

# 압전 액추에이터의 메니스커스 제어를 통한 온 디맨드(On-demand) 전기 수력학 프린팅

## On-demand electrohydrodynamic printing with meniscus controls by a piezoelectric actuator

\*김영재<sup>1,2</sup>, 김도형<sup>1</sup>, 황정호<sup>1</sup>, #김용준<sup>1</sup>

\*Y. J. Kim<sup>1,2</sup>, D. H. Kim<sup>1</sup>, J. H. Hwang<sup>1</sup>, #Y. J. Kim (yjk@yonsei.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 삼성전기 중앙연구소

Key words : On-demand ejection, ultra-fine droplets, electrohydrodynamic force, piezoelectric actuator

### 1. 초록

On-demand ejection of ultra-fine droplets that uses both electrohydrodynamic (EHD) force and mechanical actuation is presented. The liquid meniscus was controlled by a piezoelectric actuator and droplets were ejected by EHD force. Through these effects, it was possible to obtain a high operational jetting frequency of 5kHz with a short delay-time (about 50 us) when compared with existing on-demand EHD jetting methods, such as the pulsating jet mode (3-10 msec) and the pulsed-voltage cone-jet mode(3.6 msec). Also, we obtained ultra-fine droplets at a volume that was at the femto-liter level simultaneously. The jetting characteristics were examined for both hydrophobicity and hydrophilicity of the surface of a capillary.

### 2. 서론

최근 들어 마이크로 또는 나노 스케일의 닷(dot) 또는 패턴을 형성하기 위한 방법으로 직접쓰기 방식의 연구에 많은 노력이 기울여지고 있다. [1] 직접쓰기 방식은 도금, 에칭 그리고 노광공정 없이 마이크로 구조 또는 미세 패턴을 형성하기 때문에 저비용, 고속, 비접촉, 친환경적 방법이다. [2] 이러한 직접쓰기 방식 중에 드랍 온 디맨드(DOD) 잉크젯 방식이 널리 쓰이고 있으며 이러한 잉크젯 방식의 장점은 온 디맨드 프린팅이 가능하다는 것과 10-100 khz 의 토출 주파수를 구현할 수 있어 생산성이 좋다는 것이다. 그러나 잉크젯 방식에서의 액적부피는 노즐 크기의 의해 제한되기 때문에 일반적으로 20pl(직경 35 μm) 정도이다. [3] 이러한 한계를 극복하기 위해 노즐 크기보다 훨씬 작은 액적을 형성할 수 있는 온 디맨드 전기수력학적 프린팅이 연구되어 지고 있으며 pulsating jet mode [4]과 pulsed voltage cone jet mode [5]의 두 부류로 나뉜다. 각각 3-10 msec, 3.6msec 의 주기와 dealy time 이 존재하여 300 Hz 이상의 토출 주파수를 구현 및 정확한 미세액적의 DOD 구현이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 미세액적 및 1kHz 이상의 토출주파수 구현이 가능한 압전소자를 이용한 전기수력학적 프린팅 방법 (hybrid jetting system)을 제안한다.

### 2. 본론

#### 2.1 Hybrid jetting system(HJS)의 원리

그림 1 은 HJS 의 구동원리를 보여준다. 압전소자의 구동 신호가 액추에이터에 전달되면 캐필러리 내부의 압력을 증가시켜 메니스커스를 캐필러리 외부로 밀어내게 되며 이때 외부에 이미 형성되어 있는 고전압 전기장에 의해 메니스커스가 큰 형태로 변하게 되어 토출이 이루어지고 구동 신호가 종료되면 캐필러리 내부의 압력이 다시 낮아져 메니스커스가 초기 위치로 돌아가게 되어 토출이 종료되어 드랍 온 디맨드 프린팅이 가능하게 된다.

#### 2.2 실험

실험의 필수 구성은 그림 2 와 같이 (1)압전 소자가

구비된 glass capillary (Microfab, 내경 0.06mm), 압전소자의 구동신호 및 triggering 신호 발생기 (Softmecha), (3) 토출 되는 액적 관찰을 위한 고속카메라, (4) 전기수력학 토출의 위한 고전압 발생기, (5) 초기의 메니스커스 형태를 일정하게 유지하기 위한 공압 장치를 필요로 한다. 또한 본 연구에 사용된 잉크는 순도 99.7%의 C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH 이며 특성은 표 1.에 정리하였다.

### 2.3 결과

그림 3 에서와 같이 토출이 시작되기 전에 초기의 메니스커스는 공압장치에 의해 일정하게 유지되며 노즐과 pin type electrode 에는 4.7kV 의 최적화된 고전압이 형성되어 있다. 구동신호가 시작된 후 10 μs 에서 피에조 액추에이터에 의해 캐필러리 내부의 압력이 높아져 메니스커스가 밀려 나오고, 20 μs 에서 메니스커스가 이미 형성되어 있는 고전압에 의한 전기장에 의해 큰 형태로 변하고 토출이 시작된다. 30 μs 에서 구동신호가 종료되어 메니스커스가 초기상태로 돌아가서 토출이 종료되어야 하나 residual electric force 와 inertia of liquid 에 의해 90 μs 까지 토출이 이어진다. 따라서 토출신호 종료후 60 μs 의 delay time 을 갖게 되며 이론적으로 10kHz 이상의 토출주파수 실현이 가능하나 5kHz 까지 검증하였다. 이러한 고주파 토출의 위해서는 구동신호, 고전압, 초기 메니스커스의 상태를 최적화 하는 것이 중요하다. 또한 그림 4 는 이러한 원리로 on-demand 토출을 실현한 모습이다. 액적의 길이는 110 μm정도이나 그 폭은 10 μm 이하로 노즐직경대비 매우 작은 직경의 액적 토출이 가능하였다.

### 4. 결론

고주파, 초미세 액적을 형성하기 위한 hybrid jetting system 을 검증하였으며 친수성 노즐과 발수성 노즐에 대한 특성도 관찰하였다. 20-40V 의 낮은 전압으로 피에조 액추에이터를 구동하여 메니스커스를 제어하기 때문에 기존의 방법(pulsating mode, pused cone-jet mode)이 가지고 있는 3.6ms 보다 훨씬 작은 90 μs 의 delay time 을 갖는 토출을 실현하였으며 이에 따라 5kHz 까지의 고주파 토출도 가능하였다.

### 후기

본 연구는 신·재생에너지기술개발사업(2008-N-PV08-P-06-0-000) 및 국과학재단을 통한 연세대학교 나노메디컬 국가핵심연구센터의 지원으로 수행 되었습니다. 연구비 지원에 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. K. H. Church, C. Froe, T. Feeley, Commercial applications and review for direct write technologies, Proc. Material Research Sym. (2000).
2. D. B. Chrisey, The power of dircet writing, Science 289, 1872

(2000)

3. O. Yogi, T. Kawakami, M. Yamauchi, J.Y. Ye, and M. Ishikawa. On-demand droplet spotter for preparing pico- to femtoliter droplets on surface. *Anal. Chem.* 73 1896 (2001)
4. J.-U. Park, M. Hardy, S.J. Kang, K. Barton, K. Adair, D.K. Mukhopadhyay, C.Y. Lee, M.S. Strano, A.G. Lleyne, J.G. Georgiadis, P. M. Ferreira and J.A. Rogers, High-resolution electrohydrodynamic jet printing, *Nat. Mater.* 6 782 (2007).
5. J.L. Li, On the meniscus deforming when the pulsed voltage is applied, *J. Electrostatics*, 64 44 (2006).

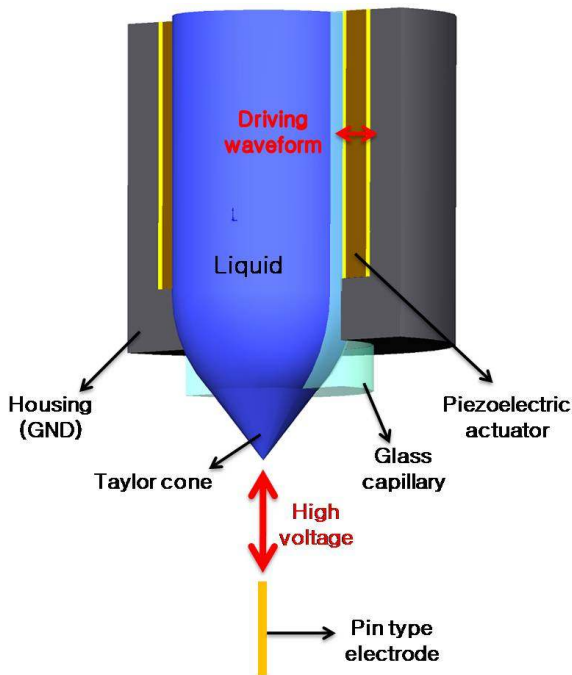


Fig. 1 Nozzle structure and principle of Hybrid jetting.

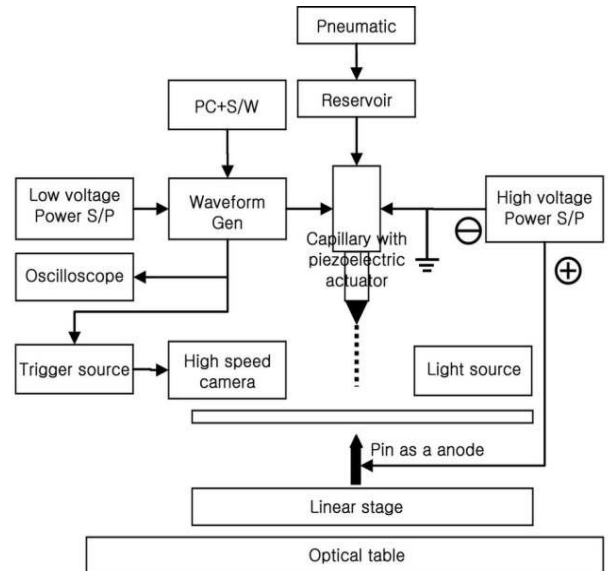


Fig. 2 Schematic of hybrid jetting system.

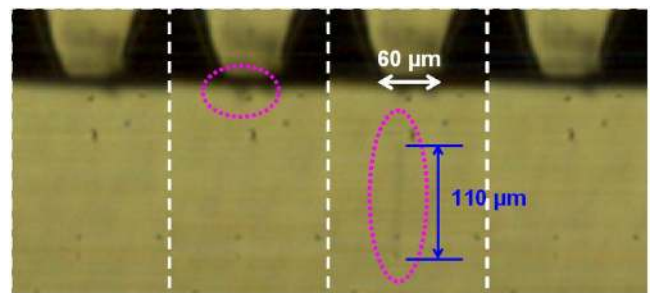


Fig. 4 On-demand jetting using hybrid jetting system at firing frequency of 1kHz.

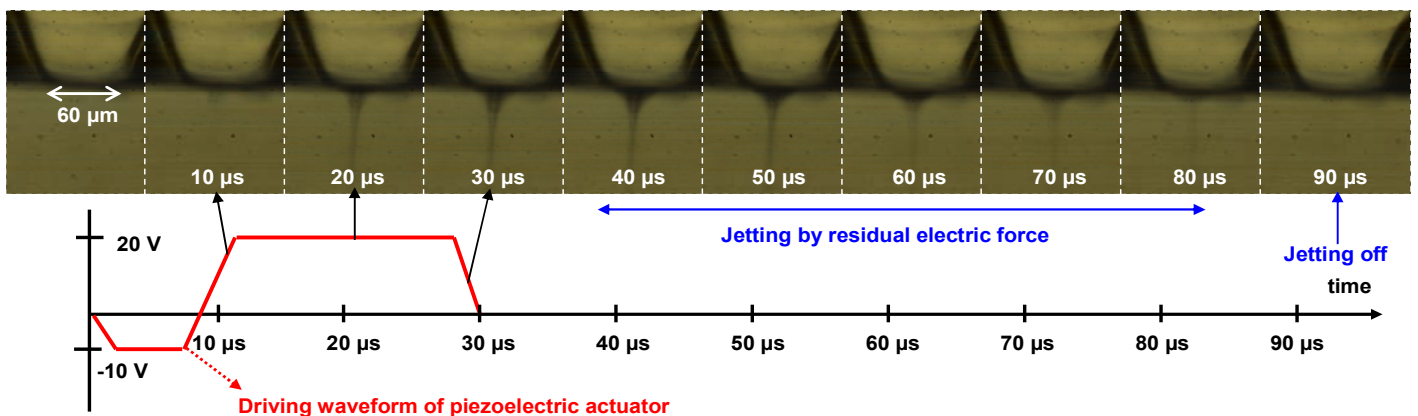


Fig. 3 Jetting and changes of meniscus when the waveform of piezoelectric actuator was applied.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Viscosity (mPa s)	Electrical conductivity (Sm <sup>-1</sup> )	Relative permittivity ( $\epsilon_r / \epsilon_0$ )	Surface tension coefficient $\gamma$ (Nm <sup>-1</sup> )	Density (kgm <sup>-3</sup> )	Charge relaxation time $\beta \epsilon_0 / K$ (s)
1.16	3.0E-4	25	0.022	789	6.0E-7