



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

디스플레이 전극 제작을 위한 전기수력학적
프린팅 공정에 관한 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學專攻

金 洙 完

2016 年 2 月

디스플레이 전극 제작을 위한 전기수력학적 프린팅 공정에 관한 연구

指導教授 崔勁賢

金洙完

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 2 月

金洙完의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 임동환



委 員 도양희



委 員 최명환



濟州大學校 大學院

2016 年 2 月



Study on Electrohydrodynamic Printing Process for Display Electrodes Fabrication

Soo-Wan Kim

(Supervised by professor Kyung-Hyun Choi)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

2016 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

임종환

Thesis director, Jong-Hwan Lim, Prof. of Mechatronics. Eng.

도양희

Thesis director, Yang-Hoi Doh, Prof. of Electronic. Eng.

최정현

Thesis director, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics. Eng.

February 2016

Date

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY



목 차

LIST OF FIGURES	1
LIST OF TABLES	3
ABSTRACT	4
I. 서 론	5
II. 전기수력학적 프린팅 기술	9
1. 전기수력학적 프린팅 공정원리	10
1) 메니스커스 형성 및 토출 원리	10
2) 전기수력학적 프린팅 모드 제어	12
III. 전기수력학적 프린팅 시스템	15
1. 미세전극 패터닝용 전기수력학적 프린팅 헤드 개발	15
2. 전기수력학적 프린팅 공정 시스템 개발	18
1) 전기수력학적 프린팅 공정 테스트 베드 및 이송부 개발	19
2) 미세전극 패터닝용 고전압 공급 시스템	20
3) 전자식 정밀 공압 잉크 제어 장치 개발	21
4) 실시간 모니터링 시스템	22
5) 통합 공정 제어 소프트웨어 개발	25
IV. 미세전극 패터닝 공정 실험 및 결과	29
1. 공정변수에 따른 미세전극 패터닝 실험	30

1) 인가전압에 따른 미세전극 패턴 토출 실험	32
2) 공급압력에 따른 미세전극 패턴 토출 실험	35
3) 미세전극 패턴 결과 평가	36
2. 미세전극 리페어를 위한 미세선폭 구현	41
1) 리페어용 단선회로 기판 제작	41
2) 단선회로 기판에 대한 리페어 공정 실험 결과	42
VI. 결 론	44
참 고 문 헌	46

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Discharge mode of Continuos and DOD	9
Fig. 2 Discharge principle of electrohydrodynamic printing	10
Fig. 3 Discharge mode of electrohydrodynamic printing	12
Fig. 4 Electrohydrodynamic printing head for microelectrode	16
Fig. 5 Configuration of electrohydrodynamic printing head	17
Fig. 6 System configuration of electrohydrodynamic printing head	18
Fig. 7 Test bed design of electrohydrodynamic printing system	19
Fig. 8 Sution plate design for X-Y-Z micro transfer stage shaft and substra te fixing	20
Fig. 9 Configuration of high-voltage supply	21
Fig. 10 Design and development of electronic supply module	22
Fig. 11 Real-time monitoring system	23
Fig. 12 Prosess monitoring camera	24
Fig. 13 Material contact angle calculation Program	24
Fig. 14 Distance measurement program between nozzle and substrate	25
Fig. 15 Integrated process control software (main mode)	26
Fig. 16 Integrated process control software (custom mode)	27
Fig. 17 Integrated process control software (setting mode)	28
Fig. 18 (a)Phenomenon of carbonized nozzle (b)Contact nozzle and substrate	31
Fig. 19 Line width V_s discharge frequency	31
Fig. 20 Images of line pattern according to discharge frequency	32
Fig. 21 Average pattern width V_s applied voltage	33
Fig. 22 Images of pattern according to applied voltage	34
Fig. 23 Average pattern width V_s pressure	35
Fig. 24 Images of non-uniform pattern according to pressure	37
Fig. 25 Images of microelectrode pattern less than $5\mu\text{m}$	38

Fig. 26 FE-SEM images of microelectrode pattern less than 5 μ m	39
Fig. 27 Cross-section image of approximately 3 μ m printed pattern(a)	40
Fig. 28 3D profile image of approximately 3 μ m printed pattern(a)	40
Fig. 29 Cross-section image of approximately 3 μ m printed pattern(b)	41
Fig. 30 3D profile image of approximately 3 μ m printed pattern(b)	41
Fig. 31 Disconnection circuit board design drawing of repair process	42
Fig. 32 Repair process results of disconnection circuit	43
Fig. 33 Cross-section image of approximately 5 μ m printed repair pattern	44
Fig. 34 3D profile image of approximately 5 μ m printed repair pattern	44
Fig. 35 I-V curve of approximately 5 μ m printed repair pattern	45

LIST OF TABLES

Table 1. Specifications of electronic precision pneumatic control unit	22
Table 2. Explanation of integrated process control software(main mode)	26
Table 3. Explanation of integrated process control software(Custom mode)	27
Table 4. Explanation of integrated process control software(Setting mode)	28
Table 5. Specifications of AgNP	30
Table 6. Experiment parameters on the discharge frequency	32

ABSTRACT

In this study we introduced new technology and system of electro hydro dynamic printing to make direct patterning for printed electronics. Electro hydro dynamic printing technology is suggested for electrode pattern less than 5um and repair process of shorted electrode pattern due to miniaturization, light weight, integration of electronics devices by rapid emerging printed electronics industry. Electro hydro dynamic printing technology overcame several fatal disadvantages of traditional inkjet printing technology. Traditional photo-lithography process of MEMS process is capable of precise micro pattern but, has several disadvantages such like high cost, environmental problems caused by harmful chemicals, waste materials. It has limitation to use photo-lithography for fabrication of electronics devices by efficient cost, environmental-friendly process.

Various printing process is applied to overcome photo-lithography's disadvantages by developing flexible electronics. ink jet printing technology of non-contact printing process is capable of direct patterning without substrate damage and recently a lot of research work has been going on. It is difficult to apply for fabrication of electronic devices due to limitation of micro pattern less than 10um, viscosity more than 50cps.

we developed integration control software that is capable of control of patterning head and patterning system for implementation 5um electrode pattern by using electro hydro dynamic printing process. we did experiment of electrode patterning according to applied voltage and material supply pressure and implemented 5um electrode pattern with ± 0.194 of standard deviation by using electro hydro dynamic printing process.

I. 서 론

전자제품의 소형화, 경량화, 직접화에 따라 낮은 선폭의 고미세 패턴이 요구되고 있고 5 μ m급의 고미세 전극패턴을 형성하는 것이 극복해야 할 과제로 남아있다. 산업체에서 요구되는 고미세 전극패턴을 형성하기 위한 인쇄전자 기술은 인쇄기술을 이용하여 다양한 전자소자를 제작하는 분야로, 인쇄공정을 통하여 전자소자를 제작하면 기존에 반도체 공정에서 전자회로, 배선을 형성하기 위해 사용되고 있는 포토리소그래피(Photolithography) 공정에 비해서 낮은 생산 단가, 고성능, 소형화, 대량생산 등의 이점을 가질 수 있다[1-4]. 또한 전도성 재료의 저온공정이 가능하여 플렉시블 전자소자 기술과 매우 높은 공정 적합성을 지니고 있어 향후 전자소자 공정 기술의 중요한 기술로 인식되고 있다. 이러한 장점들로 인하여 최근 인쇄전자 산업이 크게 주목 받기 시작하였고, 인쇄전자 기술에 대한 관심도 함께 높아지고 있다.

인쇄전자 기술의 프린팅 방식으로는 접촉식 패터닝 방식인 스크린 프린팅(Screen printing), 그라비아 프린팅(Gravure Printing), 플렉소 프린팅(Flexo printing), 오프셋 프린팅(Off-set printing)과 비접촉식 패터닝 방식인 잉크젯 프린팅(Ink-jet Printing), 에어로졸(Aerosol)등의 다이렉트 패터닝(Direct patterning)이 사용되고 있다. 이중 미세전극 패턴의 신뢰성을 확보하기 위해서 기관에 미세전극 패턴을 형성시키는 비접촉식 프린팅 방식이 주로 사용된다[5]. 대표적인 비접촉식 공정방식인 잉크젯 프린팅 기술은 노즐로부터 액적을 분사하여 토출시키는 방식으로 원하는 패턴을 직접 인쇄할 수 있어 원재료 절감 측면에서 매우 유리하다[4]. 또한 비접촉식 공정으로 기관에 접촉하지 않고 라인이나 패터닝에 용이하여 압력에 취약한 실리콘 웨이퍼 등에 손상 없이 사용할 수 있다. 이러한 장점 등으로 인해 RFID 태그, 안테나, 센서, 유연 디스플레이 등 여러 가지 전자소자에 적용하고자 많은 연구가 진행되고 있다[6].

잉크젯 프린팅 방식이 위와 같은 장점을 갖고 있지만 아직 고해상도 패턴 제작과 고점도 재료 토출에는 어려움이 있다. 고성능의 미세전극을 형성하기 위해서

는 금속 파티클의 함량이 높은 재료를 적용해야 하는데, 함량이 증가하면 용액의 점도 역시 증가하게 되어 잉크젯 프린팅 기술로는 불가능하다. 이러한 문제들을 극복하기 위해 기판을 가열하거나, 노즐의 액추에이터 구동 방식 변화를 주는 등의 시도가 있었지만 50cps 이상의 고점도 재료를 적용이 힘들고 10 μ m 이하의 선폭을 갖는 패턴의 제작에는 한계를 보이고 있다.[7-9].

잉크젯 프린팅 기술의 고점도·고함량 재료의 토출 문제와 10 μ m 선폭 패턴 토출 한계를 극복하기 위하여 전기수력학적(Electro-hydro-dynamic, EHD) 프린팅 기술이 제안되고 있다[10]. 전기수력학적 프린팅 기술은 마이크로 및 나노 스케일의 미세 액적 토출이 가능하고, 액적이 전기장을 따라서 이동하기 때문에 기판으로 토출 액적의 직진성이 우수하다. 또한 기존의 잉크젯 프린팅 기술에서는 노즐보다 작은 액적 토출이 불가능하여 노즐의 지름을 줄일 때 용액내의 용질에 의해 노즐의 막힘 현상이 발생하게 되는데 전기수력학적 프린팅 기술은 노즐사이즈보다 1/2배에서 1/10배정도의 작은 액적 토출이 가능하여 같은 지름의 노즐을 사용하더라도 기존의 잉크젯 프린팅 기술보다 고해상도의 패턴을 구현할 수 있다. 또한, 반도체 공정에서 요구되는 식각, 현상, 증착 등의 복잡한 공정을 단순화시킬 수 있고, 고점도·고함량의 전도성 금속파티클, 탄소나노튜브, 유기재료 등의 기능성 재료가 첨가된 고점도 잉크를 수 μ m의 크기의 액적을 기판 상에 패턴을 형성할 수 있어 고성능 미세전극의 형성기술로 적합하다.

최근 전기수력학적 프린팅 기술의 연구동향에 대해 살펴보면 2002년 Panio는 전압이 증가함에 따른 토출모드에 대해 연구하였고 펄스 모드에서 콘젯 모드로 변하는 것을 증명하였다[12].

전압이 일정구간 높아지는 경우 토출 모드가 마이크로 드리핑(Micro dripping) 모드에서 콘젯(cone jet) 모드로 변하게 된다. 2008년 Kokut는 소수성 기판에 콘젯 모드를 이용하여 콜로이드 현탁액을 배열하였다[13]. 2009년 Nguyen는 노즐의 외부에 전도성 코팅을 하는 것이 노즐의 내부에 코팅하는 것보다 더 안정적으로 토출 되고 잉크가 노즐을 타고 올라가는 현상도 더 적은 것으로 확인하였다[11]. 2014년 Ko는 안정적인 콘젯 모드를 이용하여 10 μ m급 고성능 미세전극 패턴을 구현하였다[14].

위와 같이 EHD 프린팅 기술을 응용하여 고해상도 패턴을 제작하고자 하는 많

은 연구가 진행되고 있다. 하지만 지금까지 전기수력학적 프린팅 기술에 대한 연구는 공정 변수들에 대한 최적화하는 연구이거나, 공정 변수들에 대한 경향성을 찾는 연구가 중심으로 이루어졌다. 또한, 전기수력학적 프린팅 기술을 이용하여 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세전극 패턴 제작에 관한 연구 및 패턴 성능 평가에 관한 연구가 부족한 실정이다.

본 논문에서는 앞서 기술한 배경을 토대로 전기수력학적 프린팅 기술을 응용하여 $5\mu\text{m}$ 급 선폭을 갖는 미세 전극패턴을 형성하는 방법을 제시하였고, 전기수력학적 패터닝 헤드를 장착한 전기수력학적 미세전극 패터닝 시스템을 개발하여 공정 실험을 통해 $5\mu\text{m}$ 급 미세 전극패턴을 구현하고자 하였다. 또한, 제작된 패턴의 선저항 측정을 통하여 전극 패턴으로써 사용 가능여부를 확인하였다.

II. 전기수력학적 프린팅 기술

전기수력학적 프린팅 기술은 잉크에 주입된 전하에 의해 유발되는 정전기적 상호 인력을 바탕으로 기관 상에 패턴을 행하는 기술이다. 잉크 내에 정전기 반발력을 이용하여 분산되어 있는 입자들과 동일한 전하를 주입함과 동시에 기관 상에 반대 전극을 설치하여, 노즐과 기관 상에 형성된 고전압에 의해 유도된 잉크 내 분산 미립자들에 의해 기관 상에 패턴을 형성할 수 있다[15]. 전기수력학적 프린팅 기술은 미세 패턴에 장점을 가지고 있어 산업체에 적용하는 연구도 최근 활발히 진행되고 있다.

산업체에서 요구되고 있는 패턴성능의 요구조건은 5 μm 급의 패턴선폭과 패턴길이 100 μm 당 100 Ω 의 전극패턴 저항이 확보되어야 하고 잉크에 의한 노즐의 막힘 현상이 없이 공정이 진행되는 신뢰성 측면이다. 기존 상용화 기술인 잉크젯 프린팅 기술의 미세전극 패턴선폭 구현은 10 μm 에서 30 μm 까지 구현이 가능하다는 연구결과가 있다. 하지만 50cps 이상의 점도와 10 μm 이하의 선폭구현이 힘들어 5 μm 급 미세전극 패턴 제작에는 한계가 있다. 기존 기술의 한계를 극복할 수 있는 전기수력학적 프린팅 기술은 노즐에 정전기력을 인가하여 전하와 전기장에 의해 노즐 끝단의 유체를 분리시켜 토출 시키는 방법으로, 고점도·고함량 잉크를 적용하여 미세전극의 높은 전도도를 확보할 수 있고 노즐 직경보다 미세한 토출이 가능하고 노즐 막힘 현상이 적고 토출된 액적의 직진성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

이 장에서는 전기수력학적 프린팅의 노즐 끝단에서 형성되는 메니스커스의 안정적인 토출을 위한 주요변수인 인가전압과 공급유량에 대한 이론적 배경과 이에 따른 메니스커스의 제어모드를 바탕으로 토출모드의 분석과 공정 기술을 적용하고자 하였다.

1. 전기수력학적 프린팅 공정 원리

전기수력학적 프린팅 기술은 전기장과 유체 내의 유도된 전하와의 상호 작용을 통해 전기력 방향으로 유체를 이동시켜 노즐 오리피스(Nozzle orifice)를 통해 미세한 액적으로 분무 또는 토출 시킬수 있는 기술이다[4]. 정전기력을 통한 유체의 분무나 토출은 1500년대 Gilbert가 저서 “de Magnate”에서 전기에 의한 물방울이 변형되는 현상을 보고하였고, 1882년 Rayleigh는 전자장 내에서의 액체의 불안정성을 명시하였다[16]. 1914년 Zeleny는 유체에 전기를 직접 인가하여 액적의 분사를 최초로 실험하였고[17], Taylor는 1964년 유체의 정전분무(Electrospray) 현상을 발견하고, 테일러 콘 젯(Taylor cone jet)에 관하여 기술하였다[18].

수정

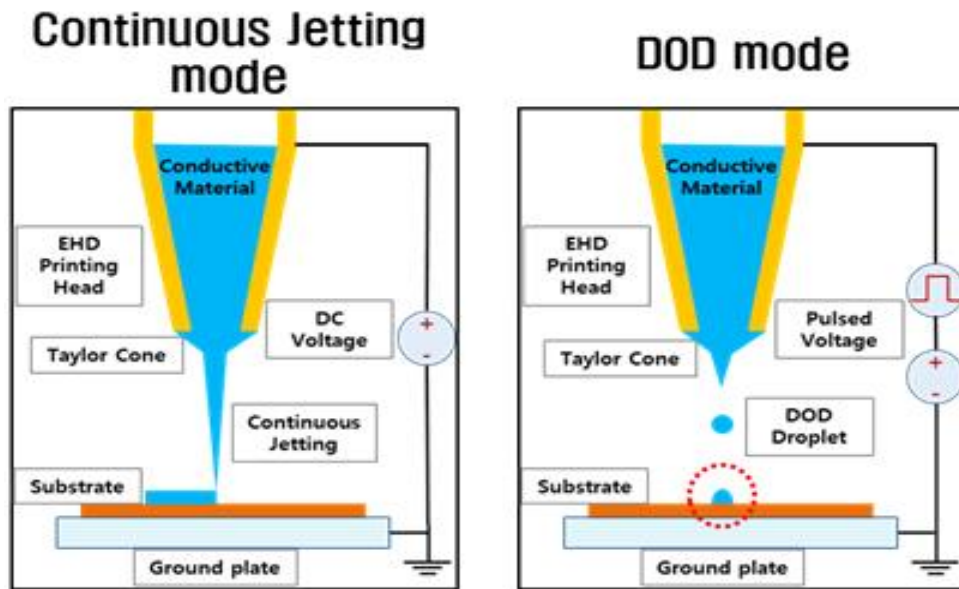


Fig. 1 Discharge mode of Continuos and DOD

전기수력학적 프린팅 기술에 의한 액적 토출 현상을 이용한 패턴 공정은 Fig. 1과 같이 DOD(Drop on dememand) 모드와 연속토출(continuos jet) 모드로 구분할 수 있다. 전기수력학적 프린팅 헤드의 DOD 모드의 액적 토출은 고전압을 펄스 형태로 출력하여 헤드의 인가하는 방식으로 dot 형태의 패턴을 보여주며, 주파수에 따라 빈도 제어가 가능한 특징이 있다. 반면, 직류 형태의 연속토출 모드

는 메니스커스의 이동 현상을 연속적으로 발생시켜 노즐 끝단에서 잉크의 테일러 콘 켓 형성을 통한 연속적인 패터닝이 가능하여 연속적인 패턴을 형성할 수 있는 특징이 있다.

1) 메니스커스 형성 및 토출 원리

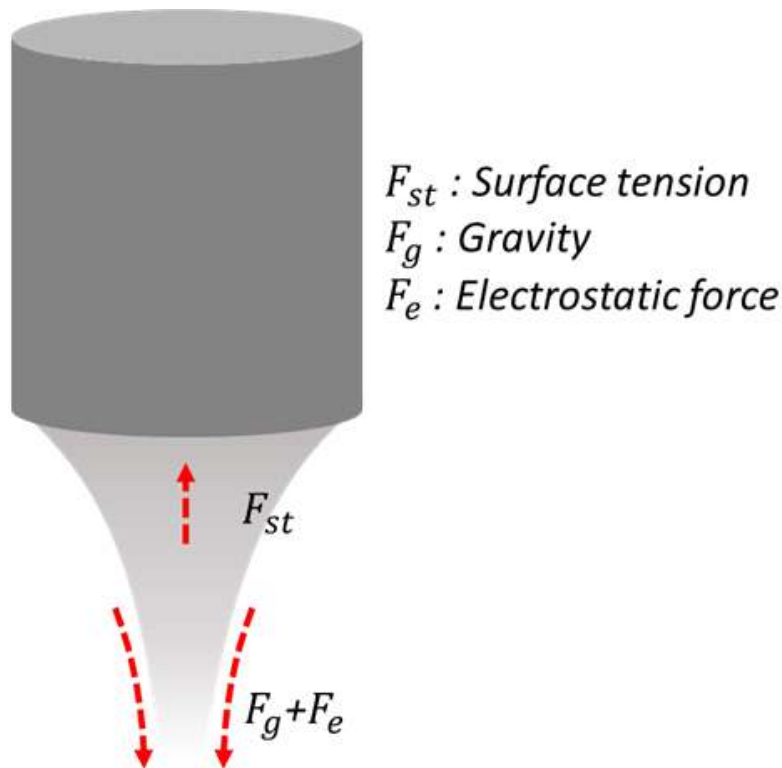


Fig. 2 Discharge principle of electrohydrodynamic printing

Fig. 2는 전기수력학적 프린팅 공정의 토출 원리를 나타낸다. 일정한 유량으로 잉크 공급장치를 통해 공급된 잉크에 고전압을 인가하면 메니스커스가 형성되며 인가전압과 주입되는 압력에 의하여 다양한 형상으로 변하게 되는데 이러한 현상은 노즐 오리피스에 전기장이 집중되는 현상으로 설명이 가능 하다. 그림은 메니스커스 형성에 작용하는 힘에 따른 노즐 오리피스의 전기장 집중현상을 나타내며, 식 (2-1)은 이때 노즐 오리피스에 형성되는 전기장의 세기 E_e 에 대한 방정식을 나타낸다. 여기서 V_c 는 노즐의 인가전압, r_c 와 d 는 각각 토출구의 외경, 토

출구와 전극 사이의 거리이며[4, 5, 19], 토출구의 전기장은 인가전압이 크고, 노즐 직경이 작을수록 커진다.

$$E_c = \left(\frac{2V_c}{r_c \ln(4d/r_c)} \right) \quad (2-1)$$

식 (2-2)는 식 Smith 경계조건을 기반으로 정전기력 액적 토출에 필요한 정전기력 E_{on} 를 나타낸다. 여기서 γ 는 용액의 표면장력, θ 는 테일러 콘 젯의 토출각, ϵ_0 는 유전율, r_c 는 토출구의 외경을 나타낸다[20].

$$E_{on} \approx \sqrt{\left(\frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{\epsilon_0 r_c} \right)} \quad (2-2)$$

공정조건에 따라 정전기력 분사에 필요한 전기장 V_{on} 을 식 (2-1)과 (2-2)를 통하여 (2-3)과 같이 유도할 수 있으며 θ 는 토출각 49.3° 를 적용하였다[4, 21].

$$V_{on} \approx \ln\left(\frac{4d}{r_c}\right) \cdot \sqrt{\frac{r_c \gamma \cdot \cos\theta}{2\epsilon_0}} = 2 \times 10^5 \cdot \ln(4d/r_c) \cdot \sqrt{r_c \gamma} \quad (2-3)$$

또한 Ganan-Calvo의 Scaling-law를 통하여 입자의 크기 d_0 와 입자의 전하량 q 를 정의하면 각각 식 (2-4), (2-5)의 방정식으로 나타낸다. 여기서 Q 는 용액공급유량, K 는 용액의 전도율을 나타내고, 미세액적의 불안정성에 대한 분열이 발생하는 임계값은 Rayleigh stability limit로 나타낸다[4, 22, 23, 24].

$$d_0 = 3.78\pi^{-2/3} Q^{1/2} \left(\frac{\rho \epsilon_0}{\gamma K} \right)^{1/6} \quad (2-4)$$

$$q \approx 0.7 \left[8\pi(\epsilon_0\gamma R^3)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2-5)$$

식 (2-4), (2-4)와 같이 용액의 물성치를 배제할 경우 초기 액적의 크기를 좌우하는 변수는 용액의 공급 유량과 인가전압으로 분무되는 미세액적의 크기를 제어할 수 있다.[21, 25, 26, 27].

2) 전기수력학적 프린팅 모드 제어

전기수력학적 프린팅 기술의 메니스커스 모드 분류에 대해 설명하고자 한다. 안정적인 토출을 위해서는 각각의 메니스커스 모드를 이해하는 것은 매우 중요하고 필요에 따라서 다르게 적용할 수 있어야 한다. 전기수력학적 프린팅 모드는 인가전압, 공급유량, 잉크, 노즐타입, 등의 공정 조건의 조정을 통하여 Fig. 3과 같이 Dripping mode, Microdripping mode, Spindle mode, Multi-spindle mode, Cone-jet mode, Oscillating-jet mode, Precession mode, Multi-jet mode로 변화하게 된다.

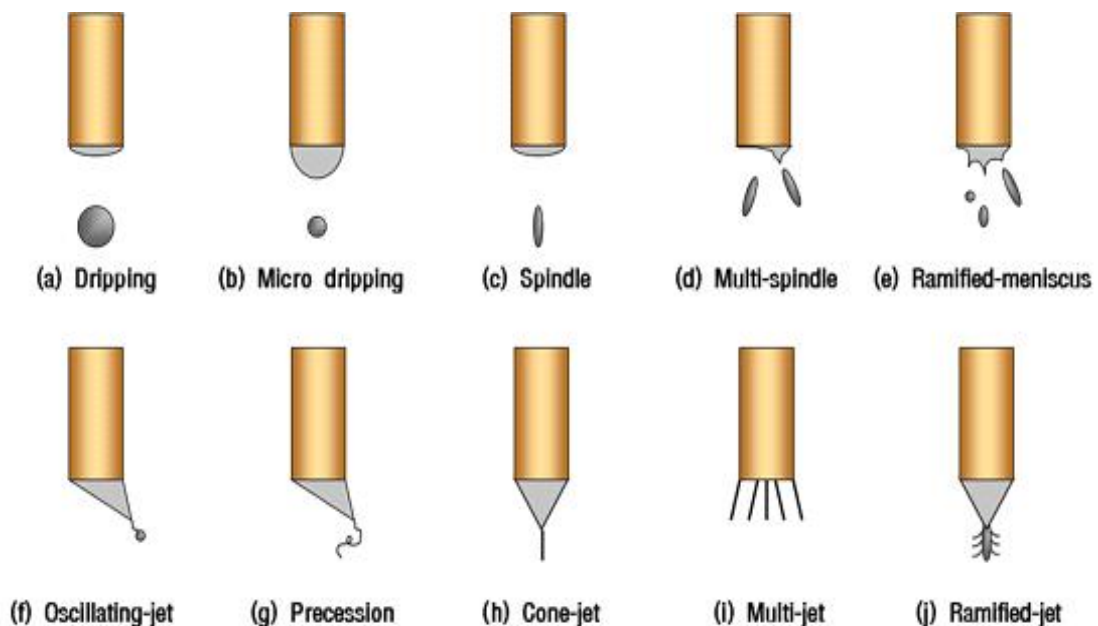


Fig. 3 Discharge mode of electrohydrodynamic printing

전기수력학적 프린팅 헤드를 통하여 미세패턴을 토출하기 위해서는 테일러 콘 젯에서 안정적인 토출이 가능하고 헤드에서 메니스커스의 제어/유지를 통해 테일러 콘을 형성할 수 있다. 테일러 콘 젯을 기반으로 안정적인 미세 액적을 토출할 수 있고, 이를 기반으로 미세패턴의 토출이 가능하다. 따라서 공정 변수 조건에 따른 토출 모드의 분석이 필요하다. 전기수력학적 프린팅 헤드를 통하여 고성능 미세전극을 구현하기 위해 인가전압에 따른 Dripping 모드와 Cone-jet 모드, Multi-jet 모드를 확인하였고, 안정적인 미세전극 패턴 형성을 위해 Cone-jet 모드를 유지하는 것이 필요함을 보였다.

(1) Dripping 모드

Dripping 모드는 일반적으로 전압이 인가되지 않은 상태로 중력에 의해 발생하는 것과 차이가 없다. 일정한 유량을 공급하게 되면 노즐 끝부분에 메니스커스가 커지게 되고 그 무게가 유체의 표면장력보다 커지게 되면 액적이 토출 되는 형태이다. Dripping 모드는 전기장의 영향의 거의 없고 전하의 공급을 늘리게 되면 노즐 끝 부분의 메니스커스가 점점 작아진다.

(2) Microdripping 모드

Microdripping 모드는 Dripping 모드에서 전하의 공급을 높이면 나타나는 형태로 노즐 직경보다 작은 액적이 노즐 끝단에 형성된다. 메니스커스에서 액적이 분리될 때, 메니스커스의 흔들림이 발생하지 않으며 액적이 분리된 후 메니스커스가 일정하게 유지된다.

(3) Spindle 모드

Spindle 모드는 두꺼운 젯과 같이 전기장의 방향으로 구의 형상이 아닌 기둥모양의 액적이 토출 되는 현상이다. 유량의 증가에 의해서도 발생되며, 일반적으로 유체에 과잉 공급된 전하를 넓은 표면적을 통하여 토출되는 현상으로 젯과 동시에 나타나기도 한다. 전압이 증가함에 따라 메니스커스는 커지는 반면에 토출 액적은 작아지고 주변에 위성액적이 생겨 패턴닝이 목적이라면 피해야 하는 모드이다.

(4) Multi-spindle 모드

Multi-spindle 모드는 대부분 고점도 소재에서 발생하며 Spindle 모드와 매우 유사하나 Spindle 모드에 비해 젯의 발생하는 비율이 높고 스프레이도 함께 발생한다. 또한, 액적이 전기장을 벗어난 형태로 토출이 되기도 한다.

(5) Cone-jet 모드

Cone-jet 모드는 메니스커스가 Cone의 모양의 형태고 Taylor cone 이라고 부른다. 토출모드 중 가장 안정적인 미세액적을 토출할 수 있고 메니스커스 끝 부분에서 미세한 액적으로 분리된다. 메니스커스의 각이 커질수록 액적의 크기가 증가하며, 전압이 증가함에 따라 토출 직경은 작아지고 거리는 짧아진다.

(6) Oscillating-jet 모드

Oscillating-jet 모드는 전압 및 유량의 증가에 따라 젯이 나타나는 현상이다. 하지만 토출이 안정적이지 않고 메니스커스의 떨림이 발생하여 불균일한 액적이 토출된다. 토출되는 액적 중, 작은 액적들은 기관으로 토출되지 않고 다시 메니스커스로 올라가기도 한다.

(7) Precession 모드

Precession 모드는 메니스커스가 나선형의 모양으로 생성되며 토출되는 현상이다. 나선형으로 토출되는 젯은 끝부분에서 작은 액적들로 분리되며 노즐 끝단에서 회전하게 되며 전압이 증가할수록 회전속도가 빨라진다.

(8) Multi-jet 모드

Multi-jet 모드는 전하의 과잉공급이 일어나게 되면 콘 형태가 사라지면서 노즐에서 여러 개의 작은 젯이 발생한다. Multi-jet 모드는 젯의 형태가 불안정하게 계속 바뀌게 되어 안정적인 상태로 토출을 유지하기 힘들다.

III. 전기수력학적 프린팅 시스템

5 μ m급 미세전극 패턴 구현을 위해서는 헤드에 고속스위칭이 가능한 고전압 시스템, 정밀 유량공급 장치, 토출을 실시간으로 확인할 수 있는 모니터링 시스템 등의 안정적인 메니스커스를 확보할 수 있는 전기수력학적 프린팅 시스템이 필요하다. 안정적인 실험을 위해 시스템 구성은 전기수력학적 프린팅 시스템부와 전기수력학적 패터닝 헤드부로 나누어 설계 및 제작하였다. 5 μ m급의 미세전극 실험을 위해 1 μ m급 이하의 정밀 이송 스테이지 및 이송 반복 정밀도 확보를 위해 제작하였다. 공정 중 진동 발생은 안정적인 메니스커스를 유지하는데 있어 중요한 요소이다. 헤드의 높은 토출 안정성을 유도하기 위해 기판 이송축을 2축으로 통합하고 헤드는 수직 나노 스테이지를 도입하여 헤드의 진동 및 오차를 최소화하여 제작하였다. 전기수력학적 프린팅 헤드는 기존의 전기수력학적 헤드의 패턴의 불균일, 위상액적 등의 문제를 개선하고 토출 안정성을 높이기 위해 내부 전극의 위치를 헤드 중심에 위치시켜 헤드 내부의 소재에 균일한 전기장이 형성될 수 있도록 개발하였다. 그리고 헤드 내부 전극의 위치를 상·하 위치제어 기능을 추가하여 헤드 내부에 인가되는 전기장의 세기를 바꿀 수 있도록 설계하였으며, 잉크의 메니스커스를 안정적으로 제어하기 위해 시린지 펌프와 분해능 -0.1kPa을 갖는 전자식 공압 제어기를 연동하여 제어하였다. 실시간으로 액적을 측정하기 위해 실시간 모니터링 시스템과 모든 시스템을 제어할 수 있는 통합 제어 프로그램을 개발하였다.

1. 미세전극 패터닝용 전기수력학적 헤드 개발

5 μ m급 이하의 미세전극 패턴을 구현하기 위해 500nm의 분해능, ± 300 nm의 반복정밀도의 고성능 전극위치 제어 모터를 추가하여 전극홀더의 상·하 위치 제어기능을 구현하였다. Fig. 4와 같이 정전기력을 인가하는 내부 전극을 헤드 중심에 위치시켜 헤드 내부의 소재에 균일한 전기장이 형성될 수 있고 헤드 내부

전극 위치를 상·하 제어하여 소재에 인가되는 전기장의 세기 및 분포를 바꿀수 있어 보다 낮은 에너지로 토출이 가능하도록 제작하였다.

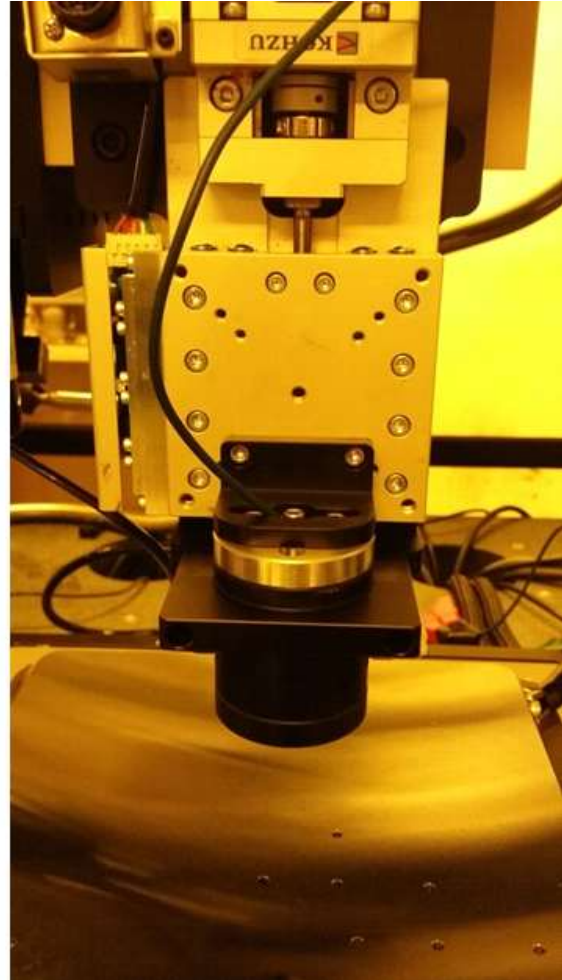
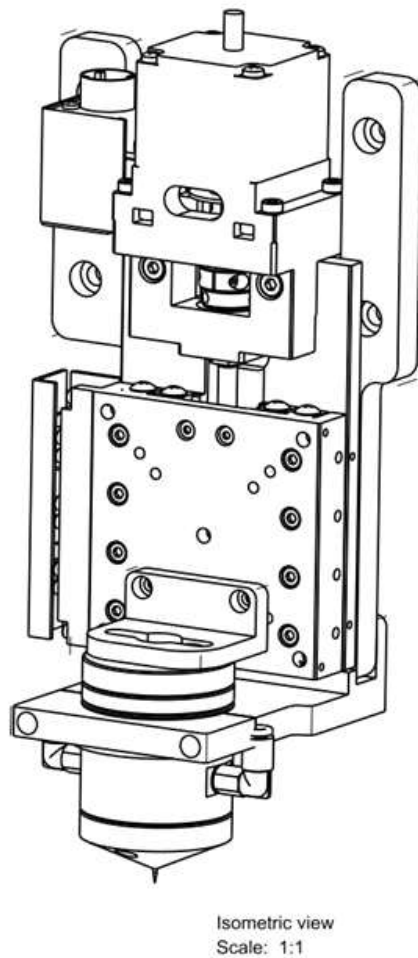


Fig. 4 Electrohydrodynamic printing head for microelectrode

전기수력학적 프린팅 헤드의 구성은 Fig. 5. (a)와 같이 챔버부, 전극 제어부, 노즐부로 3가지 파트로 세척에 용이하게 설계하였다. 챔버부는 잉크챔버, 전극 얼라이너로 이루어져 있고 잉크챔버와 공압챔버를 일체형으로 설계하여 라인을 간소화 시켰으며 챔버 내부에 센터 얼라이너를 설계하여 Fig. 5. (b)와 같이 내부 전극의 중심을 맞추어 공정의 안정성 및 재현성을 확보할 수 있도록 제작하였다. 전극 제어부는 전극홀더, 전극 상·하 가이드, 내부전극, 전극 실로 이루어져 있다. 내부 전극은 sus재질로 제작하여 구부림이나 떨림을 방지하였으며, 잉크챔버와

정밀공차를 주어 내부 전극의 중심을 일치시키고 내부전극의 상·하 위치제어까지 가능하도록 제작하였다. 또한 전극 홀더와 전극 상·하 가이드 사이에 전극 씰(seal)이 내부전극을 잡아줌으로써 공정 중 전극이 빠지지 않도록 제작하였다. 노즐부는 글라스 홀더, 글라스 실, 글라스 케필러리로 이루어져 있다. 글라스 홀더와 글라스 실은 정밀공차를 주어 글라스 케필러리가 헤드 중심에 위치시킬 수 있게 설계하였고, 글라스 실은 글라스 케필러리 고정 및 용액이 새는 것을 방지하는 역할을 한다. 헤드에서 토출되는 미세 액적의 크기는 노즐 직경에 비례하기 때문에 5 μ m급의 미세전극 패턴 구현을 위하여 Fig. 5. (c)과 같이 미세전극 조작용을 이용하여 내경 10 μ m의 글라스 케필러리를 자체 제작하였다.

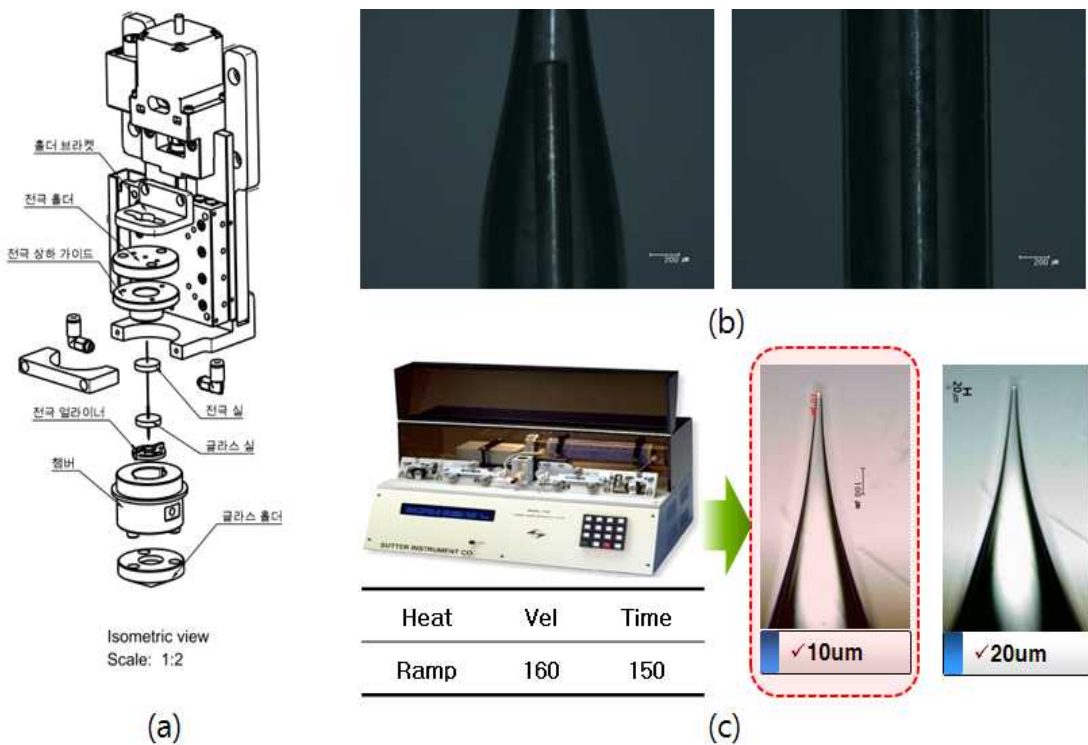


Fig. 5 Configuration of electrohydrodynamic printing head

2. 전기수력학적 프린팅 공정 시스템 개발

5 μ m급의 미세전극 제작을 위한 전기수력학적 프린팅 시스템은 정전기력을 이용하여 다양한 재료를 전기수력학 기반의 헤드를 통해 기판 위로 패터닝 하기 위한 공정 시스템이다. 전기수력학적 프린팅 시스템은 Fig. 6와 같이 모듈 단위의 시스템으로 구성된다. 전기수력학적 프린팅 시스템의 모듈 구성은 전기수력학적 프린팅 헤드(EHD head), 고전압 발생장치(high voltage amplifier), 시린지 펌프(syringe pump), 전자식 공압 제어기(electronic air controller), 2축 정밀 이송장치(2-axis stage), 나노급 Z축 이송장치(nano Z-axis stage), 함수발생기(function synthesizer), 실시간 모니터링 시스템(real-time monitoring system), 통합 공정 제어 소프트웨어(Integrated process control software)로 구성되었다. 전자식 공압 제어기는 필터를 통과시킨 드라이 에어를 주입하여, 전자식 레귤레이터에 대한 제어 신호 및 최종 센서 출력에 대한 모니터링 신호를 받아 제어된다. 실시간 모니터링 시스템은 공정 모니터링 카메라와 토출 모니터링 카메라로 구성된다.

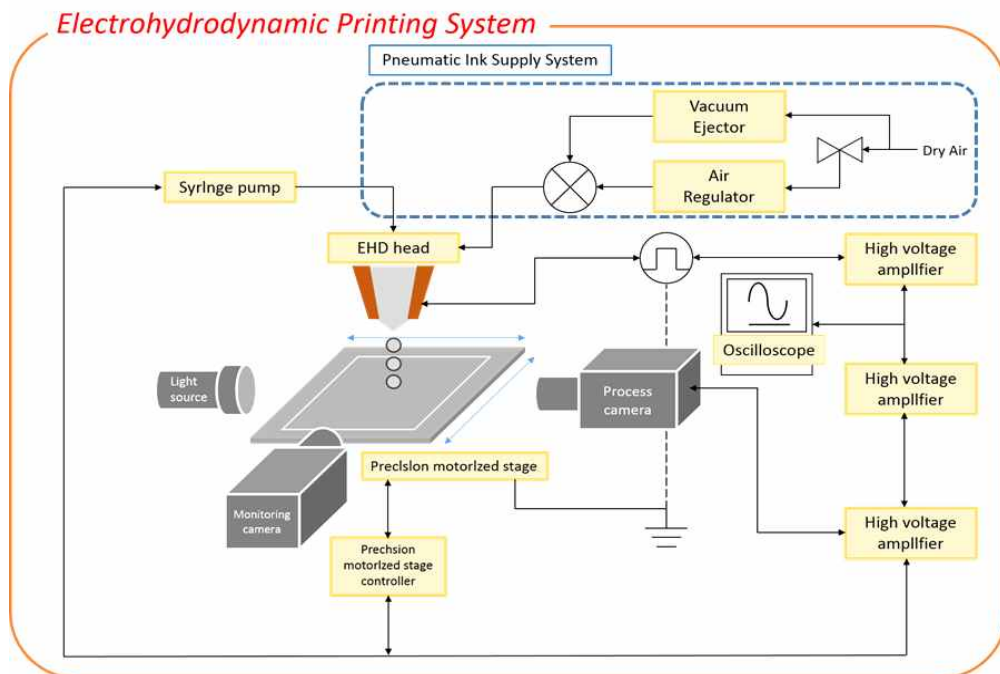


Fig. 6 System configuration of electrohydrodynamic printing head

1) 전기수력학적 프린팅 시스템 테스트 베드 및 이송부 개발

5 μ m급의 미세전극 패턴 제작을 위해 공정 중 진동으로 인한 메니스커스의 변형을 최소화 시키기 위해 Fig. 7와 같이 X-Y-Z축에 대한 1 μ m급 이하의 정밀 이송부와 테스트 베드를 설계하였다. 정밀 이송 스테이지는 3축 젠트리 타입 이송 구조로 설계되었으며, 하부 기재의 2D(X-Y축), Z축 방향으로 헤드가 이송될 수 있도록 하였다. 스테이지의 이송 정밀도, 반복 정밀도, 이송 속도를 고려하여 상판 정밀도와 흡착시의 플레이트 변형을 최소화 시키는 설계 구조로 고정밀 스테이지를 개발하였다. Fig. 8와 같이 흡착 플레이트는 S45C 탄소강에 크롬도금 처리를 하였으며 연삭 가공을 통해 5 μ m이하의 평탄도를 가지며 흡착 홀을 500 μ m의 미세 흡착 홀로 구성하였다.

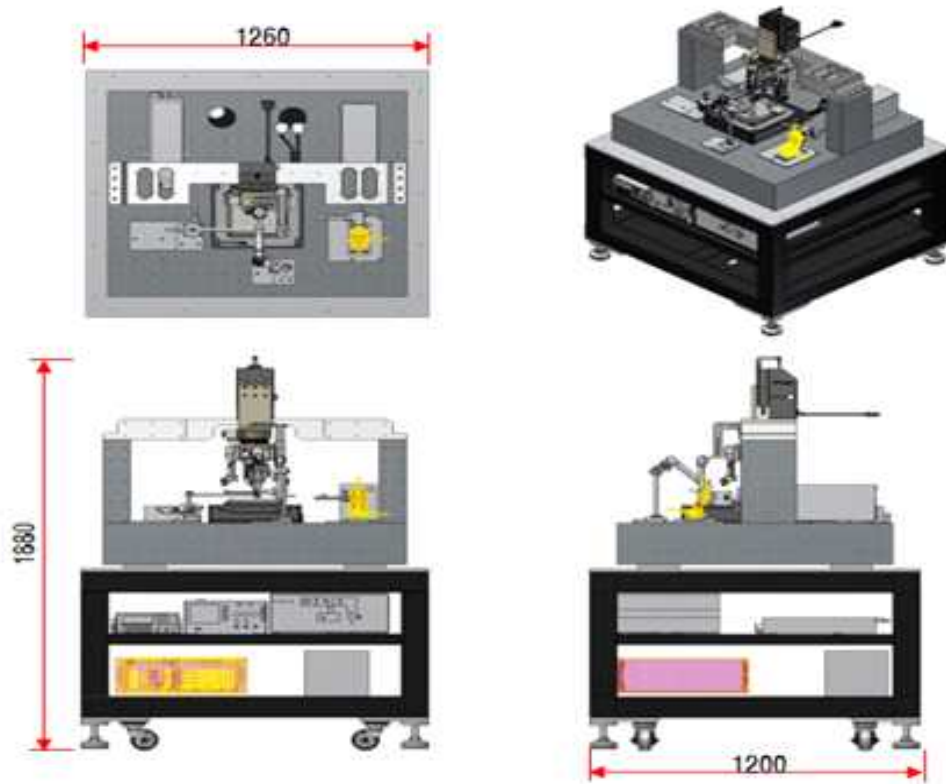


Fig. 7 Test bed design of electrohydrodynamic printing system



Fig. 8 Sunction plate design for X-Y-Z micro transfer stage shaft and substrate fixing

2) 미세전극 패터닝용 고전압 공급 시스템

미세전극 패터닝 변수 중 인가전압은 매니스커스의 모드와 안정성을 제어하기 위한 매우 중요한 변수이다. 고전압 공급 시스템은 Fig. 9와 같이 고전압 발생장치(high voltage amplifier), 임의 파형 발생장치(function generator),와 발생하는 전압을 모니터링 할 수 있는 오실로스코프(osilloscope)로 구성되며. 임의 파형 발생장치를 통한 파형의 출력펄스를 고전압 증폭모듈의 입력으로 전달하고 이를 원하는 형태로 증폭하여 헤드의 전극으로 공급할 수 있도록 구성하였다. 임의 파형 발생장치는 0~10Vdc 사이의 임의 파형 생성 및 전달이 가능하며, 1mHz~10MHz 주파수 제어가 가능하고, 이를 고전압 발생장치에서 700V/us의 slew rate로 0~10kVdc 범위의 고속 스위칭이 가능하여 노즐 끝단에 생성되는 매니스커스 제어에 용이하다.

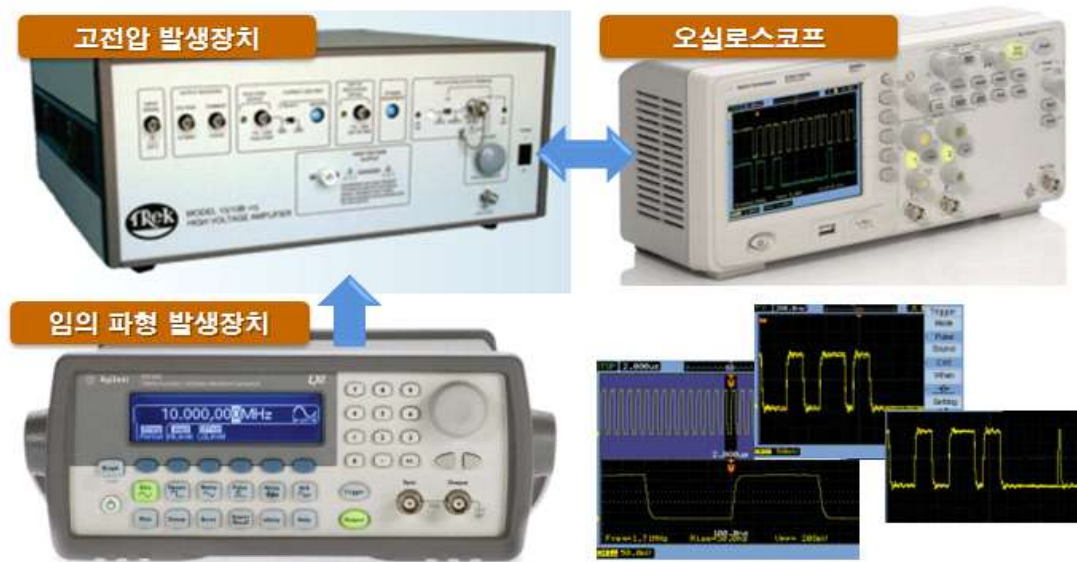


Fig. 9 Configuration of high-voltage supply

3) 전자식 정밀 공압 잉크 제어 장치 개발

전기수력학적 프린팅 헤드를 통하여 토출되는 $5\mu\text{m}$ 급의 미세액적 체적을 계산하면 fl 급 소재가 헤드에서 토출됨과 동시에 정밀하게 공급되는 고정밀 소재 공급 장치가 요구된다. 기존의 시린지 펌프를 통해 잉크를 밀어내는 방법은 시린지 펌프가 일정한 압력으로 밀어준다고 하여도 $0.1\mu\text{l/hr}$ 로 미세액적 토출에 필요한 정밀도를 만족하지 못하기 때문에 유량이 일정하지 않게 된다. 제주대학교 연구팀의 연구에 의하면 적절한 메니스커스를 형성 및 제어하고 공급되는 유량을 일정하게 하기 위해서 정밀 공압 잉크 제어장치를 설계하였다[28]. Fig. 10 같이 기존의 기계식 정밀 공압 잉크 제어장치 모듈에서 레귤레이터의 수동제어로 인하여 설정 반복성의 한계를 해결하기 위해 실시간 제어가 가능한 전자식 제어방식으로 변경한 전자식 정밀 공압 잉크 제어장치 모듈을 개발하였고 개발 사양은 Table. 1와 같다. 기계식 레귤레이터에 의한 공압량 제어기능을 전자식 레귤레이터로 교체하여 외부 콘트롤러에 의한 제어가 가능하도록 구성하였고 통합 제어 시스템으로 피드백이 가능한 압력센서를 적용하여 전자식 레귤레이터의 정밀 제어가 가능하도록 개발하였다.

Table 1. Specifications of electronic precision pneumatic control unit

구분	성능	구분	성능
전원	IN:AC 220V, OUT:DC 12V	압력 표시 범위	-100~900kPa
정압 제어 범위	0~900kPa	압력 제어 분해능	0.1kPa
차압 제어 범위	0~-88kPa	비고	Serial통신 가능

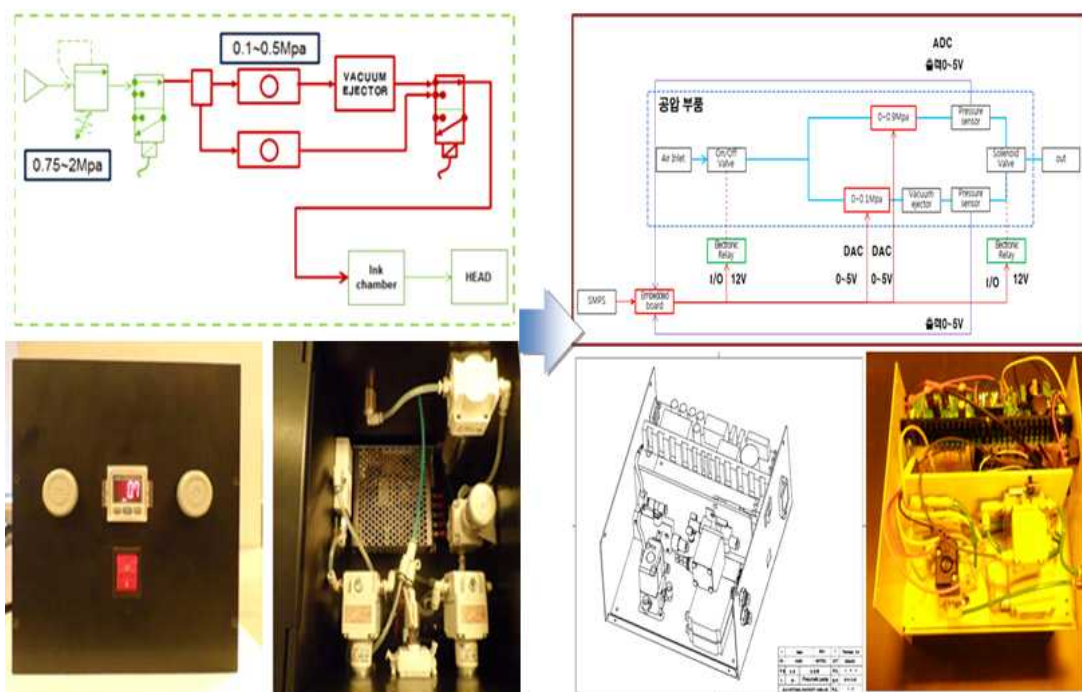


Fig. 10 Design and development of electronic supply module

4) 실시간 모니터링 시스템

5um급의 미세전극 패터닝을 위해서는 공정상태를 실시간으로 모니터링 하여 메니스커스 및 공정의 거동을 확인하여 공정 피드백이 가능한 실시간 공정 모니터링 시스템이 필요하다. Fig. 11 같이 전체적인 공정 진행 과정을 실시간으로 확인하기 위해서 메니스커스를 확인하고 노즐과 기관간의 이격거리 및 토출된

액적의 접촉각을 측정할 수 있는 토출 모니터링 카메라와 제어 프로그램 상에서 공정상황을 실시간으로 확인 가능한 공정모니터링 카메라로 구성된다.

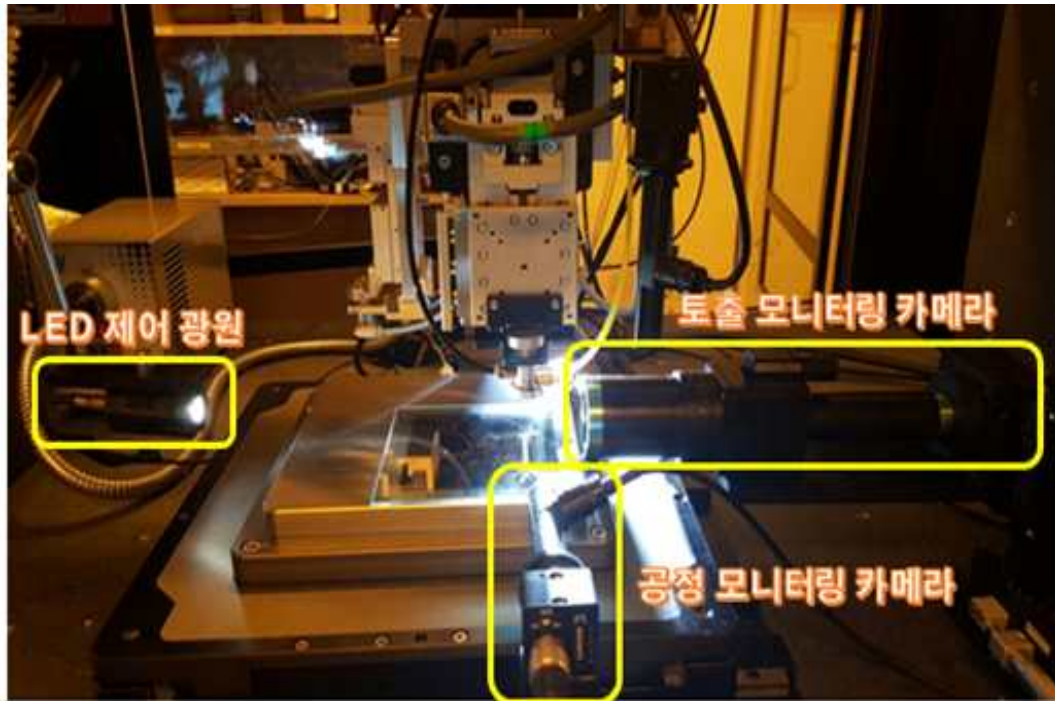


Fig. 11 Real-time monitoring system

Fig. 12와 같이 공정 모니터링 카메라는 미세전극 패터닝 공정의 세부 진행정도를 실시간으로 확인하고 공정 중간에 발생하는 현상을 확인하여 공정을 개선할 수 있다. Fig. 13와 같이 토출 모니터링 카메라는 기판에 토출된 용액의 접촉각 산출을 통하여 기판 대응성을 확인할 수 있으며 접촉각에 따라서 적합한 기판 및 기판의 후처리 여부를 결정하여 공정의 안정성을 확보할 수 있다. 전기수력학적 패터닝 공정에서 노즐과 기판간의 이격거리는 토출결과에 영향을 미치는 중요한 공정변수이다. Fig. 14와 같이 10um의 간격으로 표시하여 사용자가 모니터를 보면서 쉽게 간격을 조정이 가능하며 반복 공정에서 균일한 결과를 확보할 수 있다.

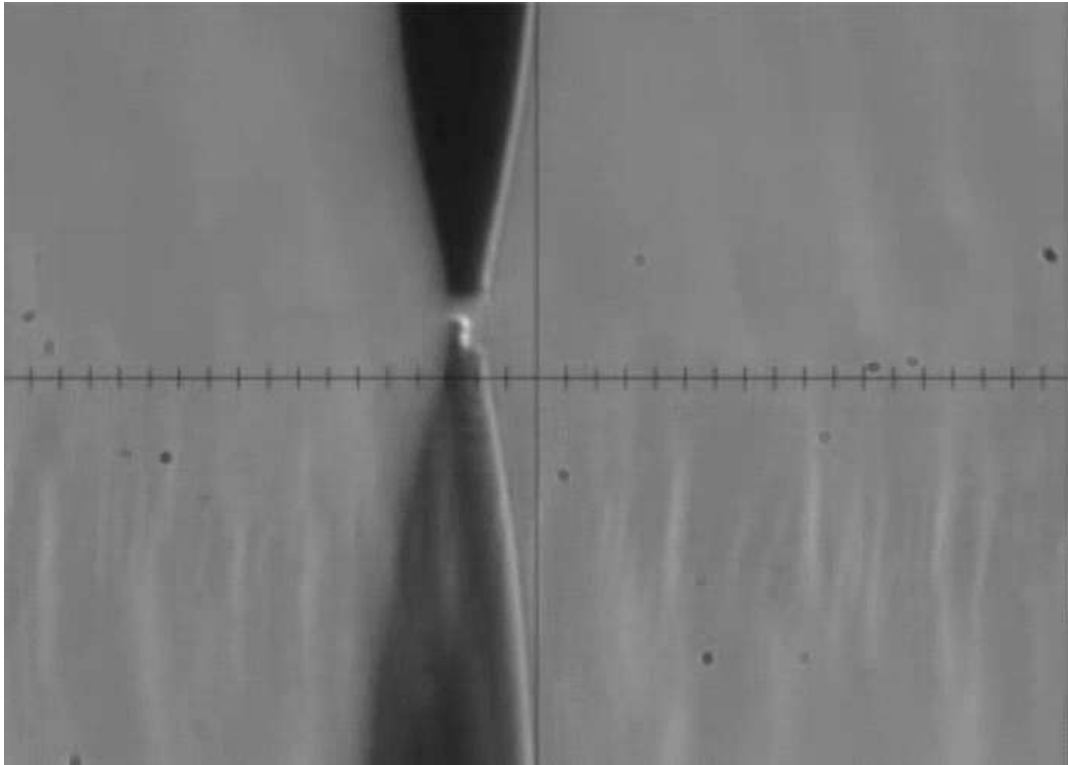


Fig. 12 Process monitoring camera

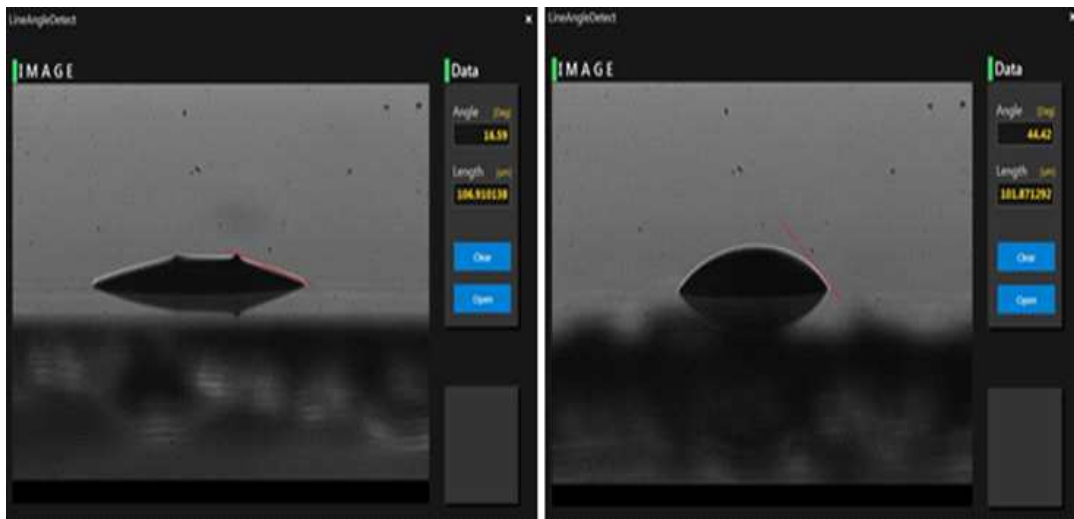


Fig. 13 Material contact angle calculation Program

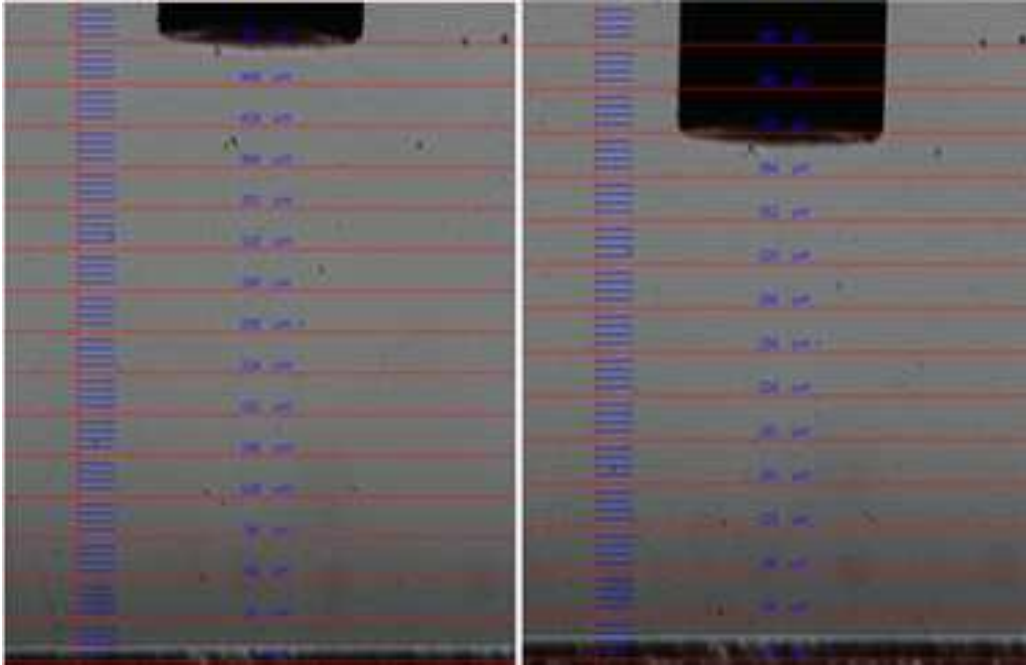


Fig. 14 Distance measurement program between nozzle and substrate

5) 통합 공정 제어 소프트웨어 개발

미세전극 제작을 위한 통합 공정 제어 소프트웨어는 크게 고전압 제어부, 모니터링부, 잉크공급 제어부, 이송부 4가지로 구성되었고 소프트웨어는 C# 기반의 그래픽 프로그래밍 언어로 개발되었다. 고전압 제어부를 통해 토출 모드를 직류, 펄스, 싱글펄스로 설정할 수 있으며, 주파수와 파형의 듀티사이클과 듀티비를 제어할 수 있도록 구성하였다. 그리고 정밀 이송 스테이지의 좌표 값을 인코딩하여 원하는 패턴과 소자를 제작할 수 있도록 개발하였다. 통합 공정 제어 소프트웨어의 인터페이스 및 기능은 Fig. 15, 16, 17와 Table. 2, 3, 4로 나타내었다.

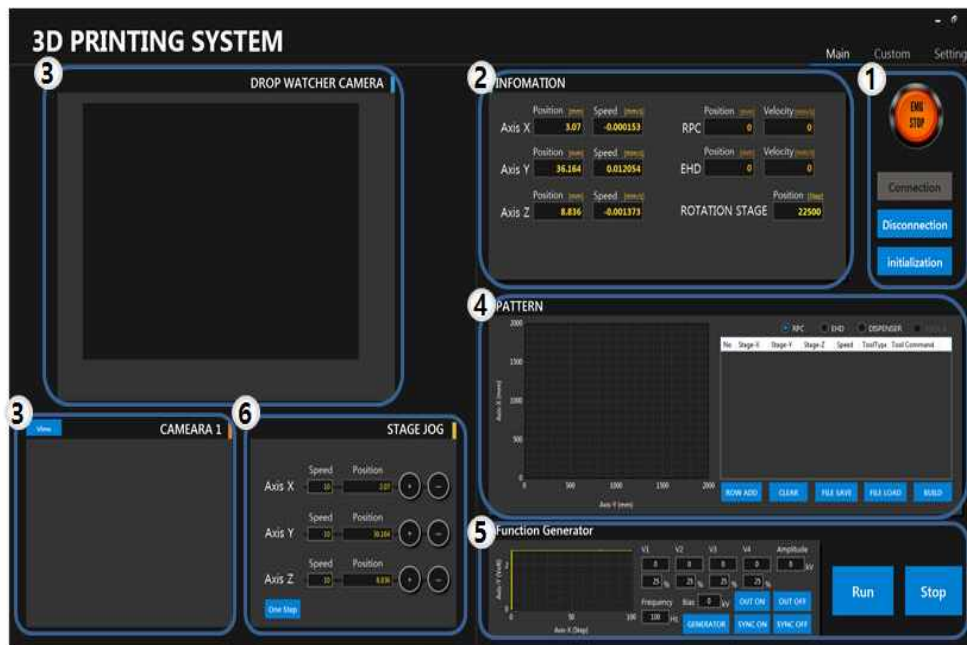


Fig. 15 Integrated process control software (main mode)

Table 2. Explanation of integrated process control software(main mode)

구분	통합 공정용 소프트웨어(Main mode) 기능 설명
1	공정을 위한 하드웨어-소프트웨어 연결, 연결 차단, 초기화, 비상 정지 제어
2	기재의 X-Y축, 헤드의 Z축과 헤드의 회전축, EHD의 전극 위치, reciprocating의 니들 위치에 대한 각 스테이지의 현재 좌표와 공급값의 실시간 변화 값을 표시함
3	토출 모니터링, 공정 모니터링과 열라인 비전의 온라인 이미지를 표시함
4	사용자에 의해 입력된 패턴에 대한 좌표 데이터를 프로그램 상에서 읽고 이를 X, Y좌표 그래프에 표시함
5	함수 발생기를 통해 생성되는 파형의 형태, 주파수, 전압값에 대한 설정 및 파형값을 설정함
6	기재의 X-Y축, 헤드의 Z축을 속도에 맞춰 이송가능한 스테이지 조그

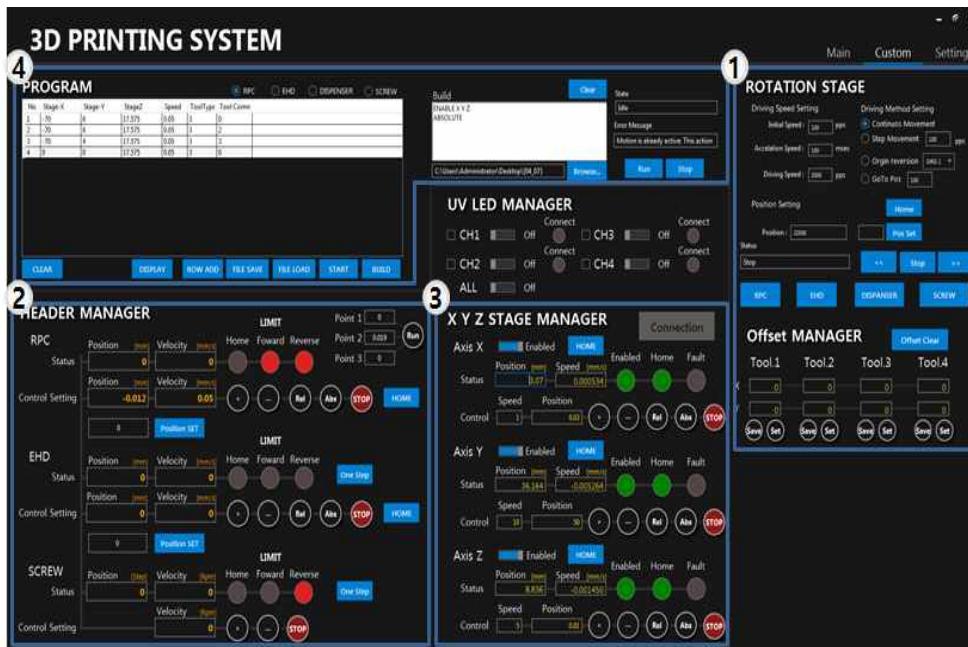


Fig. 16 Integrated process control software (custom mode)

Table 3. Explanation of integrated process control software(Custom mode)

구분	통합 공정용 소프트웨어(Custom mode) 기능 설명
1	헤드 로테이션 스테이지 회전 방식, 회전 속도, 원점 복귀, 공정 헤드 선택 등 로테이션 스테이지 세부 설정
2	EHD의 전극 위치, 이송 속도 등 좌표 및 설정에 대한 위치 제어
3	3축(X, Y, Z)에 대한 수동 이동 제어 및 속도, 좌표 설정에 대한 정밀 위치 제어와 스테이지 상태 확인
4	헤드에 대한 패턴 작성 및 사용자가 사전에 작성된 패턴 파일을 읽어 서 패턴과 소자를 제작

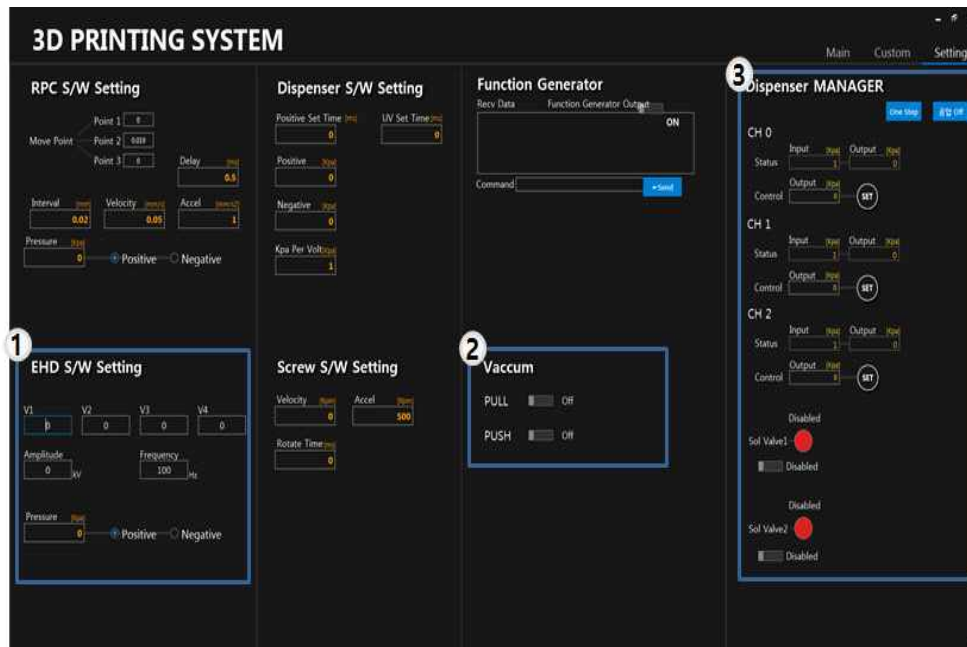


Fig. 17 Integrated process control software (setting mode)

Table 4. Explanation of integrated process control software (Setting mode)

구분	통합 공정용 소프트웨어 (Setting mode) 기능 설명
1	패턴입력 프로그램 작동 시, EHD 설정 및 파형값 설정
2	Vaccum 스테이지 설정
3	전자식 정밀 공압 잉크 제어장치의 정/차압 스위칭, 미세 압력값 설정 과 설정 압력값의 출력값 확인

IV. 미세전극 패터닝 공정 실험 및 결과

본 연구에서는 5 μ m급 미세 전극패턴 구현을 위하여 전기수력학적 프린팅 시스템과 전기수력학적 프린팅 헤드를 적용하여 미세전극 패터닝 공정 실험을 진행하였다. 미세전극 패터닝 토출 공정에서 고려되어야 할 변수는 기관의 표면상태, 소재특성, 헤드이송속도, 메니스커스 제어 등이 있고, 각 변수에 의해 제어 가능한 안정적인 메니스커스 형성이 가장 중요한 요소이다. 먼저 소재 특성과 기관 표면상태, 스테이지 이송속도 등은 잉크의 특성인 점도, 표면장력, 건조특성, 캐리어의 종류는 잉크의 성능과 시스템 및 헤드에 따라 고려되어야 할 점이다. 메니스커스의 제어는 인가전압, 공급공압, 노즐과 기관간의 이격거리, 주파수, 헤드 이송속도 등에 의해 미세 전극 패터닝폭을 제어할 수 있다.

안정적인 메니스커스의 형성과 미세전극 패터닝 구현을 위해 주요 공정 변수인 인가전압, 공급 공압 2가지를 공정 변수로 설정하였으며, 메니스커스 형성에 가장 큰 영향을 미친다. 주파수와 이송 스테이지 속도는 초기 실험을 통하여 고정하여 미세전극 패터닝 실험을 진행하였다.

안정적인 토출 모드 구간을 설정하기 위해 인가전압에 따른 토출 모드를 확인하였고 가장 안정적으로 미세액적을 토출 시킬 수 있는 cone-jet구간의 전압을 설정한 뒤 공급공압으로 미세전극 패터닝의 균일도를 제어하였다.

공정 변수에 따른 미세전극 패터닝 실험을 통해 고점도 전도성 잉크에 대한 최적 미세액적 토출 조건을 도출하였으며 5 μ m급 미세전극 패터닝을 구현하였다. 추가로 미세전극 리페어 공정에 응용 가능성을 확인하고자 단선회로 기관을 제작하였고 미세전극 패터닝 공정을 통하여 단선회로를 리페어 하여 패터닝의 선저항 측정을 통해 실제 응용 가능성을 확인하였다.

미세전극 패터닝 공정을 위해 함량 60wt%, 점도 300cps의 Ag 파티클 기반의 고점도 전도성 잉크를 사용하였고, 사이즈 10cm \times 10cm, 두께 500 μ m의 유리기관을 사용하였다. 잉크에 대한 물성치는 Table. 5와 같이 나타내었다.

Table 5. Specifications of AgNP

PG-007			
Silver Contents	60wt%	Size	average 100nm
Viscosity	300cp	Curing Temp	< 150°C
Surface Tension	50mN/m	Adhesion	5B
Vehicle	glycols	Washing	Water&alcohol
Conductivity	3mΩ/sq/mil	Storage	Room Temp

1. 공정변수에 따른 미세전극 패터닝 실험

전기수력학적 프린팅 시스템을 이용하여 메니스커스 제어를 통한 미세전극 패턴의 성능과 5 μ m 이하의 선폭 확보를 위해 인가전압, 공급압력을 제어하는 실험을 진행하였으며, 모든 실험에서 적용된 동일한 공정 변수 조건은 초기 공정실험을 통하여 노즐과 기관간의 이격거리 50 μ m, 헤드이송속도 2mm/s, 토출 주파수 100Hz로 고정하여 실험을 진행하였다. 노즐과 기관간의 이격거리는 노즐과 기관사이의 거리가 높아질수록 전기장의 세기가 약해지면서 더 많은 에너지 즉 고전압을 필요로 하게 되고 위성액적 및 토출 불균일 현상이 발생한다. 낮은 이격거리에서 낮은 에너지로 안정적인 토출을 위해서 이격거리 10 μ m에서 100 μ m에 대한 초기 실험을 진행하였다. 노즐과 기관간의 이격거리에 대한 실험 결과, 40 μ m 이하에서는 Fig. 18. (a)와 같이 스파크가 발생하여 노즐이 탄화되거나, Fig. 18. (b)와 같이 메니스커스가 기관과 접촉이 되는 액적 퍼짐 현상이 발생하였으며, 100 μ m에서는 토출이 불가능하였다. 본 실험의 결과를 토대로 노즐과 기관간의 이격거리는 50 μ m가 가장 적절함을 확인하였고, 이후 모든 실험은 50 μ m의 이격거리를 사용하였다.

토출 주파수는 전기수력학적 프린팅 헤드 내에 주기를 갖는 펄스를 인가하여 토출 주기를 결정하는 공정변수이다. 기존 산업체에서 요구 되고 있는 공정속도 2mm/s 이상이다. 요구되고 있는 공정속도에서 라인패턴을 형성하기 위해 헤드이송속도 2mm/s으로 고정시키고 토출주파수 40Hz에서 20Hz씩 100Hz까지 증가시

키면서 실험을 진행하였다. 실험결과 결과 토출 주파수가 증가할수록 패턴선폭은 감소하였지만 차이가 근소하였고, 70Hz 이상에서 라인 패턴닝이 형성되었으며, 100Hz에서 비교적 안정적인 라인 패턴닝이 형성되는 것을 Fig 19, 20을 통해 확인하였고, 공정조건은 Table. 6와 같이 나타내었다.

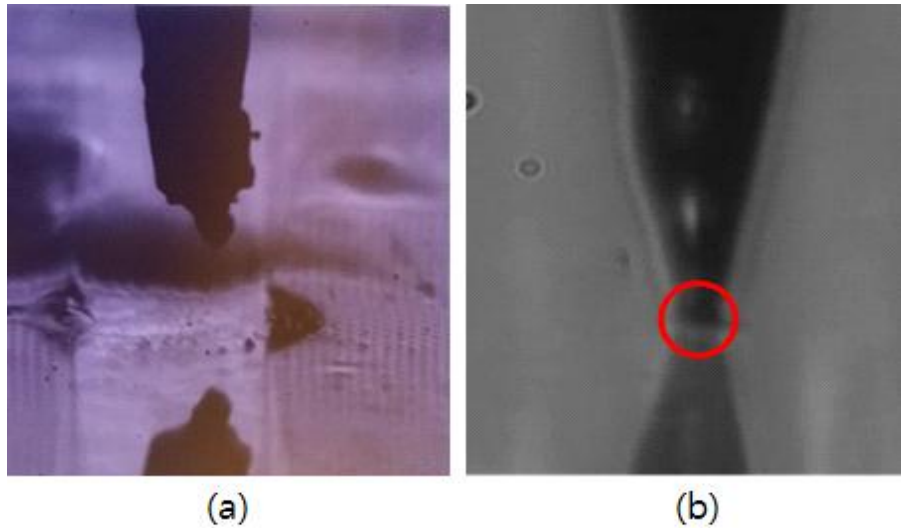


Fig. 18 (a)Phenomenon of carbonized nozzle (b)Contact nozzle and substrate

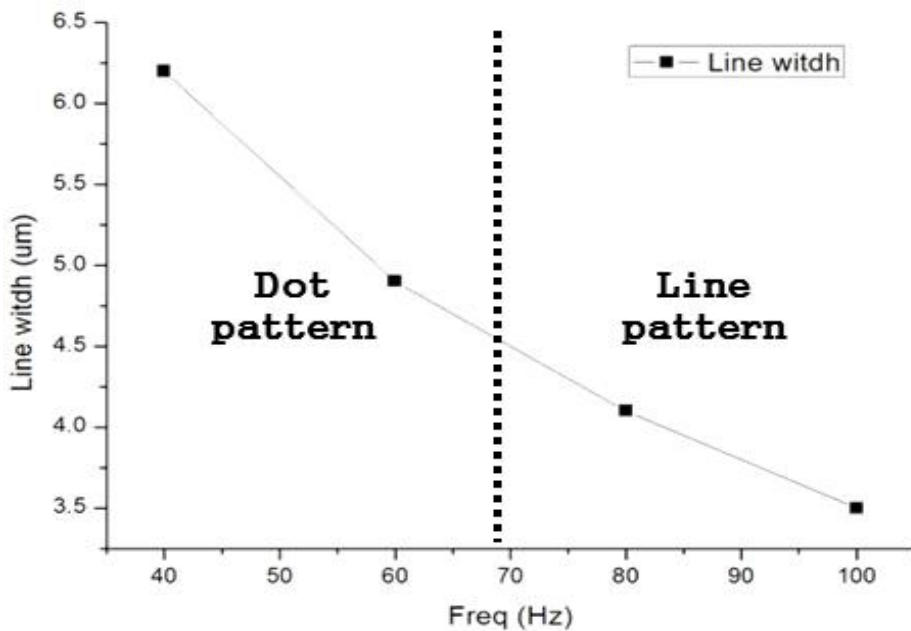


Fig. 19 Line width V_s discharge frequency

Table 6. Experiment parameters on the discharge frequency

변수	설정값
패터닝 속도	2mm/s
토출 주파수	40Hz, 60Hz, 80Hz, 100Hz
인가전압	0.6kV
소재 공급압력	0.2kPa
노즐-기재간의 간격	50um

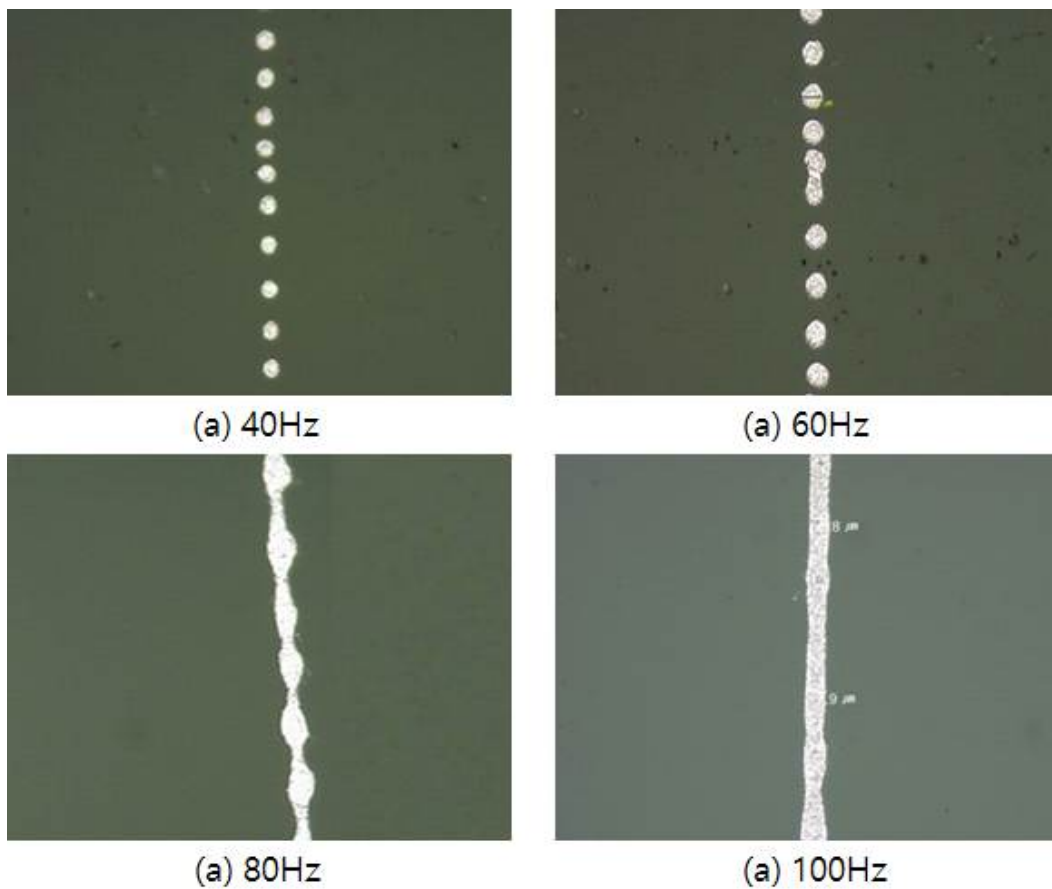


Fig. 20 Images of line pattern according to discharge frequency

1) 인가전압에 따른 토출 실험

5 μ m급의 미세전극 패터닝을 위해 인가전압에 따른 패터닝 실험을 진행하였다. 전압에 따른 미세전극 토출 실험을 통해 가장 안정적으로 미세액적을 형성할 수 있는 cone jet mode를 찾고자 하였다. cone jet 모드가 테일러 콘 젯이 안정적으로 형성되어 토출 공정을 잡기 수월하기 때문이다.

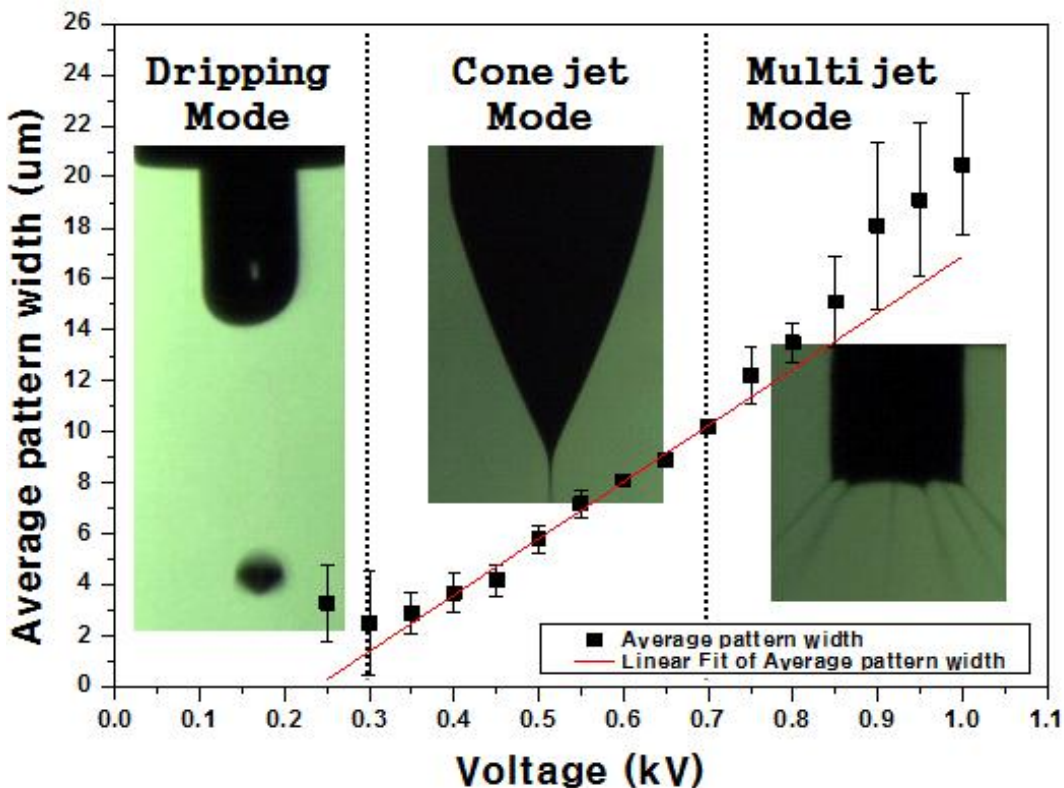


Fig. 21 Average pattern width V_s applied voltage

인가전압에 따른 미세전극 패터닝 실험은 공급 압력 0.2kPa, 헤드 이송속도 2mm/s, 노즐과 기판간의 이격거리 50 μ m, 토출 주파수 100Hz로 설정하였고, 공급 압력은 비어있는 노즐 내부에 잉크를 공급하기 위하여 정압으로 설정하였으며, 인가전압 0.1kV에서부터 0.05kV씩 1kV까지 증가시키면서 실험을 진행하였다. 전도성 잉크의 패터닝 실험결과 Fig. 21 같이 그래프로 나타나며, 실험결과 잉크의 토출 시작점은 0.25kV이었고, 0.75kV이후에는 메니스커스가 스프레이 되

는 Multi jet mode가 나타났으며 0.3kV이전에는 Dripping mode가 나타났기 때문에 실질적으로 패터닝이 가능한 인가전압은 0.35kV에서 0.7kV 까지 임을 알 수 있었다. 인가전압에 따른 미세전극 패터닝 후 패턴의 선폭 측정 결과는 그림과 같이 나타내었고, 선폭에 따라 3가지 토출 모드로 분석하였다.

Dripping mode는 인가전압 0.3kV이하에서 형성되었고, 메니스커스에 미치는 에너지양이 작아지면서 유량과 중력에 의한 액적의 토출 현상으로 해석할 수 있다. Cone jet mode는 인가전압 0.35kV에서 0.7kV까지 형성되었고, 테일러 콘 젯이 가장 안정적으로 형성되어 패턴 선폭 3 μ m에서 10 μ m까지 패턴선폭을 얻을 수 있었다. Multi jet mode는 인가전압 0.75kV이후에서 형성되었고, 인가전압이 증가함에 따라 메니스커스의 형태가 스프레이로 변화하고 토출량이 증가하면서 테일러 콘 젯이 형성되지 않고 넓게 퍼져 분무되는 방식이다. 인가전압에 따라 선폭은 선형적으로 증가하였지만 미세전극 패터닝에는 적합하지 않고 토출이 안정화 되지 않아서 오차범위가 크다.

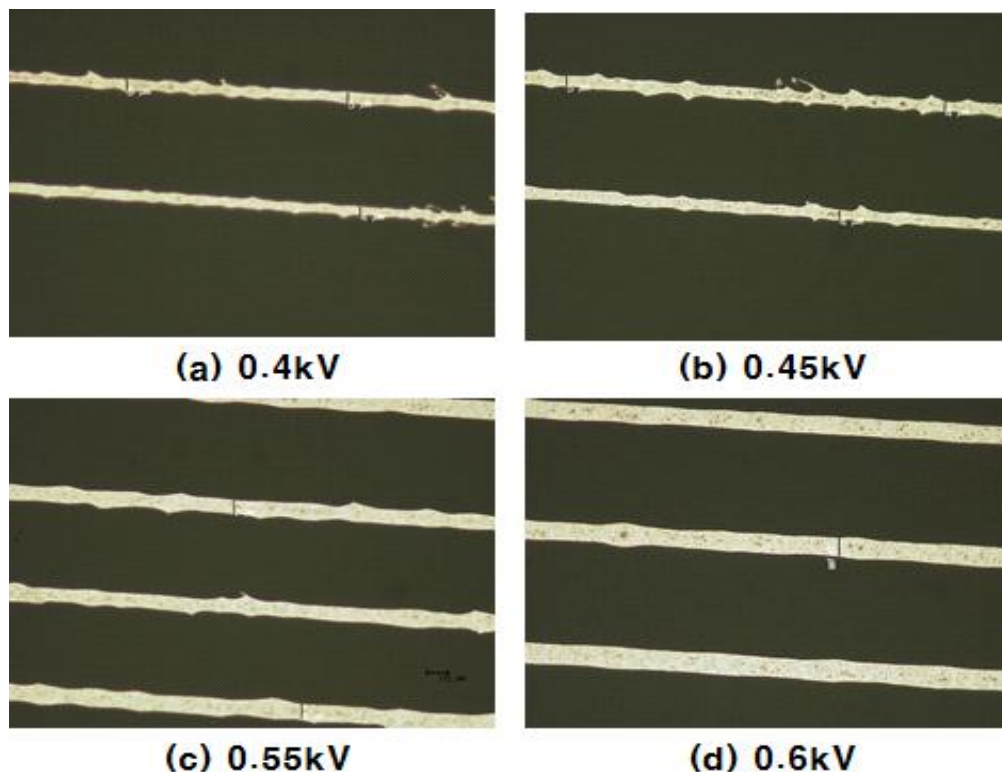


Fig. 22 Images of pattern according to applied voltage

인가전압에 따른 패터닝 실험결과 인가전압 0.35kV에서 0.7kV까지 테일러 콘젯이 가장 안정적인 cone jet mode가 형성되었고 3 μ m에서 10 μ m까지 패턴 선폭을 얻을 수 있었다. 하지만 Fig. 22 같이 0.6kV이상의 전극패턴은 비교적 균일한 토출이 가능하였지만 0.55kV이하의 전극패턴에서는 cone jet 모드에서 토출되는 토출량보다 유량공급량이 높아 토출도중 메니스커스가 유량이 쌓여 중복 토출되는 구간에서 선폭의 편차가 발생하였다. 인가전압 0.4kV에서는 표준편차 ± 0.825 , 인가전압 0.6kV에서는 표준편차 ± 0.195 로 선형적으로 감소함을 알 수 있었다. 인가전압이 증가할수록 토출량이 많아지기 때문에 토출량과 유량공급량이 일치하기 시작하는 지점 0.6kV에서부터 토출모드가 변하는 지점인 0.7kV까지 균일한 패턴을 확인할 수 있었다.

2) 공급압력에 따른 토출 실험

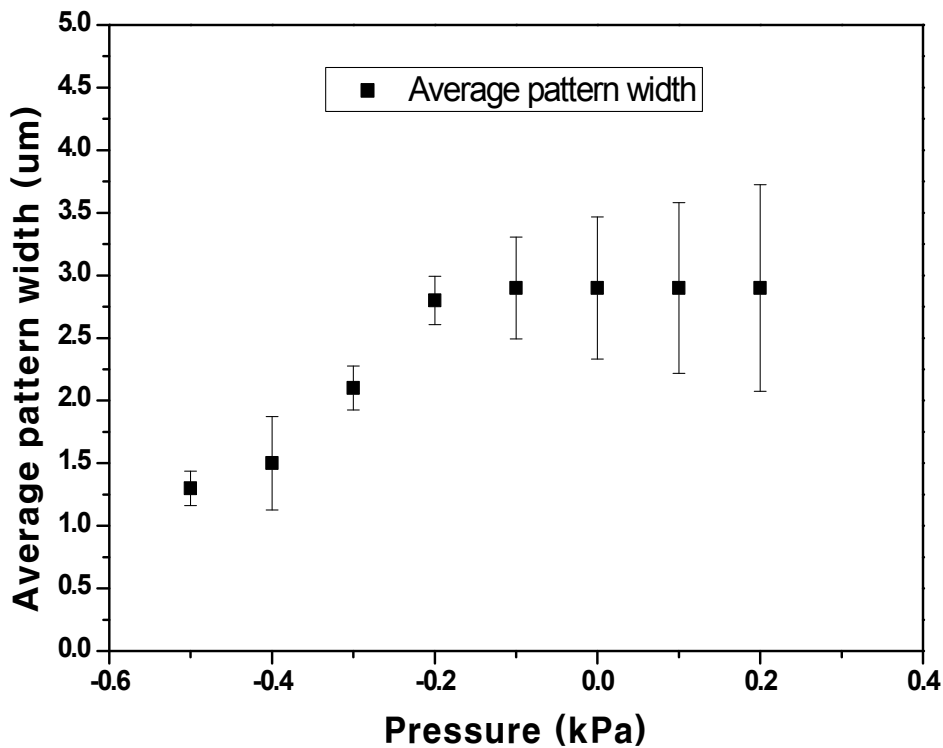


Fig. 23 Average pattern width V_s pressure

인가전압에 따른 패터닝 실험에서는 0.35kV와 0.7kV사이에서 안정적인 매니스 커스 형상과 테일러 콘젯 형태를 확인하였고, 0.6kV에서 0.7kV까지 8 μ m급의 균 일한 미세전극 패턴 선폭을 구현하였다. 궁극적으로 5 μ m급의 균일한 미세전극 패턴을 구현하고자 공급압력에 따른 패터닝 실험을 진행하였다.

노즐압력에 따른 미세전극 패터닝 실험은 Fig. 23의 그래프와 같이 cone jet mode에서 최소 액적 토출이 가능한 인가전압 변수 0.35kV에서 공급압력 0.2kPa 정압부터 0.1kPa씩 감소시키면서 -1kPa 차압까지 패터닝을 진행하였다. 공급 공 압 -0.5kPa에서 -0.8kPa 범위에서는 토출 모드가 변하여 패턴 구현이 되지 않았 고, -0.8kPa 이상에서는 토출이 이루어지지 않으므로 변수에서 제외하였다. 공급 압력이 감소할수록 패터닝 선폭이 선형적으로 감소함을 알 수 있었고, 공급압력 -0.2kPa에서는 패턴 선폭이 3 μ m로 형성되었다. 공급압력 -0.5kPa에서는 패턴선 폭이 1.6 μ m까지 감소하였지만 Fig.24와 같이 패턴이 균일하지 않고 위성액적이 발생하여 미세전극 패터닝에는 적합하지 않음을 확인할 수 있었다. 공급공압에 따른 미세전극 패터닝 실험결과 선폭의 변화는 공급공압 0.2kPa일 때 평균패턴 선폭 3.48 μ m 표준편차 \pm 0.825에서 평균패턴선폭 3 μ m, 표준편차 \pm 0.194까지 평균 패턴선폭 13.8%, 표준편차 76.5%의 감소율을 보이고 표준편차가 크게 감소함을 보였다.

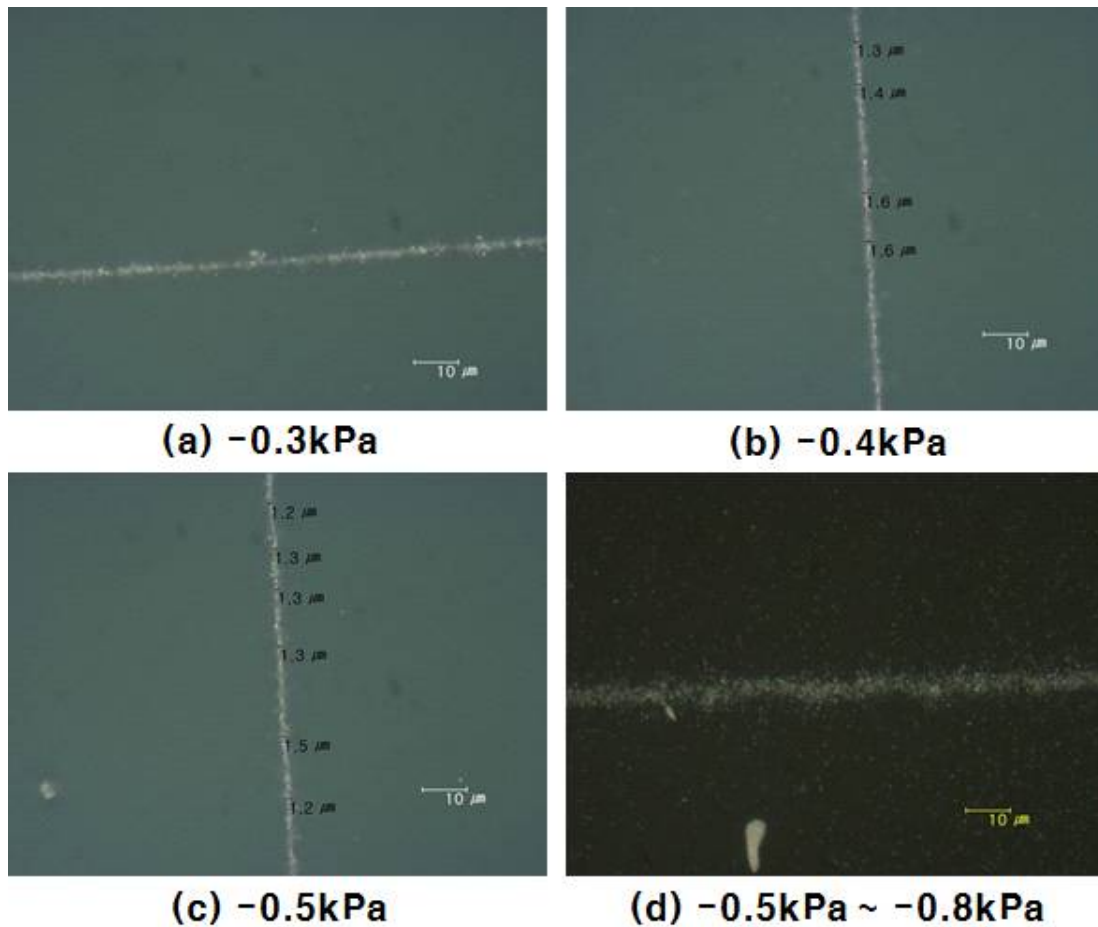


Fig. 24 Images of non-uniform pattern according to pressure

3) 미세전극 패턴 결과 평가

5 μ m급의 미세전극 패터닝을 위해 전기수력학적 프린팅 헤드의 인가전압, 공급 공압 변수에 대한 최적 공정 조건에 대한 실험 결과 인가 전압 0.35kV, 공급 압력 -0.2kPa에서 선폭 3 μ m, 표준편차 ± 0.194 를 갖는 균일한 패턴을 구현하였다. 패턴선폭은 Fig. 25와 같이 광학현미경(optical microscope)로 100배율에서 측정하였고 더 자세한 패턴선폭의 확인을 위해서 Fig. 26와 같이 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM)으로 각각 1000배율, 3000배율, 5000배율, 10000배율에서 측정하였다.

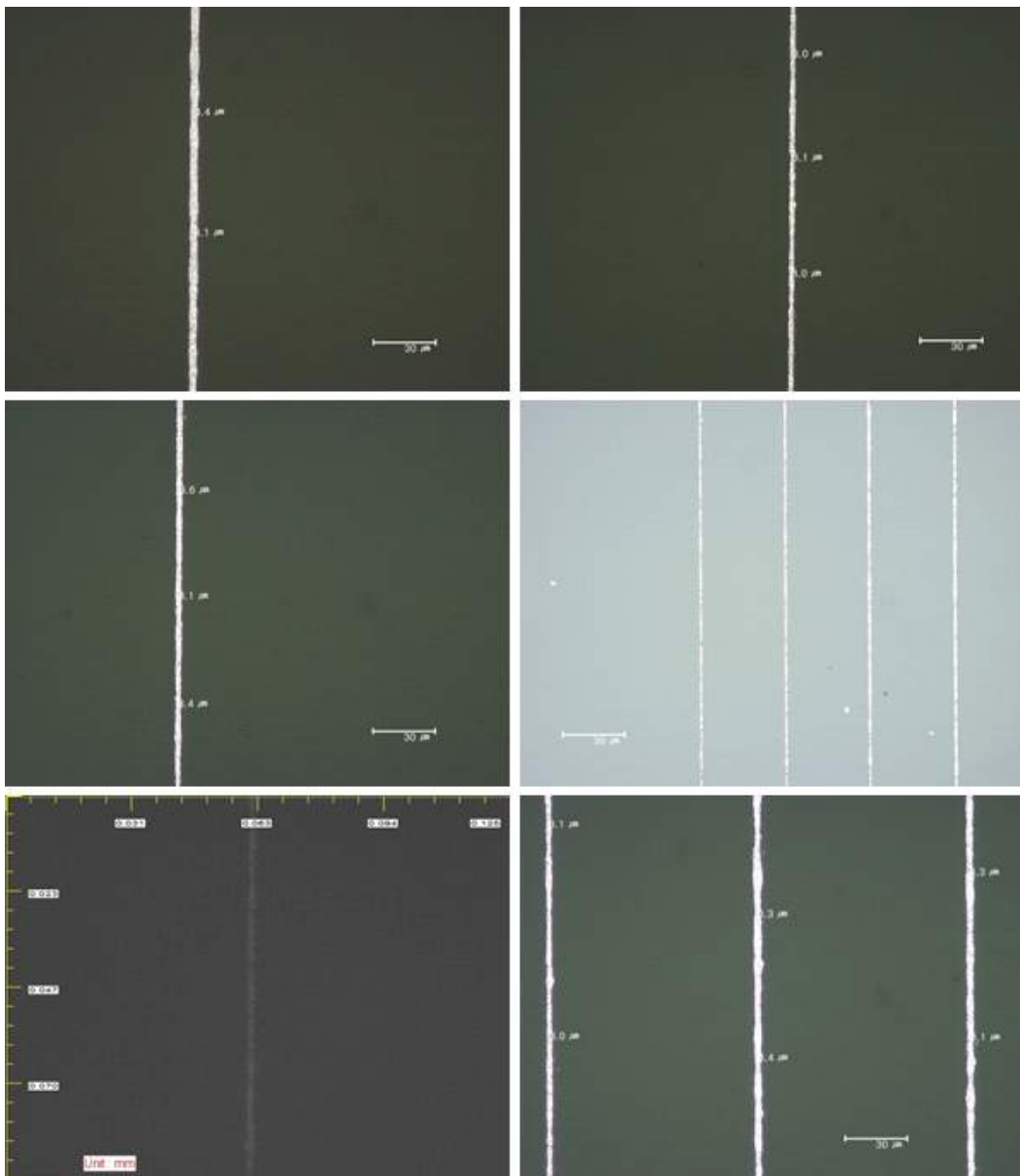


Fig. 25 Images of microelectrode pattern less than 5 μm

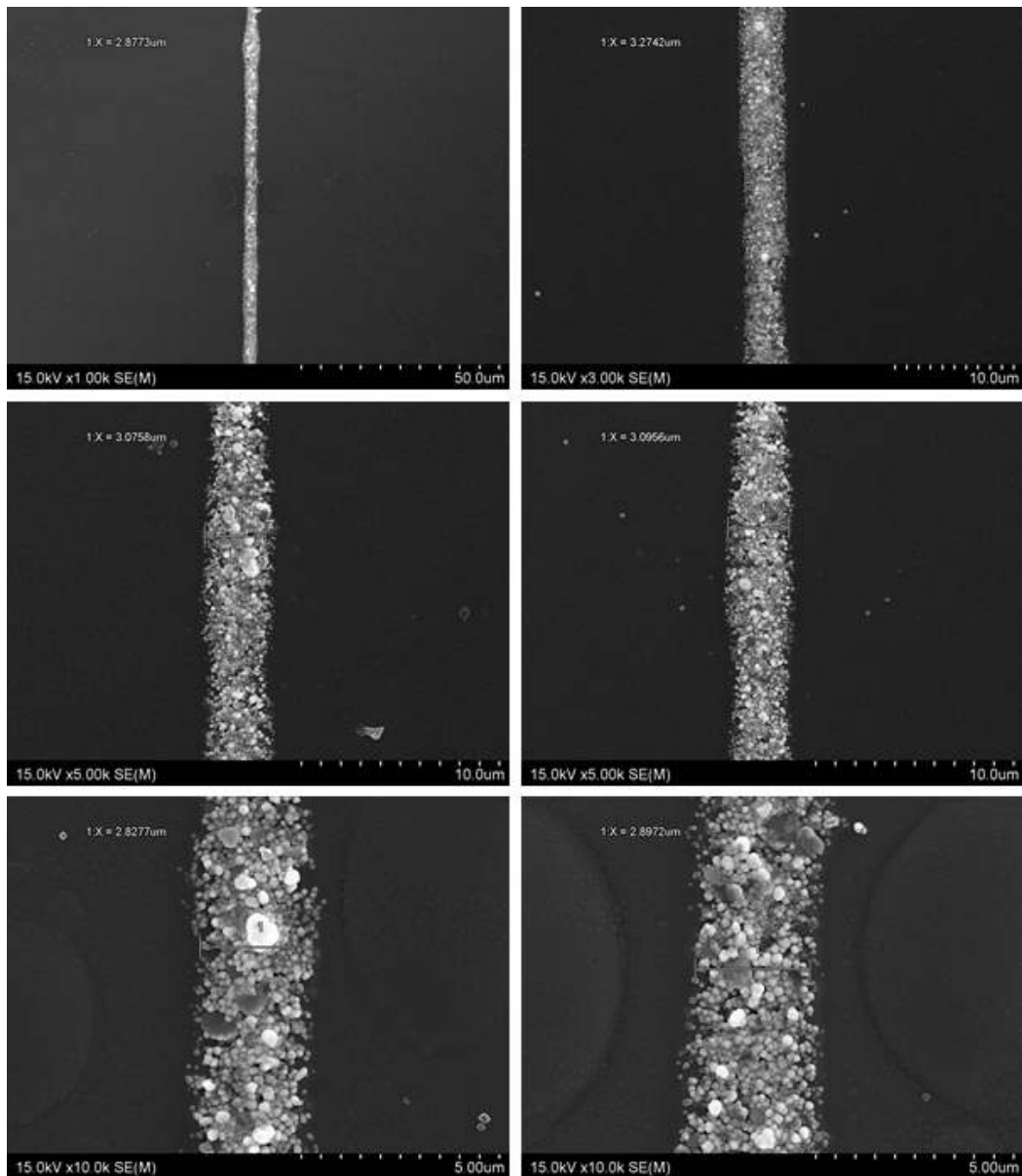


Fig. 26 FE-SEM images of microelectrode pattern less than 5 μm

미세전극 패턴의 성능을 검증은 패턴의 선저항 측정을 통하여 확인할 수 있다. 100 μm 이하의 선폭에서는 패턴의 선폭 대비 종횡비가 충분히 확보되어야 패턴의 전도도를 확보할 수 있고 전극으로서 기능이 할 수 있다.

공정 변수에 따른 미세전극 패턴의 최적 공정 조건에 따른 패턴 선폭 5 μm 급의 패턴 결과를 3차원 나노 형상 측정 시스템(WT-250, 나노시스템즈)를 사용하여 패턴 단면에 대한 종횡비를 측정하였다.

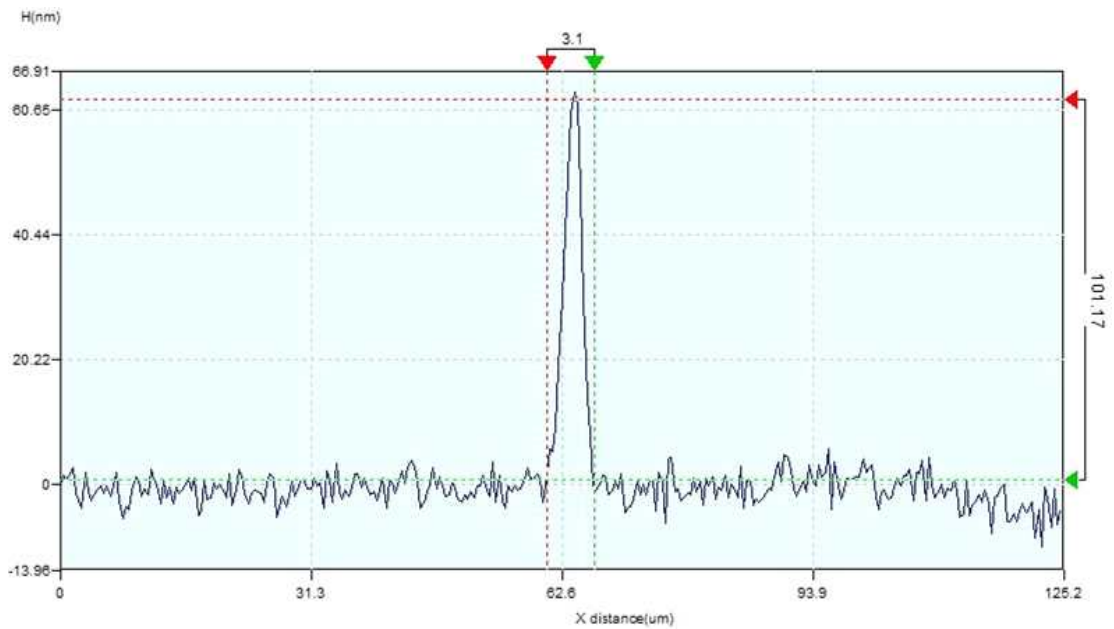


Fig. 27 Cross-section image of approximately 5 μm printed pattern(a)

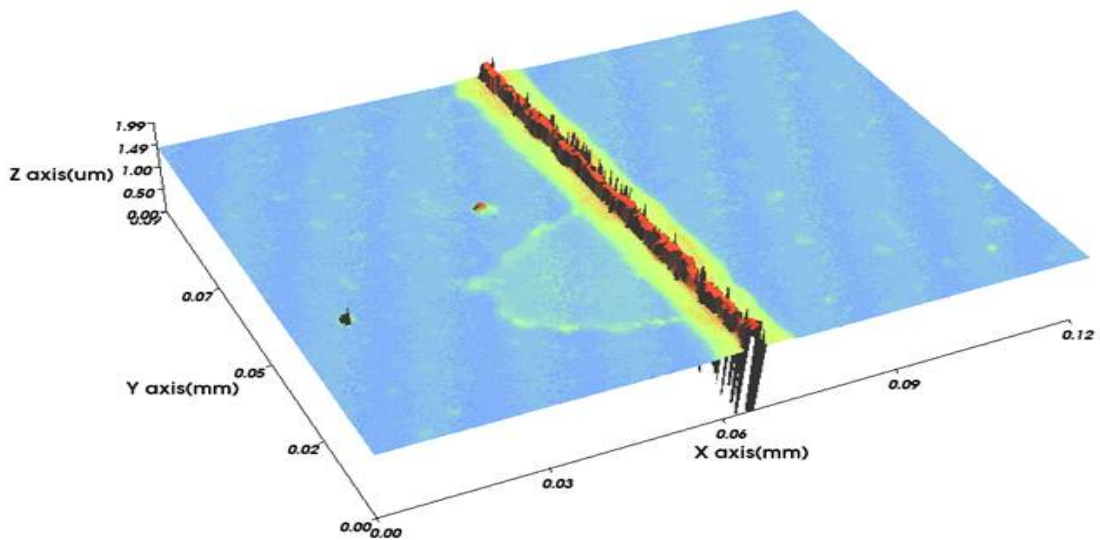


Fig. 28 3D profile image of approximately 5 μm printed pattern(a)

기판 상에 패터닝 된 미세전극 패턴 선폭 3.1μm에서 패턴의 높이는 Fig 27, 28와 같이 0.151μm로 측정되었고, 종횡비는 3.25%로 측정되었다. 공정 조건 인가전압 0.35kV, 공급 압력 -0.2kPa에서 토출한 결과이다.

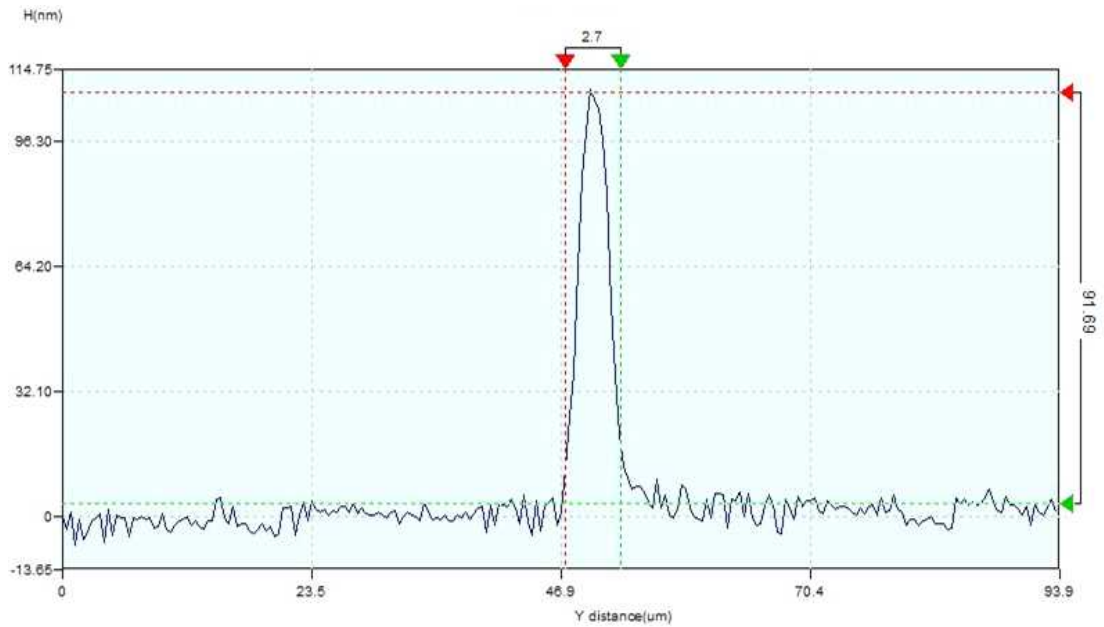


Fig. 29 Cross-section image of approximately 5 μm printed pattern(b)

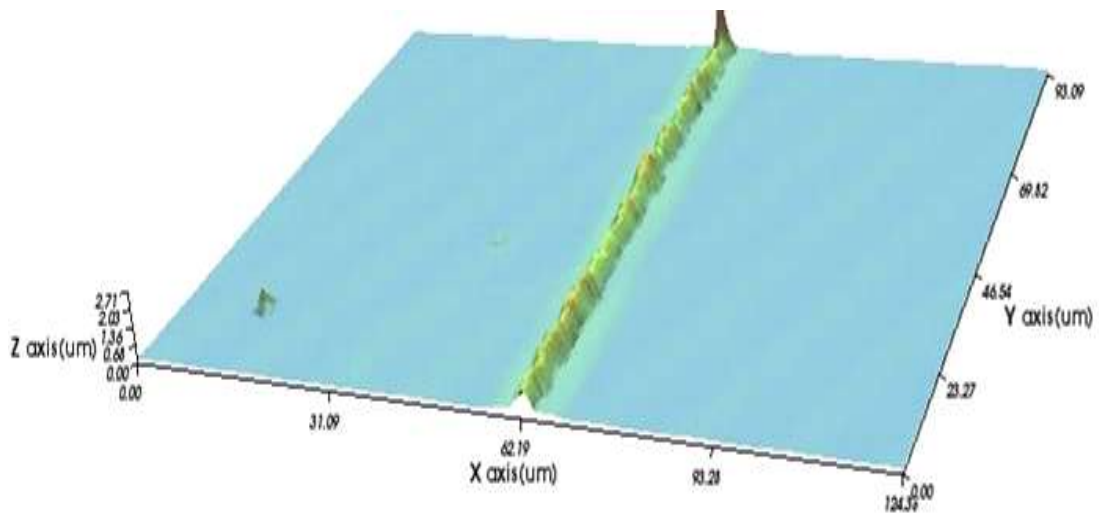


Fig. 30 3D profile image of approximately 5 μm printed pattern(b)

기판 상에 패터닝 된 미세전극 패턴 선폭 2.7 μm 에서 패턴의 높이는 0.091 μm 로 측정되었고, 종횡비는 2.93%로 측정되었다. 공정 조건 인가전압 0.35kV, 공급 압력 -0.2kPa에서 토출한 결과 Fig 29, 30 같이 나타났다. 기존의 잉크젯 방식의 패턴 종횡비 0.5% 내외임을 감안하면 약 82%의 높은 종횡비가 측정됨을 알 수 있다.

2. 미세전극 리페어를 위한 미세선폭 구현

5um급 미세전극 패턴을 디스플레이 전극 리페어 공정에 적용을 통해 전극으로서 기능의 가능 여부를 검증하고자 하였다. 리페어 공정 적용을 위해 리페어용 단선 회로 기판을 제작하였고 공정 변수별 최적 공정 조건을 적용하여 단락된 단선 회로 기판위에 5um급 미세전극 패턴을 구현하였고, 4-point 프로브 스테이션 이용하여 선저항 측정을 통해 패턴의 성능을 검증하였다.

1) 리페어용 단선 회로 기판 제작

전기수력학적 프린팅 헤드를 통해 미세전극 패턴 공정을 단선회로의 리페어 공정에 적용 가능성을 확인하기 위해 Fig. 31와 같이 단선회로 기판을 설계/제작하였다. 단선회로는 가로 26.85mm 세로 21.5mm의 웨이퍼에 총 9개의 단선회로를 갖는다. 회로 중앙에 50um로 단선이 되어있고, 단선회로의 양쪽 끝에 선저항을 측정할 수 있는 측정용 패드를 추가하여 식각공정을 이용하여 크롬 패턴을 기판에 제작하였다.

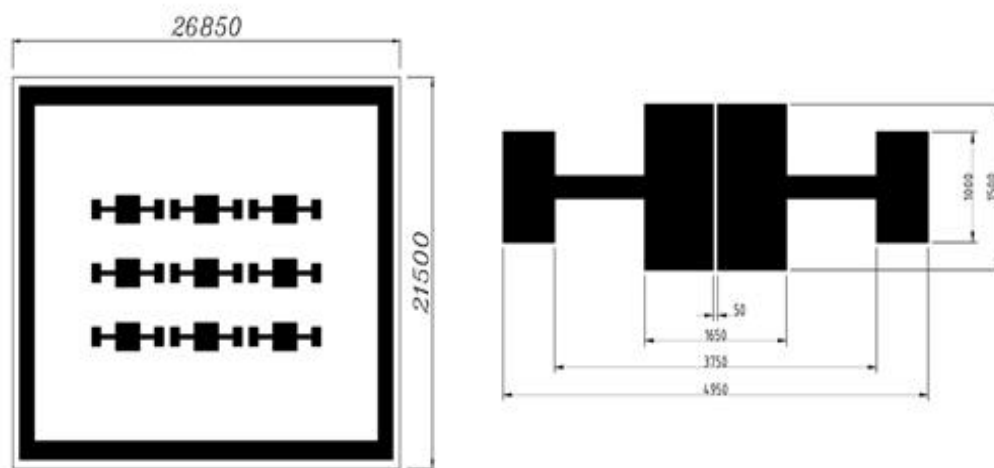


Fig. 31 Disconnection circuit board design drawing of repair process

2) 단선 회로 기판에 대한 리페어 공정 실험 결과

단선 회로 기판에 대한 미세전극 리페어 패턴 구현을 위해서 50 μm 의 단락된 단선회로 기판에 공정 변수별 최적 공정 조건을 입력하여 패터닝 공정을 진행하였다. 단선 회로 기판의 경우 표면의 유기물만을 제거하는 클리닝 과정을 거쳤고 기판의 전처리 과정 없이 패터닝을 진행하였다. 실험 결과 Fig. 32와 같이 인가 전압 0.35kV, 공급 공압 -0.2kPa에서 5 μm 급의 표준 편차 ± 0.176 을 갖는 균일한 패턴선폭을 구현하였고 리페어된 단선회로에 대한 미세전극 패턴의 종횡비와 선저항 측정을 진행하였다.

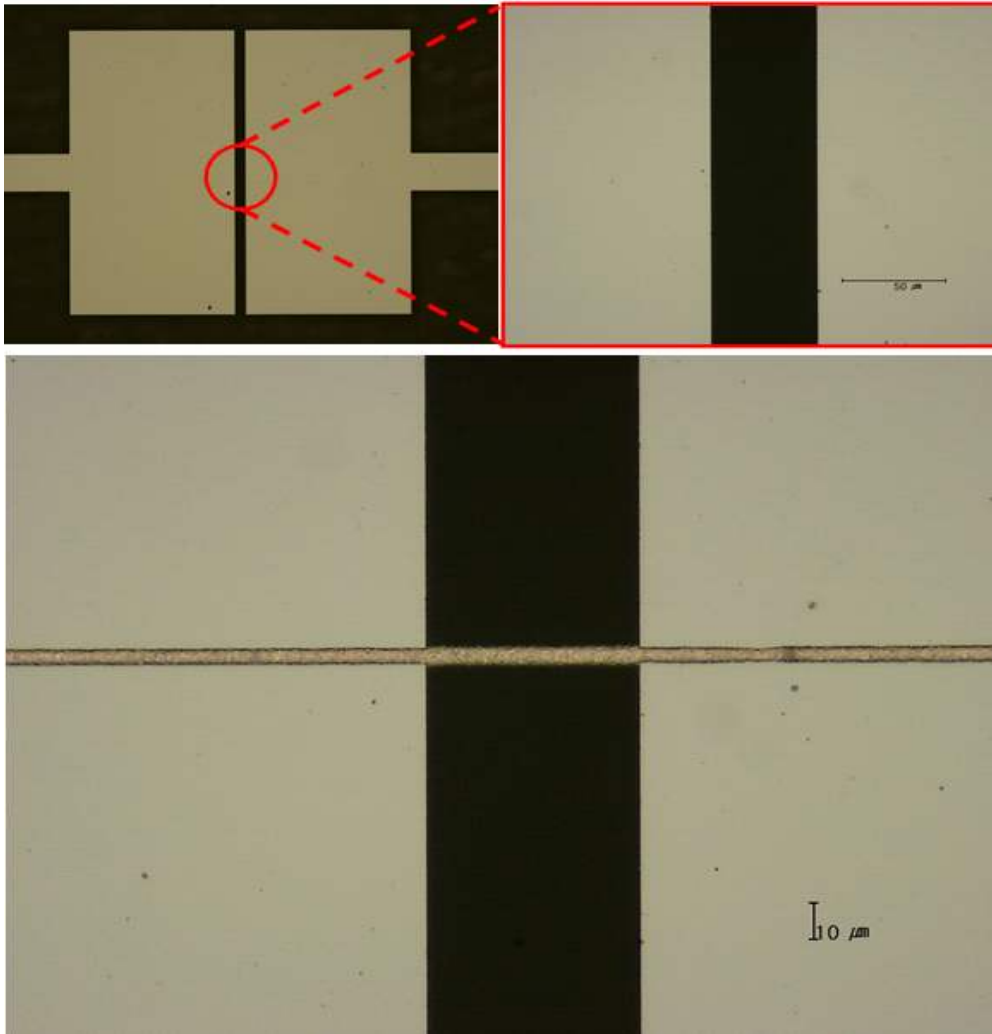


Fig. 32 Repair process results of disconnection circuit

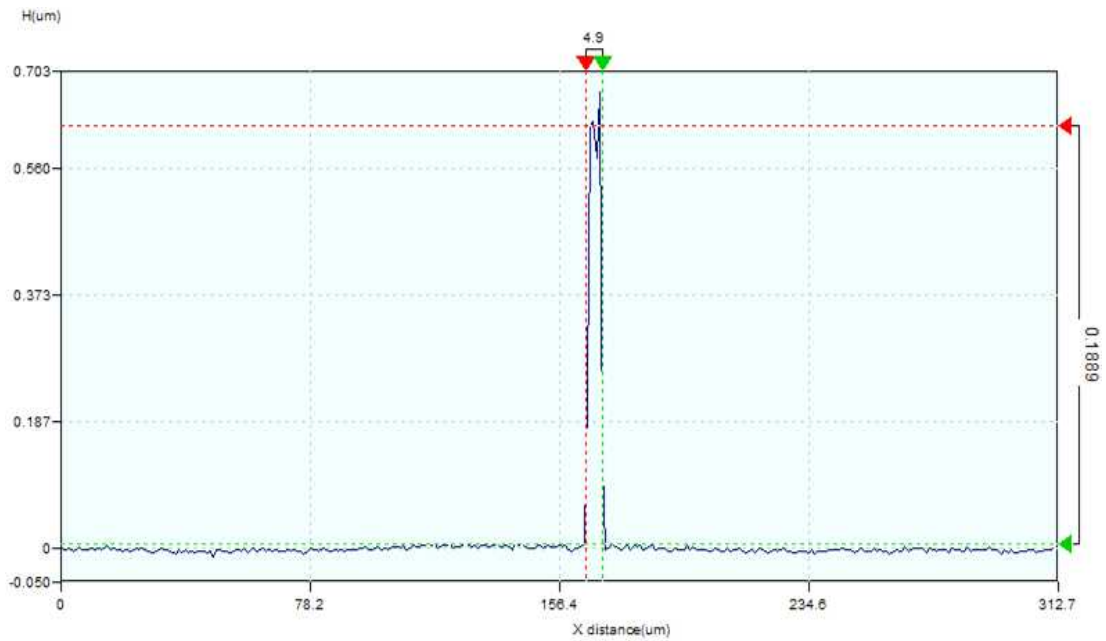


Fig. 33 Cross-section image of approximately 5 μm printed repair pattern

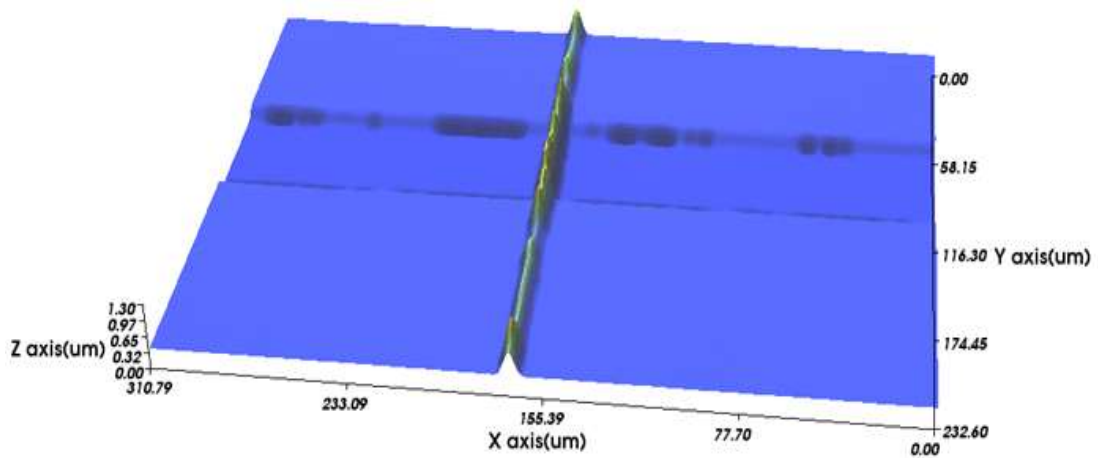


Fig. 34 3D profile image of approximately 5 μm printed repair pattern

실험 결과 Fig. 33, 34 단선 회로 기판 상에 패터닝 된 미세전극 패턴 선폭 5 μm 에서 패턴의 높이는 0.189 μm , 중횡비는 3.78%로 측정되었으며 인가전압 0.35kV, 공급압력 -0.2kPa에서 토출 하였다.패턴의 선저항은 178 Ω/cm 으로 측정 되었다.

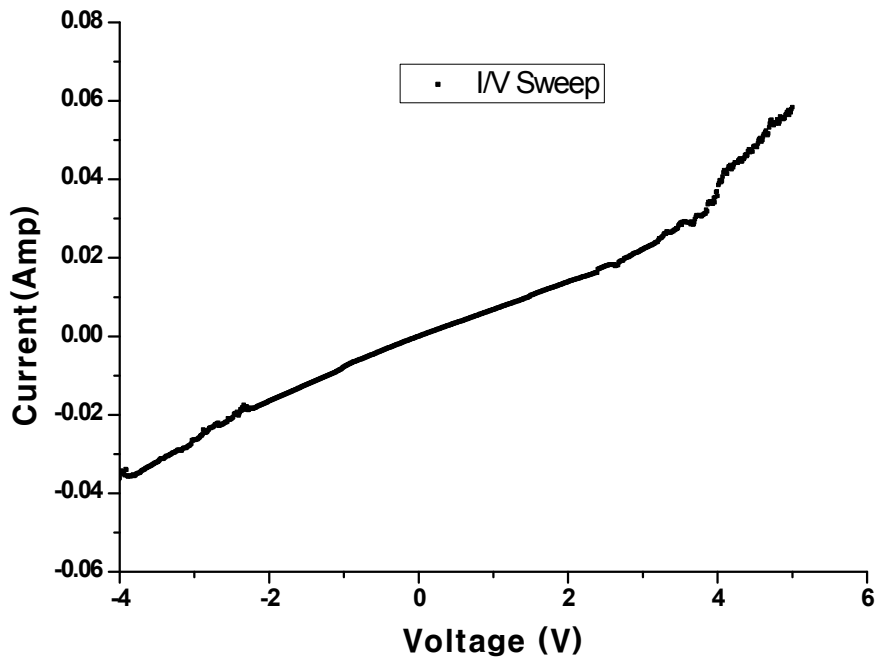


Fig. 35 I-V curve of the approximately 5 μ m printed repair pattern

실험 결과, Fig 34와 같이 그래프로 나타내었고, 단선 회로기판 상에 패터닝 된 5 μ m급 패턴의 선저항은 100 μ m당 178 Ω 으로 측정되었다. 최근 산업체에서 요구되고 있는 패턴의 저항 값은 패턴 길이 100 μ m당 100 Ω 이 요구되고 있고, 이는 기존 LCD급의 디스플레이 패넬에 적용할 수 있는 수준이다. 산업체에서 요구되는 저항 값인 100 μ m당 100 Ω 에 비해 78 Ω 이 높은 저항치가 측정되었지만 전극 패턴으로서 적용 가능한 범위이다. 산업체에서 요구되는 패턴 성능을 충족하기 위해 추후 다양한 소재특성에 대한 지속적인 연구를 통하여 실제 미세전극 패턴의 리페어 공정에 적용이 가능할 것으로 예상된다.

V. 결론

최근 전자제품에 있어 고성능화, 저가화, 유연화의 요구가 증가되고 있어 기존 식각/진공 공정의 한계를 극복할 수 있는 인쇄전자 기술이 활발히 진행되고 있다. 인쇄전자 기술 중 고점도 소재 적용이 가능하고 미세 패턴 형성의 장점을 가지는 비접촉 프린팅 방식인 전기수력학적 프린팅 기술을 적용하였다.

본 연구에서는 전기수력학적 프린팅 기술을 이용하여 안정적인 메니스커스 제어를 위해 인가전압, 공급압력에 대한 공정변수 최적화를 통하여 5 μm 이하의 미세전극을 구현하였으며, 단선 회로 기판을 제작하여 위의 최적화된 공정조건을 입력하여 5 μm 급 미세전극 패턴을 구현하였다. 패턴이 실제 적용이 가능한지 가능여부를 확인한지 단선회로를 제작하여 5 μm 급 미세전극 패턴을 단선 회로기판 상에 패터닝 후 선저항 측정을 진행하였다.

미세전극 패터닝 공정 연구를 위해 최근 인쇄전자 기술 동향과 기존의 미세전극 제작에 사용되는 기술들의 기술적 한계를 조사하였다. 이러한 문제들을 극복하고자 고점도·고함량 재료와 5 μm 이하의 미세액적 토출이 가능한 전기수력학적 프린팅 시스템에 대한 기술적 요소를 분석하고, 설계에 반영하였다. 전기수력학적 프린팅 시스템의 개발은 미세전극 패터닝용 전기수력학적 프린팅 헤드 제작, 고전압 발생장치, 전자식 정밀 공압 제어기, 나노급 이송 스테이지, 실시간 모니터링 시스템의 구성으로 개발하였다. 전기수력학적 프린팅 헤드는 10 μm 의 글라스 케필러리를 사용하였고 일체형 챔버로 노즐 교체 및 탈부착이 용이하며 정밀 공차를 통한 내부 전극의 센터 얼라인을 맞추어 제작하였다.

5 μm 이하의 미세전극 패턴 구현을 위해 점도 300cps, 함량 60wt%의 Ag 나노파티클 잉크를 사용하여 인가전압, 공급압력 2가지 변수를 공정 변수로 설정하여 제어하였고, 안정된 테일러 콘 젯 형상의 유지를 위해 최적화된 공정조건을 도출하였으며 미세전극 패턴 선폭과 균일도를 제어하였다. 인가전압 0.35kV, 공급압력 -0.2kPa에서 최적 공정 조건을 설정하여 5 μm 급 미세전극 패턴을 구현하였고, 구현된 미세전극 패턴에 대해 3차원 나노 형상 측정 시스템과 4-point 프로프 시

시스템으로 패턴에 대한 중횡비와 선저항을 측정하였으며, 측정 결과 3%의 중횡비를 갖는 미세전극에 사용할 수 있는 성능을 갖는 패턴을 구현하였다. 또한, 단선 회로 기판을 제작하고 위의 최적 공정 조건을 입력하여 리페어 공정에 가능 여부를 확인하였다. 단선 회로 기판위의 패턴링 실험 결과 3.7%의 중횡비와 100 μ m 당 178 Ω 의 저항을 갖는 5 μ m급 전극 패턴을 구현함으로써 실제 리페어 공정에 적용 가능성을 확인하였다.

전기수력학적 프린팅 기술을 이용한 단선된 미세전극 패턴을 리페어 하는 공정이 많은 관심을 받고 있기 때문에 향후 미세전극 패턴 리페어 공정에 대한 연구를 지속적으로 진행될 것이다. 향후 실제 산업화에 적용되기까지는 공정 속도, 토출 위치 제어, 전극 위에서의 토출 변화 등의 문제를 해결하기 위해 더 많은 연구개발과 노력이 필요하고 앞으로 차세대 프린팅 방식으로서 더 많은 관심을 받게 될 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] D. J. Lee and J. H. Oh, "Shapes and Morphologies of Inkjet-printed Nanosilver Dots on Glass Substrates", Surface and Interface Analysis, Vol.42, pp.1261-1265, 2010.
- [2] B. J. Kang, Y. S. Kim, Y. W. Cho and J. H. Oh, "Effect of plasma surface treatment on inkjet-printed feature sizes and surface characteristics, Microelectron. Eng. Vol. 88, pp. 2355-2358, 2010.
- [3] 양용석, 유인규, 윤호경, 홍성훈, 박주현, 정문규, 이진호, "인쇄전자 기술 및 동향", 전자통신 동향분석, Vol28, No.5, pp. 2-4, 2013.
- [4] S. H. Lee, D. Y. Byun, S. J. Han, S. U. Son, Y. J. Kim and H. S. Ko, "Electrostatic Droplet Formation And Ejection of Colloid", International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, Nagoya, pp.249-254, 2004
- [5] C. Joffre, B. Prunet Foch, S. Berthomme and M. Cloupeau, "Deformation of Liquid Meniscus Under the Action of an Electric Field", J. Electrostatics, Vol. 64, pp.44, 1982.
- [6] 김석순, "인쇄전자를 위한 잉크젯 프린팅 기술 현황 및 미래", Vol. 14, No. 1, pp. 15-21, 2001.

- [7] S. H Lee, K. Y Shin, J. Y Hwang, K. T Kang and H. S Kang. "Silver inkjet printing with control of surface energy and substrate temperature", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 18, pp. 7, 2008.
- [8] B. J. Kang and J. H. Oh, "Influence of C4F8 plasma treatment on size control of inkjet-printed dots on a flexible substrate", Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 158-163, 2010.
- [9] A. U. Chen and O. A. Basaran, "A new method for significantly reducing drop radius without reducing nozzle radius in drop-on-demand drop production", Phys. Fluids, Vol.14, pp. L1-L4, 2002.
- [10] J. Choi, S. Lee, Y. J Kim, S. U Son and K. C An, "High Aspect Ratio EHD Printing with High Viscosity Ink Ejection", Nanotech, Vol.2, pp.267-270, 2012
- [11] V. D Nguyen, M. G Schrlau, S. B. Q. Tran, H. H Bau, H. S Ko and D. Y Byun, "Fabrication of nanoscale nozzle for electrohydrodynamic (EHD) Inkjet head and high precision patterning by drop-on-demand operation", Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol.9, pp.7298-7302, 2009.
- [12] M. D Paine, "Transient electrospray behaviour following high voltage switching, Microfluid Nanofluid", Vol.6, pp. 775-783,

2009.

- [13] S. Korkut, D. A Saville and I. A Aksay, "Colloidal cluster arrays by electrohydrodynamic printing", *Langmuir*, Vol.24, pp.12196–12201, 2008.
- [14] J. B Ko, "Research on Electrostatic based High Aspect ratio Microelectrode Patterning Process", Major of Electronic Engineering, Ph.D of science, jeju national university, 2014.
- [15] J. W. Kim, K. H. Choi, and D. S. Kim, "A Study for Micro-patterning using an Electrostatic Inkjet", *Proc. of KSME Autumn Conference*, pp. 1103–1106, 2008.
- [16] L. Rayleigh, "On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charge with Electricity", *Phil. Mag.*, Vol. 14, pp. 184–186
- [17] J. Zeleny, "The Electrical Discharge form Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring the Electric Intensity at Their Surfaces", *Physical Review*, Vol. 3, Issue. 2, pp. 69–91, 1914.
- [18] G. I. Taylor, "Disintegration of Water Drop in an Electric Field", *Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Science*, Vol. 280, Issue. 1382, pp. 383–397
- [19] Y. Ishida, K. Sogabe, S. Kai and T. Asano, "Droplet Ejection

Behavior in Electrostatic Inkjet Driving", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, No. 6, pp. 5281–5286, 2008.

[20] Hakiai. K, Ishida. Y, Matsuzaki. K, Baba. A and Asano. T, "Electrostatic Droplet Ejection Using Planar Needle Inkjet Head", Japanese J. Appl. Physics, Vol. 44, No. 1, pp. 82–86, 2005.

[21] M. T. Harrics and O. A. Basaran, "Capillary Electrohydrostatics of Conducting Drops Hanging from a Nozzle in an Electric Field", J. Colloid. Interface Sci. Vol. 161, Issue. 2, pp.389–413, 1993.

[22] D. Y. Lee, Y. S. Shin, S. E. Park, T. U. Yu and J. H. Hwang, "Electrohydrodynamic printing of Silver Nanoparticles by Using a Focused Nanocolloid Jet", Applied Physics Letters, Vol. 19, pp. 90–92, 2007.

[23] K. H Choi, T. T Thanh, B. S Yang and D. S Kim, "An New Approach for Intelligent Control System design using the Modified Genetic Algorithm", International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications", Vol. 9, No. 3/4, pp. 200–315, 2010.

[24] S. Khan, Y. H. Dho, A. Khan, A. Rahman, K. H. Choi and D. S. Kim, "Direct Patterning and Electrospray Deposition Through EHD for Fabrication of Printed Thin Film Transistors", Current Applied Physics, Vol. 11, No. 1, pp. 271–279, 2011.

- [25] P. L. Hue, "Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology", Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 30, No. 7, pp. 49-62, 1998.
- [26] J. Eggers and T. F. Dupont, "Drop Formation in a One-Dimensional Approximation of the Navier-Stokes Equation", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 262, pp. 205-221, 1994
- [27] M. N. Awais, M. M. Nauman, D. Navaneethan, H. C. Kim, J. D. Jo and K. H. Choi, "Fabrication of ZrO₂ Layer through Electrohydrodynamic Atomization for the Printed Resistive Switch(memristor)", Microelectronic Engineering, Vol. 103, pp. 167-172, 2013.
- [28] Y. J. Yang, J. B. Ko, H. Y. Dang, H. C. Kim, K. H. Choi and K. H. Cho, "Development of Pneumatic Ink Supply System for Electrostatic head on Meniscus control", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 455-460