스테인레스스틸 튜브 사이에 전압을 공급하였다. 또한, 모션 컨트롤러(PMC 200P, Newport)를 이용하여 기판을 이송시킴으로써 먼저 토출된 액적에 의한 전기장 변화를 최소화 하였다.

Taylor cone 의 형성과 액적 토출은 고속카메라 (MotionPro X3, Redlake)를 이용하여 관찰 하였으며, 이와 동시에 액적 토출시 발생하는 전류를 오실로스코프를 통해 측정하였다.

본 실험에는 에탄올(aldrich)을 사용하고, 노즐과 평판전극 사이의 간격(H)은 1mm 로 고정된 상태에서 전기장의 변화와 정수압력(ΔP)의 변화에 따른 토출 특성 변화를 관찰하였다.

노즐 끝 부분에서의 전기장(E)은 노즐 직경(d_0)과 노즐과 무한 평판전극 사이의 거리(H) 그리고 인가된 전압(V_0)로부터 식 (1)과 같이 계산되었다.⁶

$$E = \frac{4V_0}{d_N \ln(8H/d_N)} \quad (1)$$

3. 실험결과

3.1 전기장 변화에 따른 토출 특성 변화

테플론 노즐의 내경은 75 μm , 길이는 16mm 인 조건에서, 인가되는 전기장의 크기가 커짐에 따라 유체의 표면이 Taylor cone 형상으로 변형되었다. 전기장의 크기가 2.62 $\text{V}/\mu\text{m}$ 를 넘어서면서 액적의 토출이 시작되었고, 수십 Hz 로 불규칙적으로 토출이 발생하였다. 전기장의 크기가 5.23 $\text{V}/\mu\text{m}$ 이상이 되자 Fig. 3 과 같이 규칙적인 토출 현상이 시작되었다. 5.23 $\text{V}/\mu\text{m}$ (Fig. 3(a))에서는 280.9Hz, 5.67 $\text{V}/\mu\text{m}$ (Fig. 3(b))에서는 326.8Hz, 6.10 $\text{V}/\mu\text{m}$ (Fig. 3(c))에서는 342.5Hz 로 전기장의 크기가 증가할수록 토출 주파수도 함께 증가하였다. 이후 전기장의 크기가 6.54 $\text{V}/\mu\text{m}$ 를 넘어서면서 연속적인 액주가 형성되어 일정한 크기의 전류신호가 측정되었다.

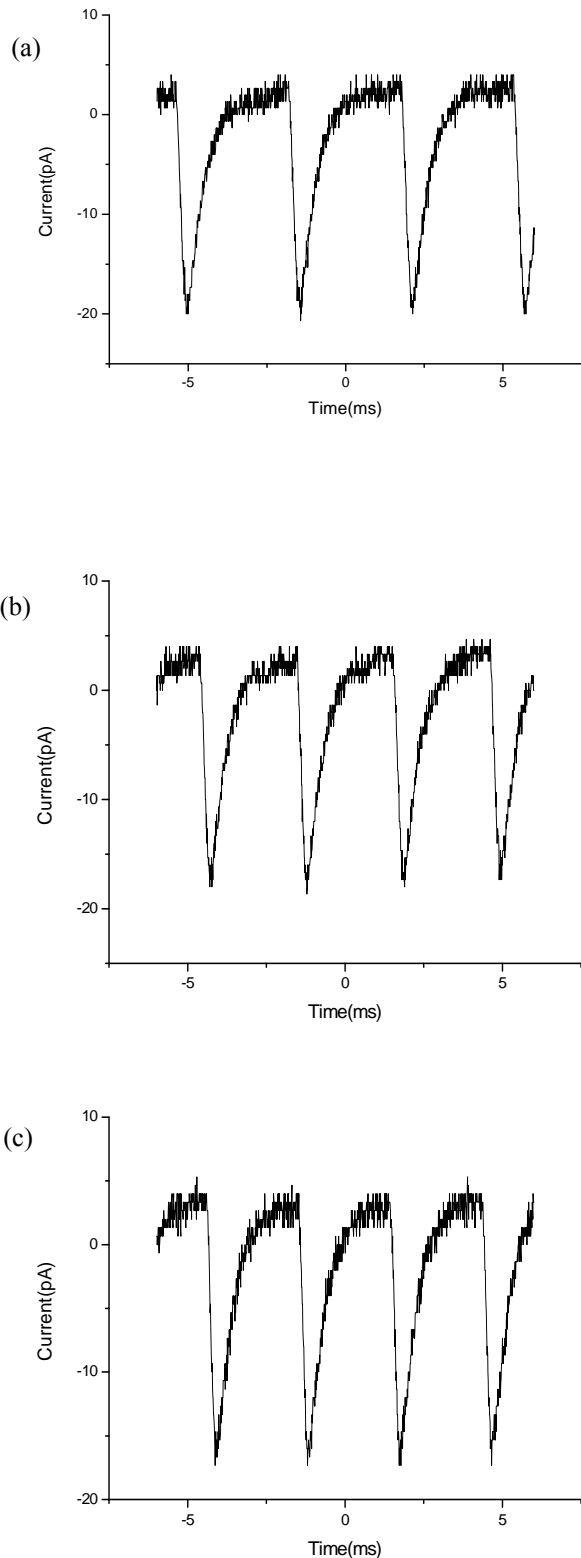


Fig. 3 Jetting signal. $d_i = 75 \mu\text{m}$, (a) $E=5.23\text{V}/\mu\text{m}$, (b) $E=5.67 \text{V}/\mu\text{m}$, (c) $E=6.10 \text{V}/\mu\text{m}$

측정된 데이터를 이용하여 한번에 토출되는 액적의 전하량을 계산해 보면 각각 12.7fC, 9.85fC, 9.01fC 이며, 이를 Rayleigh 한계 이론식⁷에 대입하면 액적의 반지름은 각각 $1.09 \mu\text{m}$, $0.92 \mu\text{m}$, $0.87 \mu\text{m}$ 로 계산된다. 전기장이 $5.23 \text{V}/\mu\text{m}$ 에서 $6.10\text{V}/\mu\text{m}$ 로 증가 하면, 토출 주파수는 21.9% 증가하며, 토출 액적의 반지름은 20.2% 감소 하였다.

이처럼 전기장의 크기가 증가 할수록 토출 주파수는 증가하고, 토출되는 액적의 크기는 감소 하는 것을 확인 할 수 있다.

다른 실험조건에서도 이와 같은 토출 특성을 보였다. 전기장의 크기가 증가함에 따라, 토출 시작 - 저주파수의 불규칙적인 토출 - 규칙적인 토출 - 연속적인 액주의 순서로 변화하는 경향을 보였다.

3.2 정수압력 변화에 따른 토출 특성 변화

길이 16mm, 내경 $150 \mu\text{m}$ 의 테플론 노즐을 사용하여, 평판전극과의 거리가 1mm, 전기장의 크기는 $E=4.79\text{V}/\mu\text{m}$ 인 조건에서 실험을 수행하였다. 노즐에 인가되는 정수압의 크기가 증가함에 따라 토출 주파수도 증가하였다. (Fig. 4)

정수압이 증가 할 경우, 토출 주파수는 증가하는 반면 계측되는 전류량은 감소하였다. 이는 각각의 액적이 포함하는 전하량이 감소하기 때문이다. 이를 3.1 에서와 같이 Rayleigh 한계 이론식에 대입하면 토출되는 액적의 반지름을 계산 할 수 있고, 이는 Fig. 5 에 나타나 있다.

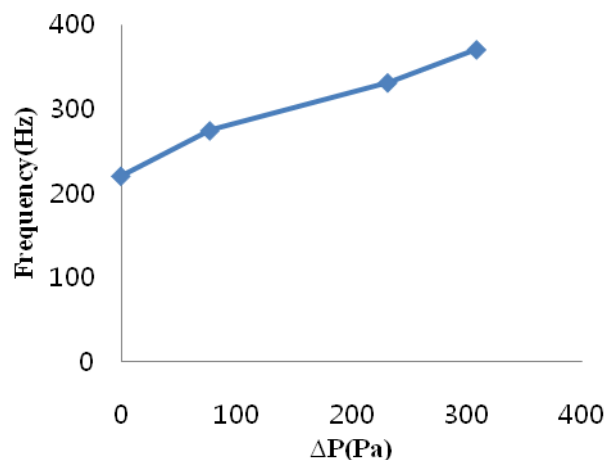


Fig. 4 Frequency vs. Static pressure,

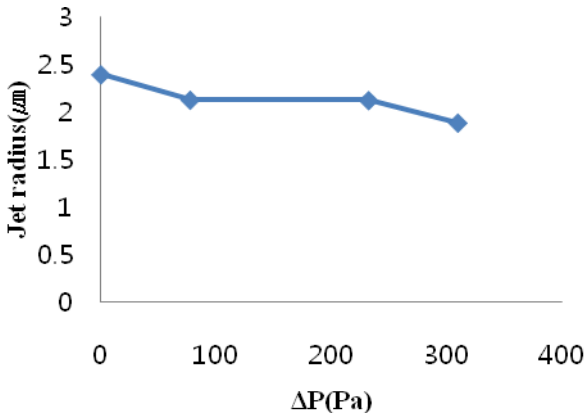


Fig. 5 Drop radius vs. ΔP

초기 실험 조건에 비해 309.288Pa 의 정수압이 추가로 인가 되었을 때, 토출 주파수는 220.3Hz 에서 370.4Hz 로 68.1% 증가하였고, 토출 액적의 반지름은 2.39 μm에서 1.88 μm로 21.3% 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 전기장의 크기와 정수압력의 크기가 전기수력학적 분무에 끼치는 영향을 연구하였다.

인가되는 전기장의 크기 변화에 따라 토출 특성은 저주파수 불규칙 토출 - 규칙적 토출 - 연속적 액주로 변화하였으며, 규칙적 토출이 발생하는 영역에서는 전기장의 증가에 따라 토출 주파수는 증가하고, 토출되는 액적의 크기는 감소한다. 또한, 규칙적인 토출이 발생하는 전기장에서 인가되는 정수압력이 증가하면, 토출 주파수는 증가하고, 토출 되는 액적의 크기는 감소한다.

후 기

본 연구는 2007 년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-331-D00053)

¹ Park, J. U., M. Hardy, S. J. Kang, K. Barton, K. Adair, D. K. Mukhopadhyay, C. Y. Lee, M. S. Strano, A. G. Alleyne, J. G. Georgiadis, P. M. Ferreira and J. A. Rogers, 2007, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing.", *Nature Materials*, Vol. 6, No. 10, pp 782-89.

² Juraschek, R. and F. W. Rölgen, 1998, "Pulsation phenomena during electrospray ionization.", *International Journal of Mass Spectrometry*, Vol. 177, No. 1, pp 1-15

³ Hartman, R. P. A., D. J. Brunner, D. M. A. Camelot, J. C. M. Marijnissen and B. Scarlett, 1999, "ELECTROHYDRODYNAMIC ATOMIZATION IN THE CONE-JET MODE PHYSICAL MODELING OF THE LIQUID CONE AND JET.", *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, No. 7, pp 823-49.

⁴ Chen, C. H., D. A. Saville and I. A. Aksay, 2006, "Scaling laws for pulsed electrohydrodynamic drop formation.", *Applied Physics Letters*, Vol. 89, No. 12

⁵ Marginean, I., P. Nemes, L. Parvin and A. Vertes, 2006, "How much charge is there on a pulsating Taylor cone?", *Applied Physics Letters*, Vol. 89, No. 6

⁶ Choi, H. K., J. U. Park, O. O. Park, P. M. Ferreira, J. G. Georgiadis and J. A. Rogers, 2008, "Scaling laws for jet pulsations associated with high-resolution electrohydrodynamic printing.", *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 12.

⁷ Lord Rayleigh, "On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charged with Electricity", 1882, *Phil. Mag.*, Vol. 5, 14, pp 184-186