

피에조 구동형 잉크젯 노즐에서의 미세 액적 형성 특성

신평호* · 성재용† · 이석종**

On the Characteristics of the Droplet Formation from an Inkjet Nozzle Driven by a Piezoelectric Actuator

Pyungho Shin, Jaeyong Sung and Sukjong Lee

Abstract. The present study has focused on the characteristics of droplet formation from an inkjet nozzle driven by a piezoelectric actuator. As an operating fluid, ethylene glycol was used and the physical properties of it such as viscosity, surface tension, contact angle and shear stress were measured. During the experiments, various temperatures and driving voltages are imposed on a capillary tube. These conditions result in a proper drive condition or an overdrive condition. In case of the proper drive condition, an image processing technique is applied to measure the diameter of a single free drop. As a result, the size of droplet is increased when the driving voltage is increased from 160 V to 190 V at 25°C. In the overdrive condition where temperature or driving voltage becomes higher than the proper drive condition, satellites and the misdirected jets happen.

Key Words: Piezoelectric Actuation(피에조 구동), Capillary Tube(모세관), Inkjet(잉크젯), Droplet Formation(액적 형성)

1. 서 론

잉크젯(inkjet) 기술은 프린터 외에도 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 공정에서는 잉크젯을 이용하면 공정을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있으나 범퍼의 크기와 피치간격을 미세하게 제어하기 위해서는 많은 연구가 필요하다. 따라서 잉크젯 기술이 더욱 더 발전되어지기 위해서는 다양한 물질에 대응할 수 있는 잉크젯 노즐의 설계와 제작에 대한 체계적인 접근이 무엇보다 시급하다.

잉크젯 기술은 노즐의 구동방식에 따라 Fig. 1과 같이 continuous 방식과 drop-on-demand(DOD) 방식으

로 나누어진다. Continuous 방식은 액체분사(liquid jet)를 형성하기 위해서 잉크가 펌프에 의해서 노즐까지 이송되어지는 반면에 DOD 방식은 용기(reservoir)에 있는 유체가 모세관 힘(capillary force)에 의해서 노즐로 이송되는 것이 주된 차이점이다. 이 중에서 DOD 방식은 지금까지 열적(thermal) 구동 방식과 피에조(piezoelectric) 구동 방식을 주로 사용하여 왔다. 열적 구동 방식에서는 노즐 안에 열을 가하면 기포(bubble)

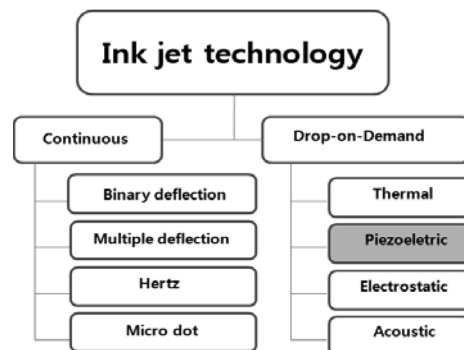


Fig. 1. Classification of various inkjet technologies

†서울산업대학교 기계공학과
E-mail : jysung@snut.ac.kr

*서울산업대학교 NID융합기술대학원

**서울산업대학교 에너지환경대학원

가 발생하여 노즐 밖으로 액적(droplet)이 분사된다. 이 방식은 기포의 열역학 특성과 열 확산 그리고 용기에서 노즐까지의 액체기둥(liquid column)을 중요하게 고려해야 한다. 반면, 피에조 구동 방식은 압전소자에 전기를 가하여 주면 압력으로 변환되어 모세관의 체적을 변화시켜 노즐 출구로부터 유체를 분사한다. 본 연구에서는 피에조 구동방식을 채택하였다. 피에조 구동형 잉크젯은 유기EL 프린팅, 전도성 잉크를 이용한 RFID 패터닝, 바이오 물질 분배 등 많은 응용분야를 가지고 있다.

전자 패키징과 관련된 잉크젯에 대한 기존 연구로는 Gans와 Schubert⁽¹⁾가 현재의 잉크젯 장비들이 폴리머(polymer)로 마이크로 어레이(micro array) 형성하는데 얼마만큼의 정확도를 가지고 있는지를 논의하였으며, Sanjana와 Fuller⁽²⁾는 잉크젯 프린팅 기술이 neuroscience의 분야에 까지 적용이 되는 가능성을 제시하였다. Kamyshny 등⁽³⁾은 물과 비슷한 물성 값을 가지는 실버 나노잉크(silver nano ink)와 물에 오일이 포함되어 있는 마이크로 유상액(micro emulsion)으로 300°C 기판(substrate)에서 주목할 만한 전도성을 가지는 패턴을 제시하였다. Prasad 등⁽⁴⁾은 세라믹 잉크젯이 기판 위에 퍼지는 현상과 다양한 물질에 대하여 현탁액의 밀도(packing density)와 점도가 전단율(shear rate)의 조건에 따라 어떻게 변하는지 연구하였다. 또한, Park과 Back⁽⁵⁾은 다양한 시간과 온도에 침전되는 나노 실버입자의 열적인 거동을 TEM과 optical profiler를 이용하여 분석하였다.

한편, 잉크젯 노즐에서의 액적 형성에 대한 연구도 많이 수행되었으며, Shield 등⁽⁶⁾은 피에조 구동형 잉크젯에서 증류수(distilled water)와 에틸렌글리콜(ethylene glycol)을 온도 25°C에서 전압(voltage)과 펄스폭(pulse width)에 따른 액적 형성의 변화를 고찰하였다. Basaran⁽⁷⁾은 액적을 만들기 위한 방법과 액적의 끊어짐 그리고 액적이 노즐 출구로부터 나와 공기와 접촉할 때의 계면 특성을 연구하였다. Mohebi와 Evans⁽⁸⁾은 잉크젯의 액적이 노즐 출구로부터 수평하게 분사되었을 때 준난류(semi-turbulent) 유동의 다양한 접근을 통하여 액적의 궤적(trajecory)을 제시하였다.

DOD 방식의 피에조 구동형 잉크젯 노즐에 관한 이상의 연구들은 대부분 상온에서 수행되었으며, 온도 및 구동 전압과 액적 크기의 상관관계에 대한 체계적인 해석은 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 잉

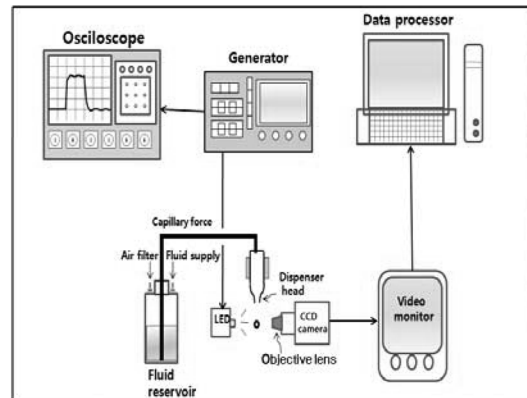


Fig. 2. Experimental setup for the inkjet nozzle system driven by a piezoelectric actuator

크젯 노즐의 작동 변수로 온도와 전압을 선정하고 이들이 액적 크기 및 형성 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 본 실험에서는 전자 패키징에 사용되는 실버 나노잉크에 대한 선행 연구로서 이와 비슷한 점도를 가지는 에틸렌글리콜을 사용하였고, 온도와 전압에 따라 노즐 출구에서 나오는 액적의 크기와 특성을 측정하였다. 액적의 크기를 측정하기 위해 독창적인 영상처리 기법(image processing technique)을 사용하였다.

2. 실험방법

Fig. 2는 피에조 구동형 잉크젯 노즐을 이용한 미세 액적 형성 실험장치의 구성도를 나타낸다. Fig. 2의 실험장치 구성은 압전 소자용 제어기(Microdrop, MD-E-201-H), 피에조 구동형 잉크젯 노즐(Microdrop, MD-K-140), CCD 카메라 및 LED strobe로 구성되어 있다. 제어기에서는 피에조 소자에 들어가는 전압, 펄스폭, 펄스주기를 조절할 수 있다. Fig. 3은 피에조 구동형 잉크젯 노즐의 상세한 부품의 구성을 나타내고 있다. 여기서 모세관 직경은 1.5 mm이며 노즐 팁의 직경은 100 μm이다. 모세관을 포함한 노즐의 재질은 유리(glass)로 되어 있다. 모세관 힘에 의해서 액체가 공급되면 피에조에 의해서 액적이 분사되고 노즐부에 히터(heater)와 열 센서(thermo sensor)도 부착되어 있어 온도 제어를 할 수 있다. 제어기에서 발생하는 압전 구동 신호는 오실로스코프(oscilloscope)를 통하여 정밀하게 모니터링 하였다. 또한 노즐 출구부에 설치된 LED strobe와 CCD 카메라를 제어함으로써 노즐 출구에서 형성되어 떨어

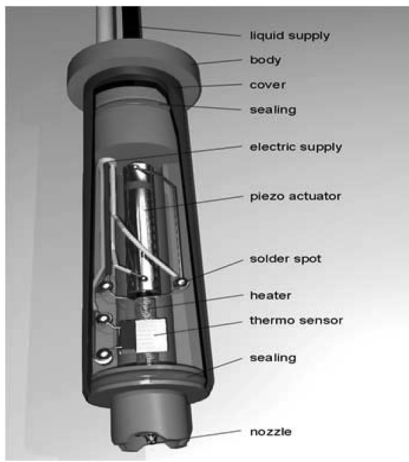


Fig. 3. An inkjet nozzle driven by a piezoelectric actuator

지는 액적을 펄스주기에 동기화 하여 영상을 획득한다. 액적이 마이크로 크기를 가지고 있어 CCD 카메라에 현미경 대물렌즈(objective lens)를 설치하였다.

본 실험에서 사용된 유체는 에틸렌글리콜이며, 점도계(Brookfield, DV-III+ULTRA Rheometer)를 이용하여 점도를 온도에 따른 함수로 측정하였다. 유체의 표면장력과 접촉각은 접촉각측정기(KSV, CAM200)를 이용하여 상온(25°C)에서 측정하였다. 표면장력과 접촉각은 깨끗한 유리 표면 위에서 힘의 평형이 이루어진 정적인(static) 상태에서 측정하였다. 미세 액적을 형성하는 실험조건으로는 피에조 구동전압을 160~210 V 범위에서 10 V씩 변화시키면서 관찰하였으며, 온도는 25°C, 35°C, 45°C의 세 가지 조건에서 실험하였다. 이때, 피에조 구동 펄스 주기와 펄스폭은 각각 500 μ s, 30 μ s로 고정하였다.

액적의 크기를 정밀하게 측정하기 위하여 영상처리 기법을 도입하였으며, Fig. 4는 구체적인 영상 처리과정을 나타낸다. 원시 영상(original image)에서 미디언 필터(median filter)를 적용함으로써 영상획득단계에서 발생하는 노이즈를 제거한다. 다음으로 이진화(binarization) 단계를 거침으로써 액적은 흰색, 배경은 검정색으로 경계를 구분한다. 이진화를 위한 문턱 값(threshold level)은 영상에 따라 적절히 조절하였다. 이진화 된 영상에서 액적 내부에 빛의 굴절현상에 의해 발생하는 검은 점이 있으며 이는 팽창연산(dilation)과 침식연산(erosion)을 반복함으로써 제거할 수 있다. 최종적으로 경계추출(edge detection) 과정을 거쳐 액적의 경계선을 구하

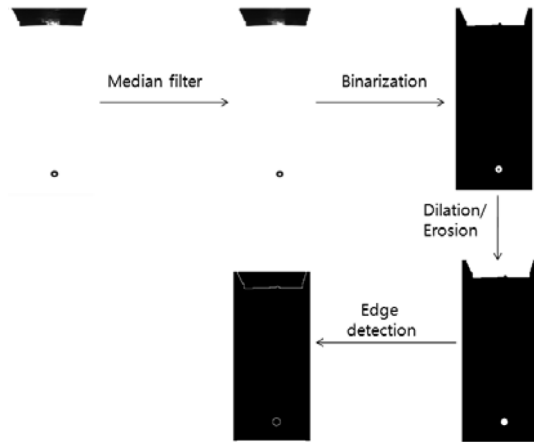


Fig. 4. Image processing procedure to obtain the droplet size

고 내부 영역의 면적을 픽셀단위로 계산한다. 액적은 구형으로 가정하여 계산된 면적으로부터 직경을 산출하였으며, 실제길이와 영상의 픽셀간격 간의 확대비(scale factor)를 곱하여 실제 액적의 크기를 산출하였다.

3. 피에조 구동형 잉크젯의 기본 원리

Fig. 5는 피에조 구동형 잉크젯 노즐의 형상과 구동 펄스의 한 주기에서 일어나는 모세관 내 압력파의 거동을 나타낸다. 액적을 분사하기 위해서는 피에조의 구동 전압을 사다리꼴(trapezoidal) 형태로 만들어 준

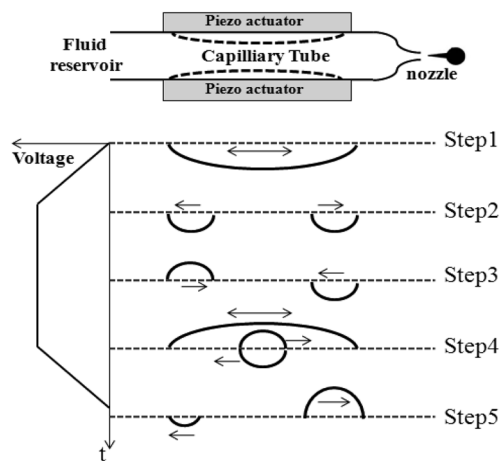


Fig. 5. Principle of the pressure wave propagation inside the capillary tube

다. 초기 단계(step1)는 전압이 0 V에서 구동전압으로 서서히 상승하는 단계이며, 이 때 모세관의 체적이 증가하면서 음(negative)의 압력파가 피에조 구동기 중앙에서 생성된다. 다음 단계(step2)에서는 생성된 압력파가 모세관의 양방향으로 전달된다. 양방향으로 전달된 음의 압력파는 노즐 팁과 용기에서 각각 반사되어 진다(step3). 이 때 용기는 밀폐되어 있어 고정단과 같은 역할을 하여 음의 압력파는 부호가 바뀌어 양의 압력파로 변환되고, 노즐 팁은 열린 채널(open channel)로서 자유단과 같이 음의 압력파로 반사된다. 노즐에서 반사되어지는 음의 압력파는 계면(meniscus)을 노즐 출구에서부터 상류로 후퇴하도록 만든다. 이후 단계(step4)에서 이 음의 압력파는 용기에서 반사되면서 되돌아오는 양의 압력파와 중앙에서 중첩(superposition)된다. 이 중첩에 의해 최종 단계(step5)에서 용기로 향하던 압력파는 매우 약해지는 반면에 노즐 출구로 향하던 압력파는 증폭되어 액적을 순간적으로 분사시킨다.

4. 결과 및 고찰

미세 액적 형성에 있어서 유체의 점도와 표면장력은 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 사용된 에틸렌글리콜의 점도를 서로 다른 온도 조건에서 측정하였으며, Fig. 6은 온도에 따른 전단율과 전단응력의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 기울기는 점도를 의미하며, 전단

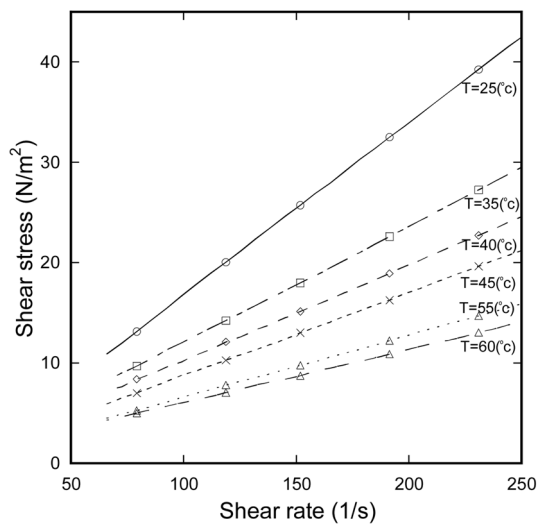


Fig. 6. Relation between shear stress and shear rate for ethylene glycol.

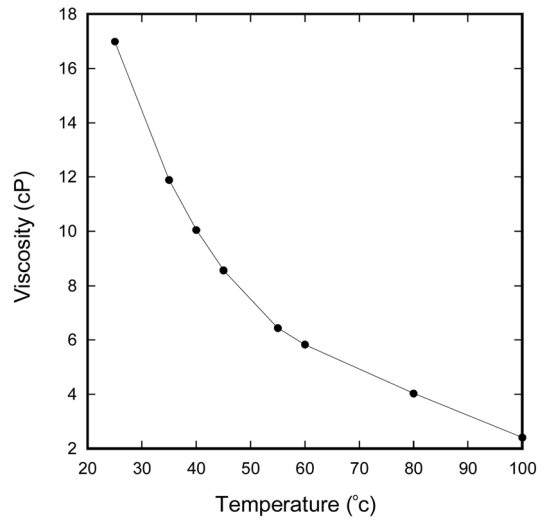


Fig. 7. Variation of viscosity of ethylene glycol according to temperature

Table 1. Material properties of ethylene glycol at 25°C

표면장력	밀도	Contact angle
49.39 mN/m	1.102 g/cm ³	19.5°

율의 변화에 따른 기울기의 변화가 없는 직선형태이므로 에틸렌글리콜은 뉴튼유체로 판명되었다. Fig. 7은 Fig. 6에서 구한 점도 값을 온도에 따른 함수로 나타내었으며, 온도 25°C에서 100°C로 증가함에 따라 점도가 17 cP에서 2.5 cP까지 내려가는 것을 볼 수 있다. 접촉각 측정기로 측정된 에틸렌글리콜의 표면장력, 접촉각은 Table 1에 나타내었으며, 에틸렌글리콜의 표면장력은 증류수보다 상대적으로 작은 값이다.

노즐의 온도, 구동 전압을 변경하면서 그에 따른 액적 형성 실험을 수행하였다. 구동전압이 주기적인 펄스 형태로 주어지기 때문에 구동 주기에 맞춰서 액적이 형성되며, Fig. 8은 시간에 따른 액적의 순차적 형성과정을 나타내고 있다. 이 그림은 온도가 25°C일 때 170 V의 구동 전압이 2,000 Hz로 작동할 때의 모습이다. 한 주기에 대한 펄스폭은 30 μs이며, 펄스에 동기화되어 시간지연(time delay)을 변경하면서 순차적 영상을 획득하였다. Fig. 8(a)~(h)의 첫 번째 영상과 마지막 영상의 시간간격은 300 μs이며, 단일 액적이 형성되기 까지 총 8가지의 단계로 구분하였다. 각 단계는 다음과 같이 설명될 수 있다. (a) 평형상태(equilibrium)로

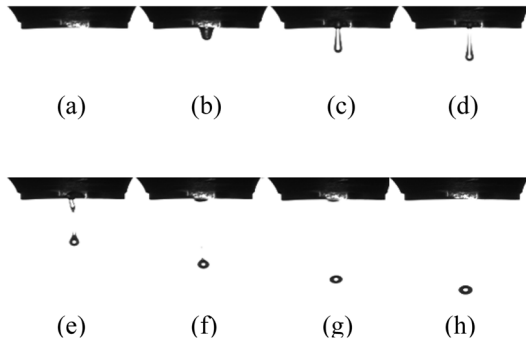


Fig. 8. Sequential process of the droplet formation under the proper drive condition at 25°C, 170 V: (a) equilibrium, (b) ejection, (c) fluid jet formation, (d) fluid jet destabilization, (e) drop break off, (f) fluid withdraw, (g) single free drop, (h) ready to eject

유체가 노즐출구 밖으로 분출되지 않음; (b) 유체를 분출함(ejection); (c) 유체가 분출이 되고 액적을 형성하기 시작함(fluid jet formation); (d) 계속되는 유체의 분출로 불안정한 상태(fluid jet destabilization); (e) 액적의 끊어짐(drop break off); (f) 유체의 후퇴(fluid withdraw); (g) 단일 액적으로 떨어짐(single free drop); (h) 분출할 준비를 함(ready to eject).

단일 액적이 형성되기 위해서는 이와 같이 8개의 과정이 문제없이 잘 진행되어야 한다. 그러나 실제로는 동일한 유체를 사용하더라도 온도, 구동전압, 펄스폭, 구동주파수 등 작동조건에 따라서 이상현상을 흔히 볼 수 있으며, 본 연구에서는 주요하게 온도와 구동전압의 변화에 따른 이상 현상을 고찰하였다. Fig. 9에서는 Fig. 8과 같이 단일 액적이 잘 형성되는 정상 구동 조건(proper drive condition)이 아닌 과도 조건(overdrive condition)에서 나타나는 이상 현상들을 나열하였다. 과도 조건은 이상 현상이 나타날 때의 작동조건을 의미하며, 온도 또는 전압이 과도하게 상승하는 경우에 발생한다. Fig. 9(a)는 단일 액적이 아닌 여러 개의 작은 액적들이 파편처럼 튀어 나가면서 생기는 현상이며, Fig. 9(b)는 액적의 궤적이 중심을 벗어나는 경우이다. Fig. 9(c)는 액적이 떨어지지 않고 길게 늘어지지만 하는 경우이다. 에틸렌글리콜의 경우 온도 변화에 따른 표면장력의 변화는 상대적으로 적은 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁾ 따라서 이러한 이상 현상의 주된 원인은 온도가 35°C, 45°C로 올라가면서 점도가 감소하고 액체분

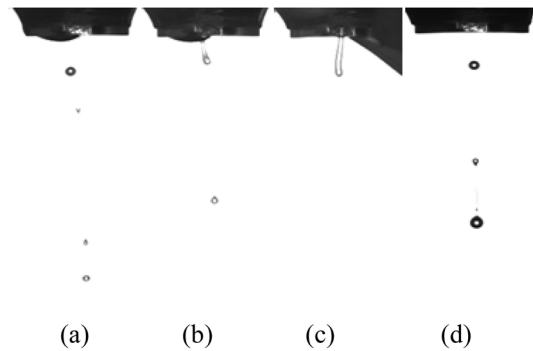


Fig. 9. Images of the abnormal droplet formation under the overdrive conditions: (a) 35°C, 190 V, (b) 35°C, 200 V, (c) 45°C, 190 V, (d) 25°C, 200 V

자들의 결속력이 떨어져서 단일 액적이 만들어지지 않고 입의 지점에서 파편(fragment)이 생겨 잘못된 방향으로 튀어 나가는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 9(d)의 현상은 온도 25°C에서 전압을 200 V로 올리면서 나타나는 이상 현상으로 원하지 않는 위성(satellite)이 생기는 것을 볼 수 있다. 위성 액적은 원래 액적보다 저항을 적게 받아서 떨어지면서 원래 액적에 합쳐지는 경우도 있지만 위성 액적이 홀로 남겨져서 기관에 도달 하였을 때 원하지 않는 지점에 떨어 질 수 있다.

Fig. 10은 영상처리 기법을 Fig. 8의 조건에서 연속적으로 촬영된 액적 영상에 적용하여 액적 직경을 구

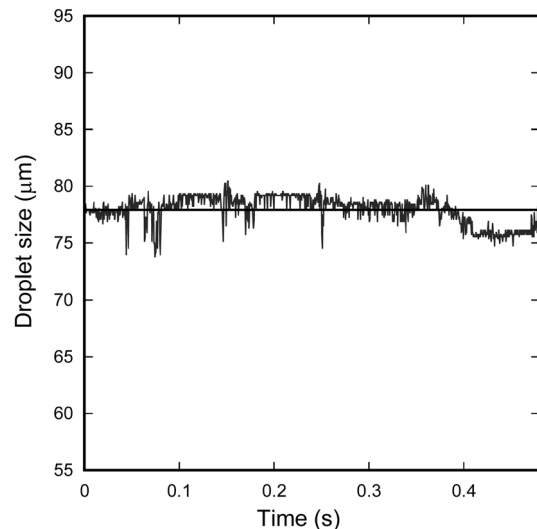


Fig. 10. Measured size of a droplet from the continuously captured images

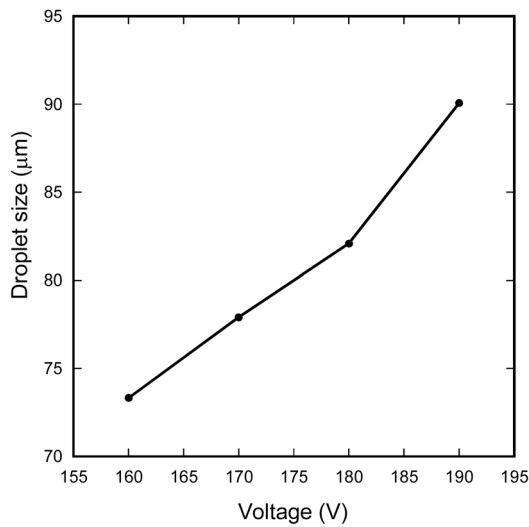


Fig. 11. Variation of the droplet size according to driving voltage

한 결과이다. 이 그림에서 실제 액적의 직경은 동일하다고 가정하고 반복측정에 의한 불확도를 계산한 결과 액적 크기는 $77.92 \pm 1.24 \mu\text{m}$ 로 불확도가 1.6%이다.

Fig. 11에서는 온도가 25°C일 때 전압을 160~190 V로 변화시키면서 형성되는 액적의 평균직경을 나타내었다. 구동 전압이 커지면서 전체적으로 액적의 크기가 선형적으로 커짐을 확인할 수 있다. 이는 전압이 높으면 압전 소자의 변위가 커져서 내부에 발생하는 압력파가 커지고 그에 따른 분사력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 액적 크기에 영향을 주는 인자는 구동 전압뿐만 아니라 펄스 파형에 따라 달라질 수 있으며, 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 피에조 구동형 잉크젯 노즐에서의 미세액적 형성 특성을 온도와 구동전압에 따라 실험하고 분석하였다. 작동 유체인 에틸렌글리콜에 대하여 점도, 표면장력 등 관련 물성치를 측정하였으며, 액적 형성 과정에서의 이상 현상이 온도와 구동전압 등 작동조건에 따라 나타남을 확인하였다. 이상 현상의 주요 발생 원인은 온도의 증가에 따른 점도의 감소이며, 구동전압이 너무 크면 위성 액적이 형성된다. 액적의 크기를 측정하기 위하여 영상처리기법을 도입하였으며 측정

불확도가 2% 이내임을 확인하였다. 측정된 액적의 크기는 구동전압에 따라 선형적으로 증가하였다.

후 기

이 논문은 서울특별시가 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원 사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합공정 및 장비개발)으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) De Gans, B.-J. and Schubert, U. S., 2003, "Inkjet Printing of Polymer Micro-Arrays and Libraries: Instrumentation, Requirements, and Perspectives," *Macromol. Rapid Commun.*, Vol. 24(11), pp. 659-666.
- 2) Sanjana, N. E. and Fuller, S. B., 2004, "A Fast Flexible Ink-Jet Printing Method for Patterning Dissociated Neurons in Culture," *Journal of Neuroscience Method*, Vol. 136, pp. 151-163.
- 3) Kamyshny, A., Ben-moshe, M., Aviezer, S. and Magdassi, S., 2005, "Ink-Jet Printing of Metallic Nanoparticles and Microemulsions," *Macromol. Rapid Commun*, Vol. 26, pp. 281-288.
- 4) Prasad, P. S. R. K., Reddy, A. V., Rajesh, P. K., Ponnambalam, P. and Prakasan, K., 2006, "Studies on Rheology of Ceramic Inks and Spread of Ink Droplets for Direct Ceramic Ink Jet Printing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, pp. 222-229.
- 5) Park, J.-W and Baek, S.-G, 2006, "Thermal Behavior of Direct-Printed Lines of Nanoparticles," *Scripta Materialia*, Vol. 55, pp. 1139-1142.
- 6) Shield, T. W., Bogy, D. B. and Talke, F. E., 1987, "Drop Formation by DOD Ink Jet Nozzles: A Comparison of Experimental and Numerical Simulation," *IBM J. RES. Develop.*, Vol. 31(1), pp. 96-110.
- 7) Basaran, O. A., 2002, "Small-Scale Free Surface Flows with Breakup: Drop Formation and Emerging Applications," *AIChE Journal*, Vol. 48(9), pp. 1842-1848.
- 8) Mohebi, M. M. and Evans, J. R. G., 2005, "The Trajectory of Ink-jet Droplets: Modelling and Experiment," *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 3469-3476.
- 9) Lee, E. R., 2003, *Microdrop Generation*, CRC Press, United States, pp. 56-69.