

고정밀 노즐 프린팅 공정의 최적화 및 공정 변수 분석

정찬영¹, 권정교², 손선영^{1,2,3} 

¹ 상지대학교 반도체공학과

² 상지대학교 반도체에너지공학과

³ 상지대학교 전기전자공학과

초록: 공압(air pulsation)을 이용한 토출 원리를 갖는 노즐 프린팅 방식의 디스펜서(dispenser)는 공기의 압력을 액체에 전달하여 일정한 양의 액체를 밀어내는 방식으로 작동한다. 노즐 프린터는 점도(viscosity), 표면 장력(surface tension) 등 액체의 특성에 따라 에너지를 정밀하게 제어하여 정확한 도포 위치와 정량의 액체를 정밀하게 도포할 수 있다는 장점을 갖는다. 본 연구는 고해상도 비전 정렬(alignment) 시스템을 갖춘 노즐프린터를 이용한 인쇄 공정 순서를 소개하고 도포 품질에 영향을 미치는 핵심 공정 변수(분사 압력, 팁 높이, 이동 속도)에 따른 프린팅 패턴들을 비교하였다. 실험 결과, 20 mm/s의 이동 속도와 0.2 mm의 노즐 높이 조건에서 2.14 μm 의 도포 표준편차를 도출해 가장 안정적이고 균일한 도포 품질을 얻을 수 있었다. 이러한 실험을 통해 도포 폭, 균일성, 단절 여부 등을 기준으로 최적화 조건을 도출하였으며, 이러한 조건이 정밀 제조 공정에 미치는 효과를 논의하고자 한다.

키워드: 노즐 프린팅, 공압, 미세 패턴, 공정 변수, 선평

Optimization of High-Precision Nozzle-Printing Processes and Process Parameters Analysis

Chanyeong Jung¹, Jeonggyo Kwon², and Sunyoung Sohn^{1,2,3}

¹ Department of Semiconductor Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

² Department of Semiconductor and Energy Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

³ Department of Electrical and Electronic Engineering, Sangji University, Wonju 26339, Korea

(Received September 1, 2025; Revised September 28, 2025; Accepted October 10, 2025)

Abstract: Nozzle-printing dispensers, which utilize air pulsation as a dispensing principle, operate by transmitting air pressure to the liquid to push a constant amount of liquid. Nozzle printers have the advantage of precisely controlling energy based on liquid properties, such as viscosity and surface tension, enabling the precise application of liquid at specific locations and quantities. This study introduces a printing process sequence using a nozzle printer equipped with a high-resolution vision alignment system. It compares printing patterns according to key process variables (jet pressure, tip height, and travel speed) that affect coating quality. Experimental results showed that a coating standard deviation of 2.14 μm was achieved at a moving speed of 20 mm/s and a nozzle height of 0.2 mm, resulting in the most stable and uniform coating quality. Through these experiments, optimal conditions were identified based on factors such as coating width, uniformity, and presence of discontinuity, and the effects of these conditions on the precision manufacturing process are discussed.

Keywords: Nozzle-printing, Air-pressure, Fine-pattern, Process parameter, Line width

✉ Sunyoung Sohn; sysohn@sangji.ac.kr

Copyright ©2025 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

- 전자소자 및 바이오센서 고 기능성 집적회로 등의 정밀 제조 공정에서 다양한 물질을 마이크로 혹은 나노 수준으로 정밀하게 도포하는 기술은 점차 중요한 공정 요소로 부각되고 있다. 용액 기반의 전자소자 제작시 잉크젯 프린팅(inkjet printing), 스프레이 코팅(spray coating), 스핀코팅(spin coating) 등의 공정들이 일반적으로 사용된다. 최근 금속 나노입자 대신 유기금속화합물 잉크를 이용한 인쇄 전극의 성능을 향상시킨 연구 및 유체 디스펜싱(fluid dispensing) 시스템의 공정 시 분사 강도, 팁 높이, 분사 속도 등과 같은 매개변수에 따른 미세패턴에 대한 연구 결과가 보고되고 있다. 잉크젯 프린팅은 비접촉(non-contact) 공정, 다양한 기판 활용성, 빠른 생산 및 다양한 패턴 형성이 가능해 정밀한 패턴의 전자소자 제작에 가장 적합하고 원하는 위치에 정교하게 잉크를 분사 가능하다는 장점으로 인쇄전자 공정에서 사용되나 프린팅 공정시 노즐 막힘, 잉크의 점도 및 잉크 조성의 제약과 높은 초기 설비 비용 등의 단점을 가지므로 다양한 프린팅 시스템의 장점을 모은 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다 [1,2].
- 최근 공압 디스펜싱(air-pressure dispensing) 기반의 노즐 프린팅(nozzle-printing) 공정은 정밀한 위치 제어와 안정적인 토출량 및 다양한 점도의 재료를 균일하게 도포할 수 있다는 장점들로 주목받고 있다. 이는 다양한 인쇄 전자 응용에서 요구되는 미세 패턴 형성과 다양한 금속 및 고분자 잉크의 적용 측면에서도 그 중요성이 강조되고 있다 [3-5].
- 산업용에서 미세 패턴을 형성하기 위한 기존의 증착 기반 공정은 고진공 환경과 고가 장비를 필요로 하며, 공정 중 발생하는 재료 손실과 복잡한 금속 마스크 제작 및 정렬(align) 과정 등으로 인해 비효율적이다 [5]. 반면, 노즐 프린팅 공정은 인쇄 도면에 따라 소량의 물질을 원하는 위치에 직접적으로 도포하는 방식으로 다양한 재료를 선택적으로 사용할 수 있고, 재료 낭비가 적으며, 기판 크기 및 종류의 선택성이 다양하다는 장점을 가진다 [5,6]. 특히 최근 개발된 이미지 인식 기반 자동 노즐 프린팅 공정시스템은 고해상도 비전 시스템과 정밀 제어 소프트웨어를 탑재하여, 작업자의 개입 없이 자동으로 기준점을 인식하고 도포위치 및 높이를 정밀하게 보정할 수 있다 [7-9].
- 본 논문에서는 SynchroSpeed 기술이 탑재된 이미지 인식 기반 노즐 프린팅 공정을 활용하여, 공정 변수(분사 압력, 팁 높이, 이동 속도)가 도포 품질에 미치는 영

향을 체계적으로 분석하였다. 이는 노즐 프린팅 공정의 이동 속도와 분사량을 실시간으로 동기화하여 일정한 도포 폭을 유지하게 해주는 기술로, 빠른 속도 변화 상황에서도 도포 품질을 균일하게 유지할 수 있도록 한다 [10,11]. 또한, 실제 산업적 공정 조건에 근접한 실험 환경을 설정하여, 실질적인 적용 가능성을 평가하였다 [12,13]. 시료로는 실리콘 기판 위에 불소계 고분자 PTFE를 FC-40용매에 1 wt.% 비율로 혼합된 용액을 사용하였으며, 공정 반복성과 도포 균일성, 단절 현상 등의 주요 품질 지표를 통해 분석을 진행하였다. 결과적으로 각 공정 변수들의 최적 값을 도출하고, 이를 통해 노즐 프린팅 공정 기반 도포 공정의 품질 향상 및 자동화 적용 가능성에 대해 고찰하였다. 본 논문은 향후 반도체 패키징, 디스플레이 접착, 유기 전자 소자 및 바이오센서와 같은 고 정밀 공정이 요구되는 다양한 분야에서 노즐 프린팅 공정기반 공정 확산에 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다 [14,15].

2. 본론

2.1 장비 개요

- 본 연구에 사용된 노즐 프린팅 시스템은 그림 1의 사진과 같이 Musashi Engineering사의 350PC Smart 모델로 정밀한 마이크로 디스펜싱을 구현하기 위한 고성능 자동 도포 시스템이다. 이 시스템은 고 정밀 XYZ직교형 로봇인 SHOTMASTER ΩX, Windows 기반의 BOX PC와 터치패널 모니터, 센서와 LED 조명을 포함한 통합 제어 박스, 고해상도 카메라 모듈, 점도 안정화를 위한 온도 제어 스테이지, 그리고 작업자의 안전을 위한 시그널 타워와 안전 커버로 구성된다.
- 본 장비는 표 1의 상세사양에서 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이하의 정밀도를 제공하며, 다양한 크기의 시린지를 장착할 수 있고, 고점도 재료까지도 안정적으로 도포 가능하다. 또한 SynchroSpeed™ 기능, 고해상도 카메라를 통한 alignment, 높이 센싱 기능 등이 통합되어 있어 정밀 공정이 가능하다 [16,17]. 또한 MuCAD 기반 도포 경로 설계는 direct-written field-effect transistor와 같은 고주파 응용이나 센서 소자 제작에도 적용 가능성이 있으며, 기존 잉크젯 및 디지털 프린팅 공정과 차별화된 정밀도를 갖는다 [18,19].

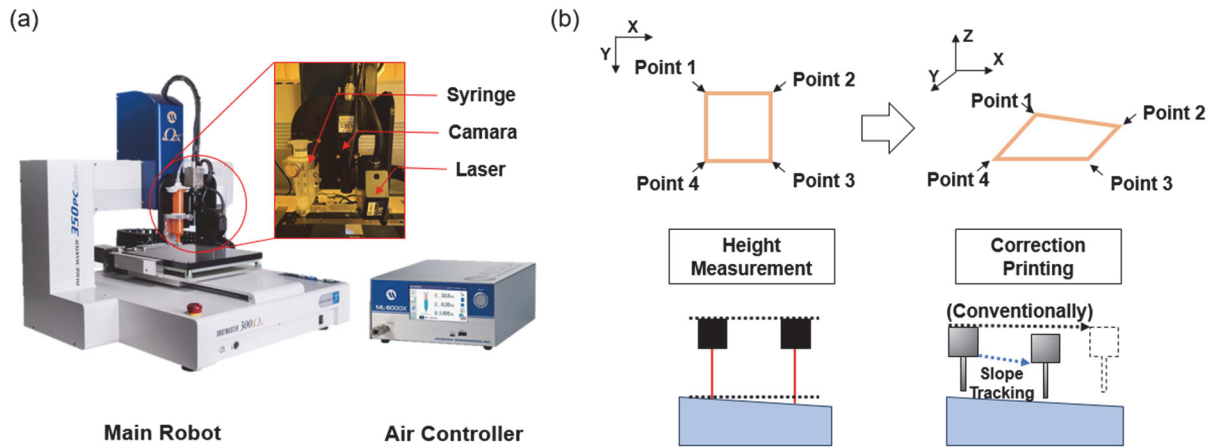


Fig. 1. Photography of (a) 350PC configuration with main robot and air controller and (b) theory of height alignment by slope tracking.

Table 1. System specification.

Features	Specifications
XY Movement Accuracy	$\pm 2 \mu\text{m}$ or less
Stage Repeatability	$\pm 1.0 \mu\text{m}$
Repeat Positioning Accuracy	$5 \mu\text{m}$
Recipe Storage Capacity	Max. 1,000 units
Syringe Specifications	3-30 cc, Barrel Type Supported
Material Viscosity Range	50-100,000 cps

2.2 조작 개요

- Musashi Engineering 350PC Smart 노즐 프린팅 공정 시스템은 반도체, 디스플레이, 전자부품 제조와 같은 고정밀 생산 공정을 위해 설계된 자동화 장비로 사용자의 권한 수준에 따라 오퍼레이션 모드와 엔지니어 모드로 구분하여 운용된다. 시스템 가동을 시작하기 위해서는 먼저 로봇 본체의 전원 스위치를 켜고, 이어서 BOX PC의 전원을 인가한다. BOX PC는 장비 제어 및 이미지 인식 기능을 담당하는 핵심 제어부로 부팅이 완료 및 프로그램 기동 후 나타나는 로그인 창에서는 사용자의 권한에 맞추어 모드를 선택해야 한다. 오퍼레이션 모드에서는 기본적인 생산 실행, 기판 로딩 및 언로딩, 카메라 모니터링 등의 작업만 가능하며, 엔지니어 모드에서는 레시피 생성 및 편집, 각종 파라미터 변경, 장비 보정, 고급 설정 등 시스템 전반에 걸친 기능에 접근할 수 있다.
- 350PC Smart의 UI는 그림 2에서 보듯이 베이스 바, 화면 타이틀, JOG bar, 작업 화면으로 구성된다. 베이스 바에는 현재 선택된 모드, 연결 상태, 작업 상태 등의 주요

정보가 표시되며, 화면 타이틀은 활성화된 기능이나 화면의 이름을 보여준다. JOG 바는 그림 3에서 상세하게 보여주듯이 X, Y, Z축 이동을 위한 핵심 조작부로 연속 모드에서는 버튼을 누르고 있는 동안 축이 지속적으로 이동하고, 스텝 모드에서는 클릭할 때마다 사전에 설정한 거리(0.01~10 mm 범위)만큼 이동된다. 이러한 제어 방식은 팁 높이와 위치를 미세하게 조정해야 하는 고정밀 작업에서 특히 유용하며, 사용자는 초기 세팅 시 선호하는 이동 단위를 지정해 반복 작업의 효율을 높일 수 있다.

- 또한 LED 조명은 최대 256단계로 조절 가능하여 다양한 재질과 색상의 기판에서도 최적의 시야를 확보할 수 있다. 오토 포커스 기능은 표면의 높이 변화에 따라 카메라 초점을 자동으로 조정하며, 레이저 센서를 이용한 높이 측정 기능과 결합하면 비 평면 기판에서도 안정적인 이미지 확보가 가능하다. 작업자는 레시피, 오퍼레이션, 구성, 메인 모니터, MuCAD 등 다섯 가지 주요 메뉴를 통해 패턴설계에서 조건 설정, 도포 실행, 결과 검증까지 순차적으로 작업을 수행할 수 있다.

2.3 카메라 모니터링

- 카메라 모니터링 기능은 기판의 기준점 인식, 패턴 정렬, 품질 검사, 도포 상태 확인 등 작업 전반에 걸쳐 필수적으로 사용된다. JOG 모드에서는 버튼을 누르는 동안 X, Y, Z축이 연속적으로 이동하며, STEP 모드에서는 설정된 거리만큼만 단위 이동이 이루어진다. 특히 STEP 모드는 기준점이나 패턴의 세부 위치를 정밀하게 조정할 때 유리하다.

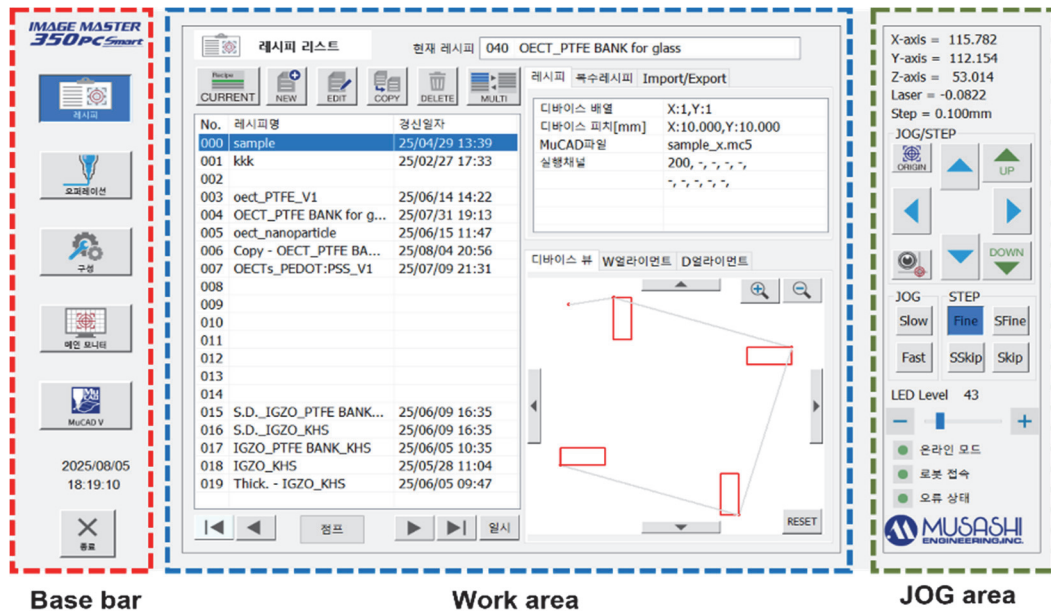


Fig. 2. 350PC program screen configuration.

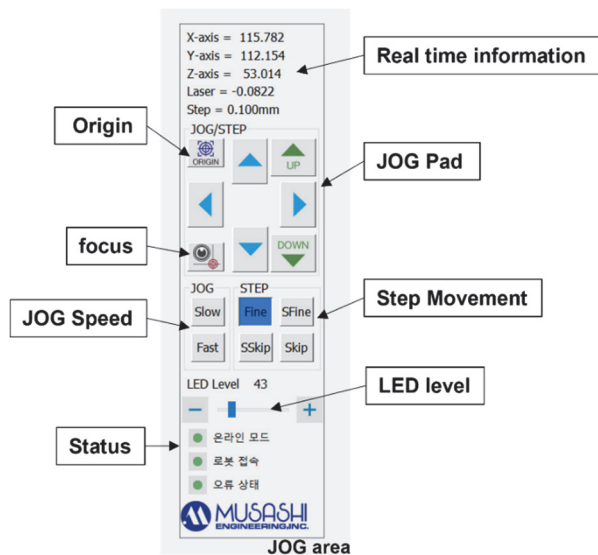


Fig. 3. Camera jog description.

- LED 조명 세팅은 도포 패턴의 가시성을 크게 좌우한다. 광량이 너무 높으면 표면 반사가 심해지고, 너무 낮으면 패턴의 윤곽이 흐려질 수 있으므로, 표면 재질과 색상에 맞춰 광량을 조정하는 것이 중요하다. 오토 포커스 기능은 세 가지 모드(단일 지점, 영역 평균, 패턴 중심 기준)로 동작하며, 특히 영역 평균 모드는 기판 표면의 높이 변화가 심한 경우에도 안정적인 초점을 유지할 수 있다.

- 메인 모니터는 노즐 프린팅 공정장비 운용에서 핵심적인 역할을 수행하는 인터페이스로, 카메라 영상을 실시간으로 대화면에 표시하며 공정 상태를 직관적으로 확인할 수 있도록 한다. 이를 통해 사용자는 도포 품질, 얼라인먼트 상태, 레시피 진행 여부를 즉각적으로 파악할 수 있다. 메인 모니터에는 다양한 기능 버튼이 제공된다. 우선 화상 선택 기능을 통해 카메라 영상과 맵 영상을 전환할 수 있으며, 맵 화면에서는 공작물 전체의 이미지를 표시하거나 클리어 버튼을 통해 기존 이미지를 초기화할 수 있다. 또한, 맵 생성/클리어 기능은 공작물 전체를 좌표 기준으로 등록하거나 해제할 수 있게 하여, 도포 결과 확인에 활용된다. X축과 Y축 방향에는 각각의 스케일이 표시되어 평행선 간의 치수 변화를 직관적으로 확인할 수 있으며, 드래그를 통해 스케일 위치를 이동할 수도 있다. 선분 스케일 기능은 특정 지점을 지정해 선분 양단의 치수를 표시하며, 실제 카메라 분해능으로부터 산출된 수치를 제공한다. 이와 함께, 화상 저장 기능은 현재 화면을 512×480 픽셀 비트맵 파일로 저장할 수 있으며, 공정 구조 확대 사진이나 도포 결과 기록을 남기는 데 사용된다.
- 메인 모니터 화면의 기능을 설명하기 위해 그림 4(a)에서 패턴 범위 표시 및 저장 기능은 화면 내 특정 영역을 빨간 점선으로 지정하여 패턴 이름과 함께 저장할 수 있다. 이를 통해 alignment mark나 NG 영역을 쉽게 등록할 수 있다. 절대 좌표 이동 기능은 로봇의 좌표계를

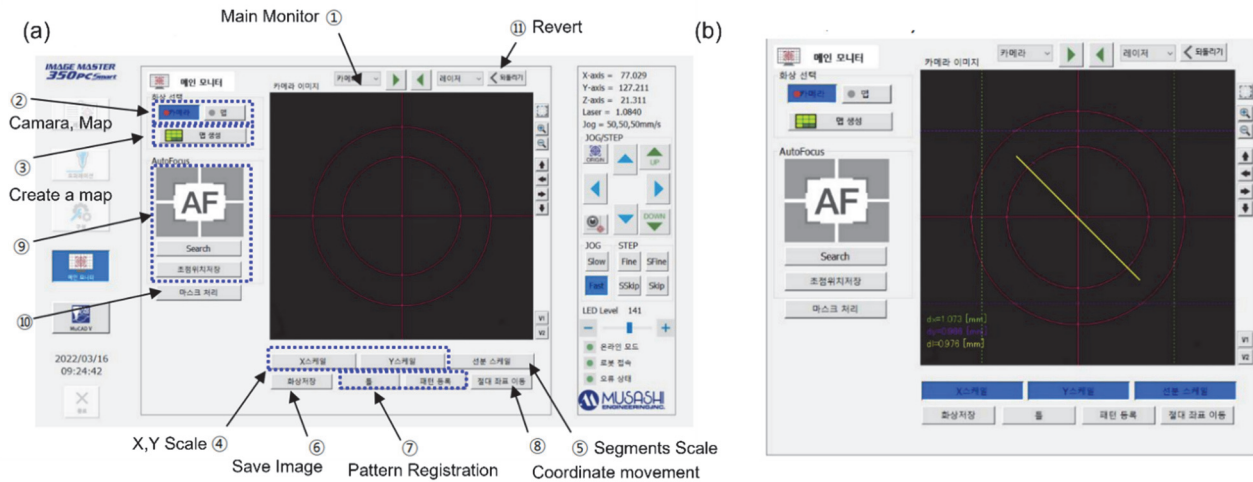


Fig. 4. Description of (a) special functions on the main monitor screen and (b) dimensional measurement images.

지정하여 정확한 위치로 이동시키며, 오토포커스 기능은 현재 카메라의 Z축을 자동으로 움직여 초점을 맞춘다. 또한, 서치 기능은 지정된 좌표로 화면을 이동시키고, 줌/축척 유지 기능은 초점 위치를 보정하거나 확대된 화면에서 특정 영역을 확인할 수 있도록 한다. 마지막으로, 마스크 처리 기능은 화면에 불필요한 영역을 가리거나 특정 부위를 강조하는 데 활용되며, 되돌리기 버튼을 통해 이전 화면으로 손쉽게 복귀할 수 있다. 또한, 메인 모니터를 통한 맵 생성 기능은 공작물을 연속 촬영 후 하나의 전체 이미지로 합성하는 기능이다. 이 기능을 통해 작업자는 개별 촬영 이미지가 아닌, 전체 도포 영역을 확인할 수 있으며, 도포 궤적이나 형상을 직관적으로 파악할 수 있다.

- 이미지 저장 및 패턴 저장 기능은 도포 결과와 품질 관리에 유용하다. 그림 4(b)에서 사용자는 얼라인먼트 마크나 불량 사례를 기록해 데이터베이스화할 수 있으며, 저장된 이미지들은 후속 분석 및 레시피 최적화 과정에 활용된다. 저장 과정에서는 비트맵 형식으로 이름을 부여해 관리하며, 화면 좌측 하단에는 저장된 이미지의 실제 픽셀 수와 대응하는 실제 치수 값이 표시된다. 이 기능을 통해 사용자는 공정 단위와 실제 작업 치수를 동시에 확인할 수 있다.
- 맵 생성 기능은 그림 5에서 도식화했듯이 공작물을 연속적으로 촬영한 후, 각 이미지를 순차적으로 이어 붙여 전체 이미지를 합성하는 방식이다. 이를 통해 작업자는 개별 촬영 이미지를 일일이 확인하지 않고도 공정 전체를 하나의 맵으로 시각화할 수 있다. 맵 생성 시에는 공작물의 시작점과 종료점을 지정하고, 촬영 간격을

설정하여 최적의 해상도와 효율성을 확보한다. 생성된 맵은 도포 궤적이나 형상 확인뿐 아니라 결과 기록 및 불량 분석에도 활용된다.

- 오토포커스 기능은 그림 6에서 카메라 초점을 자동으로 맞추는 기능으로, 버튼을 누르면 카메라의 Z축이 상하로 이동하며 초점이 맞는 위치에서 정지한다. 이때 화면은 4분할되어 초점을 확인하며, 특정 영역을 마스킹해 원하는 대상물만 초점을 맞추도록 할 수도 있다. 또한, 서치 버튼을 이용하면 선택한 포커스 화면으로 이동하며, 초점 위치 지정 버튼은 현재 위치를 포커스 기준으로 보정한다.
- 선택 포커스 화면에서는 지정한 위치에 따른 Z좌표를 확인할 수 있으며, 초점 결과는 화면에 배열 형태로 표시된다. 결과 창에서는 FOCUS 모드(선명도 기준 정렬)와 HEIGHT 모드(높이 순 정렬)로 데이터를 확인할 수 있고, 필요 시 포커스 결과를 삭제하거나 다시 실행할 수도 있다. 이러한 자동 포커스 과정은 조명의 강도나 반사 조건에 따라 달라질 수 있으므로, 광량이 적절하지 않을 경우 재조정 후 반복 수행이 필요하다.

2.4 레시피 편집

- 레시피 편집 단계에서는 패턴 궤적, 도포 조건, 분사 압력, 팁 높이, 이송 속도 등 핵심 파라미터를 설정한다. MuCAD 프로그램을 사용하면 CAD 기반 전극 패턴 또는 회로 데이터를 불러와 장비 좌표계에 맞춰 정렬할 수 있다. 궤적 티칭 기능은 작업자가 실제 이동 경로를 지정하여 기판의 기준점과 맞출 수 있게 한다. 모서리 검

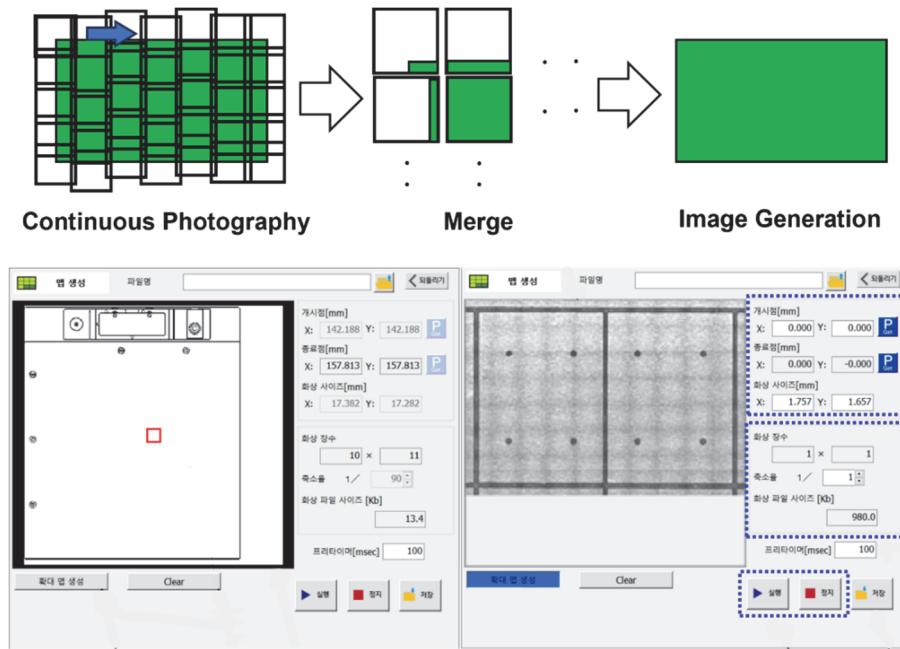


Fig. 5. Map creation process.

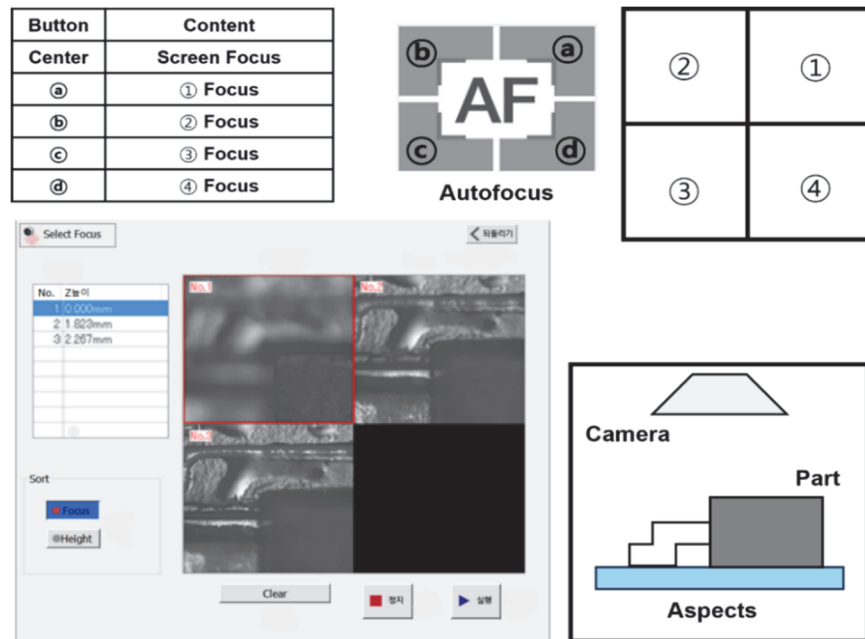


Fig. 6. Autofocus definition.

출 기능은 기판의 기준 마크나 경계를 카메라로 인식하여 패턴 위치를 자동 보정하며, 오차 범위는 $\pm 5 \mu\text{m}$ 수준이다. 이는 대면적 기판이나 반복 생산에서 위치 편차를 최소화하는 데 중요한 역할을 한다. 패턴 수정 시

에는 궤적 변경 후 반드시 시뮬레이션 모드에서 동작을 검증해야 한다. 시뮬레이션 모드는 분사를 하지 않고 이동 궤적만 재현하므로, 장비나 기판의 충돌 위험 없이 경로를 점검할 수 있다.

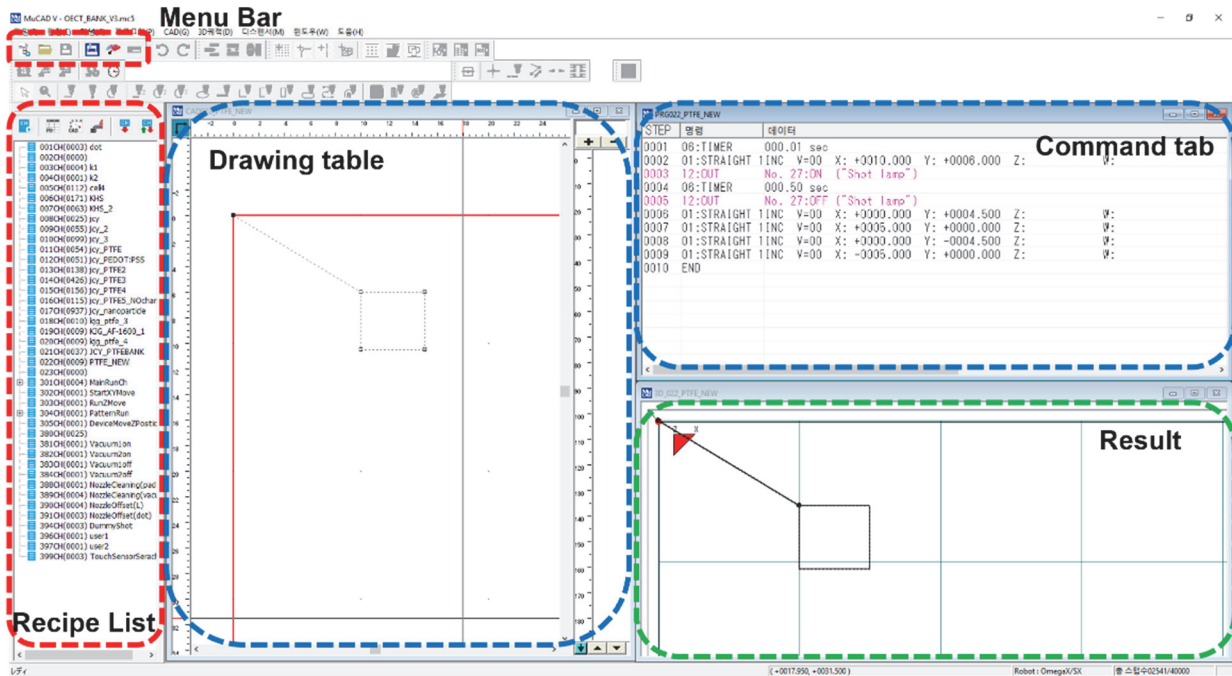


Fig. 7. Main window of MUCAD programs.

2.4.1 MuCAD 기반 도포경로 설계

- MuCAD는 사용자가 원하는 전극 패턴이나 회로 경로를 직관적으로 설계할 수 있는 전용 소프트웨어이다. Musashi 350 어플리케이션 내에서 프로그램을 실행 가능하다. 좌측 하단 MuCAD를 실행하면 상단 툴바에는 직선, 곡선, 도형 등을 배치할 수 있는 드로잉 툴이 제공되며, 추가 창을 통해 패널에서 설계한 패턴의 크기와 위치를 실시간으로 조정할 수 있다.
- MUCAD를 실행하게 되면 그림 7과 같이 5개의 섹션으로 나타난다. Menu bar에서는 생성한 레시피를 저장, 불러오기, 로봇 속도를 조절하는 구역이다. 로봇 속도의 경우 350PC 내부 구성 탭에서 변경할 수 있지만 레시피를 구성하는 과정에서도 변경할 수 있다. Recipe list tab은 생성한 레시피를 저장하는 탭으로, 최대 999개의 레시피를 생성이 가능하다. 다음 drawing table에는 점, 선, 원, 네모 등과 같은 다양한 형태의 패턴을 그릴 수 있다. Command tab은 각 X, Y, Z를 좌표 값을 입력하여 원하는 패턴을 그릴 수 있으며, 타점(shoot), 사각(straight)과 같은 데이터를 입력하는 섹션이다. 마지막으로 result tab은 작성한 레시피의 최종적인 결과를 보여주는 화면으로 top view, 3D view를 선택적으로 출력할 수 있으며, shoot이 적용되는 지점은 검정색으로 표기되어 보여진다. 본 예시는 단순한

패턴이지만 복잡한 센서 어레이나 다축 회로도 동일한 방식으로 쉽고 직관적으로 설계할 수 있으며, 생성된 패턴은 노즐 프린팅 공정 장비로 전송 후 자동으로 도포할 수 있다.

2.5 레시피 선택

- 본 장비는 레시피 기반 자동화 도포 방식을 사용하여 동일 조건에서 높은 재현성과 생산성을 확보한다. 사용자는 레시피 선택 전 반드시 기판이 흡착 상태인지, 시린지가 올바르게 장착되었는지, 높이 센서가 초기화되었는지 확인해야 한다. 레시피 파일은 장비 전용 포맷(.rcp)으로 저장되며, 저장 경로와 파일명 규칙을 준수해야 한다. 레시피가 설정되면 시스템은 해당 조건에 따라 패턴 데이터를 호출하고 SynchroSpeed™ 기술을 적용하여 분사량과 이송 속도를 동기화한다.
- 이 기능은 패턴의 직선, 곡선, 그리고 코너 구간 등 이동 속도가 달라지는 지점에서도 일정한 도포량을 유지하게 해준다. 복수 레시피 연속 실행 기능은 서로 다른 패턴과 조건을 순차적으로 적용할 수 있게 하며, 생산시 다양한 제품을 한 번의 세팅으로 처리할 수 있다. 실행 순서는 레시피 관리 화면에서 드래그 앤 드롭 방식으로 손쉽게 변경 가능하다.

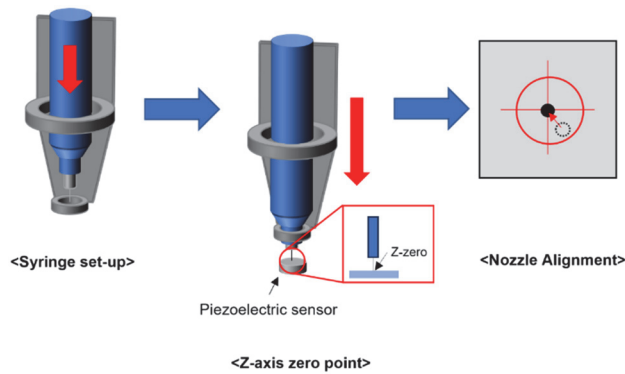


Fig. 8. Dispensing preparation (syringe setup, Z-axis zeroing, and nozzle alignment).

2.6 노즐 프린팅 준비 및 조정

- 도포 전 준비 단계는 작업 품질에 직접적인 영향을 미친다. 먼저 재료가 충전된 시린지를 장착하고 시린지 셋업창을 통해 Z영점, 오프셋 과정을 필수적으로 거쳐야 한다. 그림 8과 같이 Z영점의 경우 시린지를 탈착 및 재장착하면서 발생하는 Z축의 오차를 수정하기 위한 과정으로 워크에 부착된 센서를 통해 높이 기준값을 취득할 수 있다. 오프셋 기능은 시린지 교체 시 발생하는 도포위치 변화를 보정하기 위한 설정으로 실제 도포 위치와 카메라가 보는 도포 위치를 보정하는 역할을 한다. 이러한 과정은 추가적 설정을 통한 자동 오퍼레이션이 가능하며 히트 및 LED의 레벨을 조절하여 시린지 교체 시 자동으로 프로세싱 할 수 있다.
- 추가적인 공정으로는 준비된 노즐 내부의 기포를 제거해야 한다. 만약 기포가 남아 있으면 분사량이 불규칙해져 패턴 단절이나 번짐이 발생할 수 있기 때문이다. 점도가 높은 재료의 경우, 시린지 장착 후 1~2분간 대기하여 내부 압력이 안정된 상태에서 도포를 시작하는 것이 좋다. 또한 유틸리티 기능을 통해 진공 흡착, Z축 센서, LED 조명, 레이저 높이 측정 등의 주변 장치가 정상 동작하는지 확인해야 한다. 트레이스 기능을 활성화하면 설정된 패턴 궤적을 비분사 상태로 이동하며 확인할 수 있어, 실제 도포 전에 이동 정확도를 검증할 수 있다.

2.7 프린팅 공정

- 오퍼레이팅 단계는 그림 9와 같이 레시피 구성을 통한 “생산 사이클 트리” 순서로 자동 진행된다. 사이클 트리는 각종 프로세스로 구성되어 있어, 위 프로세스로부터

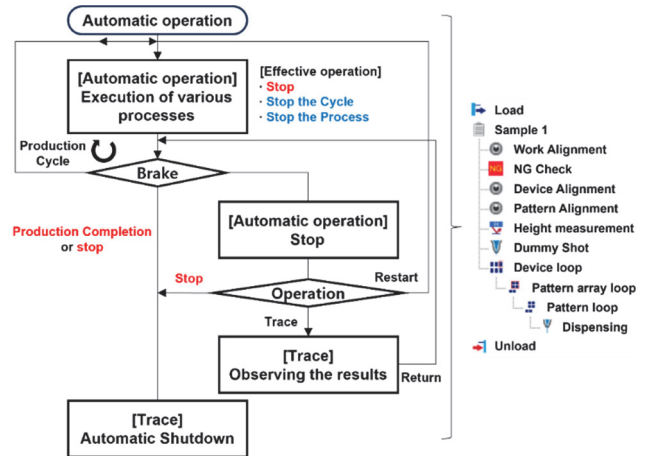


Fig. 9. Operational phase of cycle regulation and cycle tree regulation.

순차적으로 실행되며, load ~ unload 간의 메인 루프가 1사이클로 규정한다. 이렇게 생성된 사이클은 레시피 편집을 통해 설정되며 좌측 틀 안에 있는 플래그를 조작하면 지적 플래그에 따라 사이클 트리가 변화된다. 모든 설정이 완료되면 시작을 눌러 도포를 시작한다.

- 프린팅 상황은 자동운전 화면의 각 부분에서 실시간으로 확인할 수 있으며 생산되는 단계는 트레이서 녹색으로 표기가 된다. 생산 중 자동 운전 및 수동 조작의 흐름은 그림 9와 같다. 기본적으로 오퍼레이터의 조작이 없으면 황색 틀의 자동 생산 사이클이 반복되며, 프로세스 완료 혹은 사이클 완료 시 중지 또는 생산 완료 판정된다. 프로세스 완료나 사이클 완료 시에는 정지 판정되며, 정지 예약이 된 경우 자동 운전은 일시정지된다. 정지 중인 자동운전 화면에서는 트레이스 화면으로 도포 결과를 실시간으로 확인할 수 있으며 정지 중인 자동운전 화면에서 재개 버튼으로 생산을 재개할 수 있다.

2.8 매개변수 최적화

- 노즐 프린팅 공정에서 품질을 결정짓는 주요 요소는 패턴의 선폭 균일성, 도포 두께, 단절 여부, 번짐 현상 등이다. 이는 주로 재료 특성과 함께 도포 조건에 의해 결정되므로, 정밀한 공정 변수 설정이 요구된다 [9,11,12]. 본 연구는 분사 압력, 팁 높이, 이동속도 라는 세 가지 주요 변수를 중심으로 도포 품질에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다. 각 변수는 개별적으로 도포 결과에 영향을 미치기도 하지만, 상호 연계 작용을 통해 복합적으로 결과를 결정짓기 때문에 매개 변수간 상호작용을 고려한 최적화가 필요하다 [2].

2.9 매개변수 최적화

- 노즐 프린팅 공정에서 품질을 결정짓는 주요 요소는 패턴의 선폭 균일성, 도포두께, 단절 여부, 번짐 현상 등이다. 이는 주로 재료 특성과 함께 도포 조건에 의해 결정되므로, 정밀한 공정 변수 설정이 요구된다 [9,11,12]. 본 연구는 분사 압력, 팁 높이, 이동속도라는 세 가지 주요 변수를 중심으로 도포 품질에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다. 각 변수는 개별적으로 도포 결과에 영향을 미치기도 하지만, 상호 연계 작용을 통해 복합적으로 결과를 결정짓기 때문에 매개변수 간 상호 작용을 고려한 최적화가 필요하다 [2].
- 프린팅 공정의 최적 조건을 도출하기 위해, MuCAD 소프트웨어를 활용하여 간단한 회로 패턴을 설계하고 실제 노즐 프린팅 공정 장비에서 출력 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 패턴은 bank 역할의 PTFE를 세가지 핵심 공정 변수를 조합하여 매개 변수별 도포 품질을 비교하였다. 표 2는 각 변수 조합에서 측정된 선폭과 표준편차를 나타내며, 실험 변수는 분사 압력 10 kPa에서 팁 높이(0.2, 0.4, 0.6 mm), 이동 속도(10, 20, 30 mm/s)로 설정하였으며, 각 조합에서 동일한 패턴을 3회 반복 출력하였다.
- 도포 품질 평가는 그림 10-12의 광학 이미지에서 볼 수 있듯이 이동 속도 및 노즐 높이에 따른 PTFE의 선폭을 분석하였다. 측정결과 이동 속도가 10 mm/s로 느리거나 30 mm/s로 상대적으로 빠를 경우 노즐 높이에 상관없이 선폭의 편차가 크게 나타났다. 반면 20 mm/s와 0.2 mm의 노즐 높이일 경우 그림 11(c)와 같이 균일한 선폭으로 프린팅되었다.
- 표 2는 10 kPa 조건에서 노즐 높이(0.2, 0.4, 0.6 mm)

와 이송 속도(10, 20, 30 mm/s)를 조합하여 수행한 총 9가지 조건의 도포 선폭 측정 결과를 나타낸다. 평균 선폭과 표준편차 분석 결과, 속도가 증가할수록 선폭은 감소하는 경향을 보였으며, 높이 변화에 따라 선폭 변화 폭이 다르게 나타났다. 특히 20 mm/s, 0.2 mm 조건에서 표준편차가 2.14 μm 로 매우 낮아, 높은 반복성과 균일성을 확인할 수 있었다. 추가적으로, 본 연구에서 제안한 노즐 프린팅 공정은 특정 용액에 제한되지 않고 다양한 용액 조성에서도 손쉽게 적용이 가능함을 확인하였다. 예를 들어, 그림 13(a)는 불소계 고분자인 PTFE를 FC-40에 1 wt% 비율로 혼합하여 단순하게 프린팅한 결과이며, 그림 13(b)는 전도성 고분자인 PEDOT:PSS 용액에 DBSA와 GOPS를 첨가하여 프린팅한 사례이다. 두 경우 모두 별도의 복잡한 조정 과정 없이 균일한 패턴 형성이 가능하였으며, 이를 통해 본 공정이 다양한 재료 시스템에도 간단히 확장 적용될 수 있음을 알 수 있다.

- 노즐 프린팅 공정기반 프린팅 공정은 다양한 점도의 재료를 고정밀·고재현성으로 도포할 수 있으며, 공정 절차가 단순하고 설비 투자 비용이 낮다는 장점을 가진다 [1,16]. 특히 진공 환경이 불필요하고 재료 손실이 적어, 시제품 제작이나 소량 다품종 생산에 유리하며, 다양한 기판 형상과 재질에도 대응이 가능하다 [2]. 본 연구에 사용된 Musashi Engineering 350PC Smart 시스템은 이러한 노즐 프린팅 공정의 장점을 극대화하기 위해 SynchroSpeed™ 기술, 고해상도 비전 얼라인먼트, $\pm 5 \mu\text{m}$ 수준의 위치 정밀도, 자동 높이 보정 기능 등을 통합하였다 [6,9]. 이를 통해 곡선·코너 구간 등 이송 속도가 변하는 영역에서도 균일한 도포 폭을 유지하고, 비평면 기판이나 반복 생산 상황에서도 안정적인 품질을

Table 2. Line-width values with various printing conditions.

Movement Speed (mm/s)	Nozzle Height (mm)	Average Line-Width (μm)	Standard Deviation (μm)	Minimum (μm)	Maximum (μm)	Range (μm)
10	0.2	363.37	10.58	351.22	370.51	19.29
10	0.4	335.31	1.44	334.13	336.91	2.78
10	0.6	294.44	1.71	292.48	295.61	3.13
20	0.2	212.80	0.25	212.52	212.99	0.47
20	0.4	183.73	0.41	183.26	183.97	0.71
20	0.6	133.43	0.66	132.87	134.15	1.28
30	0.2	185.46	0.75	184.89	186.38	1.49
30	0.4	166.63	3.07	162.95	168.49	5.54
30	0.6	143.02	2.35	140.14	144.54	4.40

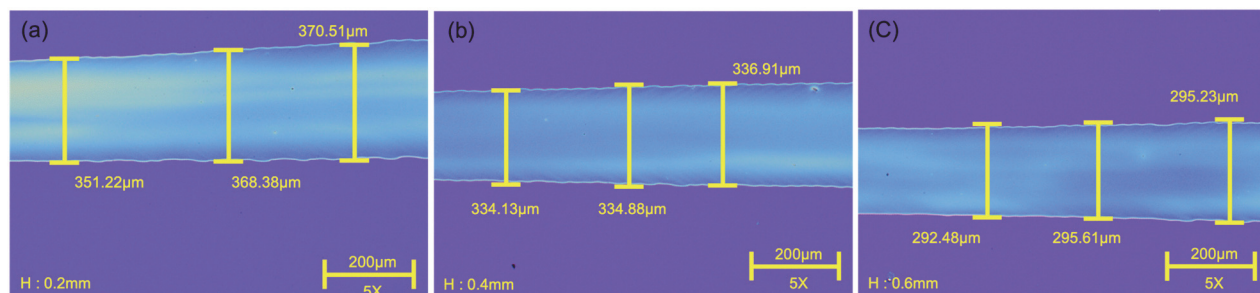


Fig. 10. Line width according to height changes of (a) 0.2, (b) 0.4, and (c) 0.6 mm at 10 mm/s speed.

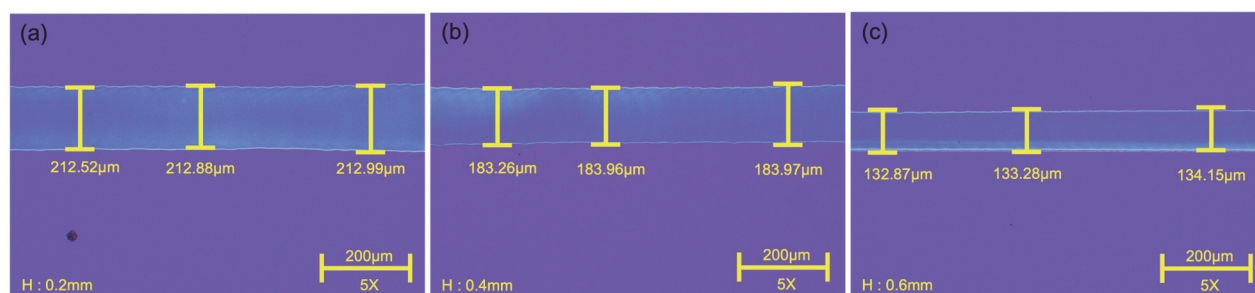


Fig. 11. Line width according to height changes of (a) 0.2, (b) 0.4, and (c) 0.6 mm at 20 mm/s speed.

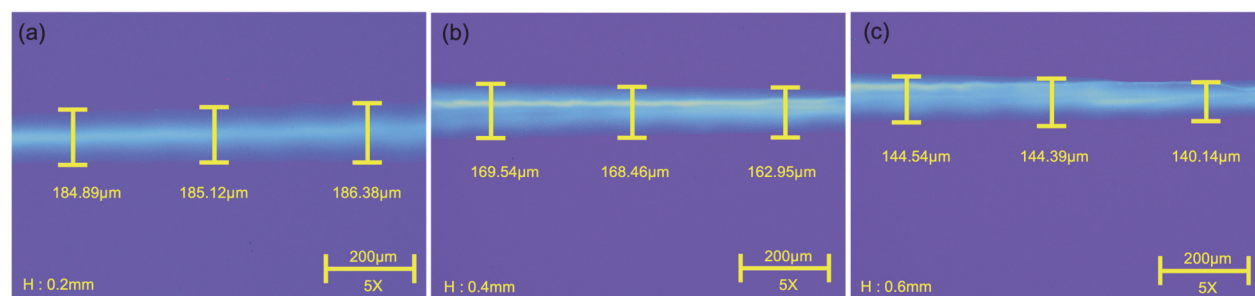


Fig. 12. Line width according to height changes of (a) 0.2, (b) 0.4, and (c) 0.6 mm at 30 mm/s speed.

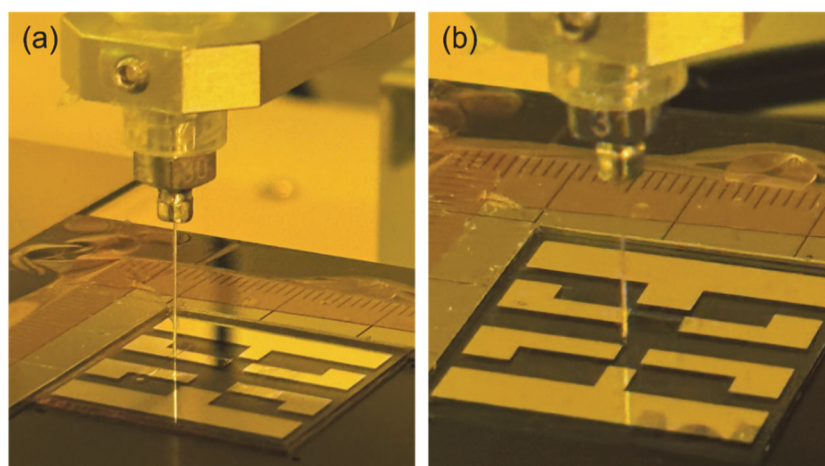


Fig. 13. Photography of (a) a PTFE printing using a 30 G nozzle and (b) PEDOT:PSS printing using a 31 G nozzle for the organic electrochemical transistor device fabrication.

보장한다는 점에서 기존 공정 대비 차별성을 가지며 차세대 전자용 제조법으로 기대된다 [6,9].

3. 결론

- 본 연구에서는 분사 압력, 팁 높이, 이송 속도라는 세 가지 핵심 공정변수가 도포 폭, 균일성, 단절 여부 등 품질 지표에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 속도가 증가할수록 선폭은 감소하는 경향을 보였으며, 높이 변화에 따라 선폭 변화 폭이 다르게 나타났다. 특히 SynchroSpeed™ 기능은 속도 변화 구간에서 분사량 변동을 최소화하여 패턴 품질 안정화에 크게 기여하였고, 비전 얼라인먼트 시스템과 높이 센서를 활용한 자동 보정은 반복 생산에서 위치 편차를 $\pm 5 \mu\text{m}$ 이하로 줄이는 데 효과적이었다. 또한, 본 연구에서는 PTFE:FC-40 혼합 용액과 PEDOT:PSS/DBSA/GOPS 용액을 비롯한 다양한 재료 조성에 대해 프린팅을 수행하였으며, 패턴 형성이 가능함을 확인하였다. 이는 노즐 프린팅 공정이 특정 소재에 국한되지 않고 폭넓은 재료군에 적용될 수 있음을 보여주며, 복잡한 공정 최적화 없이도 간단히 활용할 수 있다는 장점을 뒷받침한다.
- 향후에는 본 연구에서 확립한 최적화 방법과 장비 제어 전략을 기반으로 반도체소자, 바이오칩, 바이오센서 등 더 넓은 분야에 적용 가능성을 확장할 수 있을 것이다. 특히 다중 재료 동시 노즐 프린팅, 인라인 검사와 피드백 제어의 결합, AI 기반의 공정 변수 자동 튜닝 기술이 통합된 노즐 프린팅 공정기반 제조법을 이용해 차세대 고정밀 뿐만 아니라 고효율 생산 플랫폼을 구축에 활용될 수 있다고 사료된다.

ORCID

Sunyoung Sohn

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

감사의 글

This research was supported by the ‘Regional Innovation System & Education (RISE) program’ through the Gangwon RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Gangwon State (G.S.), Republic of Korea (2025-RISE-10-005) and ‘Semiconductor R&D Support Program’.

REFERENCES

- [1] Y. M. Woo, D. G. Lee, Y. S. Hwang, J. C. Heo, S. M. Jeong, Y. J. Cho, K. I. Park, and J. H. Park, *J. Electr. Electron. Mater.*, **36**, 454 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.4>
- [2] H. Kang, H. Jung, S. Hong, N. K. Yoon, and S. Sohn, *J. Electr. Electron. Mater.*, **37**, 382 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.4.4>
- [3] C. Cano-Raya, Z. Z. Denchev, S. F. Cruz, and J. C. Viana, *Appl. Mater. Today*, **15**, 416 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.02.012>
- [4] R. Angara, S. Li, and M. Anjanappa, *Mechatronics*, **19**, 878 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.05.002>
- [5] S. B. Balani, S. H. Ghaffar, M. Chougan, E. Pei, and E. Şahin, *Results Eng.*, **11**, 100257 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100257>
- [6] H. Jeong, J. H. Lee, S. Kim, S. Han, H. Moon, J. Y. Song, and A. Y. Park, *Sci. Rep.*, **13**, 21297 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47544-4>
- [7] B. Huang, X. Liu, J. Yan, J. Xie, K. Liu, Y. Xu, J. Liu, and X. Zhao, *Appl. Sci.*, **13**, 9206 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/app13169206>
- [8] M. Łysieñ, Ł. Witczak, A. Wiatrowska, K. Fińczyk, J. Gadzalińska, L. Schneider, W. Stręk, M. Karpiński, Ł. Kosior, F. Granek, and P. Kowalczewski, *Sci. Rep.*, **12**, 9327 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13352-5>
- [9] Musashi Engineering, *Image Master 350PC Smart SM QX Series*, (2023).
- [10] P. Martins, N. Pereira, A. C. Lima, A. Garcia, C. M. Filipe, R. Policia, V. Correia, and S. Lanceros-Mendez, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2213744 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202213744>
- [11] J. Zou, M. Huang, D. Zhao, F. Chen, and D. Wang, *Front. Mater.*, **10**, 1183747 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1183747>
- [12] B. H. Mavani, M. Arabi, R. Saritas, A. J. Scott, E. Abdel-Rahman, and A. Penlidis, *Can. J. Chem. Eng.*, **101**, 5034 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.24866>
- [13] S. Mypati, A. Docoslis, and D. P. J. Barz, *Chem. Eng. J.*, **381**, 122645 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2019.122645>
- [14] J. Rivnay, S. Inal, A. Salleo, R. M. Owens, M. Berggren, and G. G. Malliaras, *Nat. Rev. Mater.*, **3**, 17086 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.86>
- [15] D. Khodagholy, J. Rivnay, M. Sessolo, M. Gurfinkel, P. Leleux, L. H. Jimison, E. Stavrinidou, T. Herve, S. Sanaur, R. M. Owens, and G. G. Malliaras, *Nat. Commun.*, **4**, 2133 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms3133>
- [16] S. Joi, E. Lee, P. Li, T. Esatu, J. Fleischer, E. Quinn, G. Gu, V.

- Kulichenko, L. Balicas, S. T. Le, S. W. LaGasse, A. T. Hanbicki, and A. L. Friedman, *Adv. Electron. Mater.*, **11**, e00927 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202400927>
- [17] M. Ito and A. Kamath, *Flex. Print. Electron.*, **6**, 015001 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1088/2058-8585/abd29e>
- [18] A. Perinot, P. Kshirsagar, M. A. Malvindi, P. P. Pompa, R. Fiammengo, and M. Caironi, *Sci. Rep.*, **6**, 38941 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep38941>
- [19] S. Chandrasekaran, A. Jayakumar, and R. Velu, *Nanomaterials*, **12**, 4251 (2022).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano12234251>