

이젯 프린터를 사용한 고분자/퀀텀닷 마이크로 패터닝 공정

김시몬¹, 이수언², 김봉훈^{1,2} 

¹ 송실대학교 유기신소재파이버공학과

² 송실대학교 스마트웨어블공학과

초록: 이젯 프린팅은 직접적인 비접촉 마이크로 팸기술의 하나로서 노즐과 기판 사이에 강한 전기장을 가함으로써 넓은 범위의 마이크로/나노패턴 어레이를 구현할 수 있는 다목적 팸공정이다. 제조된 고분자/퀀텀닷 마이크로 패턴의 모양과 두께는 자동화된 프린트 기계에 설치된 노즐 직경과 공정에 사용된 잉크 성분에 일반적으로 정밀한 의존성을 갖는다. 본 논문의 목적은 실험 결과에 영향을 미칠 수 있는 각각의 공정 변수 효과를 설명하기 위해서 이젯 프린팅된 고분자/퀀텀닷의 전형적인 실제 예를 설명하는데 있다. 여기서 우리는 마이크로/나노 해상도로 두께가 정밀하게 제어된 고분자/퀀텀닷 패턴을 제조할 수 있는 몇 가지 이젯 프린팅 공정을 구현하였다.

키워드: 인쇄공정, 이젯 프린팅, 퀀텀닷, 마이크로패터닝 공정

Micropattern Arrays of Polymers/Quantum Dots Formed by Electrohydrodynamic Jet (e-jet) Printing

Simon Kim¹, Su Eon Lee², and Bong Hoon Kim^{1,2}

¹ Department of Organic Materials and Fiber Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

² Department of Smart Wearable Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received November 12, 2021; Accepted November 22, 2021)

Abstract: Electrohydrodynamic jet (e-jet) printing, a type of direct contactless microfabrication technology, is a versatile fabrication process that enables a wide range of micro/nanopattern arrays by applying a strong electric field between the nozzle and the substrate. In general, the morphology and the thickness of polymers/quantum dot micropatterns show a systematic dependence on the diameter of the nozzle and the ink composition with a fully automated printing machine. The purpose of this report is to provide typical examples of e-jet printed micropatterns of polymers/quantum dots to explain the effect of each process variable on the result of experiments. Here, we demonstrate several operating conditions that allow high-resolution printing of layers of polymers/quantum dots with a precise control over thickness and submicron lateral resolution.

Keywords: Printing process, Electrohydrodynamic jet printing, Quantum dots, Micropatterning process

✉ Bong Hoon Kim; bonghoonkim@gmail.com

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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.

1. 서론

- 최근 인쇄전자 기술은 전자소자, 디스플레이, 바이오 메디컬 소자 등등 여러 분야에서 활용 가능한 제조 공정으로 평가받고 있다 [1-5]. 인쇄기술이 활용될 수 있는 응용 범위가 확장되면서 전도성, 절연성, 반도체 물성을 포함한 다양한 특성을 가지는 잉크가 인쇄전자 기술에서 폭넓게 연구되고 있다 [6,7]. 나노 스케일의 전자소자의 개발과 전자회로의 높은 집적도로 인해 고해상도의 인쇄전자 기술이 요구되고 있으며, 이로 인해 기존보다 더욱 세밀한 마이크로/나노 패터닝 공정을 개발하기 위한 노력이 이루어지고 있다 [8-11].
- 특히 다양한 인쇄전자 기술 중에서 electrohydrodynamics 기반의 e-jet 프린팅 공정이 최근 많은 관심을 받고 있다 [12-15]. E-jet 프린팅 기술은 강한 전기장을 통해 잉크 표면에 정전기력을 생성시킴으로써 잉크의 기계적 움직임을 유도하는 비접촉 방식의 프린팅 기술이다. 외력으로 잉크를 방출하기 때문에 노즐의 크기 및 액체의 점성에 대해 크게 제한을 받지 않고 전압, 파형, 유량 등을 조절하여 토출되는 잉크의 droplet 크기를 결정할 수 있다. 이러한 전기수력학적 현상을 이용한 e-jet 프린팅 공정과 다양한 기능성 잉크를 사용하면 마이크로/나노 크기의 미세 패터닝이 가능하다 [16,17]. 이러한 e-jet 프린팅 기술은 여러 종류의 기판에 적용할 수 있고 대면적 및 저비용 공정을 확립할 수 있기 때문에 차세대 전자소자 제조 공정에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본론

2.1 E-jet 프린팅을 이용한 마이크로 패터닝 공정 개발

- 그림 1(a), (b)는 본 논문에서 설명하고자 하는 e-jet 프린팅 장비의 구성과 실제 프린팅 과정을 보여주고 있다. 본 논문에서는 e-jet 프린팅 방법을 사용하여 고분자/퀀텀닷의 마이크로 패터닝을 제조할 경우 다양한 공정 조건에 따라서 실험 결과가 실제로 어떻게 달라지는지를 살펴보고자 한다. 사전 실험 경험이 없는 임의의 재료를 잉크로 사용하여 e-jet 프린팅 공정을 진행할 경우 주의해야 될 실험적 이슈는 크게 두 가지이다.
- 첫째, 프린팅 과정에서 nozzle 끝부분이 막히지 않도록 tip과 잉크를 준비해야 한다. 잉크가 배출되는 tip의 경

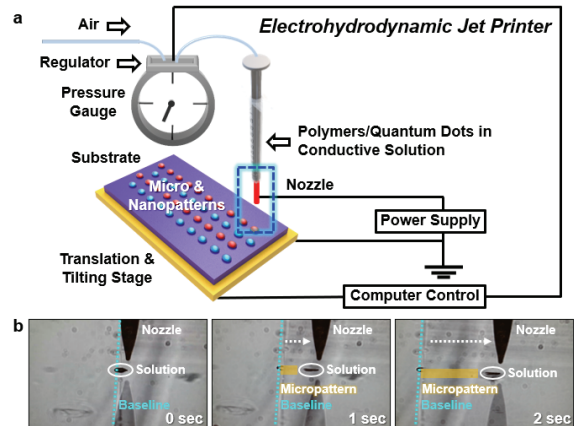


Fig. 1. (a) The schematic illustration of conventional e-jet printing setup including a nozzle, ink chamber, air supply, substrate, and automatic stage and (b) the images of a nozzle and printed micropattern on a silicon substrate during the e-jet printing process.

우 수 마이크로미터 크기의 지름을 가지면서 동시에 표면에 전기전도성을 가져야 한다. 위와 같은 두 조건을 만족하는 tip을 제조하기 위한 가장 일반적인 방법은 soda lime 재질로 만들어진 유리 바늘을 구입한 후 sputtering 공정을 통해 표면에 Cr/Au를 얇게 증착하는 것이다. 이후 gold 표면에 thiol 계열의 self-assembled monolayer (SAM)처리를 함으로써 잉크에 의해서 nozzle 끝이 막히는 것을 방지한다 [18]. 이때 주의해야 할 사항은 gold 표면에 화학처리된 thiol 계열 SAM의 경우 특히 고온에서 내구성이 떨어지게 되므로 특정 시간 이상으로 e-jet 프린팅을 진행하게 되면 주기적으로 교체를 해 주어야 한다는 점이다. 추가로 e-jet 프린팅 공정 도중에 nozzle 끝이 막히지 않는 잉크의 농도를 실험적으로 파악해야 한다. E-jet 프린팅 공정의 경우 잉크를 제조하는 데 사용한 solvent의 종류보다는 잉크의 농도에 훨씬 민감하기 때문이다 [19].

- 둘째, 완성도 높은 마이크로 패터닝을 제조하기 위해서 다양한 공정 조건들을 최적화시켜야 한다. 이때 우리가 고려해야 될 변수는 (1) nozzle의 지름, (2) tip과 stage 사이에 가해지는 voltage, (3) stage/printing speed, (4) 잉크의 농도, (5) solvent의 종류, (6) 잉크가 프린팅 되는 기판의 surface energy 등이다. 위의 5가지 항목이 마이크로 패터닝 width의 균일성/edge roughness 같은 패터닝의 완성도를 결정하는데 가장 큰 영향을 미치게 되므로 이러한 변수들의 최적 조합을 찾아내는 것이 중요하다. 참고로 e-jet 프린팅 공정의 경우 잉크를 제조하는 데 사용된 solute의 종류에 대해서는 크게 민감하지 않다.

2.2 고분자 재료의 마이크로패터닝 공정

■ 본 논문에서는 e-jet 프린팅 공정을 사용한 고분자 마이크로 패터닝의 실제 예로써 UV curable polymer (NOA 74, $n=1.52$)와 유기용매(TCB, 1,2,4-trichlorobenzene)에 녹은 polystyrene (PS, 40 kg/mol, $n=1.59$)의 실험 결과에 대해서 설명할 것이다. 이와 같은 고분자 마이크로 패턴 어레이는 light emitting diodes (LEDs)와 하나의 기판에 집적되어 waveguide의 용도로 활용될 수 있으며, 본 실험에서 사용한 NOA 74와 polystyrene의 경우 waveguides로 이용되기에 유리한 광학적 물성을 가지고 있다. Electrohydrodynamic phenomena를 이용하면 e-jet 프린터의 droplets을 수백 나노 크기로 구현할 수 있기 때문에 고해상도의 waveguides 패턴

을 대면적에 제조할 수 있다 [20-23]. 본 연구에서는 각각 고분자 재료에 대해서 tip 안쪽 지름이 5 μm 와 1 μm 인 두 종류의 nozzle를 사용하였으며, 다른 크기를 갖는 직선과 곡선 패턴을 테스트용 패턴으로 사용하였다.

■ 그림 2(a)는 5 μm 크기의 nozzle과 UV curable polymer (NOA 74)를 사용하여 마이크로 패턴의 radius of curvature가 37.5 μm 부터 75 μm 가 되도록 stage speed 20 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 부터 500 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 공정 조건을 사용한 e-jet 프린팅 결과를 보여주고 있다. 기판으로는 oxygen plasma 처리(200 W, 200 mTorr, 20 sccm, 5 min)된 silicon wafer를 사용하였다. 마이크로 패턴 width의 균일성과 edge roughness를 고려해 볼 때 radius of curvature와 printing speed가 각각 37.5 μm 와 100 μm 일 때 최적의 프린팅 결과를 얻을 수 있

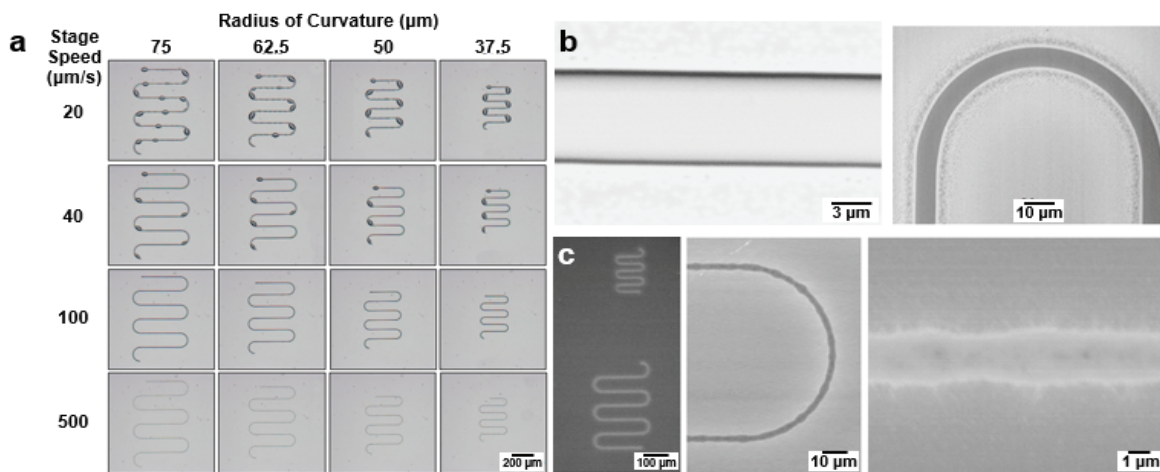


Fig. 2. The low and high magnification SEM images of e-jet printed micropatterns using UV curable polymer (NOA 74) and a metal-coated glass nozzle [(a), (b) 5 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

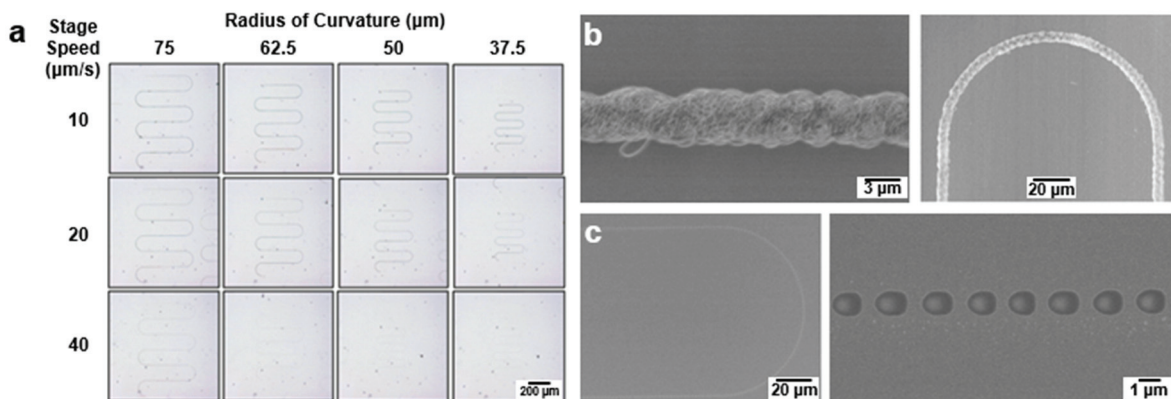


Fig. 3. The low and high magnification SEM images of e-jet printed micropatterns using polystyrene and a metal-coated glass nozzle [(a), (b) 5 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

음을 확인할 수 있다. 동일한 공정 조건을 사용했을 때 직선 패턴 부분을 포함하여 곡선 패턴 부분에도 완성도 높은 마이크로 패턴을 구현할 수 있음을 확인하였다 [그림 2(b)]. 추가로 1 μm 크기의 nozzle과 동일한 고분자 재료를 사용하여 e-jet 프린팅을 진행할 경우 radius of curvature와 printing speed가 각각 12.5 μm 와 20~40 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 일 때 가장 균일한 고분자 마이크로 패턴을 제조할 수 있었다 [그림 2(c)].

- 유기용매 TCB와 polystyrene을 사용하여 e-jet 프린팅 공정을 진행하는 경우 5 μm 크기와 1 μm 크기의 nozzle 실험에서 고분자 용액의 농도가 각각 0.25 wt% 와 0.1 wt%일 때 최적의 실험 결과를 얻을 수 있었으며 이보다 높은 농도의 경우 nozzle 끝이 막히는 현상이 발견되어 e-jet 프린팅이 불가능하였다. 그림 3(a), (b)와 그림 3(c)는 각각 5 μm 크기와 1 μm 크기의 nozzle을 사용했을 때 제조된 마이크로 패턴의 결과를 보여주고 있다. 그림 3(a)는 마이크로 패턴의 radius of curvature가 37.5 μm 부터 75 μm 가 되도록 stage speed 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 부터 40 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 공정 조건을 사용한 e-jet 프린팅 결과이다. 5 μm 크기의 nozzle을 사용하고 stage speed가 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 인 경우 radius of curvature는 37.5 μm 까지 균일한 마이크로 패턴이 제조된다는 사실을 알 수 있다. 1 μm 크기의 nozzle과 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 stage speed를 사용할 경우 radius of curvature는 12.5 μm 까지 구현이 가능하였다. 여기서 주목해야 할 점은 UV curable polymer (NOA 74)와 다르게 polystyrene의 경우 e-jet 프린팅이 진행된 chamber의 습도에 따라서 섬유 형태의 마이크로 패턴이 제조될 수 있다는 사실이다 [그림 3(b)]. 추가로 연속적인 line 패턴보다는 불연속적인 dot 패턴에서 우수한 edge roughness를 나타냈으며, 이러한 마이크로 패턴의 완성도는 프린팅 공정에 사용된 voltage를 증가시키거나 poly(methyl methacrylate) (PMMA)처럼 polystyrene 보다 상대적으로 친수성인 고분자를 사용할 경우 향상시킬 수 있다 [그림 3(c)]. 전체적으로 polystyrene보다는 UV curable polymer (NOA 74)를 사용할 때 더 높은 stage speed가 가능하며 동시에 다양한 크기의 nozzle을 사용해도 완성도 높은 마이크로 패턴을 제조할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 퀀텀닷 소재의 마이크로 패턴링 공정

- 본 실험에서는 퀀텀닷 마이크로 패턴링 실험을 위하여 green CdSe@ZnS (gradient composition shell) 퀀

텀닷과 red CdSe/CdS/ZnS 퀀텀닷을 이용하였으며 기존 논문에서 보고된 퀀텀닷 합성 방식을 그대로 이용하여 준비하였다 [24,25]. 그림 4(a)(1)~(3)은 5 μm 크기의 nozzle, dichlorobenzene을 유기용매로 사용한 0.125 wt% 농도의 red 퀀텀닷 용액, 300 V 전압, 그리고 oxygen plasma 처리된 실리콘 웨이퍼(200 W, 200 mTorr, 20 sccm, 5 min)을 기판으로 사용한 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 4(a)(1)에서 보여주는 4개의 line 패턴은 위에서부터 각각 5, 7.5, 10, 15 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 printing speed를 사용하여 제조되었다. 이러한 실험 조건은 e-jet 프린팅 공정의 재현성과 마이크로 패턴의 균일도가 좋지 않은 대표적인 경우이다. 예를 들어 그림 4(a)(1)의 위에서 두 번째 직선 패턴은 7.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 printing speed로 제조되었음에도 불구하고, 더 빠른 속도인 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 프린팅된 세 번째 직선 패턴보다 더욱 균일하고 feature size가 작기 때문이다. 그

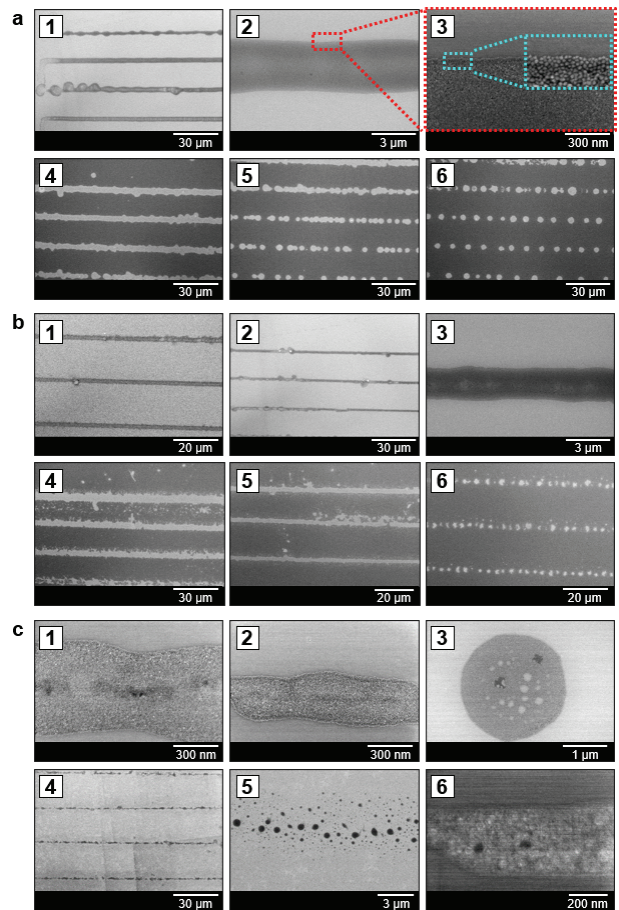


Fig. 4. The SEM images of e-jet printed micropatterns using green/red quantum dots (QDs) solution and a metal-coated glass nozzle [(a) 5 μm , (b) 2 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

림 4(a)(2), (3)은 마이크로 패턴된 쿼터닷의 고배율 SEM 이미지를 보여주고 있으며, 그림 4(a)(4)~(6)은 각각 20, 25, 30 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 printing speed를 사용한 실험 결과를 보여주고 있다. Stage speed가 증가할수록 불연속적인 부분이 나타나면서 line 패턴이 점차 dot 패턴으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

- 그림 4(b)(1)~(3)은 2 μm 크기의 nozzle, dichlorobenzene 을 유기용매로 사용한 0.0625 wt% 농도의 red 쿼터닷 용액, 350 V 전압, 그리고 oxygen plasma 처리된 실리콘 웨이퍼(200 W, 200 mTorr, 20 sccm, 5 min)를 기판으로 사용한 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 4(b)(1)에서 printing speed의 경우 위에서부터 각각 5, 7.5, 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 공정 조건을 사용하였으며, 5 μm 크기의 nozzle을 사용하였을 때보다 마이크로 패턴의 균일도와 feature size 측면에서 전체적으로 향상된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)(4)~(6)은 0.0625 wt% 농도의 red 쿼터닷 용액 대신에 0.125 wt% 농도의 green 쿼터닷 용액을 사용하여 e-jet 프린팅을 진행한 결과이며, 높은 농도의 쿼터닷 용액을 사용함으로써 마이크로 패턴의 edge roughness 값이 커진 것을 확인할 수 있다.

- 그림 4(c)(1)~(3)은 1 μm 크기의 nozzle, dichlorobenzene 을 유기용매로 사용한 0.0025 wt% 농도의 red 쿼터닷 용액, 330 V 전압, 그리고 oxygen plasma 처리된 실리콘 웨이퍼(200 W, 200 mTorr, 20 sccm, 5 min)를 기판으로 사용한 실험 결과를 보여주고 있다. 이는 충분히 작은 지름을 갖는 nozzle과 저농도 쿼터닷 용액을 사용할 경우 e-jet 프린팅 방법을 사용하여 수십~수백 나노미터 크기의 쿼터닷 패턴을 성공적으로 구현할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 4(c)(4)~(6)의 경우 oxygen plasma 처리된 기판 대신 octadecyltrichlorosilane (ODTS)을 사용하여 표면에 self-assembled monolayer (SAM) 처리가 된 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하였을 때 쿼터닷 e-jet 프린팅 결과를 보여주고 있다. Low surface energy를 갖는 기판의 영향으로 부분적으로 de-wetting된 쿼터닷 패턴이 제조되었으며, 이는 e-jet 프린팅 공정이 coffee-ring effect을 이용한 self-organized 패턴닝 공정과 결합되어 활용될 수 있음을 의미한다. 마지막으로 그림 5(a)와 그림 5(b), (c)는 각각 마이크로 스케일의 쿼터닷 패턴을 이용한 장미꽃 그림과 동일한 기판 위에 순서대로 제조된 UV curable polymer (NOA 74)와 쿼터닷 마이크로 패턴의 광학/형광 현미경 이미지를 보여주고 있다.

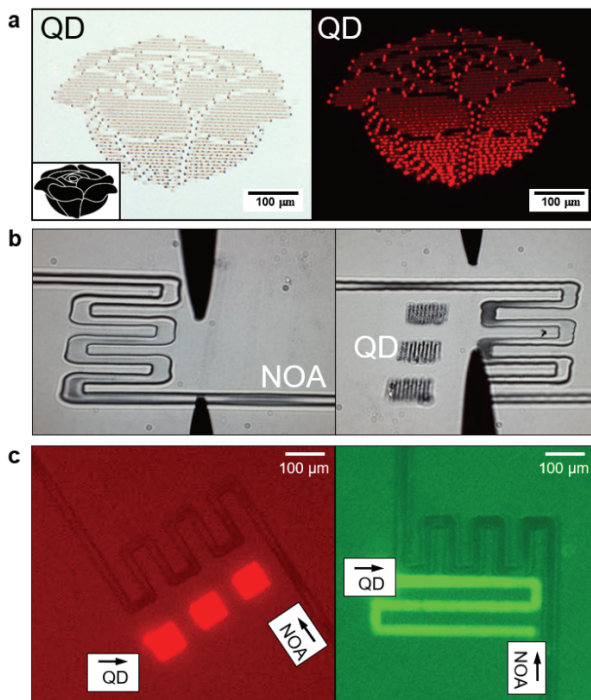


Fig. 5. (a) Optical, (b) SEM, and (c) fluorescence images of a pattern of QDs/NOA 74 e-jet printed in a raster scanning mode to obtain a uniform coverage.

3. 결론

- 본 논문에서 다룬 e-jet 프린팅 공정의 경우 기존의 마이크로 펌공정과 구별되는 뚜렷한 여러 장점들을 갖고 있기 때문에 차세대 마이크로/나노 패턴 제조 공정으로써 많은 잠재력을 가지고 있다 [26-28]. 예를 들어 고온이나 유기용매에 매우 약한 고분자 기판 또는 silicone elastomer 기판 위에 다양한 잉크의 마이크로 패턴을 직접적으로 구현할 수 있기 때문에 웨어러블 유연 전자 소자 제작에 활용될 수 있다 [29,30]. 특히 최근 차세대 디스플레이 광전자소자로 많은 연구가 이루어지고 있는 쿼터닷 디스플레이의 경우 full-color 구현을 위한 RGB 픽셀 제조 기술이 중요한 상황에서 e-jet 프린팅 공정이 해결책을 제시할 수 있는 유력한 후보 기술 중의 하나가 될 수 있을 것으로 예상된다.

ORCID

Bong Hoon Kim

<https://orcid.org/0000-0002-4610-0176>

감사의 글

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1C1C1014980).

REFERENCES

- [1] M. Zhang, G. Li, L. Huang, P. Ran, J. Huang, M. Yu, H. Yuqian, J. Guo, Z. Liu, and X. Ma, *Appl. Mater. Today*, **22**, 100903 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100903>]
- [2] H. Li, Z. Wang, Y. Cao, Y. Chen, and X. Feng, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 1612 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c19837>]
- [3] K. Kim, G. Kim, B. R. Lee, S. Ji, S. Y. Kim, B. W. An, M. H. Song, and J. U. Park, *Nanoscale*, **7**, 13410 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5NR03034J>]
- [4] C. Zhao, Y. Zhou, S. Gu, S. Cao, J. Wang, M. Zhang, Y. Wu, and D. Kong, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 47902 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12415>]
- [5] T. Ahmadraji, L. Gonzalez-Macia, T. Ritvonen, A. Willert, S. Ylimaula, D. Donaghy, S. Tuurala, M. Suhonen, D. Smart, A. Morrin, V. Efremov, R. R. Baumann, M. Raja, A. Kempainen, and A. J. Killard, *Anal. Chem.*, **89**, 7447 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b01012>]
- [6] X. Chu, G. Chen, X. Xiao, Z. Wang, T. Yang, Z. Xu, H. Huang, Y. Wang, C. Yan, N. Chen, H. Zhang, W. Yang, and J. Chen, *Small*, **17**, 2100956 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.202100956>]
- [7] S. Abdolhosseinzadeh, R. Schneider, A. Verma, J. Heier, F. Nüesch, and C. J. Zhang, *Adv. Mater.*, **32**, 2000716 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202000716>]
- [8] P. Ren, Y. Liu, R. Song, B. O'Connor, J. Dong, and Y. Zhu, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **3**, 192 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaem.0c00747>]
- [9] H. S. An, Y. G. Park, K. Kim, Y. S. Nam, M. H. Song, and J. U. Park, *Adv. Sci.*, **6**, 1901603 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201901603>]
- [10] D. Song, A. Mahajan, E. B. Secor, M. C. Hersam, L. F. Francis, and C. D. Frisbie, *ACS Nano*, **11**, 7431 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b03795>]
- [11] K. Fukuda and T. Someya, *Adv. Mater.*, **29**, 1602736 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201602736>]
- [12] K. Cao, F. Zhang, A. Zaeri, R. Zgeib, and R. C. Chang, *Adv. Mater. Technol.*, **6**, 2100251 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/admt.202100251>]
- [13] Y. Zhong, H. Yu, P. Zhou, Y. Wen, W. Zhao, W. Zou, H. Luo, Y. Wang, and L. Liu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 39550 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c06205>]
- [14] S. Su, J. Liang, Z. Wang, W. Xin, X. Li, and D. Wang, *Nanoscale*, **12**, 24450 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1039/D0NR08236H>]
- [15] J. Yong, Y. Liang, Y. Yu, B. Hassan, M. S. Hossain, K. Ganesan, R. R. Unnithan, R. Evans, G. Egan, G. Chana, B. Nasr, and E. Skafidas, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 17521 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b02465>]
- [16] T.T.T. Can, Y. J. Kwack, and W. S. Choi, *Mater. Des.*, **199**, 109408 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109408>]
- [17] N. Farjam, T. H. Cho, N. P. Dasgupta, and K. Barton, *Appl. Phys. Lett.*, **117**, 133702 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0021038>]
- [18] Y. J. Jeong, H. Lee, B. S. Lee, S. Park, H. T. Yulistira, C. L. Choong, J. J. Park, C. E. Park, and D. Byun, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 10736 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1021/am502595a>]
- [19] F. Zheng, S. Zhang, J. Mo, H. Yi, S. Zhang, H. Yu, K. Lin, J. Sha, and Y. Chen, *Small*, **16**, 2000397 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.202000397>]
- [20] B. H. Kim, M. S. Onses, J. B. Lim, S. Nam, N. Oh, H. Kim, K. J. Yu, J. W. Lee, J. H. Kim, S. K. Kang, C. H. Lee, J. Lee, J. H. Shin, N. H. Kim, C. Leal, M. Shim, and J. A. Rogers, *Nano Lett.*, **15**, 969 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl503779e>]
- [21] H. J. Kwon, X. Li, J. Hong, C. E. Park, Y. J. Jeong, H. C. Moon, and S. H. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **515**, 145989 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145989>]
- [22] M. S. Onses, E. Sutanto, P. M. Ferreira, A. G. Alleyne, and J. A. Rogers, *Small*, **11**, 4237 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.201500593>]
- [23] Y. A. Huang, H. Wu, C. Zhu, W. Xiong, F. Chen, L. Xiao, J. Liu, K. Wang, H. Li, D. Ye, Y. Duan, J. Chen, H. Yang, W. Li, K. Bai, Z. Yin, and H. Ding, *Int. J. Extreme Manuf.*, **3**, 045101 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac115a>]
- [24] W. K. Bae, J. Kwak, J. W. Park, K. Char, C. Lee, and S. Lee, *Adv. Mater.*, **21**, 1690 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200801908>]
- [25] J. Lim, S. Jun, E. Jang, H. Baik, H. Kim, and J. Cho, *Adv. Mater.*, **19**, 1927 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200602642>]
- [26] S. Pekdemir, I. Torun, M. Sakir, M. Ruzi, J. A. Rogers, and M. S. Onses, *ACS Nano*, **14**, 8276 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01987>]
- [27] W. Zou, H. Yu, P. Zhou, Y. Zhong, Y. Wang, and L. Liu, *Appl. Surf. Sci.*, **543**, 148800 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148800>]
- [28] J. Kang, Y. Jang, Y. Kim, S. H. Cho, J. Suhr, B. H. Hong, J. B. Choi, and D. Byun, *Nanoscale*, **7**, 6567 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C4NR06984F>]
- [29] Q. Wang, G. Zhang, H. Zhang, Y. Duan, Z. Yin, and Y. A. Huang, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2100857 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202100857>]
- [30] S. Lee, S. W. Kim, M. Ghidelli, H. S. An, J. Jang, A. L. Bassi, S. Y. Lee, and J. U. Park, *Nano Lett.*, **20**, 4872 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c00869>]