

양극파형의 펄스폭 변화에 따른 피에조 구동형 잉크젯 노즐의 액적 토출 특성

최성훈* · 성재용† · 이명호**

Droplet Formation of a Piezoelectric Inkjet Nozzle According to the Variation of Pulse Widths in Bipolar Waveform

Sunghoon Choi, Jaeyong Sung and Myeong Ho Lee

Abstract. In this study, a piezoelectric inkjet nozzle with a rectangular shaped channel has been developed, and the characteristics of droplet formation have been investigated according to the variation of pulse widths in bipolar waveform. The channel of the nozzle was fabricated transparently by a precision machining technique. A tantalum membrane which was attached to a piezoelectric material covers the channel. By applying two types of bipolar waveforms to the piezoelectric actuators, droplet formation through the nozzle was monitored by a CCD camera. For the variety of the first and second pulse widths in the bipolar waveforms, the regimes of single and double droplet formations are presented. The change of droplet velocity which depends on the pulse width and the type of waveform is also discussed.

Key Words: Piezoelectric Actuation (피에조 구동), Inkjet Nozzle (잉크젯 노즐), Bipolar Waveform (양극파형), Droplet Formation (액적 형성), Droplet Velocity (액적 속도)

1. 서 론

잉크젯(inkjet) 기술은 과거에 가정용 프린트와 산업용 프린트에만 쓰였지만 최근에는 MEMS, 반도체 공정 등에서 폭넓게 사용되고 있으며, 특히 금속 잉크를 이용한 마이크로 회로 패터닝 및 전자 패키징 공정에서의 마이크로 범프(bump) 제작에서 중요한 역할을 한다. 전자 패키징 공정에서 잉크젯을 이용하면 공정을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있으나 다양한 종류의 전도성 잉크를 안정적으로 토출할 수 있는 노즐 기술이 아직 부족하다. 따라서 잉크젯 기술이 더욱 발전되어지기 위해서는 다양한 점도의 유체에 대응할 수 있는 잉크젯 노즐의 설계와 제작에 대한 체계적인 접근이 무엇보다 시급하다⁽¹⁾.

피에조 방식의 잉크젯 노즐에 대한 연구는 대부분 원형 채널을 감싸고 있는 피에조에 단일파형(unipolar

waveform)의 구동 전압을 가하는 방식이 주로 연구되었다⁽²⁻⁴⁾. 본 연구에서는 원형 채널 보다 MEMS 또는 정밀가공을 통해 대량 생산이 용이한 사각단면의 평면형 잉크젯 노즐에 관심을 가지고 있다. 사각 채널 형태의 노즐에 대한 연구로는 Meinhart & Zhang⁽⁵⁾이 사각 채널 형태의 잉크젯 노즐에서 채널 내부 유동을 마이크로 PIV로 측정하였고, Lee & Kim⁽⁶⁾이 피에조를 이용해 채널 내부의 잔류 진동을 측정하였다. 그러나 이 형태의 잉크젯 노즐에 대해서는 구동 파형에 따른 액적 토출 특성에 대한 연구가 이루어 지지 않았다.

한편, 기존의 원형 채널 형상에 대해서 단일 사각파 이외에 여러 가지 형태의 구동 파형에 따른 액적 토출 특성 연구가 활발하였으며, 양극파형(bipolar waveform)을 적용한 사례가 대표적이다⁽⁷⁻⁸⁾. Chen & Basaran⁽⁹⁾은 W형 파형을 적용하여 액적 크기를 작게 하는 연구를 하였고, Dong 등⁽¹⁰⁾과 Shin 등⁽¹¹⁾은 이중파형(double waveform)을 적용하여 잉크젯 노즐에서의 액적 토출 특성을 고찰하였다. 최근에는 Gan 등⁽¹²⁾이 이중파형과 W형 파형 등 다양한 파형들에 대하여 특정 조건에서 액적 크기가 감소되는 현상을 관찰하였다. 그러나 이

†서울과학기술대학교 기계공학과

E-mail : jysnug@seoultech.ac.kr

*서울과학기술대학교 에너지 환경대학원

**서울과학기술대학교 기계공학과

상의 연구들도 복잡한 파형의 매개 변수에 대한 노즐의 응답 특성을 체계적으로 고찰하지는 않았다.

본 연구에서는 사각 단면의 평면형 채널을 가진 피에조 구동형 잉크젯 노즐을 설계 및 제작하고, 양극파형의 펄스폭(pulse width)을 다양하게 변화시키면서 액적의 토출 특성을 측정하고 분석하고자 한다. 이를 위해 구동 파형의 매개 변수를 자유롭게 변경 가능한 시스템을 구축하였다. 노즐 출구에서 토출되는 액적을 가시화하여 측정하고, 액적이 토출되는 펄스폭의 범위와 그에 따른 토출 속도 변화를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 잉크젯 노즐 제작

잉크젯 노즐의 내부 형상 설계에서 중요한 것은 파형을 효과적으로 전달할 수 있고, 피에조에 의해 생성된 채널 내부에서의 파형이 상호 간섭 또는 공명하여 어떠한 점도의 유체도 토출 시 액적 제어가 원활하도록 하는 것이다. 이에 본 연구에서는 상용 노즐을 사용하지 않고, 직접 설계 제작한 노즐을 통해 그 작동 특성을 이해하고자 하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 노즐의 형상을 보여주고 있다. 내부 유동을 관찰할 수 있게 아크릴 소재를 사용하고, 5축 정밀 가공 기법을 이용해서 사각 채널 형태의 잉크젯 노즐을 제작하였다. 사각 채널의 단면은 $1,500 \times 300 \mu\text{m}^2$ 이고, 길이는 14 mm이다. 채널은 90도로 깎여 원형 노즐부와 연결되어 있으며, 노즐 토출구의 직경은 $50 \mu\text{m}$ 이다. 채널 입구부는 튜브를 이용하여 잉크통에 연결되어 있다. 채널과 피에조(piezoelectric material) 사이에는 $30 \mu\text{m}$ 두께의 멤브레인(membrane)을 형성하였다. 또한 멤브레인 위에 피에조 덮개가 있어 피에조와 멤브레인에 압력을 가해줌으로써 피에조와 멤브레인 사이에 압축응력이 작용하도록 해주었다.

멤브레인은 잉크젯 노즐 몸체와 피에조소자 사이의 막으로서 채널 내부의 잉크누수를 막고 피에조의 변이를 전달하여 잉크를 토출시키는데 중요한 역할을 하는 구조물이다. 또한 피에조에 들어가는 전극(electrode)의 역할을 겸하면서도 피에조의 변이를 지속적으로 전달할 수 있을 정도의 탄성과 내구성을 지녀야 한다. 그래서 멤브레인의 재료로서 탄탈륨(tantalum foil)을 사용하였다. 탄탈륨은 강성이 높고 탄성이 적은 금속이지만 얇게 가공하면 적정 수준의 탄성을 갖게 되고, 액

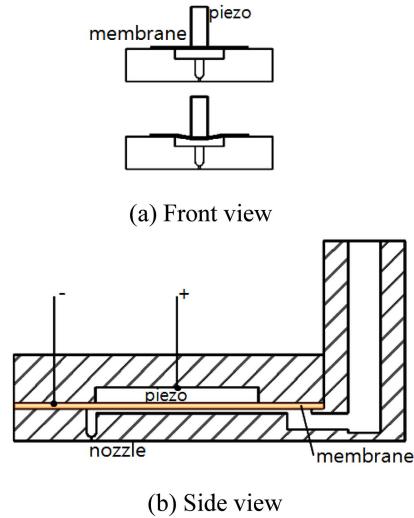


Fig. 1. Schematic of the piezoelectric inkjet nozzle.

체와 접촉 시 부식에 대한 저항이 매우 뛰어난 금속이기 때문에 멤브레인으로서 적합한 금속이다. 작동 유체는 전도성 잉크와 비슷한 점도를 지닌 상온의 DI water를 사용하였다.

2.2 구동파형 및 실험장치

피에조를 구동하기 위한 파형으로서 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 두 가지 파형을 사용하였다. Fig. 2(a)는 사각파 형태의 단일파형(unipolar waveform)이고, Fig. 2(b)는 두 개의 사각파가 반대 방향으로 연속해서 나오는 양극파형(bipolar waveform)이다. 이 파형에서 음(-)의 전압을 가하게 되면 피에조는 수축하게 되고 채널을 팽창하여 채널 내부에는 음의 압력파가 생성된다. 반대로 양(+)의 전압을 가하게 되면 피에조는 팽창하고 채널은 수축되면서 양의 압력파가 생성된다. 단일파형에 있어 Fig. 2(a)의 왼쪽 파형(+waveform)은 채널이 선수축-후팽창하는 형태이고, Fig. 2(a)의 오른쪽 파형(-waveform)은 채널이 선폽창-후수축하는 형태이다. 일반적으로는 오른쪽 파형을 많이 사용하지만 본 연구에서는 두 가지 파형에 대해 펄스폭(PW)을 변화시키면서 노즐 작동 특성을 비교 평가하였다. 양극파형인 Fig. 2(b)의 왼쪽 파형(+waveform)은 채널이 수축-팽창-수축의 과정으로 진행되고, Fig. 2(b)의 오른쪽 파형(-waveform)은 채널이 팽창-수축-팽창의 과정으로 진행된다. 양극파형에서는 두 사각파의 첫 번째 펄스폭

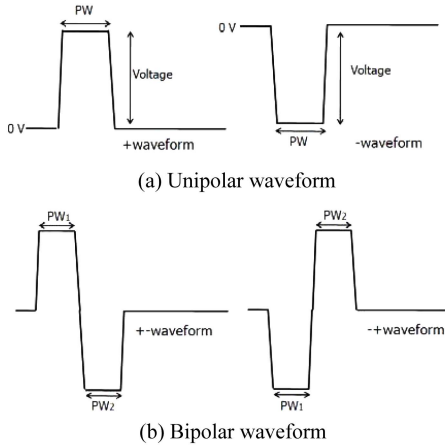


Fig. 2. Waveforms applied to the piezoelectric inkjet nozzle.

(PW₁)과 두 번째 펄스폭(PW₂)을 각각 변화시키면서 실험하였다.

잉크젯 노즐의 액적 형성 특성을 가시화하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험장치를 사용하였다. 여기서 양극파형을 포함한 다양한 형태의 구동 파형을 생성하기 위해서는 기존의 파형발생기(pulse generator)를 사용할 수 없기 때문에 별도의 파형발생기를 제작하여 적용하였다. 파형발생기에서 생성된 파형은 전압 증폭기(voltage amplifier, EPA-104, Piezo System Inc.)로 전달

되고, 전압 증폭기는 10 V의 파형전압을 -200~200 V 범위까지 증폭하여 피에조에 전달한다. 노즐 내부 압력은 피에조 구동 펄스의 순간 상승률(slew rate)이 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서 사용된 전압 증폭기는 순간 전압 상승률이 380 V/ μ s 이다. 노즐에서 토출되는 액적을 가시화하고 측정하기 위해서 LED 조명과 CCD 카메라에 연결된 현미경 대물렌즈를 사용하였다. 각 파형의 형태는 일정 시간 간격을 두고 주기적으로 반복되며, 본 연구에서는 각 파형간의 상호간섭 현상을 없애기 위해 주파수를 100 Hz로 고정하였다. CCD 카메라는 이 주파수에 동기화되어 작동하며, 펄스 발생 후 원하는 시간만큼 지연된 영상을 획득할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 주요한 변수는 각 파형에 있어서의 펄스폭이며, 펄스폭의 변화에 따른 액적 토출 범위, 토출 속도 등을 실험적으로 측정 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

단일파형 실험을 통하여 잉크젯 노즐의 특성 시간 스케일(characteristic time scale)을 얻을 수 있으며, 이 값은 액적이 토출이 되지 않는 낮은 전압에서 노즐 팁의 유체 계면이 최대 토출되는 펄스폭과 같다. 이를 최적 펄스폭(optimum pulse width)이라 한다. 이 값을 실험적으로 구하기 위하여 Fig. 4에서는 펄스폭을 변화

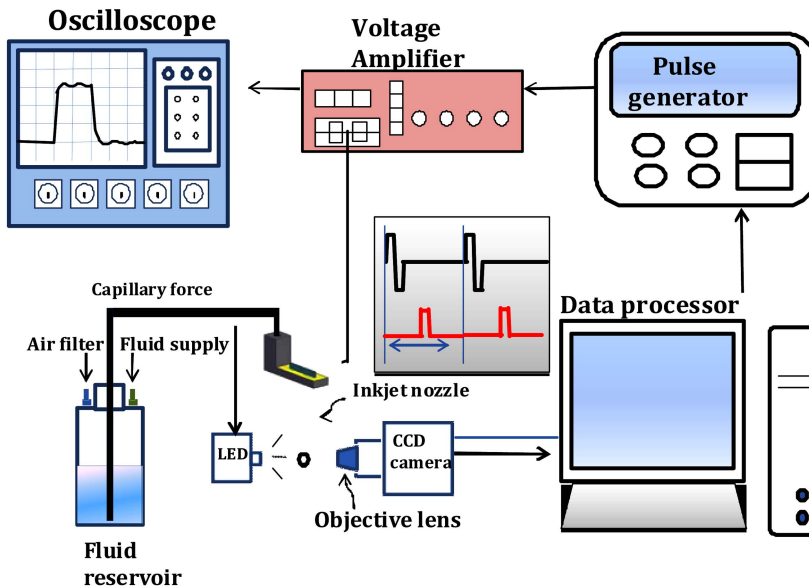


Fig. 3. Experimental setup for the visualization of droplet formation.

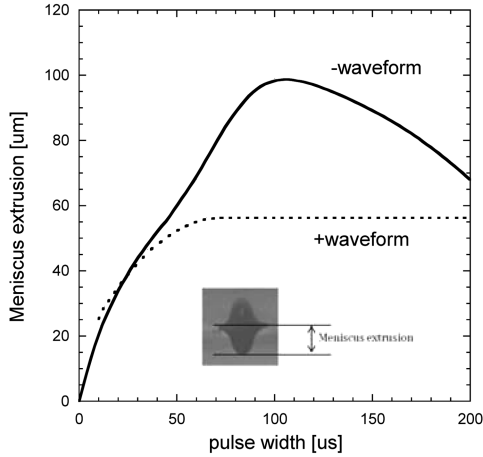


Fig. 4. Meniscus extrusion according to the pulse width in the unipolar waveform.

시켰을 때 나타나는 유체 계면의 돌출 길이(meniscus extrusion)를 그래프로 나타내었다. 여기서 구동 전압은 180 V로 고정하였다. 이 그림에서 단일파형의 펄스폭을 증가시키면 계면의 돌출 길이가 증가한다. 그러나 일정 펄스폭 이상이 되면 계면의 돌출 길이가 더 이상 증가하지 않거나 감소하는 모습을 볼 수 있다. 따라서 계면의 돌출 길이가 최대가 되는 펄스폭이 존재하며, -waveform에서는 100 μs , +waveform에서는 70 μs 로 나타났다. 펄스폭의 변화에 따른 최대 돌출 길이는 -waveform에서 더 크게 나타났다.

Fig. 5는 두 가지 양극파형을 적용하고 구동전압을 200 V로 올렸을 때 나타나는 액적 토출 과정을 가시화한 결과이다. 시간은 왼쪽에서 오른쪽으로 갈수록 증가한다. 양극파형의 첫 번째 펄스폭은 Fig. 4의 단일파형 실험에서 얻어진 최적 펄스폭을 적용하였고, 두 번째 펄스폭은 단일 액적이 생성되는 범위에서 한 가지 값을 적용하였다. 두 양극파형에 있어 액적이 토출되는 원리를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 5(a)와 같은 +waveform에서는 초기에 상승하는 펄스(rising edge)에 의해 양의 압력이 발생되고, 유체 계면이 노즐 밖으로 돌출되나 액적이 형성되지는 않는다. 이 후 하강하는 펄스(falling edge)에 의해 강한 음의 압력이 채널 내부에 형성되고 용기(reservoir)에 있는 유체를 채널 내부로 끌어당긴다. 음의 압력파는 채널 입구단에서 반사되어 양의 압력파로 전환되고 이와 동시에 상승하는 펄스에 양의 압력이 더해지면 유체가 노즐 밖으로 토출되어 액적이 형성된다. Fig. 5(b)와 같은 -+waveform인 경우 처음에 상승하는 펄스에 의해 음압이 형성되고, 이 음의 압력파는 채널 입구단에서 양의 압력파로 반사되어 돌아온다. 이 때, 상승하는 펄스에 의해 강한 양압이 형성되면서 유체를 노즐 밖으로 토출시킨다. 이 후 다시 하강하는 펄스에 의해 음압을 형성시키면 채널 내부에 존재하는 양압을 감쇄시키는 역할을 하게 된다.

Fig. 6은 두 가지 양극파형에 대하여 파형별 액적 토출 범위를 나타낸 그래프이다. 양극파형의 첫 번째 펄스폭 PW_1 과 두 번째 펄스폭 PW_2 를 변화시키면서 액적

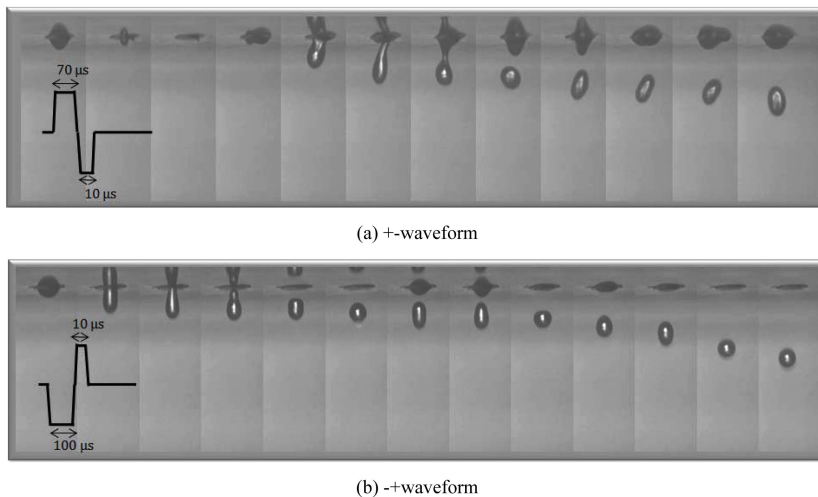
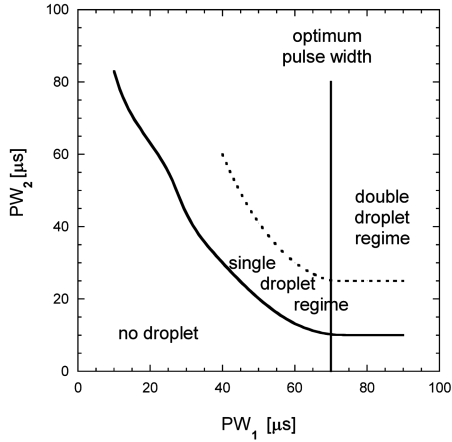
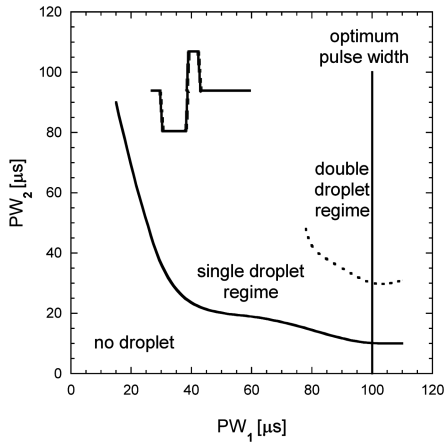


Fig. 5. Time sequences of the droplet formation by applying the bipolar waveforms at the optimum pulse widths.



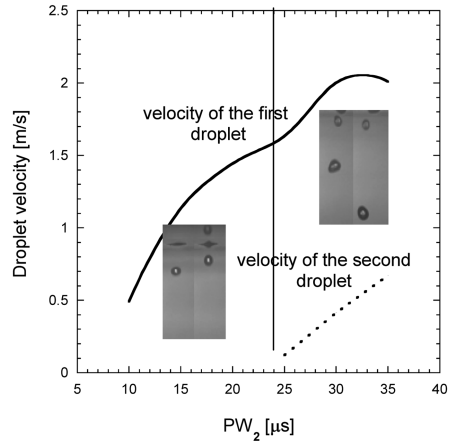
(a) +-waveform



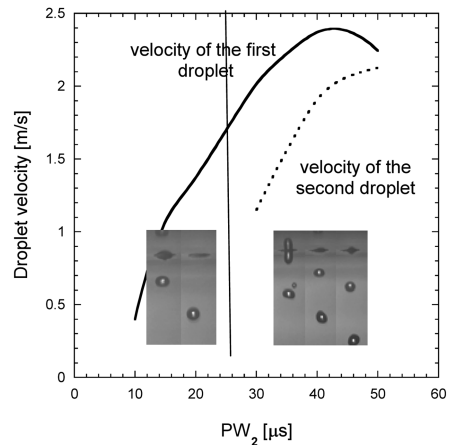
(b) +-waveform

Fig. 6. Regimes of the droplet formation for the variations of the first and second pulse widths in the bipolar waveform.

토출 여부를 살펴보았다. PW_1 과 PW_2 를 변화시켰을 때 액적이 생기지 않는 영역(no droplet regime), 단일 액적이 생기는 영역(single droplet regime), 이중 액적이 생기는 영역(double droplet regime)으로 구분하였다. Fig. 6의 결과를 살펴보면 양극파형의 형태와 상관없이 단일 액적은 PW_1 이 증가할수록 더 작은 PW_2 에서 생성됨을 볼 수 있다. 그러나 PW_1 이 최적 펄스폭보다 커지면 단일 액적이 형성되기 위한 PW_2 의 값이 약간 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 단일 액적 영역에서 PW_2 를 계속 증가시키면 이중 액적 영역으로 전환되어 한 개의 파형에 대해 2개의 연속적인 액적이



(a) +-waveform ($PW_1 = 70 \mu s$)



(b) +-waveform ($PW_1 = 100 \mu s$)

Fig. 7. Droplet velocity for the variation of the second pulse width where the first pulse width is set to the optimum pulse width.

도출되는 현상이 나타난다.

Fig. 7에서는 양극파형에 대하여 PW_1 이 최적 펄스폭(100 μs , 70 μs)으로 고정되어 있을 때 PW_2 를 변화시키면서 나타나는 토출 액적의 속도를 나타내었다. 두 양극파형에 있어 PW_2 가 증가하면 토출되는 액적의 속도는 증가한다. PW_2 가 일정 값 이상이 되면 이중 액적이 토출되고 두 번째 액적의 속도 또한 PW_2 의 증가와 함께 증가한다. 그러나 PW_2 가 더 커지면 액적의 속도는 더 이상 증가하지 않는다. 두 양극파형에 대해 액적의 속도를 비교해 보면, 단일파형을 주었을 때 계면 돌출 길이가 -waveform일 때 더욱 높았던 것처럼 양

극파형에서도 $-+waveform$ 이 $+waveform$ 에 비해 첫 번째 액적의 토출 속도가 높게 나왔다. 속도가 높다는 것은 내부 압력이 더 강하게 작용하여 유체를 강하게 밀어 낸다는 것이다. 두 번째 액적의 속도 또한 $-+waveform$ 이 더 빠른 것으로 나타났으며, $-+waveform$ 에서는 첫 번째 액적의 속도와 크게 차이가 없었으나 $+waveform$ 에서는 그 차이가 매우 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 피에조 구동형 잉크젯 노즐을 설계하고 제작하여 단일파형을 가했을 때 계면 돌출 특성으로부터 최적 펄스폭을 구하고, 양극파형을 적용하였을 때 나타나는 액적 토출 특성을 측정하고 분석하였다.

양극파형을 $+waveform$ 과 $-+waveform$ 의 두 가지 형태로 가했을 때, 첫 번째 펄스폭이 증가할수록 두 번째 펄스폭이 더 작은 값에서도 단일 액적이 토출된다. 첫 번째 펄스폭이 주어져 있으면 두 번째 펄스폭이 일정 값 이상으로 증가할 때 단일 액적 대신 이중 액적이 토출된다. 단일 액적이 토출되는 펄스폭의 범위는 $+waveform$ 에서보다 $-+waveform$ 에서 더 넓게 나타났다. 액적이 토출되는 속도는 $+waveform$ 에서보다 $-+waveform$ 에서 더 크게 나타났으며, 두 번째 펄스폭이 증가하면 파형에 상관없이 커진다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아수행된 기초연구사업임(No. 2010-0009054)

참고문헌

- 1) Shin, P., Lee, S. and Sung, J., 2008, "On the Characteristics of the Droplet Formation from an Inkjet Nozzle Driven by a Piezoelectric Actuator", J. Korean Society Visualization, Vol. 6(1), pp. 47~52.
- 2) Dijkman, J. F., 1984, "Hydrodynamics of Small Tubular Pumps", J. Fluid Mech., Vol. 139, pp. 173~191.
- 3) Shield, T. W., Bogy, D. B. and Talke, F. E., 1987, "Drop Formation by DOD Ink-jet Nozzles a Comparison of Experiment and Numerical Simulation", IBM J. Res. Develop., Vol. 31, pp. 96~110.
- 4) Reis, N., Ainsley, C. and Derby, B., 2005, "Ink-jet Delivery of Particle Suspensions by Piezoelectric Droplet Ejectors", J. Appl. Phys., Vol. 97(1), pp. 3~6.
- 5) Meinhart, C. D. and Zhang, H., 2000, "The Flow Structure Inside a Microfabricated Inkjet Printhead", Microelectromech. Syst., Vol. 9(1), pp. 67-75.
- 6) Lee, B. L. and Kim, S.-I., 2010, "Piezo-driven Inkjet Printhead Monitoring System", J. Korean Sensors Society, Vol. 19(2), pp. 124~129.
- 7) Szczech, J. B., Megaridis, C. M., Gamota, D. R. and Zhang, J., 2002, "Fine-line Conductor Manufacturing Using Drop-on-Demand PZT Printing Technology", IEEE Trans. Electron. Pack. Manuf., Vol. 25, pp. 26~33.
- 8) Jang, D., Kim, D. and Moon, J., 2009, "Influence of Fluid Physical Properties on Ink-jet Printability", Langmuir, Vol. 25, pp. 2629~2635.
- 9) Chen, A. U. and Basaran, O. A., 2002, "A New Method for Significantly Reducing Drop Radius Without Reducing Nozzle Radius in Drop-on-Demand Drop Production", Phys. Fluids, Vol. 14, pp. 1~4.
- 10) Dong, H. Carr, W. W. and Morris, J. F., 2006, "An Experimental Study of Drop-on-Demand Drop Formation", Phys. Fluids, Vol. 18, pp. 1~16.
- 11) Shin, P., Sung, J. and Lee, M. H., 2011, "Control of Droplet Formation for Low Viscosity Fluid by Double Waveforms Applied to a Piezoelectric Inkjet Nozzle", Microelectronics Reliability, Vol. 51, pp. 797~804.
- 12) Gan, H. Y., Shan, X., Eriksson, T., Lok, B. K. and Lam, Y. C., 2009, "Reduction of Droplet Volume by Controlling Actuating Waveforms in Inkjet Printing for Micropattern Formation", J. Micromech. Microeng., Vol. 19, pp. 1~8