



정전기력 잉크젯 기반 미세 패터닝 기술

당현우, 최경현 | 제주대학교

김동수 | 한국기계연구원

[요약문]

자원의 고갈과 지구환경오염의 심각성을 인지하는 시각이 늘어남에 따라 산업계에서도 친환경적 기술에 대한 다양한 연구·개발이 이수가 되고 있다. 정전기력 잉크젯 패터닝 기술 또한 그 예라 할 수 있겠는데, 이는 기존인쇄 기술의 시각적인 표현의 개념을 벗어나 패턴 자체의 기능을 부여함으로써 그 가치를 높이고, 현존하는 각종 미세 패터닝 기술의 다공정성과 환경에 미치는 영향 등의 문제점을 개선할 수 있는 기술이라 할 수 있겠다. 정전기력 잉크젯 패터닝 기술은 이미 60~70년대부터 연구·개발 되어왔던 정전기력이 유체에 미치는 영향을 제어하여 극소량 미세 액적 토출 및 분무를 이끌어 내는 기술을 기반으로 토출되는 노즐 헤드의 직경 대비 극 미량의 기능성 잉크를 토출하고, 서브마이크론(submicron)급의 패턴 인쇄를 가능케 한다. 본 논문에서는 정전기력 잉크젯 패터닝 공정의 요소기술을 기반으로 프린팅 장비를 설계 및 제작하고, 미세 액적 토출을 위한 수 마이크로미터의 직경을 갖는 노즐 헤드를 개발 및 프린팅 장비에 대응하여 통합 제어 프로그램을 이용한 기판상의 미세 패터닝 실험을 실시하였다. 정전기력 기반 미세 패터닝 실험의 공정 변수를 잉크의 특성, 노즐헤드의 특성, 기판의 특성, 장비의 특성으로 구분지어 공정 시스템의 성능을 검토 및 기능성 잉크의 미세 패터닝을 구현 하였다.

1. 서론

^[1]최근 다양한 기법의 인쇄전자 기술의 도입을 통해 전자회로의 패턴을 형성하는 기술이 주목받고 있다. 인쇄전자 기술은 기존의 식각, 증착, 도금 방식의 반도체 리소그래피 공정과 다른 재료를 기판 상에 직접적으로 프린팅 하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. ^[2]주로 다이렉트 패터닝 방식을 이용한 공정 방식을 통하여 OPV(유기박막태양 전지), RFID(무선주파수인식시스템) 태그, OLED(능동형유기발광다이오드), 플렉시블 센서, 플렉시블 디스플레이, E-paper(전자종이) 등과 같은 응용 매체를 대량으로 저가 생산하기 위한 기술개발을 목표로 하고 있다. ^[3]특히, 이 분야에서의 다이렉트 패터닝 기술은 종전의 석판인쇄 공정에서 발생하는 고비용의 마스크 제작비용, 고가의 재료 낭비와 공정 장비 설비비용, 환경오염 문제 등을 해결할 수 있는 친환경적 대체기술인 셈이다. ^[4]현재 다이렉트 패터닝 기술에는 핵심 기술인 프린팅 헤드 설계 및 제작 기술이 연구되어 있으며 압전소자, 에어로졸, 열 분사, 정전기력 방식의 프린팅 헤드가 대표적이다. ^[5]인쇄전자를 위한 프린팅 헤드들은 금속 미세 입자가 첨가되어 있는 전도성 잉크나 ITO, ZnO 등의 반도체 잉크를 기판위에 미세한 선폭으로 패터닝 하거나 스프레이 형태로 분사하여 적층하는 기능을 한다. 프린팅 헤드 기술은 기판 상에 선택적으로 재료를 패터닝 할 수 있어서 고가의 재료를 낭비하지 않고 공정 자체를 단순화 시킬 수 있다. ^[6]이러한 잉크젯 프린팅 헤드 기술을 응용하여 대량 생산 공정 장비인 롤투롤 시스템에 적용하면 대면적 고속 전자 소자 패터닝 공정 설비를 개발할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 현재 프린팅 헤

드 기술은 수 마이크로미터에서 수십 마이크로미터의 선포 정도가 인쇄 가능한 한계를 가지고 있어 부분적으로 적용하고 있는 실정이지만, 정밀 프린팅 헤드 기술로 연구가 완료되면 수십 나노미터에 이르는 반도체 시장과는 다른 영역의 새로운 시장을 창출할 수 있으리라 예상된다.

[3]기술적으로 다이렉트 패터닝 분야는 프린팅 장비, 잉크 그리고 기판으로 분류 할 수 있는데, 프린팅 장비에서는 롤투롤장비와 잉크젯 프린팅 헤드로 다시 분류된다. 롤투롤과 같은 미디어 인쇄 장비의 경우는 이미 대규모 시장이 형성되어 있고 세계적으로 기업, 연구소, 학교에서 활발히 연구 되고 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 정전기력 기반의 잉크젯 헤드는 아직 시장이 크게 형성되진 않았으나 EHD, ESD, DOD, Continuous, Spray 방식 등으로 분류되어 유럽국가나 일본 등에서 선행하여 기술 개발을 주도 하고 있는 실정이다. 아직 국내에서 개발되고 있는 잉크소재의 나노 분말입자 합성에서 고른 분산성을 가지기 어렵고, 나노입자의 대기 중 표면 산화, 표면 원자의 불완전 상태가 가지는 높은 에너지로 인한 입자간의 응집 발생 등 문제점을 가지고 있다. 하지만 최근 국내 대표적인 연구소를 중심으로 CNT 및 유기 박막 재료 등의 신규 고분자 물질 합성을 통하여 해결책을 제시하고 있다. 인쇄전자용 프린팅 헤드개발에서도 균일한 선포, 노즐 막힘, 노즐 오리피스스의 집적도 등의 문제점이 있으나 MEMS 공정기법을 통한 정전기력 기반의 잉크젯 헤드가 한 가지 해결책으로 제시되고 있다. 정전기력 잉크젯 헤드는 다른 프린팅 헤드에 비해 미세 노즐 직경을 가지면서도 고점도의 잉크를 인쇄할 수 있는 반면 노즐 막힘이 적다는 장점을 가지고 있다. 하지만 정전기력 잉크젯 헤드로 전도성 잉크를 패터닝 하기 위해 요구되는 변수가 다양하여 각각의 모듈을 재설계하고 정밀 제어를 하기위한 시스템 기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

본 논문에서는 정전기력 기반의 잉크젯 패터닝 시스템에 대한 간략한 소개와 정전기력 헤드에 대해 기술하였다. 그리고 공정변수별 패터닝을 중심으로한 정전기력 기반의 잉크젯 시스템의 신뢰성 향상 방안을 소개하고자 한다.

2. 정전기력 잉크젯 시스템

정전기력 잉크젯 시스템은 다양한 기능성 잉크를 정전기력 기반의 노즐헤드를 통하여 기판(substrate)위에 비접촉식 패터닝(patterning)하기 위한 공정 시스템으로 인쇄전자의 기반이 되는 다양한 패턴을 고성능/저비용/친환경적인 공정이 가능한 차세대 잉크젯 패터닝 시스템 기술이다.

그림1과 같이 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 구성은 정전기력 잉크젯 헤드(electrostatic inkjet head)와 고전압 발생장치(high-voltage supplier), 잉크 공급 장치(ink supplier), 정밀 이송 장치(high-accuracy moving stage) 그리고 이를 제어하는 통합 패터닝 제어 프로그램(integrated control system)으로 구성된다. 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 실험 장비 설계 기술의 개발을 통한 프로토타입 실험 장비는 잉크의 전기적 토출 조건을 분석하고 정전기력 헤드의 최적 조건을 찾는 것이 가능하다.

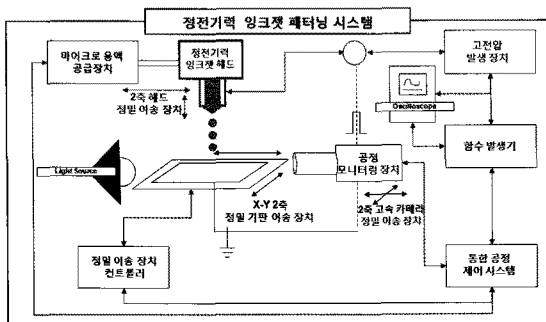


그림 1. 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템 구성도

그림 2에서는 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 프로토타입을 보여준다. 시스템의 설계조건은 정전기력 잉크젯 헤드의 개발, 정밀 이송 장치 개발, 고전압 발생 장치 개발, 마이크로 용액 공급 장치 개발, 공정 모니터링 장치 개발, 통합 제어 프로그램으로 분류하였다. 정전기력에 잉크의 토출을 조절하여 미세 선폭 패턴의 인쇄가 가능하도록 각 장치별로 최적 변수의 설정이 요구된다. 정전기력 잉크젯 헤드 토출 공정 장비는 전도성 잉크 액적의 토출을 위한 전계 인가 방식으로 보통 핀 투 플레이트(pin-to-plate) 형식으로 구성된다.

⁵⁾ 전압 인가를 위한 10kV, 1kHz급의 성능의 고전압 발생장치와 다채널의 스위칭장치의 설계 기술은 채널수만큼의 멀티 노즐을 수용할 수 있어 대면적 기판에서 한 번에 특성이 다른 여러가지 재료를 패터닝 할 수 있다. 고전압 발생장치는 동작 시에 고조파 성분이 발생할 가능성을 염두에 두어야 하며, 전원부에 노이즈 필터와 서지전류 보호기를 함께 설치하며, 다채널 스위칭 모듈의 경우 직류 전원의 전달 손실률을 0.1%미만으로 제작된다. 출력 임피던스의 경우 정전기력 노즐 헤드의 액적 토출시의 전류 증가치를 고려해 47Ω 미만이 되도록 한다.

⁶⁾ 정밀 이송 장치의 기판 이송 스테이지는 10μm이하의 정밀도를 갖는 리니어 모터 스테이지가 알맞고 다양한 서브 마이크로 급의 패턴이나 디바이스를 설계할 수 있는 조건을 충족시키도록 개발되어야 한다. 실험 장비에서 정밀 이송 장치는 총 6축으로 이루어져 있으며 헤드 이송부, 기판 이송부, 모니터링 장치 이송부, 안정화 장치로 분류할 수 있다. 기판 이송 장치는 모니터링 시스템을 부착 할 수 있도록 모니터링 시스템용 자동 2축, 수동 1축의 스테이지를 설치되고, 스테이지 하층에는 6축의 스테이지를 제어할 모터 드라이버 모듈을 장착하여 스테이지와 메인 오퍼레이팅 컨트롤러와 통신할 수 있는 인터페이스 모듈로 설계된다. 마이크로 용액 공급 장치의 경우 50μl/hr이하의 유량 제어를 유지하여 수 pL의 액적 토출량을 조절할 수 있는 조건을 고려하여 설계되어야 한다.

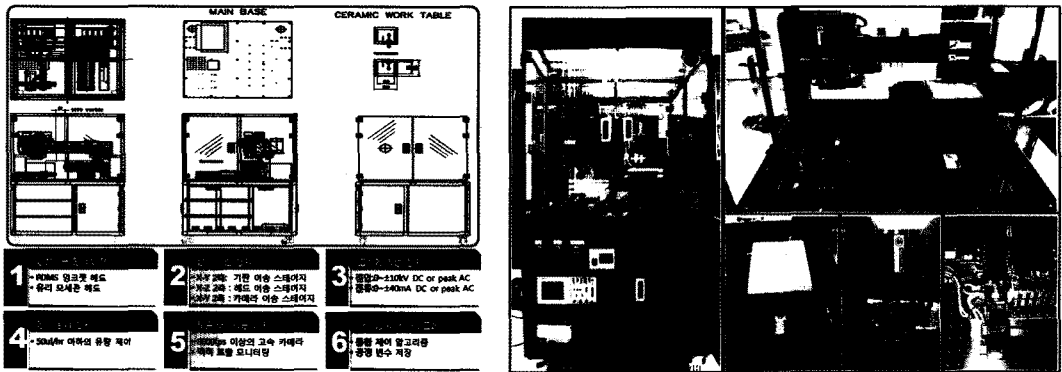


그림 2. 좌 : 시스템 설계 조건 및 레이아웃, 우 : 정전기력 잉크젯 패터닝 실험 장치

⁴⁾ 정전기력에 의한 전도성 패턴 형성과정은 그림 3과 같은 순서에 의해 이뤄진다. 먼저 잉크를 헤드의 오리피스까지 공급하고 직류 고전압을 헤드에 인가하여 노즐 오리피스 상에 잉크의 메니스커스를 확인하는 초기 과정은 정전기력기반의 잉크젯 프린팅의 특징이다. 메니스커스 형성 조건을 조절하기 위하여 잉크 공급 유량을 재설정하거나 직류 고전압을 변화시키면서 잉크 토출 직전 상태가 되어야만 안정적인 패턴을 형성할 수 있을 것이다.

시스템의 컨트롤러 구성은 그림 4와 같이 함수발생기 모듈, 오실로스코프 모듈, 6축 모션 컨트롤러 모듈, 비전 컨트롤러 모듈 그리고 마이크로 잉크 펌프제어 모듈로 제안된다. 통합 공정 제어 소프트웨어는 GUI기반으로 그림 5와 같이 구현되는데 ①부터 ⑦까지 각각 정밀 이송 스테이지 제어, 고전압 발생장치 및 함수 발생기 제어, 고전압 출력 비교 모니터링 창, 패턴 입력 제어, 액적 토출 모니터링 창, 베이스 히터 컨트롤러 그리고 각 장치 기능의 통신 블록다이어그램을 보여준다.

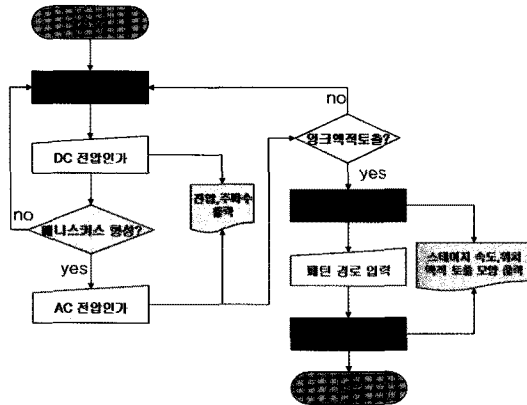


그림 3. 정전기력 잉크젯 프린팅 공정 제어 알고리즘

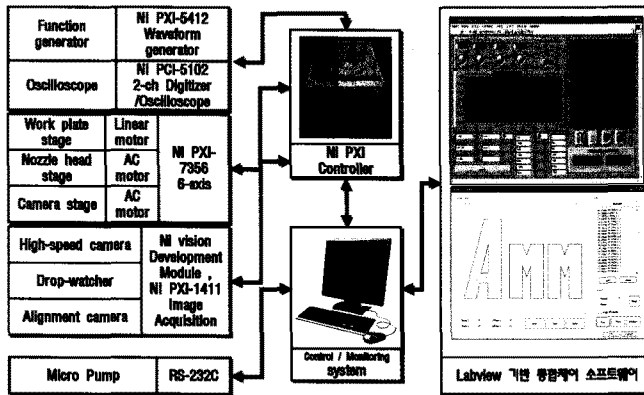


그림 4. 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템 통합 제어 방안

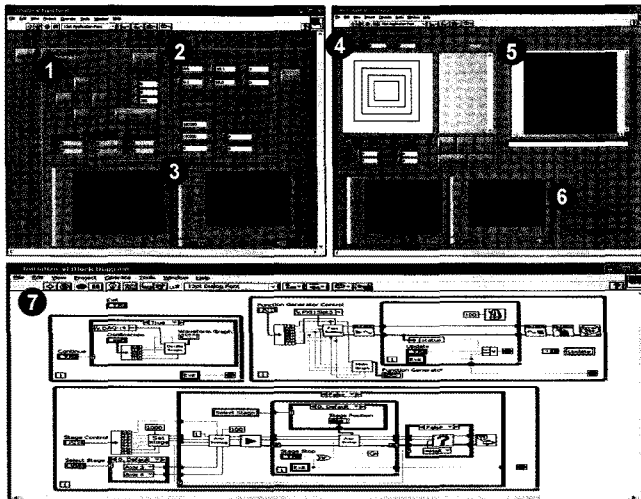


그림 5. 시스템 통합 제어 프로그램

3. 정전기력 헤드

3.1 정전기력 헤드 설계

정전기력 기반의 DOD(drop on demand) 잉크젯 헤드의 원리를 분석하고 설계·개발하여 싱글 DOD 잉크젯 헤드에 적용한다.

^[2]그림 6은 DOD 잉크젯 헤드의 공정원리와 잉크젯 헤드의 토출 특성을 나타낸다. DOD 공정은 메니스커스(meniscus) 형성 단계와 액적 토출 단계 나눌 수 있는데, 메니스커스 형성 단계는 전도성 잉크가 직류 바이어스 전압에 의하여 액적 토출 직전의 조건이 되는 것을 말하고, 여기에 펄스 전압을 인가하여 헤드에서 잉크 액적을 분리시켜 기관위에 패터닝하는 과정을 액적 토출 단계라고 한다. 특히 정전기력 기반의 잉크젯 헤드를 이용하여 전도성 잉크를 연속적으로 기관위로 패터닝하기 위해서는 지속적으로 잉크가 메니스커스 형성 단계를 유지하고 있어야 한다. 메니스커스 형성 단계는 일종의 토출 직전, 대기상태라고도 설명 할 수 있으며, 이와 같은 현상은 직류 바이어스 전압과 잉크 표면 장력 그리고 중력에 의한 힘의 평형 상태를 유지하기 때문에 나타나게 된다.

공정 분석과 실험결과, 토출되는 미세 액적은 헤드 노즐 직경과 전기장 세기에 반비례적인 크기를 보이며 패터닝 결과에서 알 수 있듯이 정전기력 기반의 DOD 헤드는 메니스커스와 미세액적 토출 두 단계를 반복하여 일정한 패턴을 생성한다.

3.2 헤드 개발

그림 6은 유리 모세관 타입의 정전기력 잉크젯 노즐 헤드를 보여준다. 유리 모세관에 열과 압력을 동시에 가하여 다양한 크기의 투출구 직경을 갖는 노즐 헤드를 제작할 수 있다. 노즐 오리피스의 직경은 약 100um 크기에서부터 1um 정도까지 제작이 가능하고, 실질적으로 실험에 쓰인 범위의 노즐은 5um~약 50um까지 이다.

^[4]모세관 타입의 장점은 노즐이 실제 액적 토출 시간까지의 warm-up(이하 워업)시간이 비교적 짧은다는 점과 지속적으로 일관된 성능을 보여준다는 것이다. 하지만 선평을 좀 더 줄이기 위한 공정변수는 모세관 노즐 오리피스 직경에 의존하는데 10um 근방부터는 전도성 잉크내의 나노 금속 입자끼리의 뭉침 현상으로 인하여 노즐 오리피스가 막히는 문제점이 발생되고, 30wt% 이상의 고점도 잉크 사용시 모세관 장력이 강하여 액적토출이 불가능한 점이 발생된다. 따라서 다양한 변수의 제약을 개선하고, 다양한 기능성 잉크에 대응이 가능한 다양한 형태의 노즐 헤드 개발이 필요하다.

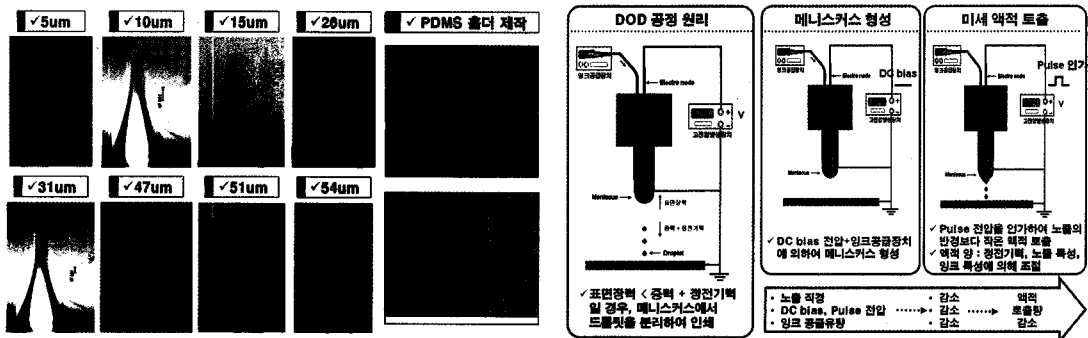


그림 6. 좌 : 유리 모세관 타입 잉크젯 헤드, 우 : DOD 헤드 공정 원리



4. 실험 및 결과

²⁾정전기력 잉크젯 패터닝 실험에 적용된 공정 변수를 그림 7에 나타내었다. 인가전압 설정은 잉크젯 헤드에 직류 전원을 인가하여 노즐 헤드 토출구에 전도성 잉크의 메니스커스(meniscus)를 모니터링 하여 액적이 원뿔 형태를 이루며 토출되기 시작하는 지점을 피크 전압(peak voltage)으로 설정하였고, 토출 주기를 조정하기 위하여 펄스파(puls wave) 형태로 인가하면서 주파수를 300Hz로 설정한다. 노즐헤드에 인가된 전압 조건은 오프셋 전압(offset voltage)을 0.5kV로 설정하고 피크 전압(peak voltage)을 0.8~1.2kV의 범위에서 가변하며 초기 미니멈(minimum) 전압에서 피크전압까지 상승하는 구간에서 잉크의 토출을 위한 메니스커스를 형성하고 드랍 전압(drop voltage) 유지되는 동안 잉크의 액적 토출이 이루어지게 된다. 실험에 적용된 잉크의 속성은 wt% 55.66, 표면장력5.3dyn/cm, 점도 87cps 이다.

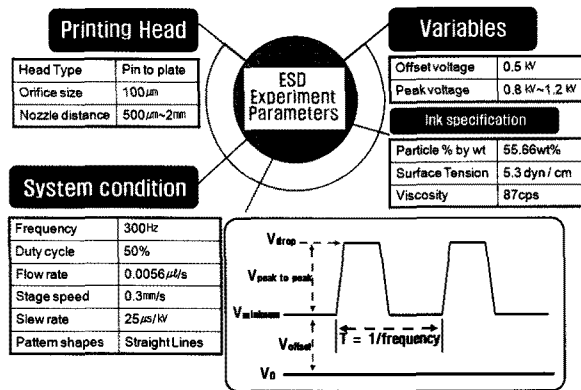


그림 7. 정전기력 잉크젯 패터닝 공정 변수

실험 패턴은 패터닝 후 150°C에서 10분간의 소성 공정을 거쳤으며 마이크로스코프(microscope)를 통하여 선폭을 측정한 결과 최소 선폭 56 μ m에서 최대 91 μ m의 선폭 구현이 가능하고, 정밀 이송장치를 이용하여 그림 8과 같은 패턴을 구현할 수 있다.

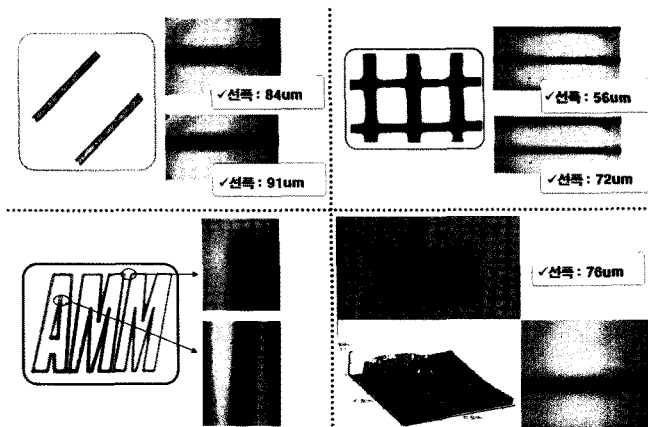


그림 8. 정전기력 잉크젯 패터닝 결과 및 구현 선폭

5. 결 론

정전기력 잉크젯 패터닝 기술의 기본적인 연구로 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 요소별 세부 설계조건을 설정하여 CAD tool을 이용한 시스템 설계를 하고, 유리 모세관을 이용한 정전기력 잉크젯 노즐 헤드를 제작하여 시스템 상에 적용하였으며, 통합제어프로그램을 개발하여 기관 상에 패터닝 실험을 함으로써 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 성능 및 기능의 성과 등을 검증 및 점검할 수 있도록 구성하였다. 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템의 성능 실험 변수 조건을 잉크특성, 액적토출특성, 기관특성, 헤드특성, 장비특성 그리고 결과사양 등의 세부적 요소로 구분하여 적용하고, 시스템을 정전기력 잉크젯 헤드, 정밀 이송 장치, 고전압 발생 장치, 마이크로 용액 공급 장치, 공정 모니터링 장치 그리고 통합 제어 프로그램 요소로 구분하여 성능을 평가 및 점검한다.

정전기력 잉크젯 패터닝 시스템 성능 실험에 사용된 유리 모세관과 형태의 잉크젯 헤드에서 단일 노즐 헤드로서 수십 마이크로급의 미세패턴을 구현할 수 있다.

정밀 이송 장치의 기관 이송, 헤드 이송과 고속카메라 이송 모듈의 개발을 통해 선폭과 선 간격 100um 이하의 패턴 제작과 정전기력 잉크젯 노즐 헤드의 미세동(微細動) 제어를 한다.

최대 10kV급 고전압 발생장치로 정전기력 잉크젯 노즐 헤드에 고전압을 지원할 수 있도록 하고, 고전압 발생 장치의 입력 주파수 제어를 통해 정전기력 잉크젯 노즐 헤드를 이용하여 금속 나노 입자가 함유된 전도성 잉크의 메니스커스 상에서 토출되는 액적의 토출주파수를 제어할 수 있다.

또한 마이크로 용액 공급 장치의 미세 유량 제어 모드를 통해 노즐 오리피스 상에서의 메니스커스 생성량을 줄임으로써 메니스커스의 첨예한 원추 모양을 형성하고, 분사되는 액적 토출량을 제어할 수 있다.

공정 모니터링 장치로부터 정전기력 잉크젯 노즐 헤드의 토출구 상에서 전도성 잉크의 메니스커스 형태와 액적 토출 과정을 시간적 흐름과 공정 조건 변수의 제어에 따른 헤드와 잉크의 반응을 관찰하고 분석할 수 있다.

통합 제어 프로그램으로부터 모든 공정 변수를 제어함과 동시에 결과데이터를 체계화함으로써 정전기력 잉크젯 시스템의 성능에 대한 검증을 진행하고, 정전기력 잉크젯 헤드와 전도성 잉크간의 공정 변수 조건에 따른 결과를 도출한다.

참고 문헌

- [1] 고정범, 김형찬, 당현우, 도양희, 김동수, 최경현, 정전기력 잉크젯 패터닝 시스템 개발, 2010년도 전기·전자·전자파·통신학회 학술발표논문집 ISSN 2005-0496, p94~97, 2010
- [2] 김형찬, 고정범, 김동수, 도양희, 최경현, 정전기력 잉크젯을 이용한 고 종횡비 패턴 제작에 관한 연구, 한국정밀공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, p751~752, 2009
- [3] 고정범, 칼리드 라만, 살림칸, 도양희, 김동수, 최경현, 풍력제어기를 위한 Printed Electronics 기반의 유연기판 제조 기술에 관한 연구, 한국동력기계공학회 2009년도 춘계학술대회 논문집, p381~384, 2009
- [4] 고정범, 인쇄전자 공학을 위한 정전기력 잉크젯 헤드 개발, 2010년도 제주대학교 대학원 석사학위논문, p7~41, 2010
- [5] Ahsan Rahman, J.B. Ko, Adnan Ali, Saleem Khan, Khalid Rahman, B.S. Yang, H.C.Kim, Drop on Demand Non-contact Hydrophilic Electrostatic Deposition Head, International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol: 10 No: 01, p61~69, 2010



당 현우

· 제주대학교 전자공학과 석사과정
· 관심분야 : pingted electronics, electronic device
· E-mail : hwdang@jejunu.ac.kr



최 경 현

· 제주대학교 메카트로닉스공학과 교수
· 관심분야 : printed electronics, micro mechatronics
· E-mail : khchoi@jejunu.ac.kr



김 동 수

· 한국기계연구원 선임연구본부장
· 관심분야 : 전자안배장비, 삼차원조형시스템, 공기
압액츄레이터, 잉크젯 기술
· E-mail : kds671@kimm.re.kr