

유체 디스펜싱 시스템의 프린팅 프로세스 최적화를 위한 주요 파라미터 분석

강호승¹, 정해창², 홍순호², 윤남경³, 손선영^{2,4} 

¹ 상지대학교 신에너지자원공학과

² 상지대학교 반도체물리전자학과

³ (주)쓰리에이치코퍼레이션 기술지원팀

⁴ 상지대학교 전기전자공학과

초록: 유체 디스펜싱(fluid dispensing) 방식인 Microplotter 시스템은 압전 소자를 통한 초음파 펌핑(pumpin)을 기반으로 유체를 분사한다. 이 기법은 넓은 범위의 점도를 가진 다양한 물질들이 마이크로 사이즈로 프린팅 되는 것을 가능하게 한다. 본 논문에서는 디스펜서 프린팅 기술에 대해 소개하고 장비를 이용한 다양한 공정을 이해 및 응용에 목적을 두고 있다. 또한, 분사 강도, 분사 시 팁의 높이, 분사 속도와 같은 매개변수들을 조절하여 장비의 최적화 방법에 대해 설명하고자 한다. 금속 나노 입자, 탄소나노튜브, DNA, 단백질 등 광범위한 유체와 호환된다는 Microplotter의 장점을 이용함으로써 인쇄전자, 생명공학, 화학공학 등 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대된다.

키워드: 디스펜서 프린팅, 초음파, 프린팅 매개변수, 점도, 선평

Analysis of Key Parameters for the Printing Process Optimization of a Fluid Dispensing Systems

Hoseung Kang¹, Haechang Jeong², Soonho Hong², Nam Kyung Yoon³, and Sunyoung Sohn^{2,4}

¹ Department of New Energy and Mining Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

² Department of Semiconductor Physics and Electronic, Sangji University, Wonju 26339, Korea

³ Technical Support Department, 3H Corporation, Seongnam 13572, Korea

⁴ Department of Electrical and Electronic Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

(Received May 4, 2024; Revised May 27, 2024; Accepted May 29, 2024)

Abstract: The Microplotter system with a fluid dispensing method, sprays fluid based on ultrasonic pumping through piezoelectric devices. This technique can possible for various materials with a wide range of viscosities to be printed in microscale. In this paper, we introduces dispenser printing technology as well as aim to understand and apply various processes using the equipment. In addition, we will explain how to optimize the equipment by adjusting parameters such as spray intensity, tip height during printing, and patterning speed. By utilizing Microplotter's advantage of being compatible with a wide range of fluids, including metal nanoparticles, carbon nanotubes, DNA, and proteins, it is expected to be used in various fields such as printed electronics, biotechnology, and chemical engineering.

Keywords: Dispenser printing, Ultrasonic, Printing parameter, Viscosity, Linewidth

✉ Sunyoung Sohn; sysohn@sangji.ac.kr

Copyright ©2024 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

- 일반적으로 전자소자 제작에는 불순물 혼입을 방지하고 균일한 박막의 두께 조절이 용이한 진공 증착 공정이 주로 사용되고 있다 [1,2]. 그러나 진공 공정은 재료의 손실이 크며, 고가의 공정 장비가 필요할 뿐만 아니라 대면적화에도 큰 제약이 있다 [3,4]. 이에 대한 대안으로 인쇄전자(printed electronics) 공정 기술이 주목받고 있다. 프린팅 공정은 진공 증착 대비 설비 투자비용이 낮고, 재료 사용 효율성이 높아 소재 비용을 크게 절감할 수 있다 [5,6]. 또한, 대면적화가 가능하고, 인쇄에 유해한 포토리소그래피 공정이 필요 없으므로 공정 시간 및 비용을 줄일 수 있다 [7-9].
- 프린팅 공정은 인쇄 방법에 따라 크게 접촉식(contact) 방식과 비접촉식(non-contact) 방식으로 분류할 수 있다 [그림 1(a)] [10-13]. 접촉식 프린팅 방식에는 그라비어(gravure), 플렉소그래피(flexography), 스크린(screen), 오프셋(offset) 프린팅 방식 등이 있고, 비접촉식 프린팅 방식에는 디스펜서(dispenser), 잉크젯(inkjet), 전기수력학 젯(EHD jet) 프린팅 및 스프레이 코팅(spray-coating) 등이 있다. 비접촉식 프린팅 방식은 기판과의 접촉 없이 물질을 분사할 수 있어 접촉식 프린팅 방식에서 오는 여러 단점들을 극복할 수 있다 [10,14,15]. 가장 대표적인 비접촉 프린팅 기술인 잉크젯 프린팅 공정은 열 또는 압전 소자(piezoelectric material, PZT)에 인가된 전압에 의해 챔버내의 잉크를 팽창시켜 노즐을 통해 잉크 방울을 고속으로 분사하는 방법이다 [16-18].
- 본 논문에서 유체 디스펜싱(fluid dispensing) 방식인 Microplotter는 디스펜서에 압전소자가 부착되어 있다. 교류 전원이 압전기에 공급되면 압전소자가 진동하고, 특정 주파수(공진주파수)에서 진폭이 충분히 높으면 용액이 노즐 끝에서 분사된다 [19-21]. Microplotter는 잉크젯 프린팅 방식과 달리 연속선을 분사하는 기능을 가지고 있다. 이는 유체가 표면에 닿은 후에 디스펜서를 비활성화하지 않음으로써 가능하다. 디스펜서는 표면을 따라 이동하여 매끄러운 라인을 형성하고, 비활성화되어 표면에서 떨어진다. Microplotter는 진동으로 인해 필요한 만큼의 잉크가 분사되기 때문에 인쇄할 때 한 번에 한 방울씩 분사되는 잉크젯 프린팅보다 소량의 잉크가 사용되고, 위성 액적(satellite droplet)이 발생하지 않는다 [22]. 또한, 초음파 펌핑을 기반으로 하는 새로운 형태의 유체 분사 기법을 사용하여 넓은 범위의

점도를 가진 유체를 20 micron 이하의 폭으로 프린팅할 수 있다는 장점이 있다 [23,24].

- 본 논문에서는 SonoPlot[®] Microplotter[™] Pro [그림 1(b)]를 이용하여 디스펜서의 구동 방식에 대해 언급하고, 효율적인 인쇄를 위하여 최적화된 공정 조건을 찾는 데 중점을 둔다. Microplotter는 인쇄 헤드와 광학 시스템이 장착된 포지셔닝 시스템, 제어 전자 장치 및 기본 인터페이스가 설치된 컴퓨터로 구성되어 있고, 10 micron의 해상도로 31×31×7 cm의 부피 내에서 디스펜서를 이동시킬 수 있다. 또한, 분사 강도, 속도 등 여러 프린팅 매개 변수를 조정하여 디스펜서를 효율적으로 제어할 수 있다. 이 모든 움직임은 시스템의 기본 인터페이스인 SonoGuide 소프트웨어 패키지를 통해 제어 가능하다.

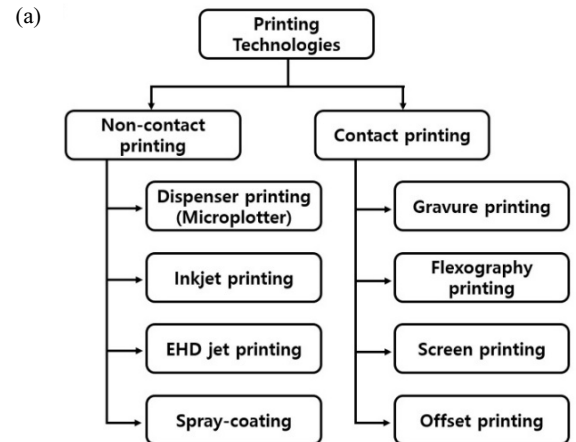


Fig. 1. (a) The classification of printing technologies and (b) photograph of Microplotter pro system.

2. 디스펜서 프린팅 구동 방식

2.1 프린팅 준비 과정(printing preparation)

- 디스펜서 보정(dispenser calibration): 디스펜서가 처음 시스템에 연결되면 SonoGuide의 메인 컨트롤 인터페이스에서 'calibrate dispenser'를 선택하여 소프트웨어가 그림 2(a)와 같이 디스펜서를 보정해야 한다. 디스펜서 보정 과정에서 공진 주파수가 측정되며, 급격한 하락과 그 이후에 스파이크가 나타나는데, 이는 디스펜서 내에서 발생하는 공진이다 [그림 2(b)]. 강도가 급격할수록 더 강하고, 임피던스가 최소인 dip의 바닥 근처의 주파수가 정확한 공진 주파수이다. 이 주파수는

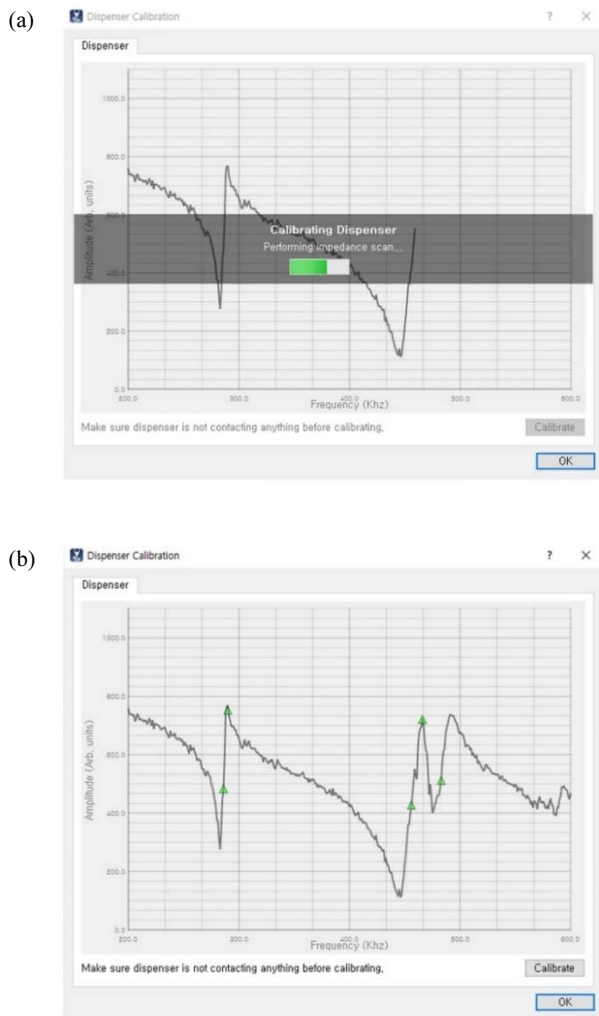


Fig. 2. (a) Detecting process and (b) monitoring during dispenser calibration.

pumping과 spraying이 가장 쉽게 발생하는 주파수로써 디스펜서의 dispense 및 spray 값에 자동으로 할당된다. 이때, piezoelectric 방식의 잉크젯 printing 기술에서 사용되는 주파수(1~20 KHz)와 달리 [25,26], Microplotter는 초음파 주파수(400~700 KHz)로 구동된다 [27-29].

- 카메라 설정(camera setting): 카메라가 디스펜서의 팁에 초점을 맞추기 위해 LED를 켜고, 카메라 마운트의 3개 나사를 조정한다 [그림 3(a)].
- 디스펜서 제어(dispenser control): SonoGuide 메인 인터페이스의 왼쪽 상단에 위치한 방향 버튼을 사용하여 robot positioning arm을 세 축(x, y, z)에 걸쳐 단계적으로 이동시킬 수 있다 [그림 3(b)]. 단일 화살표는 작은 폭으로 움직이는 반면, 화살표가 두 개인 버튼은 큰 폭으로 움직인다. 각각의 폭은 아래 small step, large step 입력란의 값을 변경하여 조절할 수 있다. 모든 값은 micrometer 단위이며, 축에 따라 값을 다르게 설정할 수 있다.
- 표면 보정(surface calibration): 프린팅을 진행하기 전 기판의 기울기를 측정함으로써 표면의 불균일성을 고려할 수 있다. 디스펜서를 프린팅 할 구간의 왼쪽 상단 모서리 위에 위치시키고 'find surface' 버튼을 클릭하면 디스펜서가 천천히 아래로 움직여 표면에 접촉한다. 표면에 있는 디스펜서를 500 micrometer 위로 이동시킨다. X, y 방향으로 각각 보정할 거리를 설정하고 'calibrate surface cant' 버튼을 클릭하면 표면 지형 측정을 시작한다 [그림 3(c)]. 디스펜서는 표면에 닿을 때까지 아래로 이동하여 높이를 측정한다 다음 새로운 위치로 이동하며 x 축과 y 축을 따라 일렬로 각각 5개 점을 측정한다. 프린팅 동작 시 측정된 x 및 y 방향의 기울기를 고려하여 마이크로 피펫의 높이를 조절할 수 있다.

2.2 프린팅 공정(printing process)

- 프린팅 용액 준비 과정(solution well location): 디스펜서를 처음 사용하거나 변경하면 solution plate 내의 well 위치를 새로 설정해야 한다. 디스펜서를 solution plate의 A1 well(plate의 우측 상단 모서리) 위치로 이동시키고 현재 좌표를 'set A1 well' 버튼을 클릭하여 A1 well의 위치로 설정하면 나머지 well의 위치도 일치하도록 자동으로 계산된다. 이후, well의 지정위치를 클릭하면 그 위치로 이동한다. 'solutions' 창에서는 왼쪽

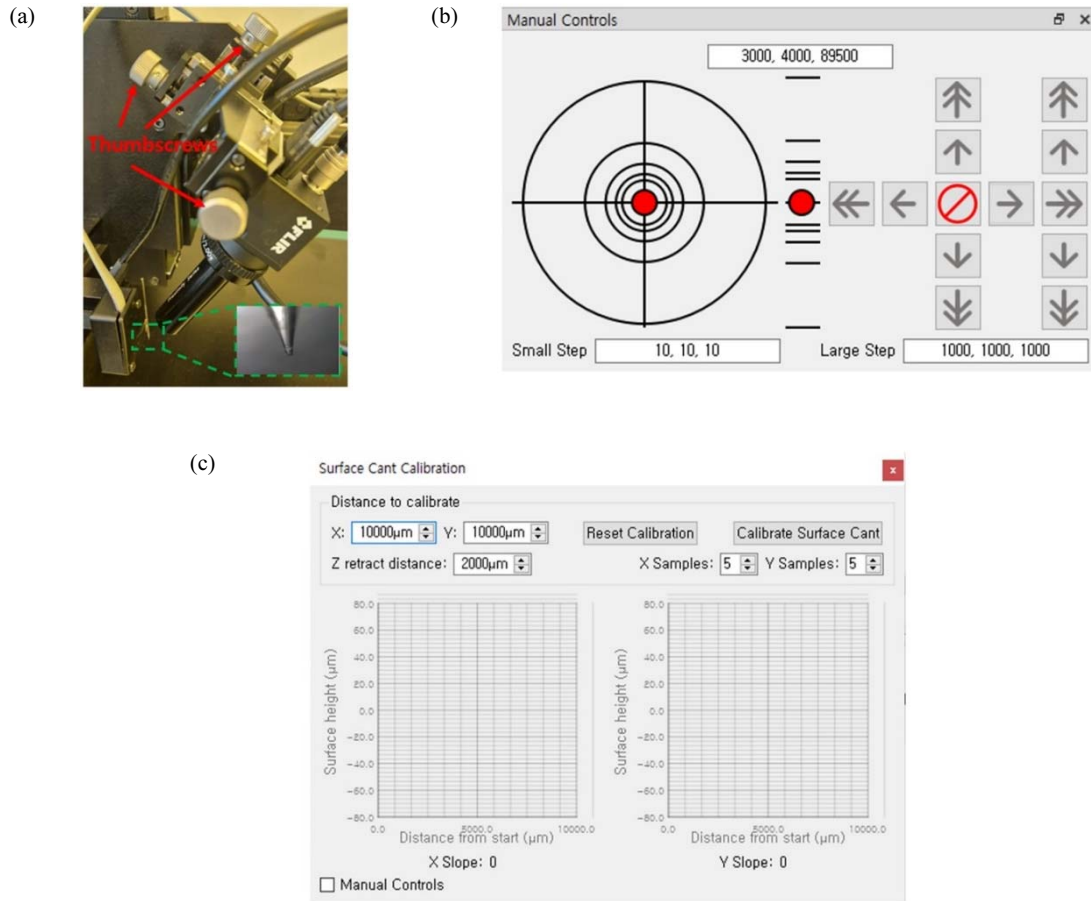


Fig. 3. (a) Photograph of thumbscrews on the camera mount that adjust the tip of the dispenser into focus, (b) manual controls, and (c) surface cant calibration windows.

아래에 + 버튼을 눌러 solution들을 추가하고 - 버튼을 눌러 제거할 수 있다 [그림 4(b)]. 'solution settings' 창에서는 용액 이름, plate 종류, well 위치를 설정한다 [그림 4(b)]. 용액에 따라 다른 매개변수(draw distance, reload time, empty time, rinse cycles)들을 설정할 수 있다. 이는 각각 용액을 디스펜서에 다시 load 하기 전에 프린팅 할 수 있는 거리, 디스펜서에 용액을 로딩하는 시간(초), 디스펜서에서 모든 용액을 분사하는 데 걸리는 시간(초), 디스펜서에서 용액을 완전히 제거하는 데 필요한 린스 사이클에 해당한다.

- 동작(operation): 디스펜서가 용액이 담겨 있는 위치로 이동하여 glass tip을 용액에 담그면 모세관 현상에 의해 해당 용액이 디스펜서 내부로 올라오기 시작한다 [그림 5(a)]. 만약 그렇지 않다면, glass tip이 작은 먼지 입

자들로 막혀 있을 수 있기 때문에, dispense 또는 spray 버튼을 클릭한다. 이로 인해 well 안의 solution에서 진동을 일으키고 디스펜서 내에 갇힌 물질을 제거한다. 용액이 흐르기 시작하면 초음파 동작을 멈춘다. 패턴 설계 및 프린팅(pattern drawing and printing): DXF 패턴은 Microplotter 시스템에 의해 표면에 그려질 유체의 점, 선 등의 형상(feature)을 표현한 것이다 [그림 5(b)]. DXF 패턴은 별도의 drawing 프로그램에서 생성하고 편집할 수 있다. 디스펜서를 패턴이 그려질 곳의 중앙으로 이동 후 retracting height를 설정하여 'print' 버튼을 클릭하면 인쇄를 시작한다. 패턴이 인쇄될 때 진행 상태가 표시되고, 현재 또는 다음 인쇄할 항목이 파란색으로 강조 표시된다 [그림 5(c)].

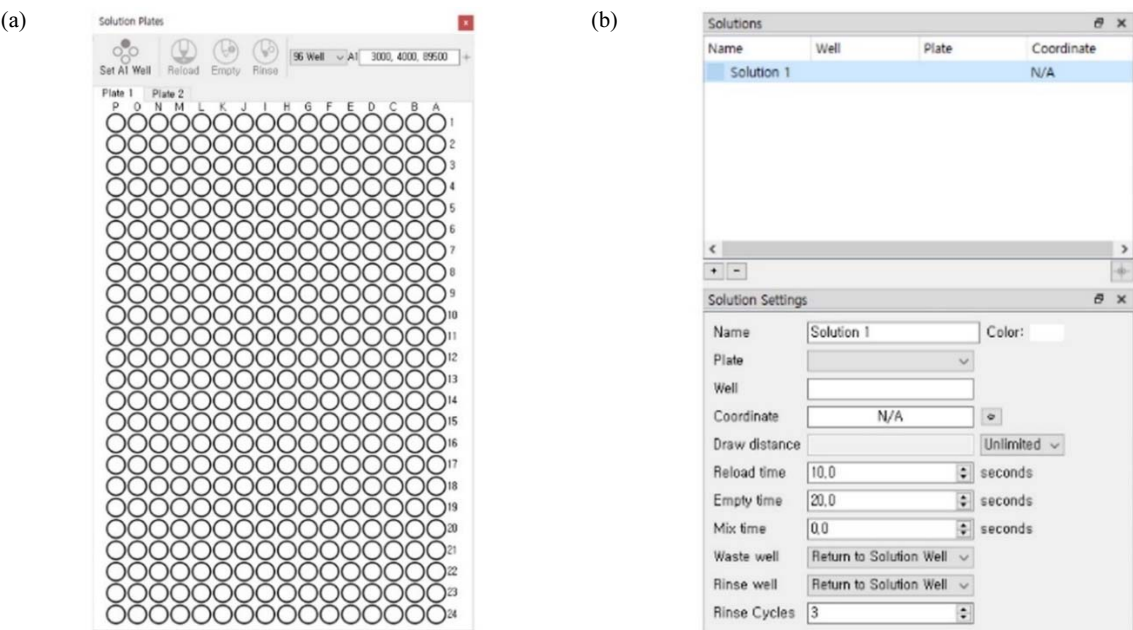


Fig. 4. (a) Solution plate and (b) list of solution and solution setting windows.

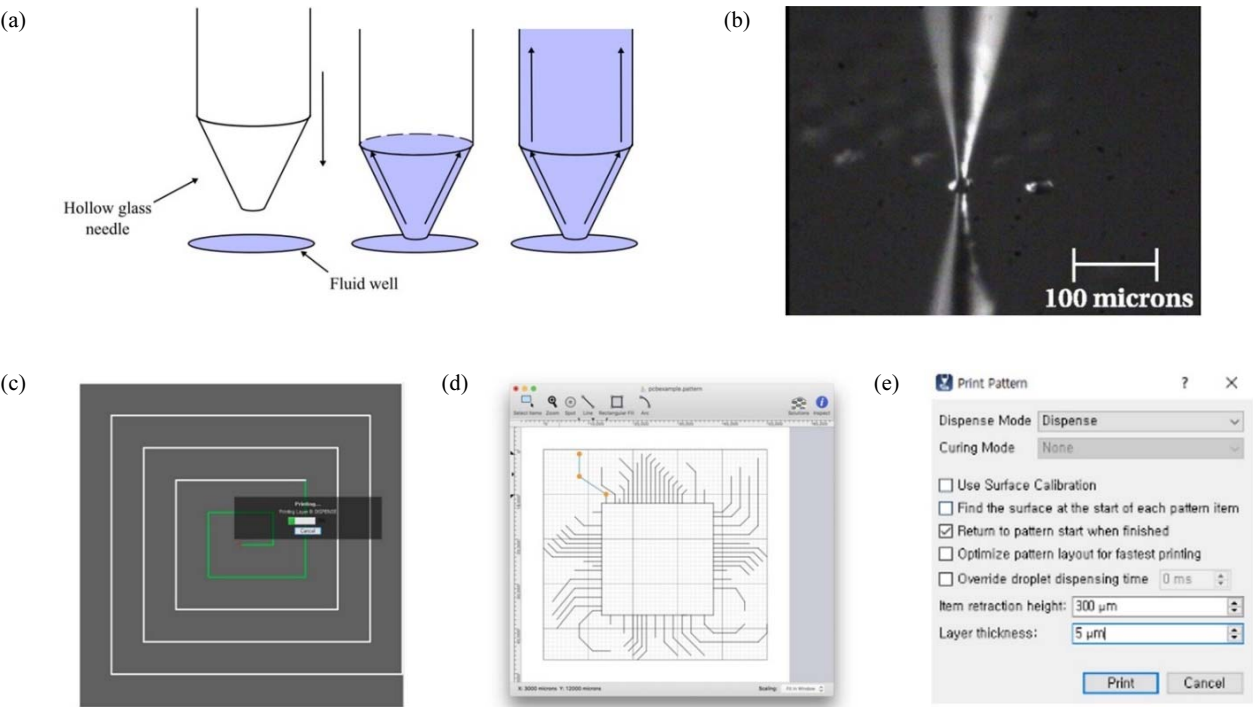


Fig. 5. (a) Schematic of capillary action. (b) Dot, (c) line, and (d) fine patterns, and (e) print pattern window.

3. 최적화(optimizing)

3.1 프린팅 매개변수(printing parameters)

- 프린팅에 있어서 여러 매개변수들 가운데 분사 강도, 높이, 속도가 가장 큰 영향을 미친다 [그림 6(a)]. 이때, 팁의 직경 크기에 따라 매개변수들의 최적화 수치들이 달라진다.
- 분사 강도 변화(variation in dispensing strength): 압전 소자에 가해지는 전압에 따라 잉크를 분출하는 팁에 적용되는 초음파의 강도가 달라진다. 디스펜서는 공진 주파수에서 pumping 동작이 수행되며, pumping 강도는 교류 전압이 증가함에 따라 증가한다. 디스펜서는 특정 임계 전압 이상에서 유체가 덜 제어되며

spraying을 시작한다 [30]. Spraying은 주로 디스펜서의 내용물을 비우거나 세척하는 데 사용된다. 전압은 0.1 V에서 20 V까지 조절할 수 있다 [그림 6(b)]. 일반적으로, 점성(viscosity)이 높을수록 더 높은 전압이 필요하다. 또한, 디스펜서의 tip 사이즈가 작을수록 초음파에 더 강하게 반응하므로 더 낮은 전압이 필요하다.

- 팁 높이 변화(variation in tip height): 팁이 샘플 표면에 붙어 있는 경우와 비교하면, 표면으로부터 상승된 팁은 상대적으로 낮은 구동 전압에서도 많은 양의 잉크가 토출되고, 구동 전압 증가에 따라 선평은 더 빠르게 증가한다. 이때, 팁의 직경이 작을수록 높이에 따른 선평이 일정하다.
- 프린팅 속도 변화(variation in patterning speed): Setting editor 창에서 프린팅 속도와 가속도를 조절할 수 있고, 단위는 각각 $\mu\text{m/s}$, $\mu\text{m/s}^2$ 이다. 프린팅 속도와 가속도는 팁에서 나오는 잉크의 양을 변화시킨다. 대체로 프린팅 속도가 빨라질수록 선평은 줄어들며, 매우 느린 속도는 과도한 잉크의 양으로 인해 퍼질 수 있고, 매우 빠른 속도는 선이 끊어지거나 팁이 부서질 수 있다 [30]. 팁의 직경이 작을수록 더 부서지기 쉽기 때문에 프린팅 속도를 낮춰야 한다.

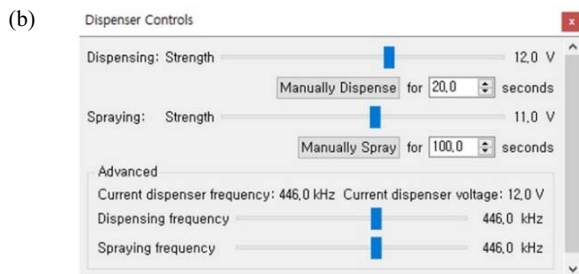
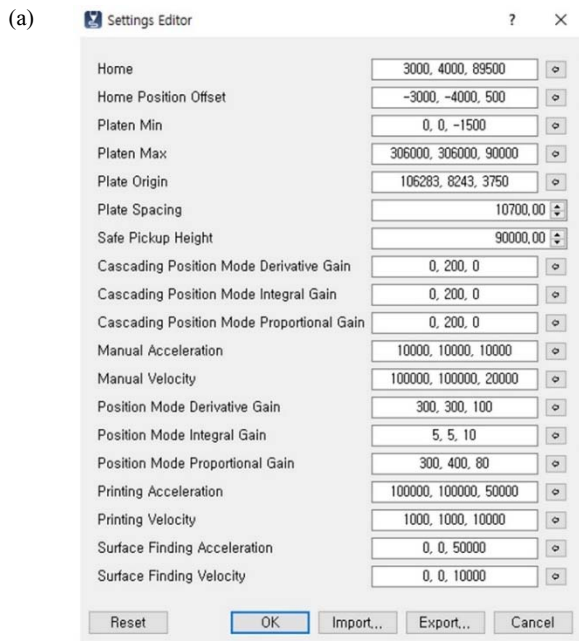


Fig. 6. (a) Setting editor and (b) dispenser controls windows.

3.2 프린팅 매개변수 최적화 연구 사례(optimization study case for printing parameter)

- 미국 Ohio University 연구팀은 전도성 잉크를 사용하여 Microplotter의 프린팅 매개변수 최적화 방법을 보고하였다 [20,22]. Microplotter의 최적화는 분사 강도, 팁 높이, 패턴링 속도를 변경하며 수행되었다. 모든 패턴은 Novacentrix silver nanoink JSB40G (점도=8 cp)와 10 μm 직경의 팁을 사용하여 진행되었다. 최적화 연구를 위해 0.1 V의 구동 전압, 3,000 $\mu\text{m/s}$ 의 패턴링 속도 및 1 μm 의 팁 높이를 표준 프린팅 조건으로 지정 후 각각의 매개변수를 변경했다.
- 분사 강도 변화: 0~0.6 V까지는 분사 강도에 따라 큰 차이가 없이 60 μm 의 선평을 유지했다. 그 후로는 분사 강도가 증가함에 따라 선평은 점차 증가했고, 1 V일 때 70 μm , 1.1 V일 때 75 μm , 1.2 V일 때 85 μm 로 나타났다. 1.3 V 이상의 전압이 인가되면 옆으로 퍼지기 시작하면서 더 이상 균일한 프린팅을 형성할 수 없다.
- 팁 높이 변화(tip height variation): 표면으로부터 팁의 높이가 7 μm 를 넘으면 팁과 표면 사이에 형성된 잉크의 메니스커스가 없기 때문에 실질적으로 프린팅이

공기 중에서 중단된다. 또한, 높이에 따른 구동 전압의 존성 테스트가 진행되었다. 그 결과, 낮은 전압에서는 높이와 상관없이 선폭이 비슷하게 나타났지만, 높이가 증가할수록 제어 가능한 전압 영역의 폭이 줄어든다.

- **프린팅 속도 변화(printing velocity change):** 공정 시 설정한 최저 속도는 $500 \mu\text{m/s}$ 로 잉크가 과도하게 분사되고, 진동으로 인해 잉크가 도포된다. 속도가 증가함에 따라 선폭이 줄어들고 잉크의 퍼짐 현상이 개선되어 균일하게 프린팅되었다. 프린팅 속도가 $3,000 \mu\text{m/s}$ 에서 균일한 선폭과 막 두께를 가져 가장 이상적인 프린팅이 이루어졌고, $7,000 \mu\text{m/s}$ 이상의 빠른 속도에서는 선폭이 불균일하게 나타났다.

3.3 프린팅 매개변수 최적화(optimization of printing parameter)

- 앞서 언급했던 Ohio University 연구팀의 방법을 기반으로 Microplotter의 프린팅 매개변수(분사 강도, 팁 높이, 패턴링 속도)에 따라 프린팅 공정 최적화를 위한 다양한 실험들을 수행하였다. 패턴은 DXF 파일 형식과 호환되는 2D 설계용 애플리케이션(Libercad)을 사용하여 설계했다. 모든 패턴은 유리기판 위에 Novacentrix silver nanoink JS-A211(점도=8~12 cp)와 $60 \mu\text{m}$ 직경의 팁을 사용하여 진행했다. 최적화 연구를 위해 18 V의 구동 전압, $1,000 \mu\text{m/s}$ 의 패턴링 속도 및 $10 \mu\text{m}$ 의 팁 높이를 표준 프린팅 조건으로 지정 후 각각의 매개변수를 변경했다. 인쇄된 패턴의 특성들은 도립 현미경(Olympus CK40)을 통해 관찰되었으며, 현미경에 부착된 카메라(ToupTek Photonics UCMOS series)를 사용하여 프린팅된 패턴을 분석하였다.
- **분사 강도 변화:** Dispenser control 창의 'dispensing strength'를 조절하여 프린팅 시에 가해지는 분사 강도를 제어했으며, 선폭 제어는 1~20 V 범위 내에서 구동 전압을 조절했다. 아래 표 1에서 인가된 전압이 1 V일 때 $60 \mu\text{m}$, 2 V일 때 $63 \mu\text{m}$ 로 나타났고, 3~12 V 범위 내에서는 $80 \mu\text{m}$, 13~15 V 범위 내에서는 $97 \mu\text{m}$ 의 선폭을 유지했다(표 1). 그 후로는 분사 강도가 증가함에 따라 선폭은 점차 증가했고, 특히, 인가된 전압이 19 V에서 20 V로 증가할 때 증가율이 약 100%로 크게 늘어났다. 그러나 구동 전압에 따라 인쇄된 패턴들은 모두 균일한 프린팅 라인을 형성했다 [그림 7(a)~(f)].
- **팁 높이 변화:** 기판의 높낮이 차이로 인한 팁과 기판과의 직접적인 접촉(contact) 문제를 방지하기 위해 프린

팅을 진행하기 전 'calibrate surface cant' 버튼을 클릭하여 기판의 기울기를 측정했다. 측정된 x 및 y 방향의 기울기를 고려하여 $5 \mu\text{m}$ 이상의 높이에서 프린팅을 진행했다. 기판으로부터 팁의 높이가 $10 \mu\text{m}$ 이하일 때 에러 범위 내 프린팅 패턴을 형성할 수 있었다 [그림 8(a)~(c)]. 반면, 팁의 높이가 $10 \mu\text{m}$ 을 넘으면 불균일한 프린팅 패턴이 형성되기 시작했고, $20 \mu\text{m}$ 을 넘으면 팁과 유리 기판 사이에 형성된 잉크의 매니스커스가 없어지기 때문에 프린팅이 중단되는 문제가 발생된다 [그림 8(d), (e)].

- **프린팅 속도 변화:** Setting editor 메뉴에서 'printing velocity'를 조절하여 프린팅을 진행할 때 x 및 y 축 모터의 동작 속도를 제어했다. 분석을 위해 프린팅 속도를 $100 \sim 4,000 \mu\text{m/s}$ 변화에 따른 프린팅 형상 및 선폭을 측정하였다(표 2). 공정 시 매우 느린 속도를 설정할 경우 과도한 양의 잉크가 분사되고 진동으로 인해 잉크가 퍼져서 불균일한 패턴을 형성했다 [그림 9(a)]. 이러한 문제점은 $200 \sim 3,900 \mu\text{m/s}$ 범위 내에서 프린팅 속도를 증가시킬수록 잉크의 퍼짐 현상이 개선되어 균일한 박막을 형성했고, 선폭이 감소했다 [그림 9(b), (e)]. 프린팅 속도가 $4,000 \mu\text{m/s}$ 일 경우에는 매우 빠른 속도로 인해 불균일한 박막을 형성했으며 패턴이 중간에 끊어지는 경우가 다수 발생했다 [그림 9(f)]. 결론적으로 다양한 프린팅 공정조건 변수 최적화에 따른 미세패턴 형성이 중요하다.

Table 1. Observations on dispensing strength change.

Driving voltage (V)	Linewidth (μm) (Average values)	Remarks
1	60	
2	63	
3~12	80	
13	97	• Fine patterns with uniform ink dispensing process • Linewidth increases with increasing dispensing strength
14	97	
15	97	
16	100	
17	103	
18	120	
19	150	
20	290	

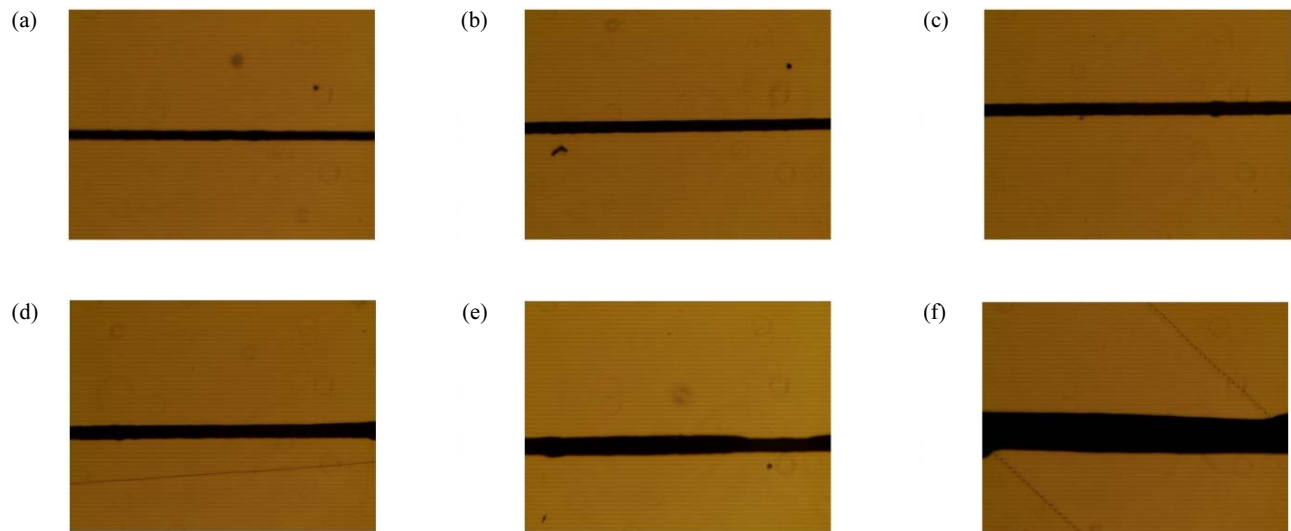


Fig. 7. Optical images of Microplotter-printed patterns with different dispensing strengths of (a) 1 V, (b) 3 V, (c) 13 V, (d) 17 V, (e) 19 V, and (f) 20 V.

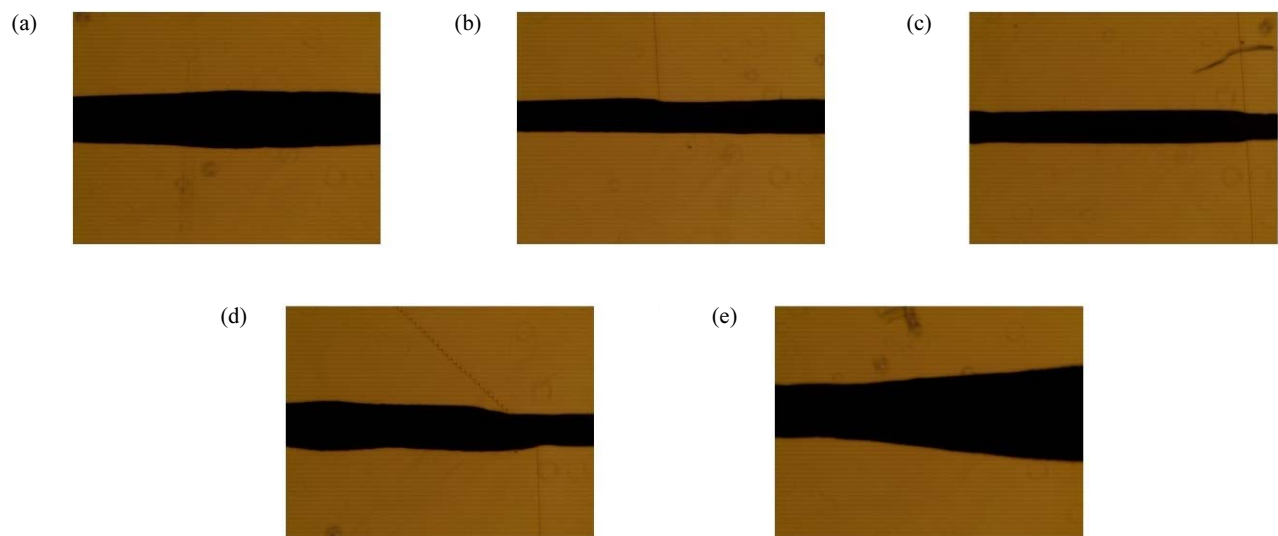


Fig. 8. Optical images of Microplotter-printed pattern printed with different tip heights of (a) 5 micron, (b) 7 micron, (c) 10 micron, (d) 11 micron, and (e) 20 micron.

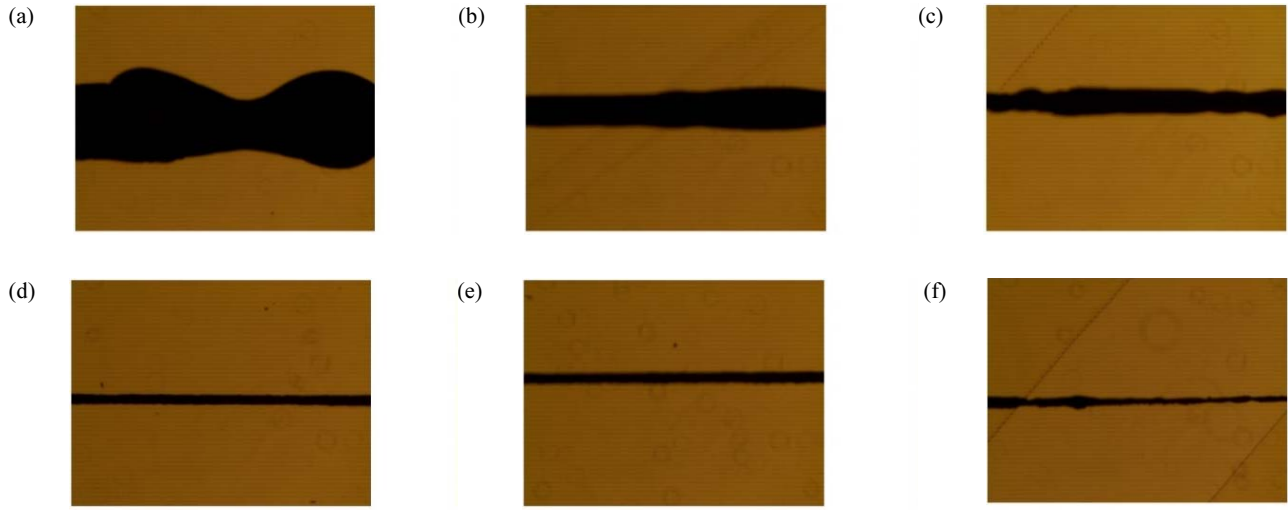


Fig. 9. Optical images of Microplotter-printed patterns as a function of the operating speeds with (a) 100 $\mu\text{m/s}$, (b) 200 $\mu\text{m/s}$, (c) 500 $\mu\text{m/s}$, (d) 3,800 $\mu\text{m/s}$, (e) 3,900 $\mu\text{m/s}$, and (f) 4,000 $\mu\text{m/s}$.

4. 응용 분야(applications)

4.1 나노바이오(nanobio)

Table 2. Observations on varying the printing speed.

Printing speed ($\mu\text{m/s}$)	Linewidth (μm) (Average values)	Remarks
100	N/A	• Ink bleeding occurs due to an excessive amount of ink jetting
200	270	• Convulsive printing (The printing becomes more uniform with the spreading of ink decreasing as the printing speed increases)
500	210	
1,000	120	
1,500	83	
2,000	83	• Form an ideal pattern with uniform ink dispensing (The linewidth of the pattern decreases as the printing speed increases)
3,000	83	
3,500	83	
3,700	77	
3,900	77	• Highly non-uniform patterns with a maximum linewidth of 77 μm and a minimum linewidth of 50 μm
4,000	77	

■ Microplotter 시스템은 재료 연구 개발(R&D) 라인의 다양한 프로세스에서 활용될 수 있다. 초음파 기술을 이용한 Microplotter 시스템은 광범위한 유체와 호환되기 때문에 금속 나노입자뿐만 아니라 다른 프린팅 시스템에서 어려움을 겪고 있는 탄소나노튜브나 그래핀과 같은 탄소 신소재들을 프린팅 할 수 있다. 또한, DNA 및 단백질과 같은 물질을 다양한 모양으로 마이크로 스케일 프린팅 할 수 있기 때문에 생명공학 및 화학공학 분야에서도 활용되고 있다.

■ 실험적으로 SonoPlot[®]에서 Microplotter를 이용해서 nanometallic silver ink를 프린팅 한 후 어닐링 하여 마이크로 스케일 전도성 trace를 형성 [그림 10(a)] [31] 및 화학적으로 처리된 유리 슬라이드에 ~35 micron 크기의 spot의 DNA 용액을 증착하여 단일 성분 마이크로 어레이를 제작했다 [그림 10(b)] [32]. 또한, Wisconsin 대학교의 연구팀은 뉴캐슬병 바이러스(newcastle disease virus, NDV)를 감지하기 위해 효소 결합 면역흡착 분석(enzyme-linked immunosorbent Assay, ELISA) 유형, 즉 샌드위치형 마이크로 어레이를 제작했다 [그림 10(c)] [33].

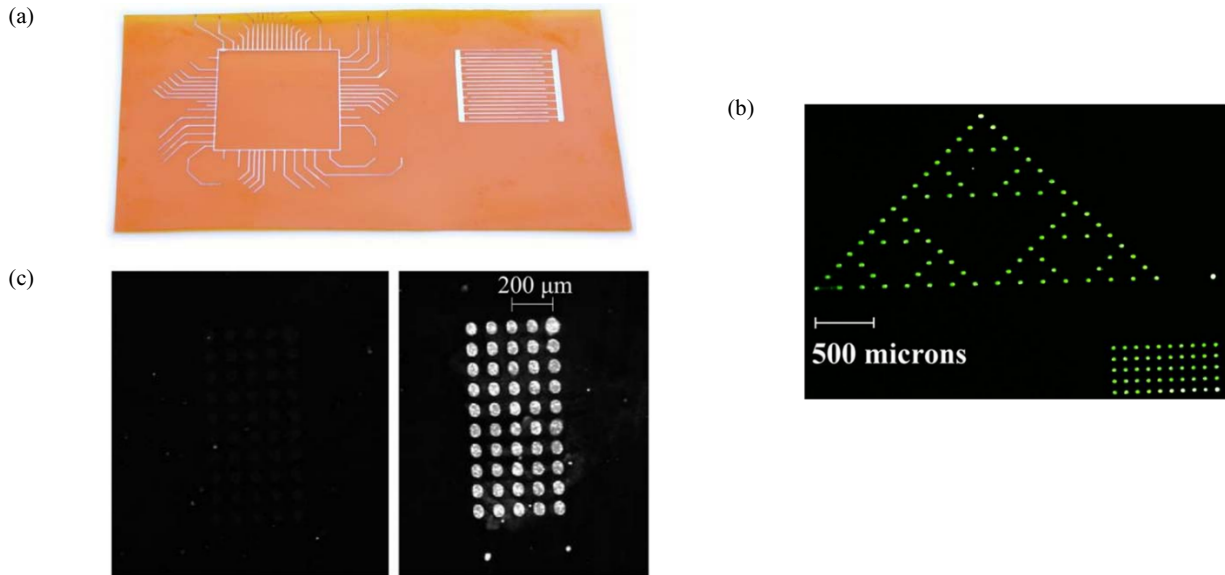


Fig. 10. (a) Printing lines of nanometallic ink for conductive electronic traces, (b) spotting DNA at a high resolution for microarray fabrication, and (c) spotting proteins for an ELISA-type microarray assay.

4.2 적층(stackings)

- Microplotter 시스템은 간단한 공정방법 및 빠른 프린팅 속도, 그리고 다양한 점도의 소재들을 이용해 두꺼운 두께 막 형성 및 여러 층을 적층(stackings) 할 수 있다는 장점을 갖는다. 하부층(under-layer)과 동일 위치에 상부층(upper-layer)을 덮어씌우는 오버프린팅을 통해 박막 적층을 형성할 수 있다. 이러한 오버프린팅을 활용한 연구는 압력 구동 방식의 디스펜서 시스템 [34,35]과 초음파 구동 방식의 Microplotter [30,36]에서 모두 활발히 진행되고 있다. Microplotter는 넓은 점도 범위의 유체 사용이 가능함으로써 기존 압력 구동 방식의 디스펜서 시스템 연구 분야 범위를 확장시킬 수 있는 장점이 있지만 프린팅 도중에 z 축의 높이를 조절할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 Microplotter 시스템으로 오버프린팅을 진행할 경우 아래층에서 가능한 평평한 표면을 만들어야 일정한 선폭을 얻을 수 있다 [30].
- 압력 구동 방식의 디스펜서 중 몇몇 장비들은 z 축의 높이를 정밀하게 조절하는 기능이 있어서 일반적인 적층 구조와 달리 아래층과 새로운 층이 교차하며 오버프린팅하거나 높이가 다른 표면에 계단형식으로 프린팅이 가능하다 [37]. Microplotter 또한 제한적인 조건하에서 교차하는 구조의 오버프린팅이 가능하며, 이때 수 마이크로 이내의 평탄도 공차가 요구된다 [30].

5. 결론

- 인쇄전자기술은 기능성 전자 잉크를 인쇄하듯이 찍어내는 방식으로 기존의 반도체 및 디스플레이 제조 공정에서 사용되는 진공 증착 공정과 비교하여 저비용, 친환경, 유연성, 고속 대량생산 및 대면적화가 가능하다는 장점이 있다. 인쇄 방법에 따라 다양한 프린팅 공정이 존재하는데, 잉크젯 프린팅이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이 논문에서는 유체 디스펜싱 방식인 Microplotter를 특성화하고, 장비의 동작 원리, 장비 사용 시 최적화 방법에 대해 소개하였다. Microplotter는 기존 잉크젯 기술과 비교하여 10 μm의 낮은 해상도로 연속적인 패턴을 프린팅 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 광범위한 유체와 호환되기 때문에 다양한 분야에서 활용될 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 이 장비의 동작은 크게 디스펜서와 샘플 표면의 보정, 마이크로 피펫에 잉크를 로딩, 표면에 잉크를 프린팅 하는 세 단계로 이루어진다. 용액 분사 시에는 교류 전원에 의한 초음파 주파수(400~700 KHz)가 이용된다는 특징이 있다. 분사 강도, 분사 시 팁의 높이, 분사 속도와 같은 매개변수들을 조절하면 프린팅을 최적화할 수 있다. 대체로 분사 강도가 증가할수록, 분사 속도가 느릴수록 선폭이 늘어나고, 분사 시 마이크로 피펫의 높이가 높을수록 구동 전압 증가에 따라 선폭이 빠르게 증가하는 경향이 있다. 매개변수들의 최적화된 수치들은 팁의 직경에 따라

다르게 형성할 수 있다. 본 논문을 통해 Microplotter 시스템을 이용한 유체 디스펜싱 방식의 프린터가 다양한 분야에서 활발히 활용될 수 있기를 기대한다.

ORCID

Sunyoung Sohn

<https://orcid.org/0000-0002-5543-627X>

감사의 글

본 논문은 강원특별자치도(교육장비지원사업), 한국연구재단(NRF-2022R1F1A1074752) 및 상지대학교 대학원 지원에 의하여 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

- [1] A. Baptista, F.J.G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, and L. Fernandes, *Proc. Manuf.*, **17**, 746 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.125>
- [2] S. Shahidi, B. Moazzenchi, and M. Ghoranneviss, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, **71**, 31302 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2015140439>
- [3] W. J. Lee, W. T. Park, S. Park, S. Sung, Y. Y. Noh, and M. H. Yoon, *Adv. Mater.*, **27**, 34 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201502239>
- [4] G. R. Bhimanapati, D. Kozuch, and J. A. Robinson, *Nanoscale*, **6**, 11671 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/c4nr01816h>
- [5] Z. W. Zhong, *Mater. Manuf. Processes*, **36**, 987 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1885709>
- [6] M. A. Shah, D. G. Lee, B. Y. Lee, and S. Hur, *IEEE Access*, **9**, 140079 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219>
- [7] R. Parashkov, E. Becker, T. Riedl, H. H. Johannes, and W. Kowalsky, *Proc. IEEE*, **93**, 1321 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.850304>
- [8] B. Bao, J. Sun, M. Gao, X. Zhang, L. Jiang, and Y. Song, *Nanoscale*, **8**, 9556 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/C5NR09239F>
- [9] P. F. Moonen, I. Yakimets, and J. Huskens, *Adv. Mater.*, **24**, 5526 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201202949>
- [10] H. Zhang, S. K. Moon, and T. H. Ngo, *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.*, **7**, 511 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00139-9>
- [11] A. Nathan, A. Ahnood, M. T. Cole, S. Lee, Y. Suzuki, P. Hiralal, F. Bonaccorso, T. Hasan, L. Garcia-Gancedo, A. Dyadyusha, S. Haque, P. Andrew, S. Hofmann, J. Moultrie, D. Chu, A. J. Flewitt, A. C. Ferrari, M. J. Kelly, J. Robertson, G.A.J. Amaratunga, and W. I. Milne, *Proc. IEEE*, **100**, 1486 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2190168>
- [12] R. F. Pease and S. Y. Chou, *Proc. IEEE*, **96**, 248 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.911853>
- [13] R. R. Søndergaard, M. Hösel, and F. C. Krebs, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **51**, 16 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1002/polb.23192>
- [14] S. Khan, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, *IEEE Sens. J.*, **15**, 3164 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2375203>
- [15] K.K.B. Hon, L. Li, and I. M. Hutchings, *CIRP Ann.*, **57**, 601 (2008).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.006>
- [16] B. Derby, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **40**, 395 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104502>
- [17] X. Du, S. P. Wankhede, S. Prasad, A. Shehri, J. Morse, and N. Lakal, *J. Mater. Chem. C*, **10**, 14091 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1039/D2TC02511F>
- [18] P. Calvert, *Chem. Mater.*, **13**, 3299 (2001).
doi: <https://doi.org/10.1021/cm0101632>
- [19] B. Panreck and M. Hild, *Int. Scholarly Sci. Res. Innovation*, **12**, 678 (2018).
doi: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53647136>
- [20] T. Holeman, *Master's Thesis, The Systematic Approach to Microplotter Printing of Perovskite Precursors*, p. 1-96, Ohio University, Athens (2018).
- [21] M. Ferrari, S. Dalola, V. Ferrari, G. Cordaro, C. Cristiani, and G. Dotelli, *Procedia Eng.*, **168**, 1196 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.409>
- [22] A. Rohit, *Master's thesis, Optimization and Characterization of a Capillary Contact Micro-Plotter for Printed Electronic Devices*, p. 1-105, Ohio University, Athens (2017).
- [23] Y. Fang, H. Zou, S. Peng, G. Dong, and M. M. Tentzeris, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **5**, 4157 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.3c00428>
- [24] D. Chester, P. Theetharappan, T. Ngobil, M. Daniele, and A. C. Brown, *ACS Appl. Mater. Interface*, **12**, 47309 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c15056>
- [25] Y. Kim, W. Sim, C. Park, Y. Yoo, J. Joung, and Y. Oh, *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (IEEE, Zhuhai, China, 2006) p. 826-831.
doi: <https://doi.org/10.1109/NEMS.2006.334905>
- [26] B. H. Kim, T. G. Kim, T. K. Lee, S. Kim, S. J. Shin, S. J. Kim, and S. J. Lee, *Sens. Actuators, A*, **154**, 132 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.05.021>
- [27] A. C. Taylor, *Ph.D. Thesis, Diamond for Stem Cell Biotechnology*, p. 1-200, University College London, London (2016).

- [28] B. J. Larson, S. D. Gillmor, and M. G. Lagally, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 832 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1688436>
- [29] N. P. Simonenko, N. A. Fisenko, F. S. Fedorov, T. L. Simonenko, A. S. Mokrushin, E. P. Simonenko, G. Korotcenkov, V. V. Sysoev, V. G. Sevastyanov, and N. T. Kuznetsov, *Sensors*, **22**, 3473 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/s22093473>
- [30] Y. Ge, *Ph.D. Thesis, Printed Charge Storage Capacitor*, p. 1-120, Technische Universität, Dresden (2017).
- [31] Sonoplot®, *Printing Lines of Nanometallic Ink for Conductive Electronic Traces* (2016).
<https://www.sonoplot.com/nanometallic-ink>
- [32] Sonoplot®, *Spotting DNA at a High Resolution for Microarray Fabrication* (2016).
<https://www.sonoplot.com/spotting-dna-at-a-high-resolution-for-microarray-fabrication>
- [33] Sonoplot®, *Spotting Proteins for an ELISA-Type Microarray Assay* (2016).
<https://www.sonoplot.com/spotting-proteins-for-an-elisatype-microarray-assay>
- [34] M. Wajahat, S. Lee, J. H. Kim, J. Ahn, H. H. Sim, J. H. Kim, J. Bae, S. H. Kim, J. Pyo, and S. K. Seol, *Addit. Manuf.*, **60**, 103249 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103249>
- [35] J. Balaban and T. Blecha, *2022 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* (IEEE, Vienna, Austria, 2022) p. 1-5.
doi: <https://doi.org/10.1109/ISSE54558.2022.9812794>
- [36] A. Molazemhosseini, L. Magagnin, P. Vena, and C. C. Liu, *J. Electroanal. Chem.*, **789**, 50 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.01.041>
- [37] Ł. Witczak, M. Chrzanowski, P. Sitarek, M. Łysień, and A. Podhorodecki, *ACS Omega*, **8**, 39217 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04601>