

이젯 프린터를 사용한 고분자/퀀텀닷 마이크로 패터닝 공정

김시몬¹, 이수언², 김봉훈^{1,2} 

¹ 송실대학교 유기신소재파이버공학과

² 송실대학교 스마트웨어러블공학과

초록: 이젯 프린팅은 직접적인 비접촉 마이크로 펄스 기술의 하나로서 노즐과 기판 사이에 강한 전기장을 가함으로써 넓은 범위의 마이크로/나노패턴 어레이를 구현할 수 있는 다목적 펄스 공정이다. 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 패턴을 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

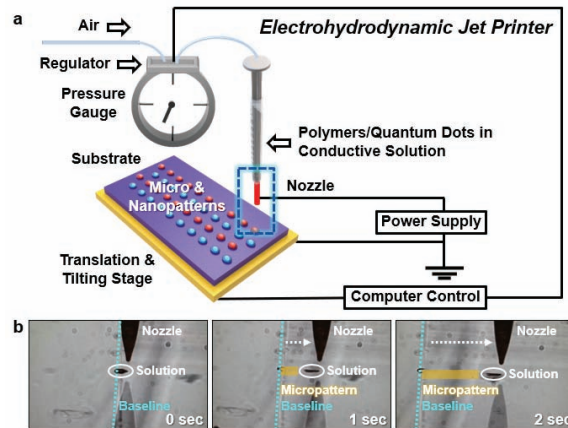


Fig. 1. (a) The schematic illustration of conventional e-jet printing setup including a nozzle, ink chamber, air supply, substrate, and automatic stage and (b) the images of a nozzle and printed micropattern on a silicon substrate during the e-jet printing process.

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 패턴을 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 패턴 width의 균일성/edge roughness 같은 패턴의 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 패터닝 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 패터닝

을 대면적에 제조할 수 있다 [20-23]. 본 연구에서는 각각 고분자 재료에 대해서 tip 안쪽 지름이 5 μm 와 1 μm 인 두 종류의 nozzle을 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 패터닝의 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 패터닝 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

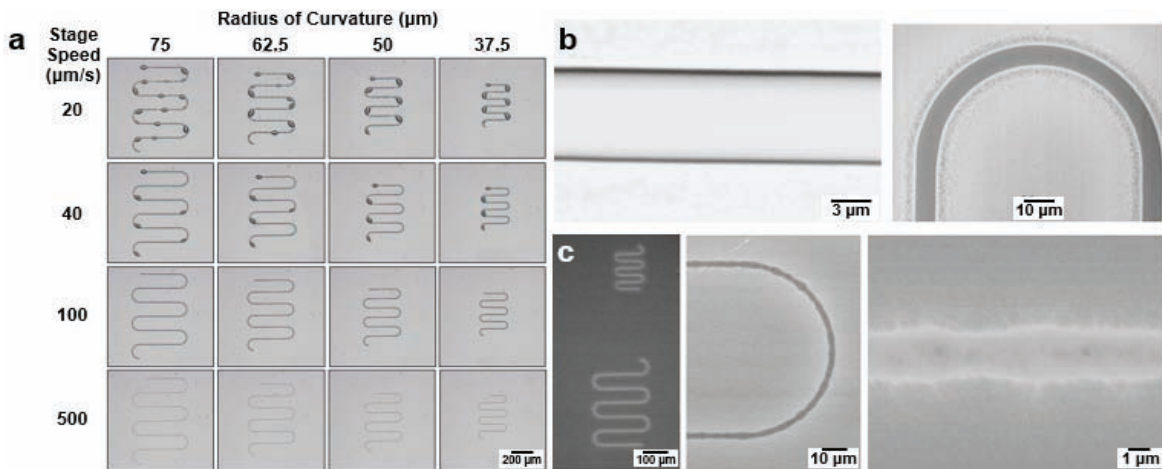


Fig. 2. The low and high magnification SEM images of e-jet printed micropatterns using UV curable polymer (NOA 74) and a metal-coated glass nozzle [(a), (b) 5 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

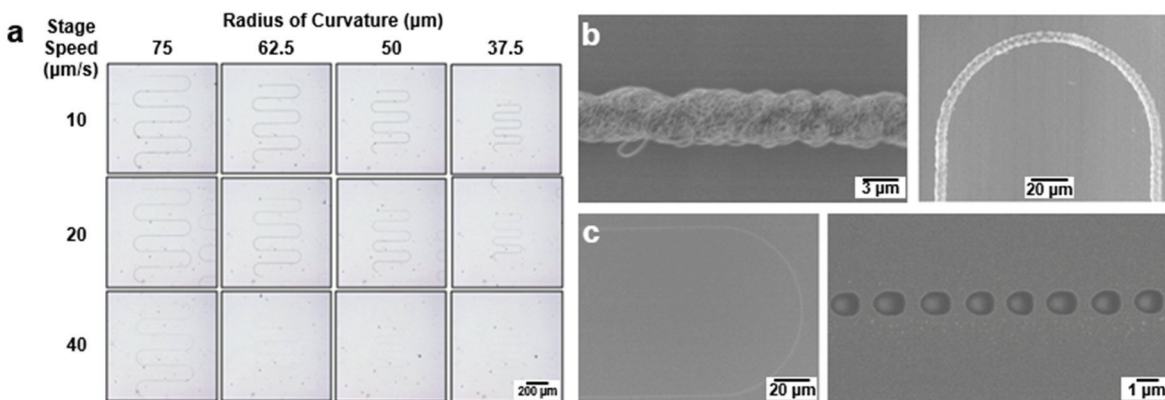


Fig. 3. The low and high magnification SEM images of e-jet printed micropatterns using polystyrene and a metal-coated glass nozzle [(a), (b) 5 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

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 polystyrene보다 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 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 프린팅된 세 번째 직선 패턴보다 더욱 균일하고 feature size가 작기 때문이다. 그

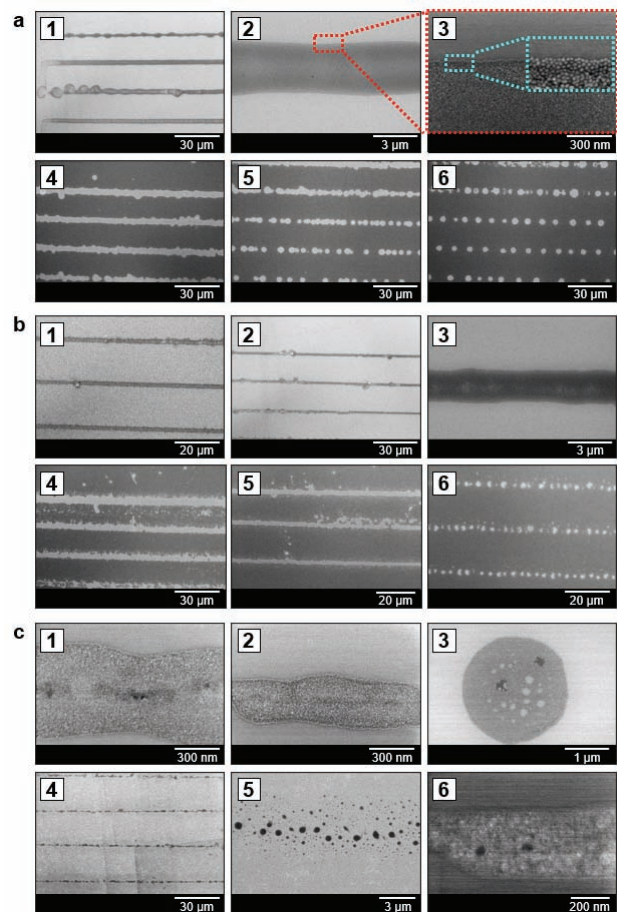


Fig. 4. The SEM images of e-jet printed micropatterns using green/red quantum dots (QDs) solution and a metal-coated glass nozzle [(a) 5 μm , (b) 2 μm , and (c) 1 μm internal diameter at the tip].

림 4(a)(2), (3)은 마이크로 패턴된 퀀텀닷의 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 퀀텀닷 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 퀀텀닷 용액 대신에 0.125 wt% 농도의 green 퀀텀닷 용액을 사용하여 e-jet 프린팅을 진행한 결과이며, 높은 농도의 퀀텀닷 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 퀀텀닷 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 퀀텀닷 용액을 사용할 경우 e-jet 프린팅 방법을 사용하여 수십~수백 나노미터 크기의 퀀텀닷 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 퀀텀닷 e-jet 프린팅 결과를 보여주고 있다. Low surface energy를 갖는 기판의 영향으로 부분적으로 de-wetting된 퀀텀닷 패턴이 제조되었으며, 이는 e-jet 프린팅 공정이 coffee-ring effect를 이용한 self-organized 패턴닝 공정과 결합되어 활용될 수 있음을 의미한다. 마지막으로 그림 5(a)와 그림 5(b), (c)는 각각 마이크로 스케일의 퀀텀닷 패턴을 이용한 장미꽃 그림과 동일한 기판 위에 순서대로 제조된 UV curable polymer (NOA 74)와 퀀텀닷 마이크로 패턴의 광학/형광 현미경 이미지를 보여주고 있다.

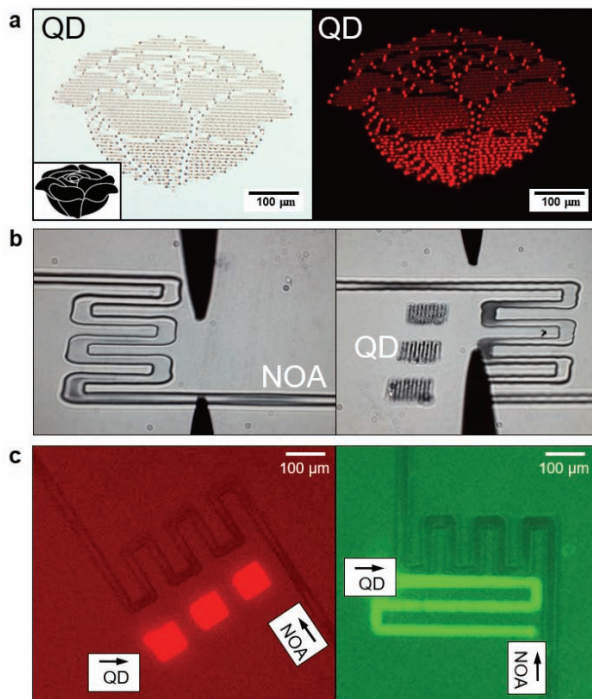


Fig. 5. (a) Optical, (b) SEM, and (c) fluorescence images of a pattern of QDs/NOA 74 e-jet printed in a raster scanning mode to obtain a uniform coverage.

3. 결론

■ 본 논문에서 다룬 e-jet 프린팅 공정의 경우 기존의 마이크로 팍공정과 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 퀀텀닷 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 한국 연구재단의 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. Kemppainen, 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/acsaelm.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/acs.nano.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>]