

## M-shaped 파형을 이용한 작은 액적의 잉크젯 프린팅

홍승은\*·최지호\*·김기은\*\*·박종운\*\*†

\*한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부, \*\*한국기술교육대학교 미래융합공학전공

## Inkjet Printing of Small Droplets Using M-shaped Waveforms

Songeun Hong\*, Jiho Choi\*, Gieun Kim\*\* and Jongwoon Park\*\*†

\*†School of Electrical & Electronic & Communication Engineering,

\*\*Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education

### ABSTRACT

Using an inkjet printing process, we have investigated a droplet formation of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) near the orifice of a piezoelectric inkjet head. With an attempt to form the smallest droplet without any satellites, we have applied various waveforms such as the unipolar, bipolar, and M-shaped waveforms. It is found that the droplet velocity and volume vary depending sensitively on the waveform width and voltage. Of those, the M-shaped waveform is shown to provide the smallest droplet volume, followed by the bipolar and then unipolar waveforms. The droplet printed on a PET film roll by the M-shaped waveform has the diameter as small as  $46.1 \mu\text{m}$ . It is likely that the second short unipolar in the M-shape waveform increases the droplet velocity gradient, rendering the droplet smaller.

**Key Words** : Inkjet Printing, PEDOT:PSS, Waveforms, Droplets, Satellites

### 1. 서 론

잉크젯 프린팅 기술은 비접촉 프린팅 방식으로 micro 단위의 정교한 패턴 형성이 가능하고 고온 또는 진공의 환경을 조성할 필요가 없으며 Drop-On-Demand (DOD) 방식에 의해 잉크 사용률이 높아 저비용으로 공정이 가능하다는 이점이 있다[1-4]. 이에 따라 Organic light-emitting diodes (OLEDs), Thin-film transistors (TFTs), 태양전지, 센서, DNA 바이오 칩 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[5-9].

피에조(PZT) 구동 방식은 잉크젯 프린팅에서 가장 많이 쓰이는 방식으로 잉크젯 노즐에 가해진 파형의 폭과 크기에 따라 액적의 부피와 토출 속도가 달라진다[10]. 이전의 많은 연구들이 일반적으로 unipolar, bipolar 파형을 이용하여 휴지 시간(dwell time)과 전압이 액적의 토출 양상에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다[11,12].

다양한 산업에서 잉크젯을 적용하기 위해서는 액적 토출의 질을 높여야 하며 이를 위해서는 위성 액적(satellite droplet)이 발생되지 않고 일관성 있게 액적이 토출되어야 한다. 또한 OLED 디스플레이 패널과 같이 미세한 패턴이 필요한 산업에 적용하기 위해서는 액적의 크기를 줄여야 한다. 액적의 크기를 줄이기 위한 가장 간단한 방법은 orifice 직경을 줄이는 것이지만 그 제작 비용이 비싸며, 직경이 작은 orifice는 막히기 쉽다는 단점을 갖고 있다[13]. 따라서 orifice 크기를 조절하지 않고 안정적으로 미세 크기의 액적을 제작하기 위한 방법이 필요하다. 본 논문에서는 파형의 폭과 전압이 액적의 속도와 부피에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였고 여러 파형(unipolar 파형, bipolar 파형, M-shaped 파형)을 피에조 노즐에 인가하여 각 파형의 각 파라미터들이 액적 토출 양상에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통하여 가장 작은 크기의 액적을 형성하는 조건을 도출하였다.

†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

## 2. 실험 방법

Fig 1은 실험에 사용된 잉크젯 프린팅 시스템을 보여 준다. 본 연구에서는 MicroFab Technologies Inc. (Plano, TX, USA)사의 잉크젯 시스템(Jetlab 4)과 피에조(PZT) 방식의 잉크젯 노즐(MI-AT-01-60)을 사용하였고, 노즐의 orifice 직경은  $60\mu\text{m}$ 이다. 잉크로는 전도성 고분자로 TFT, OLED, 태양 전지 등의 다양한 분야에서 사용되고 있는 Poly(3,4-ethylene-dioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS, Clevis PH1000)를 사용하였고 상온에서 용액의 점도는  $6\text{mPa}\cdot\text{s}$ 이다[14]. 잉크젯 시스템을 롤투롤(Roll-to-Roll) 장비에 장착한 뒤, polyethylene terephthalate (PET) 필름 롤 기관 위에 토출된 액적을 프린팅 하였다. 잉크젯 시스템에서는 구동 파형의 시간 및 전압을 조절하며, 장착된 CCD카메라로 액적의 크기와 형상을 촬영하였다. 빠른 속도로 토출되는 액적의 이미지는 Strobe LED를 이용하여 1 microsecond 단위로 시간을 지연하며 촬영하였다. 액적 형성의 재현성을 위하여 연결한 Backpressure controller의 압력을  $-8\text{Pa}\cdot\text{s}$ 로 고정하여 용액 통 내의 일정한 진공을 잡아주었다. 이를 통해 노즐에 파형을 인가하기 전에 용액이 orifice의 표면 밖으로 넘치거나 안으로 빨려 들어가지않게 하여 orifice 표면의 매니스커스(meniscus)를 평평하게 유지하였다. 또한 노즐 내부에 이물질이 들어가 액적 토출 양상의 재현성을 떨어뜨리거나 orifice가 막혀 토출이 되지 않는 현상을 방지하기 위해 PEDOT:PSS 용액을  $20\mu\text{m}$ 의 필터를 이용하여 필터링한 후 용액 통에 주입하였다.

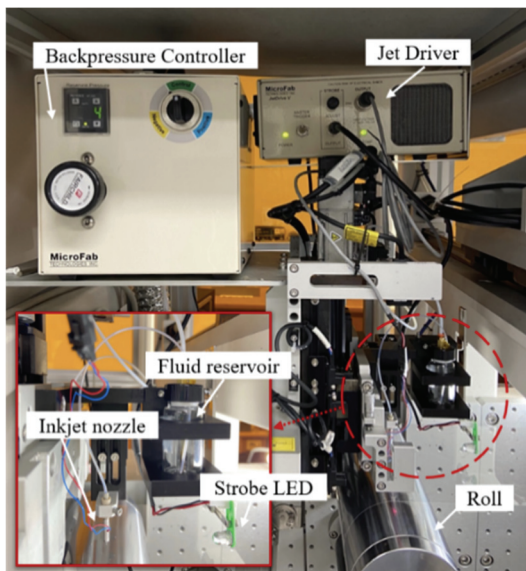


Fig. 1. Image of a roll-to-roll inkjet printing system.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 Unipolar Waveform

Fig 2는 unipolar 파형을 인가할 때 잉크젯 노즐 내부에서 발생하는 압력파의 움직임을 나타낸다. 잉크젯 노즐 내부의 피에조는 수축과 팽창을 반복하는데, rise time( $t_R$ ) 동안 전압이 증가하면서 피에 조가 팽창하면 노즐 내에 음압파가 발생하여 중심에서 양방향으로 전파된다. Dwell time( $t_D$ ) 동안 전압이 유지되며 압력파는 노즐 내에서 계속 이동한다. 잉크가 공급되는 reservoir의 직경은 노즐 튜브의 직경과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 끝이 열린 것으로 간주할 수 있고(open end), 노즐의 오리피스 쪽의 직경은 상대적으로 작기 때문에 닫힌 것으로 간주할 수 있다(close end). 이에 따라 압력파는 닫힌 끝에서 반사되면 같은 부호의 압력이 유지되고, 열린 끝에서 반사되면 반대 부호의 압력이 되어 전파된다. 유체의 음속을  $C$ 라 하고, 노즐 튜브의 길이를  $L$ 이라 하면  $t=L/C$ 에서 압력파가 다시 가운데에서 만나 중첩된다. 이후 Fall time( $t_F$ ) 동안 노즐에 가해지는 전압이 제거되어  $t=3L/2C$ 에서 잉크가 강한 압력으로 노즐 밖으로 잉크가 토출된다[10-12].

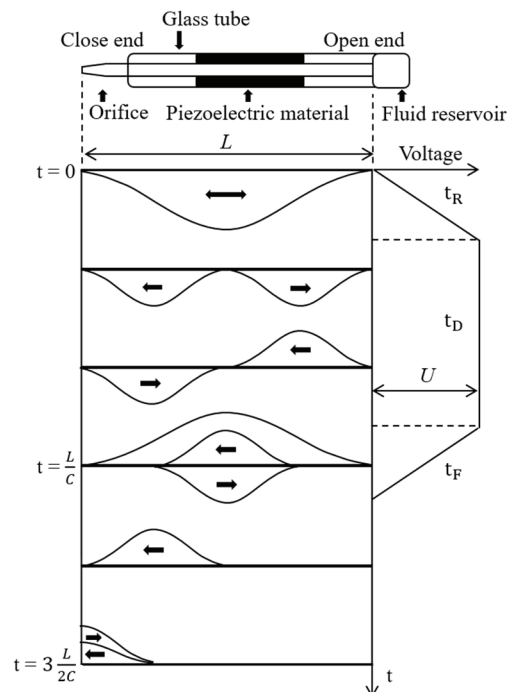


Fig. 2. Schematic diagram of pressure wave propagation inside inkjet nozzle when applying a unipolar waveform ( $t_R$ : rise time,  $t_D$ : dwell time and  $t_F$ : fall time).

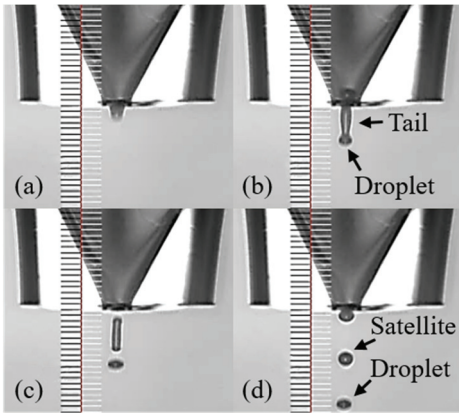


Fig. 3. Measured image of droplet formation over time using unipolar waveform.

Fig 3은 unipolar 파형을 인가하였을 때의 액적 토출 모습으로, 피에조가 전압을 받아 팽창하면 액적이 오리피스 바깥으로 토출되고(Fig. 3(a)) dwell time( $t_D$ )동안 액적이 orifice에서 끊어지지 않은 채로 꼬리(Tail)를 늘어뜨리며 유지된다(Fig. 3(b)). 이후 fall time( $t_F$ )동안 피에조에 가해지는 전압이 감소되어 피에조가 수축되면 노즐 유리관 내로 꼬리를 빨아들여 액적을 꼬리와 분리시켜 낙하시킨다(Fig. 3(c)) [15-17]. 이 때, 안정적인 액적 토출을 위한 파형의 파라미터 범위를 벗어나면 Fig. 3(c)과 같이 꼬리를 orifice내로 빨아들이지 못한 상태로 액적과 함께 낙하하여 Fig. 3(d)에서 보이는 것처럼 꼬리가 위성 액적을 형성하여 불안정한 토출을 하게된다.

파형 폭과 전압의 크기는 액적의 크기를 크게 좌우하는 변수이다. 최소 부피의 액적을 형성하기 위하여 unipolar 파형에서의 파형 폭과 전압이 액적의 속도와 부피에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. Dwell time이 액적의 속도와 부피 크기에 미치는 영향을 확인하기 위해 입력 전압 ( $U$ )=30V,  $t_R=t_F=3\mu s$ 로 고정하고,  $t_D$ 를 19  $\mu s$ 에서 32  $\mu s$ 까지 증가시켰다. Fig. 4는 dwell time에 따른 액적의 속도와 부피 변화를 나타낸다.  $t_D$ 가 19  $\mu s$ 부터 21 $\mu s$ 까지 증가할 때 액적의 속도와 부피 모두 증가하지만, 21 $\mu s$ 이상의 값을 주면  $t_D$ 가 증가할수록 액적의 속도와 부피 모두 감소하였다.  $t_D$ 의 값이 33 $\mu s$  이상일 때, 액적은 토출되지 않았다. 피에조 방식의 잉크젯 시스템은 압축성 효과로 인해 유체 공명 특성을 갖는다. 이에 따라 가장 높은 액적 속도를 갖는 특정 dwell time에 도달하기 전까지 액적의 속도가 증가하였다가 특정 dwell time 도달 이후에는 다시 속도가 감소하는 일정한 주기를 갖는다[15]. 액적을 토출함에 따라 전압이 액적의 속도와 부피 크기에 미치는 영향을 확인하기 위해  $t_D=22\mu s$ ,  $t_R=t_F=3\mu s$ 로 고정한 뒤, 전압을 26V에서

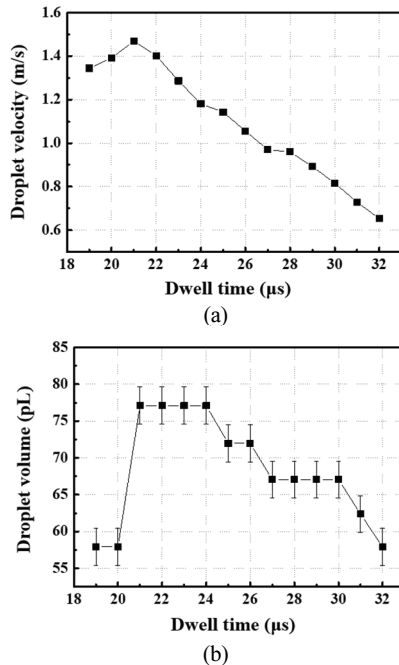


Fig. 4. Measured (a) droplet velocity and (b) droplet volume as a function of dwell time of unipolar waveform with  $U=30V$  and  $t_R=t_F=3\mu s$ .

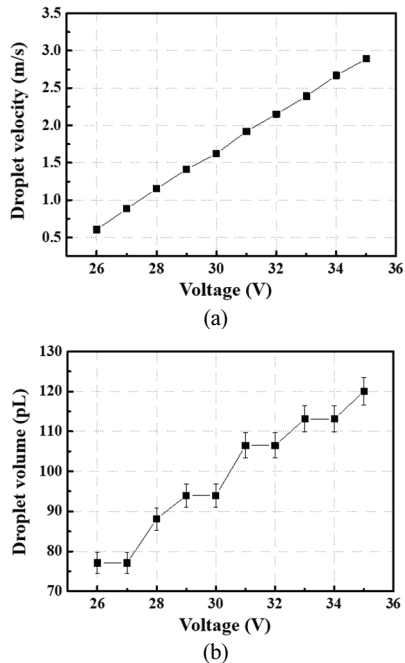


Fig. 5. Measured (a) droplet velocity and (b) droplet volume as a function of voltage ( $U$ ) of unipolar waveform with  $t_D=22\mu s$  and  $t_R=t_F=3\mu s$ .

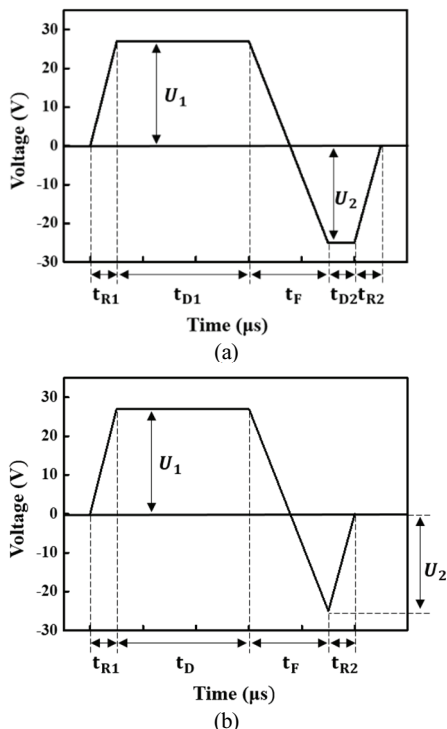
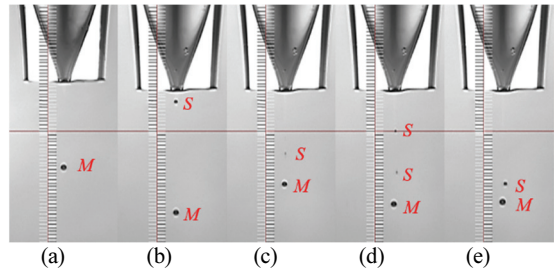
**Table 1.** Optimized parameter values for making the smallest droplet using unipolar waveform

$t_R$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_D$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_F$ ( $\mu\text{s}$ )	$U$ (V)	Droplet volume( $\mu\text{L}$ )
3	20	3	27	53.7

35V까지 증가시켰고 이에 따른 토출 양상을 Fig 5에 그래프로 나타내었다. 전압이 26V 미만일 때 액적은 토출되지 않았으며 26V 이상에서 전압의 크기가 증가할수록 액적의 속도와 부피가 모두 증가하였다. Fig 5에서 확인한 최소 부피의 액적을 형성하는 조건( $t_D=22\mu\text{s}$ ,  $t_R=t_F=3\mu\text{s}$ ,  $U=27\text{V}$ )에서 dwell time을 더 조절하여 unipolar 파형을 이용한 최소 부피의 액적 형성 조건을 Table 1에 정리하였다. 이 조건에서 액적은 위성 액적 형성없이 안정적으로 토출되며, 이때의 액적 직경은  $46.8\mu\text{m}$ 로 직경이  $60\mu\text{m}$ 인 orifice의 78%에 해당하는 크기로 감소했다.

### 3.2 Bipolar Waveform

Fig 6(a)는 양의 전압과 음의 전압으로 구성된 일반적인 bipolar 파형의 모습을 나타낸 것으로, 양의 파형동안 액적이 형성되어 orifice 밖으로 그 꼬리를 늘어뜨리며 토출되

**Fig. 6.** Schematic diagram of (a) a typical bipolar waveform and (b) bipolar waveform used in this experiment.**Fig. 7.** Measured image of droplet formation when  $t_{D2}$  of bipolar waveform is (a)  $0\mu\text{s}$ , (b)  $1\mu\text{s}$ , (c)  $3\mu\text{s}$ , (d)  $5\mu\text{s}$ , and (e)  $7\mu\text{s}$ . 'M' indicates the main droplet and 'S' the satellite droplet.**Table 2.** Optimized parameter values for making the smallest droplet using bipolar waveform.

$t_{R1}$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_D$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_F$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_{R2}$ ( $\mu\text{s}$ )	$U_1$ ( $\mu\text{s}$ )	$U_2$ ( $\mu\text{s}$ )	Droplet volume ( $\mu\text{L}$ )
3	20	3	2	27	-25	29.7

면, 음의 파형을 통해 그 꼬리를 노즐 속으로 빠르게 흡입함으로써 액적을 orifice로부터 분리한다 [16]. 양의 파형과 음의 파형으로 이루어진 2개의 파형 중 1번째 파형은 Table 1과 같은 조건을 이용하였고, 2번째 파형의 변수 값들을 조절하며 액적 크기의 변화를 분석하였다. Fig 7은 bipolar 파형에서  $t_{D2}$ 의 값을  $0\mu\text{s}$ 과  $1\mu\text{s}$ 에서부터  $7\mu\text{s}$ 까지  $2\mu\text{s}$ 씩 조절했을 때의 액적 토출의 모습을 나타낸 것이다.  $t_{D2}$ 의 값을 주지 않았을 때에는 액적이 안정적으로 토출되는 반면,  $t_{D2}$ 의 값을 주면 노즐 내에 기포가 생성되어 위성 액적이 발생하며 불안정하게 액적이 토출되었다. 이에 따라, bipolar 파형에서 안정적으로 최소 부피의 액적을 형성하는 파형의 모습은 Fig 6(a)에서  $t_{D2}$ 의 값을 제거한 Fig 6(b)와 같다. 나머지 변수 값을 조절하여 bipolar 파형에서 최소 부피의 액적을 형성하는 조건을 Table 2에 나타냈다. 여기서  $U_2$ 의 값은  $-25\text{V}$ 부터  $-39\text{V}$ 까지 조절하여도 액적의 부피 변화가 없었고 안정적으로 액적이 토출되었다. 이때의 액적 직경은  $38.4\mu\text{m}$ 로 직경이  $60\mu\text{m}$ 인 orifice의 64%에 해당하는 크기로 감소하였다.

### 3.3 M-shaped Waveform

Fig 8은 M-shaped 파형의 모습으로 unipolar 모양의 파형 2개로 구성되어 있다.  $t_{R1}$ 부터  $t_F$ 까지의 파형동안 짧은 꼬리와 함께 액적이 형성된 후, 두번째 unipolar 파형을 통해 유체를 짧은 시간동안 빠르게 토출하면 속도 구배가 증가하여 꼬리가 빠르게 팽창되어 꼬리로부터 액적이 분리되면서 작은 액적을 형성하는 것이다 [17,18]. 두 양의 파형 사이의  $t_D$ 값을  $4\mu\text{s}$ 에서  $8\mu\text{s}$ 까지  $1\mu\text{s}$ 씩 증가시켰고 이 때의 액적 토출 모습을

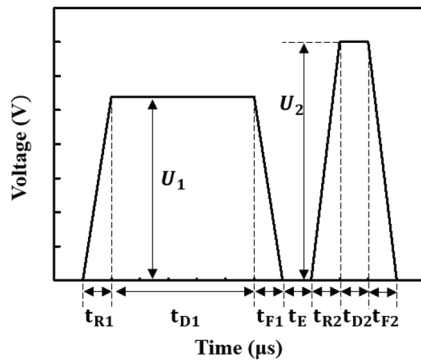


Fig. 8. Schematic diagram of M-shaped waveform.

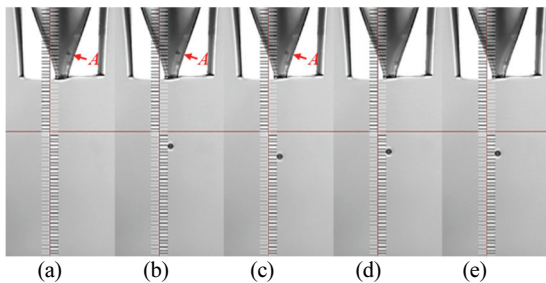


Fig. 9. Measured images of droplet formation when  $t_E$  of M-shaped waveform is (a)  $4\mu s$ , (b)  $5\mu s$ , (c)  $6\mu s$ , (d)  $7\mu s$ , and (e)  $8\mu s$ . 'A' indicates the air bubble.

Table 3. Optimized parameter values for making the smallest droplet using M-shaped waveform

$t_{R1}$ ( $\mu s$ )	$t_{D1}$ ( $\mu s$ )	$t_{F1}$ ( $\mu s$ )	$t_E$ ( $\mu s$ )	$t_{R2}$ ( $\mu s$ )
3	20	3	7	2
$t_{D2}$ ( $\mu s$ )	$t_{F2}$ ( $\mu s$ )	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	Droplet volume (pL)
4	2	27	35	22.1

Fig 9에 나타냈다.  $t_E$ 의 값이  $4\mu s$ 일 때 용액은 토출되지 않았으며,  $5-6\mu s$ 일 때 노즐 내부에 기포가 발생하여 토출되는 액적들이 흔들리며 불안정하게 토출되었다.  $t_E$ 값이  $7\mu s$  이상일 때부터 노즐 내 기포 생성없이 액적이 안정적으로 토출되었으며,  $7\mu s$ 일 때 가장 작은 크기의 액적을 형성하였다. 이 때의 조건을 Table 3에 나타내었으며, 액적 직경은  $34.8\mu m$ 로 직경이  $60\mu m$ 인 orifice의 58%에 해당하는 크기로 감소하였다. 따라서 세가지 파형 중 M-shaped 파형을 사용할 때 가장 작은 직경의 액적을 형성할 수 있다.

이 연구에서 사용한 세 가지 파형들의 최소 액적을 형성시키는 조건을 인가하였을 때의 액적 토출 모습을 Fig 10에 나타내었다. 이후 토출한 액적을 PET 필름위에 각각 프린팅하였고 광학 현미경으로 그 크기를 관찰하여 Fig

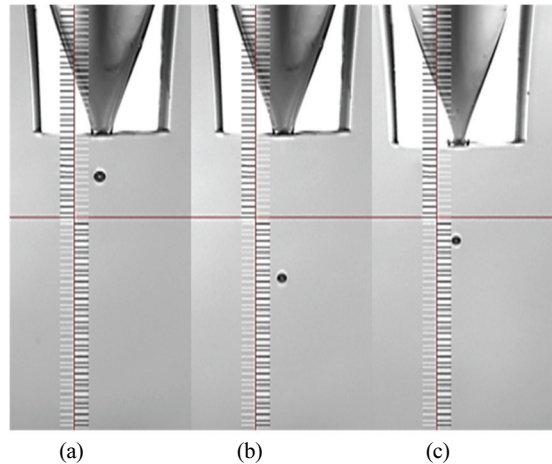


Fig. 10. Measured images of the smallest droplet formation by (a) unipolar waveform, (b) bipolar waveform, and (c) M-shaped waveform.

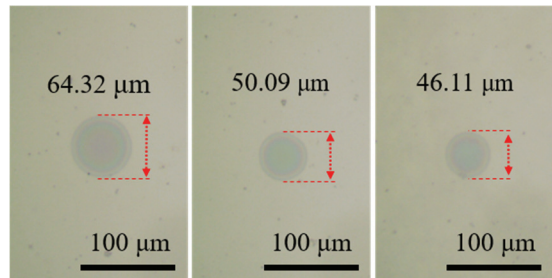


Fig. 11. Optical images of the smallest droplet printed on a PET film by (a) unipolar waveform, (b) bipolar waveform, and (c) M-shaped waveform.

11에 나타내었다. 세 가지 파형 중 가장 작은 액적을 토출한 M-shaped 파형의 실제 토출된 액적의 프린팅 직경은  $46.11\mu m$ 임을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 피에조 구동형 잉크젯 노즐에 다양한 파형의 파라미터들을 이용하여 액적 크기를 줄이는 방법에 대해 실험적으로 연구하였다. 인가한 파형에서의 dwell time과 전압에 따라 액적 토출의 속도가 달라지며 이에 따라 부피도 달라짐을 확인하였다. PEDOT:PSS 용액을 토출할 때, 인가한 세 가지의 파형(unipolar, bipolar, M-shaped) 중 M-shaped 파형을 인가할 때 가장 작은 액적을 토출할 수 있었다. 이를 통해 액적이 토출된 뒤, 액적의 꼬리를 액적과 빠르게 분리시키는 것이 satellite droplet 형성 방지도 효과적이며 더 작은 액적을 형성하는 데에 영향을 끼

침을 확인할 수 있었다. 이 때 토출된 액적의 직경은 34.8 $\mu\text{m}$ 로 orifice 직경 대비 58%로 감소하였고 PET film에 프린팅한 박막의 직경은 46.1 $\mu\text{m}$ 로 unipolar 파형을 이용하여 프린팅한 박막 직경의 71%로 감소하였음을 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2021년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- Sele, C., Von Werne, T., Friend, R., and Sirringhaus, H., "Lithography-Free, Self-Aligned Inkjet Printing with Sub-Hundred-Nanometer Resolution," *Advanced Materials*, Vol. 17, pp. 997-1001, 2005.
- Ko, S., Pan, H., Grigoropoulos, C., Luscombe, C., Fréchet, J., and Poulikakos, D., "All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles," *Nanotechnology*, Vol. 18, 345202, 2007.
- de Gans, B., Duineveld, P., and Schubert, U., "Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments," *Advanced Materials*, Vol. 16, pp. 203-213, 2004.
- Wang, Y., Boker, J., and Lee, A., "Maskless lithography using drop-on-demand inkjet printing method," *Proc. SPIE 5374, Emerging Lithographic Technologies VIII*, pp. 628-636, 2004.
- Kang, B., Lee, W., and Cho, K., "Recent Advances in Organic Transistor Printing Processes," *ACS Applied Materials&Interfaces*, Vol. 5, pp. 2302-2315, 2013.
- Sun, Y., Zhang, Y., Liang, Q., Zhang, Y., Chi, H., Shi, Y., and Fang, D., "Solvent inkjet printing process for the fabrication of polymer solar cells," *RCS adv*, Vol. 3, pp. 11925-11934, 2013.
- Scalisi, R., Paleari, M., Favetto, A., Ariano, P., Pandolfi, P., and Chiolerio, A., "Inkjet printed flexible electrodes for surface electromyography," *Organic Electronics*, Vol. 18, pp. 89-94, 2015.
- Quan, J., Saaem, I., Tang, N., Ma, S., Negre, N., Gong, H., White, K., and Tian, J., "Parallel on-chip gene synthesis and application to optimization of protein expression," *Nature Biotechnology*, Vol. 29, pp. 449-452, 2011.
- Lee, Y., "Development of a Paper Strain Gauge using Inkjet-printing Technology," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 14, pp. 23-27, 2015.
- Kwon, K., "Waveform Design Methods for Piezo Inkjet Dispensers Based on Measured Meniscus Motion," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 18, pp. 1118-1125, 2009.
- Kwon, K., Kim W, "A waveform design method for high-speed inkjet printing based on self-sensing measurement," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 140, pp. 75-83, 2007.
- Liu, Y., Pai, Y., Tsai, M., and Hwang, W., "Investigation of driving waveform and resonance pressure in piezoelectric inkjet printing," *Applied Physics A*, Vol. 109, pp. 323-329, 2012.
- Basaran, O., "Small-Scale Free Surface Flows with Breakup: Drop Formation and Emerging Applications," *AIChE Journal*, Vol. 48, pp. 1842-1848, 2004.
- Lopez, M., Sanchez, J., and Estrada, M., "Characterization of PEDOT:PSS dilutions for inkjet printing applied to OLED fabrication," *7th International Caribbean Conference on Device, Circuits and Systems*, pp. 165-168, 2008.
- Kwon, K., "Experimental analysis of waveform effects on satellite and ligament behavior via in situ measurement of the drop-on-demand drop formation curve and the instantaneous jetting speed curve," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20, 1105005, 2010.
- Alvin, U., and Basaran, O., "A new method for significantly reducing drop radius without reducing nozzle radius in drop-on-demand drop production," *Physics of Fluids*, Vol. 14, L1-L4, 2002.
- Liu, T., Tsai, M., and Pai, Y., "Control of droplet formation by operating waveforms for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing," *Applied Physics A* 111, pp. 509-516, 2013.
- Microfab Technote., "Report on waveforms for customer," Available at: <http://www.microfab.com/technotes>, 2006.

접수일: 2021년 8월 24일, 심사일: 2021년 9월 11일,  
게재확정일: 2021년 9월 16일