한국기계가공학회지, 제20권, 제12호, pp. 123~128(2021.12) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 12, pp. 123~128(2021.12) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.12.123

고점도 용액 정밀토출을 위한 노즐 직경 및 표면젖음성 특성 연구

이상현*, 배재현**, 이상민**,#

*삼성전자, **동의대학교 기계자동차로봇부품공학부

Study of the Geometry and Wettability of Nozzles for Precise Ejection of High Viscous Liquids

Sanghyun Lee*, Jae Hyeon Bae**, and Sangmin Lee**,#

*Test & System Package, Samsung Electronics

**Division of Mechanical, Automotive, Robot Component Engineering, Dong-Eui University

(Received 26 September 2021; received in revised form 15 October 2021; accepted 20 October 2021)

ABSTRACT

Liquid dispensing systems are extensively used in various industries such as display, semiconductor, and battery manufacturing. Of the many types of dispensers, drop-on-demand piezoelectric jetting systems are widely used in semiconductor industries because of their ability to dispense minute volumes with high precision. However, due to the problems of nozzle clogging and undesirable dispensing behavior in these dispensers, which often result in device failure, the use of highly viscous fluids is limited. Accordingly, we studied the behaviors of droplet formation based on changes in viscosity. The effects of surface energy and the inner diameters of needle-type nozzles were also studied. Results showed that nozzles with lower surface energies reduced the ejection volume of droplets when a smaller nozzle diameter (0.21 mm in this study) was applied. These results indicate that the hydrophobic treatment of nozzle surfaces and the use of smaller nozzle diameters are critical factors enabling the use of highly viscous fluids in precision dispensing applications.

Keywords: Droplet(액적), High Viscosity(고점도), Dispenser(디스펜서), Wettability(젖음성), Nozzle(노즐)

1. 서 론

디스펜싱(dispensing) 시스템은 정밀한 액체 제어 기술을 활용하여 실런트(sealant), 잉크(ink), 에폭시(epoxy), 전해액(electrolyte) 등과 같은 기능성 액상 물질을 정량으로 정확한 위치에 반복적으로 토출하는 시스템을 말한다[1]. 디스펜싱 시스템은 디스플레이, 2차전지, 반도체 제품 등 광범위한 산업현장에서 매우 다양한 제품의 제조공정에 널리 활용되고 있다[2]. 디스펜서의 구동 방식은 공기압(air pressure) 방식[3], 멤브레인(membrane) 방식[4], 압전구동(piezoelectric) 방식[5], 오거(Auger screw) 방식[6], 정전 분무(electrospray) 방식[7] 등 다양한 방식이 있으며, 사용하고자 하는 용액의 특성, 디스펜싱 정밀도 및 제품의 생산성 등 제조공정의 요소들을 고려하여 목적에 적합한 방식이 활용되고 있다.

반도체 생산 분야의 산업현장에서는 일반적으로

Corresponding Author : thinking@deu.ac.kr
Tel: +82-51-890-2300, Fax: +82-505-182-6978

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

피코리터(pico liter, pL) 및 나노리터(nano liter, nL) 수준의 미세정량 토출 목적으로 수십에서 수백 마이크로미터(㎛) 수준의 내경(inner diameter)을 갖는 노즐을 이용한 압전구동 젯팅(jetting) 방식이 널리 사용되고 있다. 본 방식은 드롭온디맨드(drop-on-demand)[8] 형태로 미량의 액적(droplet)을 높은 정밀도로 초당 수백 회 토출이 가능한 장점이 있으나, 높은 점도(viscosity)를 갖는 용액을 정밀하게 토출하는 데 있어 기술적인 어려움이 있다. 대표적으로 용액에 의한 노즐 막힘(clogging)으로 발생하는 유지보수 비용의 증가, 그리고 미토출(non-dispensing) 또는 비산액적(satellite) 발생과 같은 비정상적인 토출 이슈는 제품의 생산성 및 수율을 하락시키는 매우 주요한 불량 원인으로 작용한다. 따라서 고점도의 용액을 정밀하게 토출하기 위한 주요 요소들에 관한 연구가 필요하다.

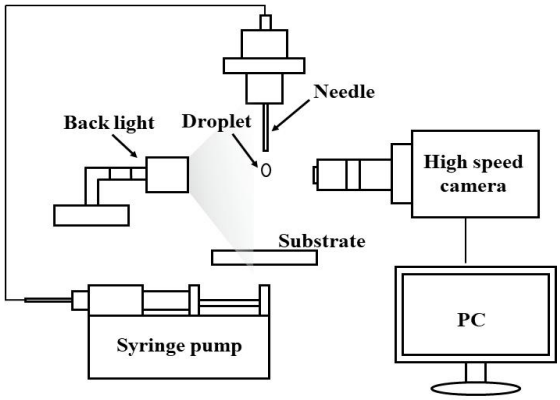
따라서 본 논문에서는 고점도 용액의 액적 토출 시 정밀성에 영향을 미치는 위한 주요 인자에 관해 연구를 수행했다. 유체제어 시스템과 초고속 이미징 시스템을 구축하여 용액의 점도 변화에 따른 노즐 끝단에서의 토출 특성을 분석하였으며, 노즐의 직경과 표면 특성에 따른 액적의 거동을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 분석방법

본 연구에서는 노즐 끝단(nozzle tip)에서의 액적이 토출되는 현상을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 초고속 이미징(high-speed imaging) 시스템을 구축하여 실험에 사용하였다. 셔터스피드 1/300000 s, 프레임속도 10000 frame/s 조건으로 이미지를 획득했다. 이미지 분석(image processing)은 매트랩(MATLAB) 기반의 분석 코드를 활용하여 토출 현상에 관련된 주요 인자들을 정량화하였다.

유체를 정밀하게 제어하고 노즐을 통해 액적 형태로 토출하기 위해 시린지 펌프(syringe pump)를 활용한 유체제어 시스템을 구성하였다. 시린지 펌프는 원하는 유량을 정밀하게 제어할 수 있으며, 시린지와 튜브를 연결하고 튜브의 끝에 노즐을 조립하여 액적 토출을 실시하였다. 초당 1개 이상의 단일 액적(single droplet)을 연속적으로 발생시키기 위해, 본 실험에서는 70mL/hr의 유량 조건을 적용하였다.



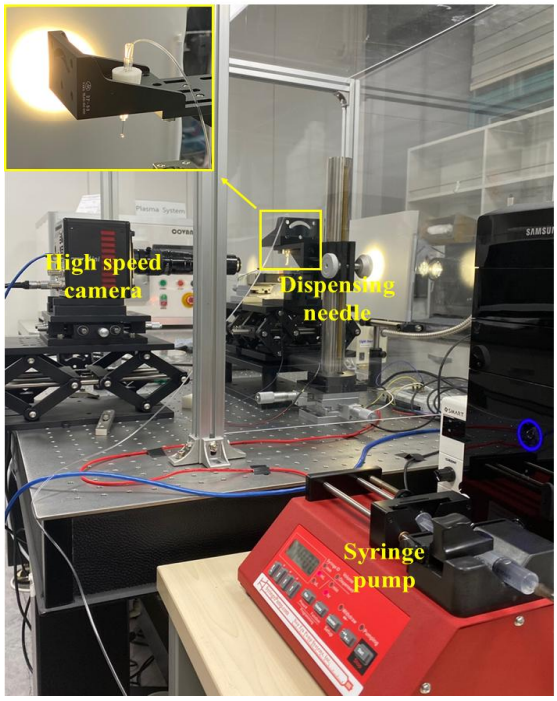


Fig. 1 Experimental setup

2.2 시편 및 용액 준비

점도 특성이 다른 용액의 토출 현상을 관찰하기 위해 물(water)과 글리세롤(glycerol)을 혼합한 3가지의 용액을 실험에 사용하였다(Table 1). 용액 토출을 위한 노즐의 직경은 16 Gauge(내경 1.19 mm) 및 27 Gauge(내경 0.21 mm) 두 가지를 사용하였으며, 노즐에 소수성 코팅(hydrophobic coating) 적용 여부에 따른 표면 젖음성(wettability)[9] 특성이 다른 노즐 2가지 종류를 준비하였다. 소수성 코팅은 0.2% 테플론 용액(Teflon®, AF-1600)을 이용하여 상온에서 노즐을 용액 속에 수 초 (5초 이내) 동안 담근 후 꺼내서, 용제(solvent)를 제거하기 위해서 70℃ 오븐에서 충분히 건조 시켰다. 노즐은 스테인리스 스틸(stainless steel) 소재로 소수성 코팅의 효과를 확인하기 위해, 동일한 재료의 표면의 테플론 코팅에 따른 젖음성 변화를 확인하였다. 젖음성 변화는 물을 이용하여 표면 접촉각(contact angle)을 측정하였으며, 그 결과 코팅 전후 스테인리스 스틸 표면 접촉각은 각각 73 ± 1.0°, 121 ± 2.6°로 측정되었다. 접촉각은 상온(~ 18 ℃)의 상대습도 25% 환경에서 8회 반복 측정하였다(Fig. 2). 모든 실험에 사용한 물은 초순수 제조 장치(Power, ㈜휴먼과학)를 이용하여 이온을 제거한 초순수(deionized water)를 사용하였다.

Table 1 Properties of liquids

Liquid types	Density (kg/m^3)	Viscosity (cP)	Surface tension (mN/m)
Water	998	1	73
50% Glycerol	1126	6	68
90% Glycerol	1235	219	63

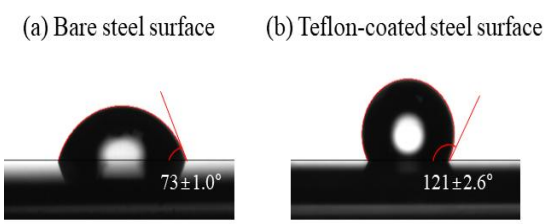


Fig. 2 Surface wettability for bare steel and Teflon-coated steel surfaces

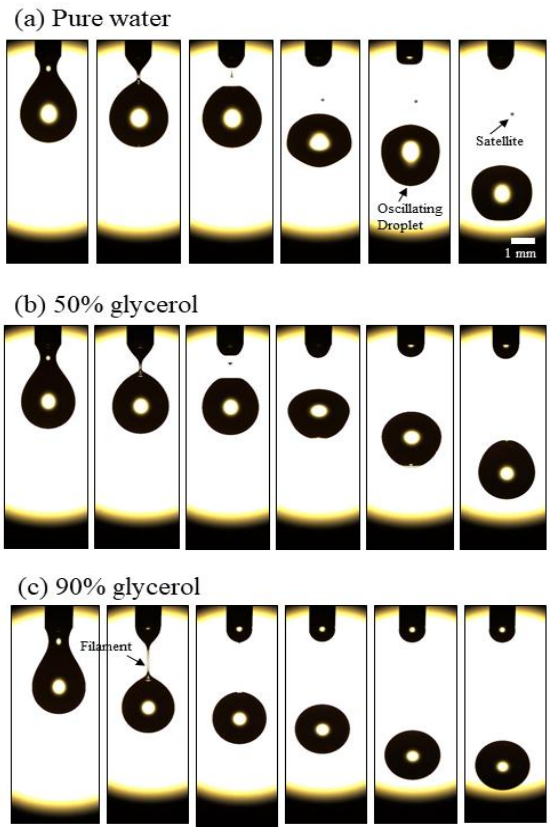


Fig. 3 Sequential images of the ejection process for three different droplets

3. 실험결과 및 고찰

3.1 점도에 따른 용액 토출 현상 분석

초고속 카메라로 분석한 용액의 액적 토출 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 실험조건은 테플론 코팅을 실시하지 않은 16 Gauge 노즐을 적용하였다. 노즐 끝 부분에서 토출되는 액적의 형성은 "①액적 형성-②필라멘트(filament) 형성-③네킹(necking) 발생-④토출(ejection)"의 과정[10]을 통해 이루어졌다. 토출된 액적의 움직임을 보면, 점도가 낮은 용액일수록 진동(oscillation) 형태의 액적 모션(motion)이 발생함을 관찰할 수 있었으며, 점도가 높은 용액의 경우는 진동 형태의 모션 없이 액적이 토출되었다. 이는 점도 향상에 의한 용액의 댐핑(damping) 효과[11]가

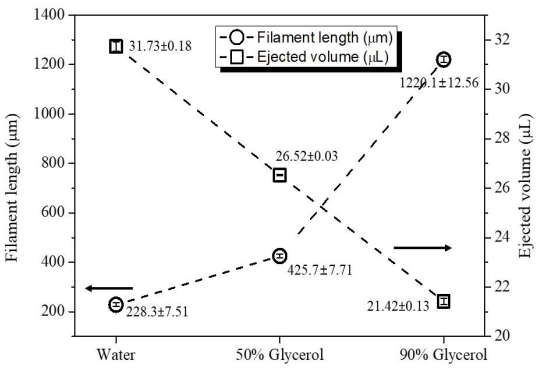


Fig. 4 Filament lengths and ejected volumes for three liquid types

증가하였기 때문이다. 필라멘트 형성 측면에서는 점도가 높은 용액일수록 스트레칭(stretching) 발생 경향 증가로 인해 필라멘트 길이가 길게 형성되었으며, 점도가 낮을수록 필라멘트가 짧게 형성되며 액적이 토출되었다(Fig. 4). 토출되는 용액의 부피는 점도가 증가할수록 감소하였다. 이는 점도 증가에 따라 필라멘트 네킹 현상이 빠르게 발생하기 때문이다. 위성 액적(satellite) 발생은 저점도 용액 토출 조건에서 상대적으로 두드러지게 관찰되었으며, 이는 네킹에 의한 액적 형성 과정에서 용액의 점도 대비 상대적으로 표면장력의 영향력이 강해 표면에너지 최소화를 위해 구형의 액적을 형성하려고 하는 경향이 크기 때문이다.

3.2 소수성 코팅 영향성 분석

스틸 소재의 노즐 끝단에 테플론 코팅을 실시하여 젖음성 변화에 따른 토출되는 액적의 부피를 분석하였다. 16 Gauge 노즐을 적용한 실험에서는 노즐의 젖음성 특성과 토출되는 용액의 부피 사이에 유의미한 상관성은 없는 것으로 분석되었다. 16 Gauge 노즐 조건에서는 액적 토출을 위한 노즐의 내경이 충분히 커서 (>1mm) 액적 토출이 용이하여 유의미한 차이가 관찰되지 않았던 것으로 보인다. 반면, 27 Gauge 노즐을 적용한 실험에서는 테플론 코팅이 적용된 소수성 노즐에서 점도 특성이 다른 3종류의 액체 모두 토출 부피가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 소수성 표면 특성을 갖는 노즐은

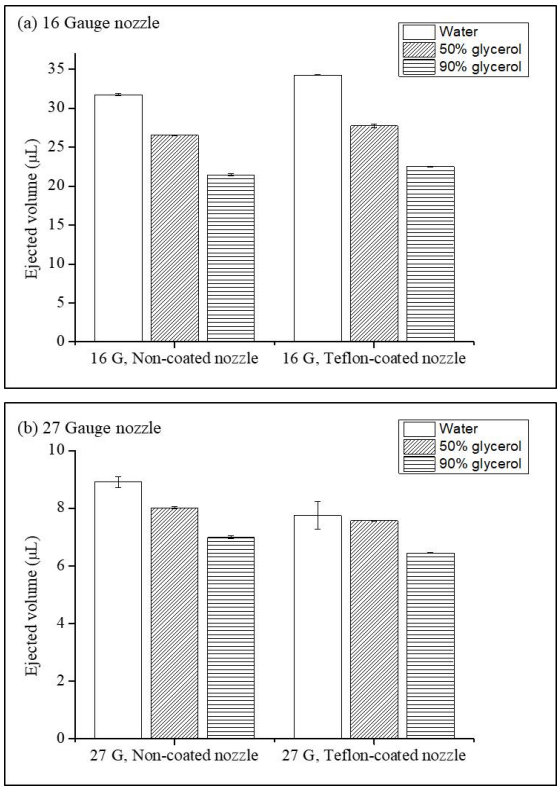


Fig. 5 Ejected volumes of liquids under different nozzle wettabilities

접촉각이 크고 표면에너지(surface energy)가 낮으며[12], 따라서 액체와 노즐 표면과의 접착력(adhesion)이 감소하게 된다. 이로 인해, 액적 토출 시 극복해야 할 에너지 레벨이 낮아지게 되며 결과적으로 토출 부피가 감소하게 된다[13].

실험 결과를 바탕으로, 고점도의 용액을 정밀하게 토출하기 위한 노즐의 적용에 관해 내경과 표면 젖음성이라는 주요 인자를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 용액의 점도변화에 따라 노즐 끝부분에서 액적이 형성 및 토출되는 과정에 관해 관찰 및 분석하였다. 액적의 토출은 "①액적 형성-②필라멘트(filament) 형성-③네킹(necking) 발생-④토출(ejection)"의 과정을 통해 이루어졌으며, 용액의 점

도 변화에 따라 다른 양상을 나타내었다. 물과 글리세롤을 혼합하여 다른 점도를 갖는 3가지 샘플 용액을 만들어 토출 평가를 했으며, 용액의 점도가 높을수록 액적 토출 과정에서 필라멘트의 길이는 길게 형성되며, 토출되는 액적의 부피는 감소함을 확인할 수 있었다. 또한, 점도가 낮은 용액과 비교 시, 위성 액적의 발생 경향이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 용액에 잘 젖지 않는 소수성을 갖는 노즐은 상대적으로 토출내경이 작은 경우, 액적의 토출부피를 감소시키는 것을 확인하였다. 따라서, 고점도의 용액을 토출함에 있어 정밀도를 향상하기 위해서는 상대적으로 좁은 직경(내경 1.19 mm;16G → 내경 0.21 mm;27G)을 갖는 노즐을 적용하고, 추가로 노즐 표면의 표면에너지를 감소시켜 액체와의 접착력을 감소시키기 위한 코팅을 사용 목적에 따라 적용할 필요가 있다.

후 기

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2020R1F1A1050735)."

REFERENCES

1. Jianping, L., and Guiling, D., "Technology development and basic theory study of fluid dispensing - a review," Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP '04), pp. 198-205, 2004.
2. Kim, D. K. and Kim, S. K., "A Study on Design of Nozzle Tip for Airless Spray Coating," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 183-188, 2012.
3. Choi, I. H., Kim, H, Lee, S., Baek, S. and Kim, J., "Plug-in nanoliter pneumatic liquid dispenser with nozzle design flexibility," Biomicrofluidics, Vol 9, No. 6, pp. 064102, 2015.
4. Lee, S. and Kim, J., "Development and characterization of a cartridge-type pneumatic dispenser with an integrated backflow stopper," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, No. 1, 015011, 2009.
5. Trimzi, M. A., Ham, Y. B., An, B. C., Choi, Y. M., Park, J. H. and Yun, S. N., "Development of a Piezo-Driven Liquid Jet Dispenser with Hinge-Lever Amplification Mechanism," Micromachines, Vol 11, No. 2, pp. 117-134, 2020.
6. Hong, S., Sanchez, C., Du, H. and Kim, N., "Fabrication of 3D Printed Metal Structures by Use of High- Viscosity Cu Paste and a Screw Extruder," Journal of Electronic Materials, Vol 44, No. 3, pp. 836-841, 2015.
7. Dang, H. W., Yang, S. W., Doh, Y. H. and Choi, K. H., "Improvement of Spray Coating Uniformity using ESD Electrodes," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15 No. 2, pp. 118-124, 2016.
8. Lee, T. M., Kang, T. G., Yang, J. S, Jo, J. D., Kim, K. Y., Choi. B. O. and Kim, D. S., "Theoretical Analysis and Experimental Characterization of DoD Metal-Jet System," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 31, No. 256, pp. 11-17, 2007.
9. Kim, J. H., Kwon, Y. J., Yang, H. S. and Kim, J., "Hydrophobic Surface Treatment with Anisotropic Characteristics Using Laser Selective Deposition," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 11, pp. 109-116, 2020.
10. Jang, D., Kim, D. and Moon, J., "Influence on Fluid Physical Properties on Ink-Jet Printability," Langmuir, Vol. 25, pp. 2629-2635, 2009.
11. Kong, G., Mirsandi, H., Peters, E. A. J. F., Baltussen, M. W., Kuipers, J. A. and Buist K. A., "Oscillation dynamics of a bubble rising in viscous liquid," Experiements in Fluids, Vol. 60, No. 130, 2019.

12. Stallard, C. P., McDonnell, K. A, Onayemi, O. D., O'Gara, J. P. and Dowling, D. P., “Evaluation of Protein Adsorption on Atmospheric Plasma Deposited Coatings Exhibiting Superhydrophilicto Superhydrophobic Properties,” Biointerphases, Vol. 7, No. 31, 2012.
13. Dong, Z., Ma, J. and Jiang, L., “Manipulating and Dispensing Micro/Nanoliter Droplets by Superhydrophobic Needle Nozzle,” ACS Nano, Vol 7, No. 11, pp. 10371-10379, 2013.