

피에조 구동형 잉크젯에서 액적 형성의 가시화 및 토출속도 측정

권대회* · 최용석* · 이상준†

Visualization of Drop Formation and Droplet Velocity Measurement of a Piezoelectric-type Inkjet

D. H. Kwon, Y. S. Choi and S. J. Lee,

Abstract. The reproducibility of water droplet formation which is indispensable in the investigation of a drop-on-demand piezoelectrically driven inkjet was verified by checking the size of droplet and distance from the nozzle tip of inkjet head to droplet. Based on the reproducibility of droplet formation, we visualized the formation of micro-scale droplets by acquiring consecutive images at the jetting frequency of 500 Hz for which air bubbles were not generated. Two different electric waveforms were used to drive the piezoelectric actuator. The visualization system consists of a high-speed camera that can capture images up to 250,000fps, a long-distance microscope and a halogen lamp as a light source.

Key Words: Reproducibility (재현성), Drop Formation (액적 형성), Inkjet Nozzle (잉크젯 노즐)

1. 서 론

Drop-on-demand(DOD) 방식의 잉크젯(inkjet) 기술은 지난 수년간 응용 분야를 크게 넓혀오고 있다. 특히, DOD 방식 중 피에조 구동형 잉크젯 기술은 다른 프린팅 방식에 비해 보다 많은 응용분야를 가지고 있는데, 기존의 활자 인쇄에서 나아가 다층구조의 전기회로 제작,^(1,2) LCD 컬러 필터(color filter), 생명공학분야에 이르기까지⁽³⁾ 넓은 범주에서 활용되고 있다. 최근에는 상향식(bottom-up) 미소 구조물의 제작에 있어서 효율적이고 경제적인 제조기법으로 각광 받고 있다. 이와 관련하여 그동안 다양한 작동유체 혹은 인쇄물질의 액적 형성에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 하지만 피에조 구동형 DOD 방식의 잉크젯 기술에 있어서 구동전압의 파형, 작동유체의 성질 및 잉크젯 노즐의 형상 등이 액적 형성과정에 미치는 영향에 대한 물리적인 이해는 아직까지 부족한 실정이다.

피에조 구동형 잉크젯에 대한 기존의 연구사례로는

Meinhart & Zhang이 형광입자를 이용하여 잉크젯 노즐 내부흐름에 대한 PIV(Particle image velocimetry) 속도장 측정 실험을 수행하였고⁽⁴⁾, Dong & Carr은 액적의 형성과정과 표면 정착 과정을 가시화하였다.⁽⁵⁾ 이밖에 Chen & Basaran은 구동전압의 파형과 액적 형성에 대한 연구를 수행하였다.⁽⁶⁾ 이들의 연구들 외에도 수많은 연구가 수행되었으나, 앞서 언급한 바와 같이 액적 생성에 관련된 여러 가지 변수들과 액적 형성에 관한 물리적인 해석은 아직까지 완전하지 못한 상태에 있다. 본 연구에서는 액적 형성에 대한 물리적 해석을 위한 가시화 연구의 첫 번째 단계로 액적의 형성과정에 대한 재현성을 확인하고 이를 바탕으로 노즐 끝 부분에서의 계면(meniscus)의 변화와 잉크젯 액적 형성 과정을 가시화하였다.

2. 실험 장치 및 방법

본 실험에서 사용된 피에조 구동형 잉크젯 헤드는 MicroFab社의 MJ-AT 모델로서 노즐직경이 50 μm 이고 유리 재질로 만들어져 있다. 그리고 증류수를 작동유체로 사용하였다. 아래 Fig. 1은 실험장치를 도식적으로 묘사한 개략도이다. 잉크젯 노즐과 함께 고속

†포항공과대학교 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과

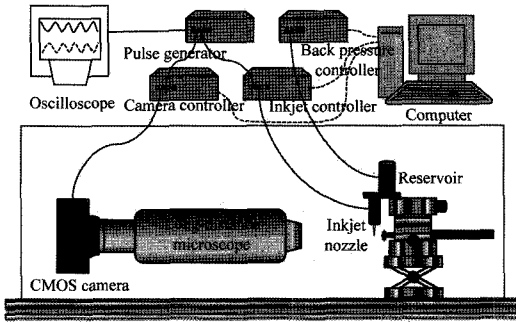


Fig. 1. Experimental setup

CMOS 카메라(Photron Fastcam)와 긴 초점 거리를 가진 현미경(Long-distance microscope)을 방진 테이블 위에 설치하여 진동을 차단하였다. 그리고 미세한 외기에 기인한 오차를 방지하기 위해 아크릴 재질로 만든 사각 챔버(chamber) 속에서 실험을 수행하였다. 잉크젯 헤드 노즐에서 나타나는 작동유체의 계면을 압력 조절장치를 통하여 일정한 위치에 고정시키고, CMOS 카메라 컨트롤러(controller)와 피에조 구동전압 파형 발생장치를 동기장치(delay generator)를 이용하여 동기시켜 원하는 순간에 영상을 취득할 수 있도록 하였다. 실험시 동기시키는 장치들의 전기 신호를 오실로스코프로 보면서 동기과정을 확인하였다. 미세 액적의 형성에 걸리는 시간은 수 백 마이크로초 정도이며, 한번의 토출 사이클(cycle)동안 이루어지는 계면 움직임이 액적 형성과정의 이해에 핵심적인 역할을 한다.⁽⁴⁾ 깨끗한 액적 영상을 획득하기 위하여 본 연구에 사용한 CMOS 카메라가 제공하는 가장 짧은 노출시간(shutter speed)인 $4\ \mu\text{s}$ 로 노출하여 영상을 취득하였다. 짧은 노출 시간에 따른 부족한 광원은 광원을 잉크젯 노즐에 집중함으로써 해결하였다. 그리고 피에조 구동 신호와 CMOS 카메라 사이의 시간 지연(time delay)을 이용하여 계면의 형상과 기포 크기의 상관관계를 구하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 액적 형성과정의 재현성

액적 형성의 재현성을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같은 구동 신호(driving waveform)를 이용하여 500 Hz의 토출 주파수에서 정상적인 액적 형성이 이루어지도록 하였다. 본 실험에서 사용한 작동유체는 증류수

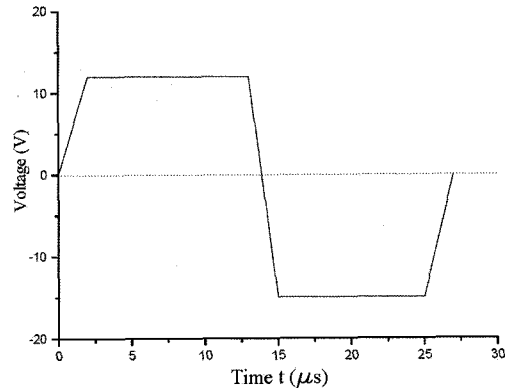


Fig. 2. Driving waveform type I

(distilled water)로서 기존의 연구에서 많이 사용된 잉크에 비하여 낮은 점성을 가진다. 이로 인하여 구동 신호의 전압과 구동 시간이 잉크를 작동유체로 사용한 기존 연구에 비해 작은 값을 가진다. Fig. 3은 구동 신호가 트리거(triggering)된 후 (a) $100\ \mu\text{s}$ 와 (b) $290\ \mu\text{s}$ 이후에 취득한 5번의 액적 영상을 보여주고 있다. Fig. 3의 (c)와 (d)는 이들 5개 영상을 겹쳐서 나타낸 것으로 하나의 영상으로 거의 동일하게 나타난다는 것을 알 수 있다. $290\ \mu\text{s}$ 이후의 3번째와 4번째 형성된 액적 영상을 비교해보면 Fig. 3(e)에 나타난 것처럼 액적 위치의 미세한 차이를 제외하고는 동일하다는 것을 확인할 수 있다. 나아가 픽셀(pixel) 단위로 분석하여 정리한 Table 1에서 볼 수 있듯이 5번의 토출에서 형성된 액적의 크기, 노즐 끝에서의 액적까지의 거리, 그리고 계면의 형상은 최대 3 픽셀(pixel), 즉 $3.5\ \mu\text{m}$ 이하의 오차를 가지고 일치하는 것으로 나타났다. 이 정도의 차이는 픽셀 정보를 사용한 미세측정에서 발생할 수 있는 오차 범위에 들어가므로 액적 형성의 재현성은 상당한 신뢰도를 가짐을 알 수 있다.

3.2. 액적 형성과 토출과정의 가시화

액적 토출의 재현성을 바탕으로 액적의 형성과정을 가시화 하였다. Fig. 2의 피에조 구동 파형 I을 이용하여 500Hz의 토출 주파수로 형성시킨 액적에 대해 $5\ \mu\text{s}$ 간격으로 영상을 얻었다. Fig. 4(a)는 취득한 액적 영상을 $10\ \mu\text{s}$ 간격으로 나타낸 것으로 계면의 움직임과 액적의 형성과정을 보여주고 있다. 잉크젯 헤드를 구동시키는 트리거 신호 발생으로부터 $t = 35\ \mu\text{s}$ 경과한 순간에 계면이 노즐 밖으로 돌출되어 액적이 형성되기

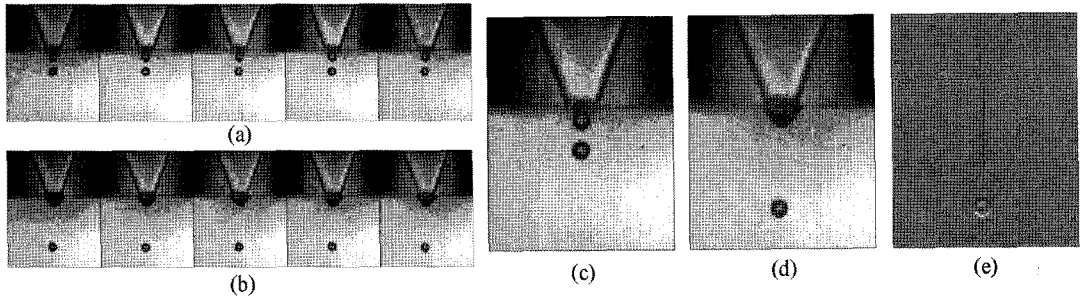


Fig. 3. Reproducibility of droplet formation : (a) images taken after 100 μs from triggering; (b) t=290 μs; (c) overlapped 5 images of (a); (d) overlapped 5 images of (b); (e) differential image subtracted third image from fourth one of image (b)

Table 1. Comparison of main parameters for 5 different droplet formation experiments

Experiment number	After 100 μs			After 290 μs		
	Droplet size (μm)	Distance from nozzle (μm)	Difference (μm)	Droplet size (μm)	Distance from nozzle (μm)	Difference (μm)
1	42.0	102.2	0	40.9	250.9	
2	42.0	102.2	0	40.9	247.5	
3	42.0	102.2	0	40.9	246.3	less than 3.4
4	42.0	102.2		40.9	248.6	
5	42.0	101.0	1.2	40.9	247.5	

시작하고 $t = 45 \mu s$ 에서 구형의 액적이 형성되어진다. $t = 55 \mu s$ 에 취득한 영상을 보면 액적에 붙어있는 꼬리가 잉크젯 헤드의 노즐과 이어져 있다. 그러나 $t = 65 \mu s$ 에는 계면의 노즐 내부로의 후퇴로 인해 액적이 꼬리로부터 떨어지게 되어 온전한 형상의 구형의 액적이 형성되어진다. 액적의 크기는 재현성을 가지며, 액적의 이동 속도는 Fig. 4(b)에 표시한 것처럼 일정 시간간격으로 취득한 영상을 겹친 후 픽셀 정보를

이용하여 액적들이 움직인 거리를 측정함으로써 구하였다. 액적의 속도는 1 m/s 이하의 값을 가지며 Table 2에 각 구간별 액적의 속도를 정리하여 나타내었다. 액적이 잉크젯 노즐로부터 떨어질수록 속도가 증가하여 가속되는 것으로 나타났다. 피에조 구동형 잉크젯의 경우, 액적의 초기 토출로부터 평형 상태에 이르는 과정에 있어서 액적에 작용하는 외부 요인으로는 잉크젯 노즐 부분에서의 표면장력, 공기와의 마찰, 직전에 토출된 전방 액적이 야기한 공기흐름(streaming) 등이 있다.⁽⁷⁾ 본 실험에서 속도가 측정되어진 영역은 노즐에 근접한 구간으로 streaming에 기인한 효과가 보다 크게 작용하는 것으로 보인다.

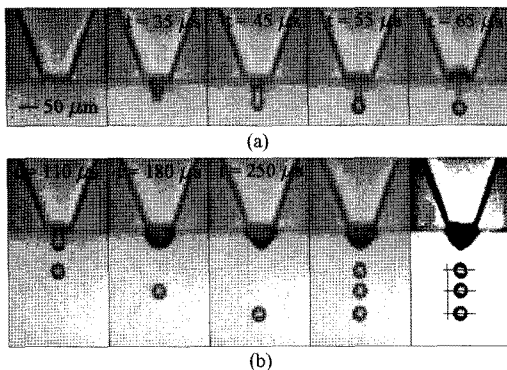


Fig. 4. Visualization of drop formation process for the driving waveform of Fig. 2

Fig. 5는 잉크를 이용한 기존의 연구에서 많이 사용되고 있는 전압 파형의 구동 신호를 나타내고 있다. Fig. 2의 구동신호에 비해 구동시간과 전압의 세기가 2배 이상의 큰 값을 가진다. 이 전압파형을 이용하여

Table 2. Droplet velocity for driving waveform type I

Velocity (m/s)	Elapsed time after triggering (μs)				
	110	145	180	215	250
	0.766	0.795	0.851	0.937	

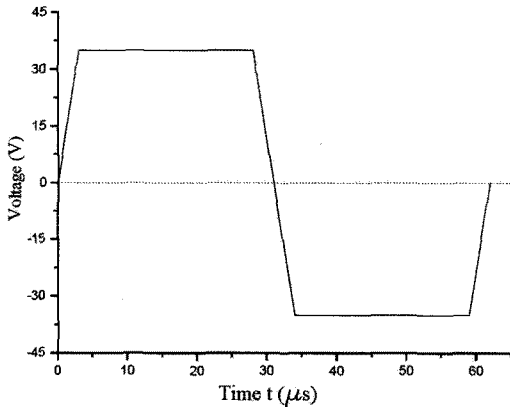
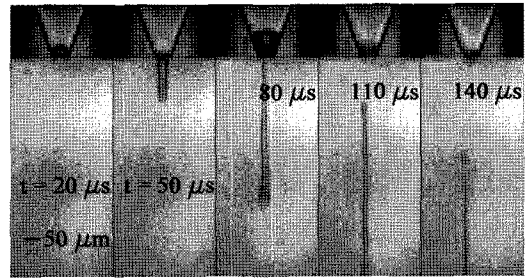


Fig. 5. Driving waveform type II

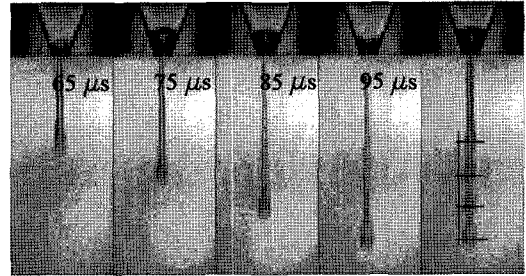
500 Hz의 토출 주파수로 앞서와 동일한 조건으로 취득한 액적의 형성과정을 Fig 6(a)에 나타내었다. Fig. 4와 마찬가지로, 계면의 돌출에 기인하여 액적 형성이 시작되며(Fig. 6(a), $t = 50 \mu\text{s}$) 꼬리가 계면의 노즐 내부로 후퇴함에 따라 액적과 연결되어진 꼬리가 끊어지는 현상이 $t = 80 \mu\text{s}$ 에 나타나고 있다. 차이점으로는 계면 움직임이 상대적으로 크고 액적의 꼬리가 매우 길게 형성되었다. 이에 따라 관측영역 내에 단일 액적 형태로 형성되지 않아 액적의 크기를 측정하기 어려웠다. 그리고 카메라가 제공하는 가장 짧은 노출시간($4 \mu\text{s}$)으로도 뚜렷한 액적 영상을 얻기 어려웠지만 픽셀 정보를 이용하여 액적의 선두 부위의 움직임으로부터 이동 속도를 측정할 수 있었다. Table 3에 요약 정리한 바와 같이, 액적은 10 m/s 가 넘는 빠른 속도로 토출되어 잉크를 사용하는 피에조 구동형 잉크젯의 액적 이동 속도에 비해 비정상적으로 빠른 속도로 이동하였다. 이것은 작동유체로 사용한 증류수의 점도가 잉크에 비해 크게 낮아 액적 형성에 상대적으로 큰 에너지가 부가된 것에 기인한 것으로 보인다.⁽⁸⁾ 액적 형성을 지배하는 무차원수 중, Ohnesorge 수, $Oh = \mu / \sqrt{\rho R \sigma}$, 와 Bond 수, $Bo = \rho R^2 g / \alpha$ 는 구동신호 파형에 상관없는 작동유체와 잉크젯 노즐의 크기에 대한 특성을 나타낸다. 이번 실험의 경우, $Oh = 1.5 \times 10^2$ 그리고 $Bo = 3.4 \times 10^4$ 의 값

Table 3. Droplet velocity for driving waveform type II

Velocity (m/s)	Elapsed time after triggering (μs)			
	65	75	85	95
	12.71	14.08	14.53	



(a)



(b)

Fig. 6. Visualization of drop formation process for the driving waveform of Fig. 5.

을 가진다. 여기서 매우 작은 Bond 수는 액적 형성에서 중력은 무시할 수 있다는 것을 의미하며 마찬가지로 작은 크기를 갖는 Ohnesorge 수는 점성력이 액적 형성과정에서 표면장력에 비하여 낮은 영향을 미친다는 것을 의미한다. 반면에 Fig. 5의 구동신호 파형을 사용하여 정상적인 토출이 이루어지는 작동유체의 경우 Bond 수는 증류수와 마찬가지로 매우 작지만, Ohnesorge 수는 1에 가까운 값을 가진다.⁽⁶⁾ 이는 앞서 언급한 Fig. 6의 결과에 대한 원인이 작동유체가 가지는 점도 차이라는 것을 뒷받침한다. 액적의 이동속도는 Fig. 4의 경우와 마찬가지로 노즐로부터 멀어질수록 빨라졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 피에조 구동형 DOD 방식의 잉크젯을 이용하여 형성된 액적의 크기, 노즐로부터 액적까지의 거리, 그리고 계면의 형상 변화를 비교하여 액적 형성과정의 재현성을 확인하였다. 이러한 재현성을 바탕으로 액적 형성과정에서의 계면의 움직임을 가시화한 결과, 계면이 액적 형성에 지배적인 역할을 하고 있음을 알 수 있었다. 잉크를 사용한 기존의 피에조 구동

형 잉크젯에 비해 낮은 전압과 짧은 구동 시간을 가지는 구동신호 파형을 이용하여 증류수로 액적을 형성하였다. 형성된 액적은 잉크 혹은 그와 비슷한 물성을 지니는 작동 유체를 이용한 기존의 연구에서 얻어진 액적의 형성과정과 정성적으로 동일하였다.

액적이 토출되어 평행에 이를 때까지의 속도 변화를 살펴본 결과, 액적이 노즐 부근에서 가속되는 현상이 관찰되었는데, 이것은 직전에 만들어진 액적에 의해 형성되어진 공기유동(streaming)에 기인한 것으로 판단되어진다.

구동시간과 구동전압을 2배 이상 크게 한 경우 액적의 토출 속도는 10 m/s 이상이었으며, 깨끗한 액적 영상을 얻는데 어려움이 있었다. 깨끗한 액적 영상을 획득하기위해 향후 연구에서는 카메라의 노출 시간을 줄이고 펄스 레이저와 같은 광원을 사용하여야함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방 연구)지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) M. Orme, Q. Liu, and R. Smith, 2000, "Molten Aluminum Micro-droplet Formation and Deposition for Advanced Manufacturing Applications," *Alum. Trans.*, Vol.3, 95.
- 2) P. Calvert, 2001, "Inkjet Printing for Materials and Devices," *Chem. Mater.*, Vol.13, 3299.
- 3) B. de Heiji, B. van der Schoot, H. Bo, J. Hess and N. F. de Rooij, 2000, "Characterization of a fL Droplet Generator for Inhalation Drug Therapy," *Sens. Actuators. A.*, Vol.85, 430.
- 4) C. D. Meinhart, and H. Zhang, 2000, "The Flow inside a Microfabricated Inkjet Printhead," *J. MEMS.*, Vol.9(1), pp.67~74.
- 5) H. Dong, and W. W. Carr, 2006, "Visualization of Drop-on-demand Inkjet: Drop Formation and Deposition," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.77, 085101.
- 6) A. U. Chen, and O. A. Basaran, 2002, "A New Method for Significantly Reducing Drop Radius without Reducing Nozzle Radius in Drop-on-demand Drop Production," *Phys. Fluids.*, Vol.14(1), L1~L4.
- 7) E. R. Lee, 2002, *Microdrop Generation*, CRC Press, New York, pp.33~42.
- 8) P. H. Shin, J. Y. Sung, and S. J. Lee, 2008, "On the Characteristics of the Droplet Formation from an Inkjet Nozzle Driven by a Piezoelectric Actuator", *Journal of the Korean Society of Visualization.*, Vol.6(1), pp.47~52.