

碩士學位論文

인쇄전자 공학을 위한
정전기력 잉크젯 헤드 개발



濟州大學校 大學院

에너지응용시스템學部 電子工學專攻

高 政 範

2010 年 2 月

인쇄전자 공학을 위한 정전기력 잉크젯 헤드 개발

共同指導教授 都良會, 崔勁賢

高政範

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010 年 2 月

高政範의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2010 年 2 月

Development of Electrostatic Inkjet Head for Printed Electronics

Jeong-Beom Ko

(Supervised by professor Yang-Hoi Doh)
(Co-supervised by professor Kyung-Hyun Choi)

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

2010 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

Thesis director, Kwang-Man Lee, Prof. of Electronic. Eng.

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

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

February 2010

Date

Faculty of Applied Energy System
Major of Electronic Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	1
LIST OF TABLES	3
ABSTRACT	4
I. 서 론	5
II. 잉크젯 프린팅 기술	7
1. 잉크젯 프린팅 시스템	7
2. DOD 잉크젯 프린팅 헤드 기술	8
1) 열 구동 잉크젯 헤드	9
2) 압전 구동 잉크젯 헤드	10
3) 정전기력 잉크젯 헤드	11
III. 정전기력 잉크젯 헤드 개발	12
1. PCB 기반 잉크젯 헤드 개발	14
2. PDMS 기반 잉크젯 헤드 개발	16
3. MEMS 기반 잉크젯 헤드 개발	17
4. 유리 모세관 잉크젯 헤드 개발	18
5. 통합 잉크젯 헤드 설계	19
6. 멀티 잉크젯 헤드 설계	20
IV. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 및 고찰	22
1. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 및 결과	22
1) 정전기력 잉크젯 헤드 액적 토출 실험 및 결과	25
2) 전도성 라인 패터닝 실험 및 결과	34
2. 고 찰	41
V. 결 론	43
참 고 문 헌	44

LIST OF FIGURES

그림 2.1. 열 구동 잉크젯 헤드의 두 가지 방법(HP 사, Canon 사)	8
그림 2.2. 압전 구동 잉크젯 헤드 종류	10
그림 2.3. 정전기력 잉크젯 헤드의 원리	11
그림 3.1. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도	12
그림 3.2. 정전기력 잉크젯 DOD 헤드 공정원리	13
그림 3.3. PCB 잉크젯 헤드 설계	15
그림 3.4. PCB 잉크젯 헤드 제작	16
그림 3.5. PDMS 노즐 제작 및 특성	17
그림 3.6. MEMS 잉크젯 헤드 개발 및 소수성 특징	18
그림 3.7. 유리 모세관 잉크젯 헤드	19
그림 3.8. 통합 잉크젯 헤드 설계	20
그림 3.9. 멀티 잉크젯 헤드 설계	21
그림 4.1. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 입력 전압	24
그림 4.2. PCB 잉크젯 헤드 노즐 오리피스 형태에 따른 테일러 원추 모양 비교	26
그림 4.3. 모세관 형태를 갖는 PDMS 잉크젯 헤드	27
그림 4.4. 평탄한 노즐 오리피스를 갖는 PDMS 잉크젯 헤드의 액적 토출 모드	27
그림 4.5. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 1	28
그림 4.6. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 2	29
그림 4.7. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 3	29
그림 4.8. 금속 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 1(위성 액적 형성)	30
그림 4.9. 금속 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 2	30
그림 4.10. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 1	31
그림 4.11. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 2	32
그림 4.12. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 3	32
그림 4.13. 정전기력 잉크젯 모세관 헤드의 액적 토출 현상	33
그림 4.14. 정전기력 잉크젯 헤드 액적 토출 모드 분류	33

그림 4.15. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink1)	35
그림 4.16. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 결과 그래프	35
그림 4.17. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 높이 측정 결과(Ink5)	36
그림 4.18. 금속 모세관 잉크젯 헤드 결과(Ink2)	37
그림 4.19. 금속 모세관 잉크젯 헤드 잉크 특성 비교(Ink1,2,4)	38
그림 4.20. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink2)	38
그림 4.21. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink3)	40
그림 4.22. 유리 모세관 잉크젯 헤드를 이용한 응용 패턴 제작(Ink2)	41



LIST OF TABLES

표 4.1. 정전기력 잉크젯 프린팅 공정변수	23
표 4.2. 정전기력 잉크젯 헤드 실험용 금속 나노 입자 잉크	24
표 4.3. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink1)	34
표 4.4. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink5)	36
표 4.5. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink2)	37
표 4.6. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink1,2,4)	38
표 4.7. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink2)	39
표 4.8. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink3)	40
표 4.9. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수(사용 잉크 : Ink2)	41
표 4.10. PCB, MEMS 잉크젯 헤드의 토출 특성	42
표 4.11. PDMS, 유리 모세관, 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과	42

ABSTRACT

This thesis describes the physical development of a new inkjet technology electrostatic inkjet head design, which offers a direct and flexible approach for high resolution patterning. The electrostatic inkjet head is a contactless way of depositing the different materials on substrate. Contactless deposition of the metallic contents on different types of substrate without involving the complex steps is under research and will be powerful tool in the future. The direct fabrication process using electrostatic can be expected to be one of the dominant tools for both nano-technology research and applications such as microelectronics. The electrostatic forces enable the system to overcome the mechanical actuation which is often required high fabrication cost, actuation limitation and integration problems to produce printed electronics and electrical patterns at higher frequency rate.

In this research various kinds of micron nozzle head based on hydrophilic and hydrophobic surfaces has been designed, fabricated and evaluated by experiment. For the head design, different type of materials has been used containing the above mention properties to evaluate the different dripping behavior. For the experiment purpose, the head is developed by lamination copper cladding sheet, MEMS, PDMS, glass and metallic materials. From experiments, different results like meniscus generation, dripping, jetting and printing has been observed and analyzed. These heads were fabricated by using different micromachining and modeling technology. and for the evaluation purpose different inks like dielectric, semiconductor and conductor inks been used. The experiments of conductive pattern had been performed to evaluate with different conductive ink in order to evaluate the developed electrostatic inkjet head.

I. 서 론

최근 전자제품의 소형화, 경량화, 집적화 추세와 함께 저단가의 대량생산을 위한 인쇄전자 공학 시스템 기술적 요구가 이어지고 있다. 인쇄전자 공학 시스템은 RFID 태그, 센서, 유연기판 디스플레이, 태양전지, 광고판 등의 응용을 지원하는 고성능 프린팅 시스템을 통해 기술적인 연구가 진행되고 있다 [5]. 즉, 고성능 프린팅 시스템을 통해 디스플레이 재료, 반도체 소자 내 금속 박막 등의 전자재료를 종전의 반도체 공정 대신에 대상 기판 위로 직접 패터닝하여 제조하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 고성능 프린팅 기술은 반도체 공정에서 요구하는 식각, 현상, 증착 과정 등을 생략하고, 전도성 나노 입자, 유기재료, 탄소나노튜브 등의 기능성 재료가 첨가된 잉크를 사용하여 압전(piezoelectric) 구동, 에어로졸(aerosol), 열(thermal) 분사, 정전기력(electrostatic force) 구동 방식 등을 기반으로 하는 잉크젯 프린팅 헤드(inkjet printing head) 또는 롤투롤(roll-to-roll, R2R) 인쇄 공정 기술을 통해 종이, 유리, 플라스틱 등과 같은 소재나 기판위에 전자기판 또는 디스플레이 분야 등 간단한 매체를 대량 인쇄할 수 있다. 높은 마스크 제작비용, 고가의 재료 낭비, 공정 장비 설비비용과 환경오염 문제 등을 일정 부분 해결하면서 저비용의 효율적인 생산 공정 교체, 재료비 절감, 대면적 프린팅과 생산속도 향상 등의 장점이 있다 [6]. 기술적으로 고성능 프린팅 분야는 프린팅 장비 및 공정 기술, 기능성 재료 잉크 제조 기술, 전·후 처리 장비 및 공정 기술과 소재 설계 및 개발 기술로 분류 할 수 있는데, 프린팅 장비 기술에서는 롤투롤 장비와 잉크젯 프린팅 헤드로 다시 세부적으로 분류가 된다.

잉크젯 프린팅 기술은 각종 기능성 재료의 액적(droplet) 크기가 수 피코 리터(pl, 10^{-12} liter)인 나노 패터닝(nano patterning)을 지원 가능한 기술로 연구가 되면서 고성능 잉크젯 프린팅 분야에서 중요한 원천 기술로 인식되고 있다 [11]. 특히 이 분야에서 주목받고 있는 비접촉식 잉크젯 프린팅 방식 중에 하나인 정전기력 잉크젯 헤드는 전기장과 유체 내의 유도된 전하와의 상호 작용에 의한 정전기력 이용하여, 유체를 움직여 노즐 오리피스(nozzle orifice)를 통해 미세한 액

적으로 분무 또는 토출시킬 수 있는 기술이다[4, 10]. 정전기력을 통한 액적의 분무나 토출 현상은 1500년대 Gilbert의 저서 “de Magnete”에서 전기에 의한 물방울의 변형됨을 보고하였고, 1882년 Rayleigh는 전자장 내에서의 액체의 불안정성을 명시하였다 [1]. 1914년 Zeleny는 액체에 전기를 직접 인가하여 액적의 분사를 최초로 실험하였고 [2], Taylor는 1965년 액체의 정전분무(electro-spray) 현상을 발견하고 테일러 원추(Taylor cone)에 관하여 기술하였다 [3]. 전기력에 의한 유체의 이동성을 이용한 액적의 토출이나 분무 현상을 이용한 잉크젯 프린팅 헤드는 기존의 열(thermal) 방식이나 압전(piezoelectric) 방식 헤드보다 좀 더 미세한 액적과 10 μ m 이하의 미세선폭을 인쇄할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 정전기력 방식의 잉크젯 헤드는 구조가 간단하여 제작하기가 용이하고 노즐 오리피스의 크기보다 상대적으로 작은 액적을 토출할 수 있는 장점을 가지고 있다 [7, 8, 9].

앞서 기술한 배경을 토대로, 좀 더 향상된 잉크젯 프린팅 기술 응용을 위해서는 고성능의 정전기력 잉크젯 헤드 개발이 필요한 시점이다. 아직 상용화되지 않은 정전기력 잉크젯 헤드 기술을 위해, 다양한 형태의 잉크젯 헤드를 제작하여 성능 비교를 통해 최적 성능의 헤드를 제시하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 기판 상에 전도성 잉크의 액적을 토출하여 다양한 패턴 및 응용 소자를 제작할 수 있는 정전기력 잉크젯 헤드의 개발을 목표로 하였다.

2장에서는 잉크젯 프린팅 시스템의 핵심적인 기술인 잉크젯 프린팅 헤드에 관해 기술하였고, 3장에서는 정전기력 잉크젯 헤드를 PCB(printed circuit board), MEMS(micro-electro-mechanical systems), PDMS(polydimethylsiloxane, 폴리디메틸실록산), 유리 모세관(glass capillary), 금속 모세관(metallic capillary)등과 같은 다양한 공정 기법과 형태, 재료를 가지고 제작하였다. 4장에서는 정전기력 잉크젯 헤드를 이용하여 전도성 금속 미세 입자(conductive metallic nano particle)가 첨가된 잉크를 가지고 PET(polyethyleneterephthalate, 폴리에틸렌테레프탈레이트) 필름, 폴리이미드(polyimide, PI) 필름, 종이 등의 유연 기판(flexible substrates)과 유리기판 위로 전도성 패턴(conductive pattern)을 형성하는 실험을 하였고, 전도성 패턴의 실험 결과에 대한 분석을 하였다. 5장에서는 정전기력 잉크젯 헤드 개발의 성과와 향후 연구 방향에 대해 논의하였다.

II. 잉크젯 프린팅 기술

인쇄전자 공학(printed electronics) 분야에서 나노 패터닝을 위한 고성능 프린팅 기술 개발은 반도체, 디스플레이, 태양전지 등의 산업 분야에서 낮은 생산 단가, 고성능, 소형화, 대량생산 등의 시장의 요구에 따라 중요한 기술로 인식되고 있다.

나노 패터닝을 위한 고성능 프린팅 공정 장비의 종류는 크게 접촉식 프린팅 방법과 비접촉식 프린팅 방법으로 분류될 수 있다. 접촉식 프린팅 방법이란 롤투롤 시스템 상에서 적용되는 그라비아 오프셋 프린팅(gravure offset printing, 오탁 인쇄)이나 플렉소 인쇄(flexography press), 스탬프 인쇄(stamp printing), 스크린 인쇄(screen printing) 방식을 말한다. 비접촉식 프린팅은 잉크젯 프린팅 헤드를 통해 내부 유체를 기판 상에 분사하거나, 열 전사, 레이저 등의 다양한 기법을 통해 프린팅 하는 방법으로, 이 장에서는 비접촉식 잉크젯 프린팅 기술에 대해 설명하였다.

1. 잉크젯 프린팅 시스템

비접촉식 잉크젯 프린팅은 내부 유체의 분사 방법에 따라 연속 분사(continuous-jet) 방식과 DOD(drop-on-demand) 방식으로 나눌 수 있다. 또한 프린팅 헤드의 구조적 원리에 따라 압전(piezoelectric) 방식, 열(thermal) 방식 그리고 정전기력(electrostatic force) 방식으로 분류된다. 먼저 연속 분사 방식의 잉크 토출 방법은 전기적으로 대전된 잉크 액적을 연속적으로 분사한 뒤, 대전된 잉크 방울이 정전 방식의 편향 장치에 의해 기판의 특정지점에 흡착시키고 나머지 잉크는 회수하는 방식이다. 고속 잉크 방울 분사로 고속 인쇄의 장점을 가지고 있지만 산업체 포장 인쇄 등에 제한적 쓰이고 있다. 현재 대부분은 잉크를 인쇄하는 순간에만 분사하는 DOD 방법을 많이 사용하고 있다.

2. DOD 잉크젯 프린팅 헤드 기술

1) 열 구동 잉크젯 헤드

열 구동 잉크젯 헤드의 원리는 먼저 히터에 의해 발생한 열을 이용하여 백만분의 1초(μs , 10^{-6} second)이내에 버블(bubble)이 형성하고, 버블은 잉크 챔버(ink chamber) 안의 액체를 노즐 오리피스 밖으로 밀어내게 된다. 그리고 잉크에 저장된 모든 열이 다 소진되면, 버블은 붕괴되기 시작한다. 열 구동 헤드는 잉크 챔버에서 잉크 방울이 분사되는 위치에 따라 지붕구조(roof-shooter)와 가장자리 구조(edge-shooter)로 분류된다. 그림 2.1은 지붕 구조로 분류되는 HP의 TIJ(thermal inkjet) 헤드에 대한 개략적인 단면 형상과 Canon의 가장자리 구조의 열 구동 잉크젯 헤드 단면구조를 나타낸 것으로 지붕 구조 설계는 HP 외에도 Lexmark와 Olovetti의 제품에서도 적용되고 있다. 가장 자리 구조에서도 잉크 방울이 분출되는 원리는 지붕구조에서와 같으나, 잉크 챔버가 별도로 필요 없기 때문에 지붕구조에 비해 그 구조가 간단하며, 노즐의 수량 밀도가 높다. 그러나 제조 공정상 하부기판(substrate)의 윗면이나 아랫면이 아닌 측면에 노즐을 만들게 되기 때문에 노즐을 한 줄로 밖에 배열할 수 없다는 단점이 있다. 그런데 최근 Canon은 발열체의 용량과 노즐의 크기를 2중으로 하여 일종의 방울 크기를 변조하는 기술을 통해 1열 배열로 인한 노즐 수에서의 한계를 극복하였다 [12].

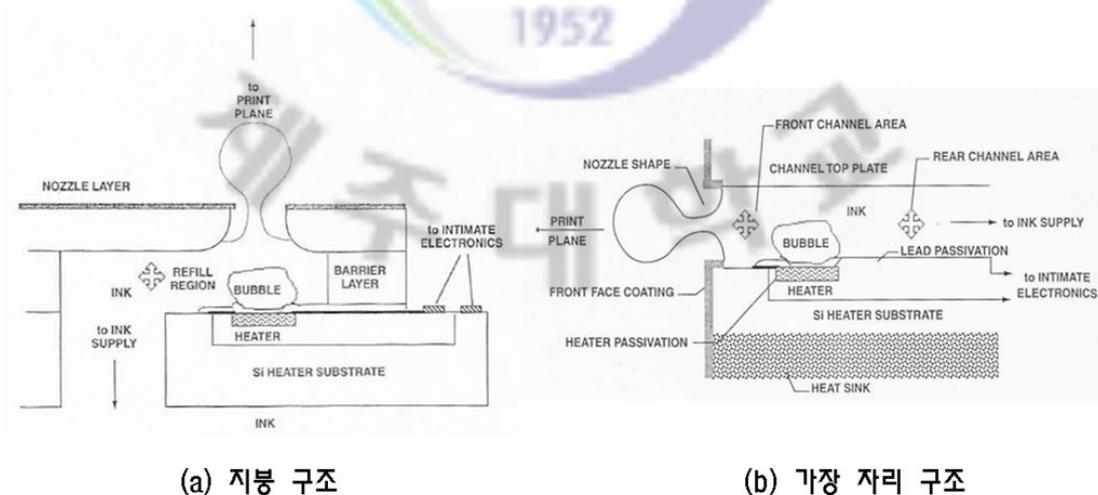


그림 2.1. 열 구동 잉크젯 헤드의 두 가지 방법(HP 사, Canon 사).

2) 압전 구동 잉크젯 헤드

압전 소자는 전기 신호를 기계적인 거동으로 바꿔주는 역할을 하는 소자인데 이러한 압전 소자의 변형을 이용하여 잉크 챔버 내의 부피를 변화시켜 잉크 챔버 안의 잉크를 노즐을 통해 분사하는 방식의 헤드를 압전 구동 헤드라고 한다. 압전 구동 방식의 종류에는 그림 2.2.에서와 같이 스퀴즈 모드(squeeze mode), 굽힘 모드(bend mode), 누름 모드(push mode) 그리고 전단 모드(shear mode)가 있다 [12].

그림 2.2. (a)는 스퀴즈 모드로 동작하는 단일 노즐 압전 구동 헤드를 나타낸 것이다. 스퀴즈 모드는, 주로 실린더 형상의 압전 소자에서 압전 재질의 실린더 외벽에 서로 마주 보게 전극을 형성한 뒤 전기적 신호를 가할 때 실린더의 외벽이 서로 마주 보는 방향으로 수축하거나 팽창하여 실린더 내부 부피를 변화시키는 모드를 말한다. 높은 점도의 물질을 분사할 수 있다는 장점이 있지만 압전 소자를 일일이 정교한 조립 작업에 의해 만들게 되므로 멀티 노즐을 형성하는 것이 매우 어렵다 [12].

그림 2.2 (b)는 압전 구동에 의한 OA용 잉크젯 프린팅 헤드로 가장 널리 사용되는 Epson 헤드의 개략적인 단면 형상을 나타낸 것이다. 압전 소자는 얇은 막 형태로 만들어져 압력발생실의 모양에 맞추어 진동판 위에 접착하는 방식으로 헤드가 제작된다. 굽힘 모드 헤드에서는 굽힘 동작을 하는 진동판의 사용으로 인해 일정한 크기가 필요하게 되어 압전 소자를 고밀도로 배치하는 것이 어려워지는 문제가 있었지만 최근에는 얇은 막(thin wall) 공정 기술의 발달로 인해 잉크 챔버 배열 간격이 100 μ m 이내의 제품도 이미 출현한 바 있다 [12].

굽힘 모드의 헤드 원리는 압전 소자와 멤브레인(membrane, 분리막) 사이에 얇은 두께의 하부 전극이 존재하게 되는데 압전 소자가 팽창 또는 수축할 때 멤브레인은 이 동작을 억제하여 결과적으로 압전 소자와 멤브레인이 전체적으로 굽힘 거동을 하여 잉크 챔버 안의 잉크를 노즐 오리피스를 통해 밖으로 밀어내게 된다. 이와 같은 굽힘 모드로 동작하는 잉크젯 헤드로는 Tektronix와 Phaser 300 시리즈, Epson의 Color Stylus시리즈, 그리고 Sharp의 RJ 시리즈 등이 있다 [12].

누름 모드를 이용하는 대표적인 잉크젯 헤드로는 그림 2.2. (c)와 같은 Hitachi 헤드와 그림 2.2. (d)의 Epson헤드가 있다. 누름 모드 헤드의 경우에는 비교적 고밀도의 노즐 배열을 가지는 헤드 제작이 가능한 반면 압전 소자를 압력 챔버에 정렬하여 고정시키는 데 까다로운 공정이 요구된다. 이러한 누름 모드의 잉크젯

헤드를 성공적으로 상업화한 회사로는 Hitachi와 Epson외에도 Dataproducts와 Trident가 있다 [12].

전단모드를 이용한 잉크젯 헤드는 비교적 큰 구동력을 바탕으로 LCD 칼라 필터와 같은 전자 물질 도포 등과 같은 산업 분야에서 주목을 받고 있다. 그림 2.2 (e)와 (f)는 각각 Spectra 및 Xaar 의 전단 모드 방식 잉크젯 헤드의 개략적인 단면 형상을 나타낸 것이다. 전단모드에서 압전소자가 동작되는 원리는 폴링 (polling: 높은 전압을 압전소자에 대해 미리 가하는 것) 방향과 동작 시 가하는 전계의 방향이 서로 90°를 이루므로써 압전 소자가 전단 변형을 일으키게 되어 잉크 챔버의 잉크가 노즐을 통해 분출하게 되는 것이다 [12].

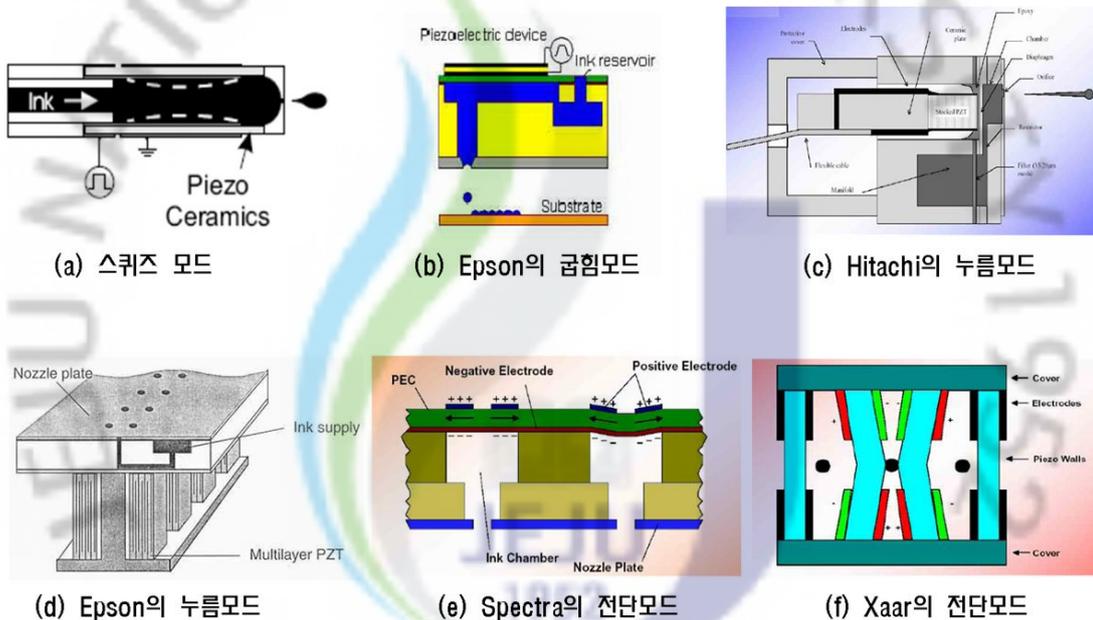


그림 2.2. 압전 구동 잉크젯 헤드 종류.

3) 정전기력 잉크젯 헤드

정전기력 잉크젯 헤드의 구조는 그림 2.3.(a)와 같이 잉크 공급 채널과 잉크 챔버의 헤드몸체부와 노즐 오리피스, 음전극으로 구성된다. 잉크는 외부의 잉크 공급 펌프에서 헤드의 잉크 공급 채널을 통해 공급된다. 헤드와 음전극 사이에 고전압이 인가되면 정전기력의 힘으로 노즐 오리피스 밖으로 잉크의 메니스커스가 형성된다. 고전압, 노즐의 형상과 잉크의 특성을 조절하여 메니스커스(meniscus) 끝단에서는 수 μm 의 미세액적을 토출하여 기판 상에 패터닝을 한다. 노즐 오리피스에 형성된 메니스커스에서 미세액적을 토출하기 위한 조건은 그림 2.3.(b)와 같이 크게 3가지 힘이 작용한다. 메니스커스를 기판 방향으로 끌어당기는 힘은 메니스커스의 작용하는 중력과 정전기력이다. 잉크의 표면장력에 의해 반대 방향으로 힘이 함께 작용하는데, 중력과 정전기력의 합이 표면장력보다 크게 될 때 액적이 떨어지게 된다. 정전기력 잉크젯 헤드의 특징은 노즐 오리피스 직경보다 작은 크기의 액적이 토출가능하고, 직접 잉크에 전기장을 인가하므로 액적토출을 위해 헤드 내에 압전 소자나 히터가 불필요하여 멀티 잉크젯 헤드를 위한 집적화가 가능하다는 점이다 [13-26].

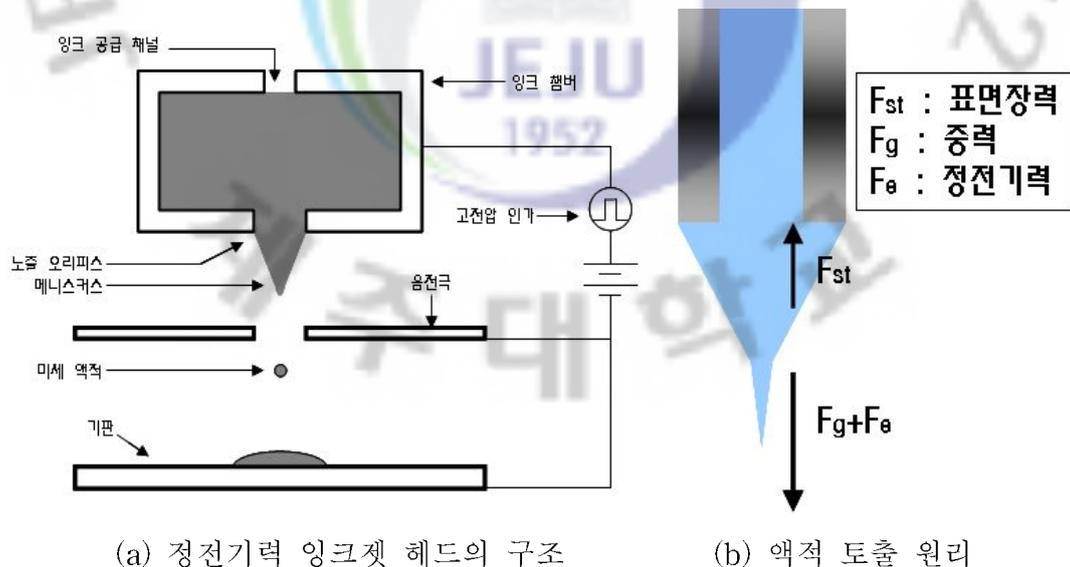


그림 2.3. 정전기력 잉크젯 헤드의 원리.

III. 정전기력 잉크젯 헤드 개발

정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 다양한 기능성 재료를 정전기력 기반의 잉크젯 헤드를 통해 목표 기판(substrate) 위로 패터닝(patterning)하기 위한 공정 시스템이다. 인쇄전자 공학의 응용을 위한 고성능, 저비용과 친환경적인 공정이 가능한 차세대 잉크젯 프린팅 시스템 기술이다. 일반적인 정전기력 잉크젯 시스템은 정전기력 잉크젯 헤드(electrostatic inkjet head)와 고전압발생장치, 마이크로 용액 공급 장치, 정밀 이송 장치, 그리고 이를 제어하는 통합 공정 제어 시스템으로 그림 3.1.과 같이 구성된다.

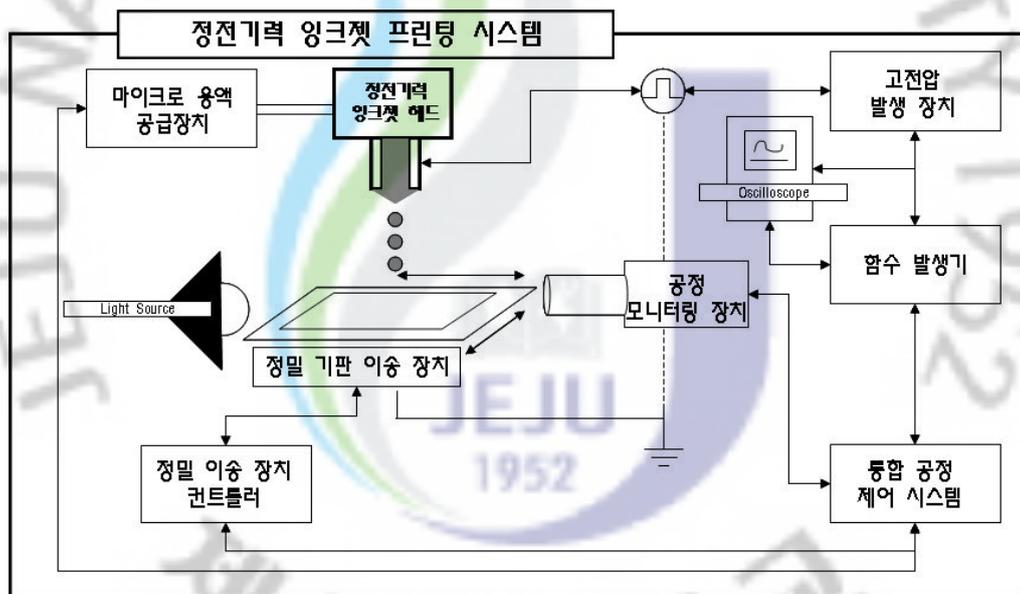


그림 3.1. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도.

그리고 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성 요소에서 핵심 기술인 정전기력 DOD(drop on demand) 잉크젯 헤드의 구동 원리를 통해 PCB, PDMS, MEMS 그리고 유리 모세관 잉크젯 헤드 개발하였고, 통합 잉크젯 헤드와 멀티 잉크젯 헤드의 설계 방안을 제시하였다.

그림 3.2.는 정전기력 DOD 잉크젯 헤드의 공정원리와 액적의 토출 특성을 나

타낸다. 정전기력 DOD 공정 단계는 메니스커스 형성과 액적 토출로 구분되며, 메니스커스 형성 단계에서는 잉크젯 헤드 내부로 공급된 전도성 잉크가 직류 바이어스 전압에 의하여 노즐 오리피스 상에 잉크의 메니스커스를 형성되고, 여기에 고전압 펄스 전압을 인가하여 메니스커스 끝단에서 잉크의 미세 액적을 분리시켜 기판위에 패터닝하는 과정을 액적 토출 단계라고 한다. 특히, 정전기력 잉크젯 헤드를 이용하여 전도성 잉크를 연속적으로 기판위로 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.

고전압 펄스 전압에 의해 토출되는 미세 액적의 크기는 헤드의 노즐 오리피스 직경과 인가된 전압 및 전기장에 대하여 반비례하는 특성을 보이며, 메니스커스 형성과 미세 액적 토출 두 단계를 연속적으로 반복하여 기판 상에 전도성 패턴을 형성하게 된다.

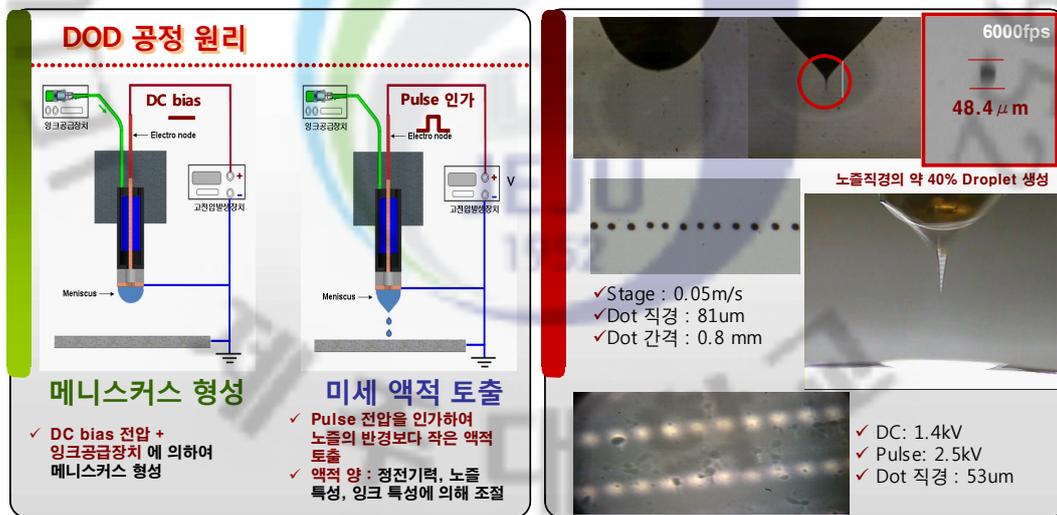


그림 3.2. 정전기력 잉크젯 DOD 헤드 공정원리.

1. PCB 기반 잉크젯 헤드 설계

기존의 정전기력 잉크젯 헤드의 구조를 살펴보면 유체에 직접 전압을 인가하고 전기장을 형성할 수 있는 양 전극부와 음 전극부, 유체를 잉크젯 헤드의 노즐 오리피스까지 공급하는 잉크 공급로 그리고 헤드의 몸체와 내부 잉크 챔버를 구성하는 부분으로 구분되고, 각각의 제조 공정에서는 MEMS공정, 기계적 미세 가공 공정 등을 필요로 한다. 이러한 정전기력 잉크젯 헤드의 구조적 특성과 제작공정을 토대로 PCB 제작 공정을 응용하여 정전기력 PCB 기반 잉크젯 헤드를 그림 3.3와 같이 3가지의 형태로 설계하였다. PCB 제작공정은 크게 동박압착, 노광, 식각, 도금, 홀 제작, 절삭으로 이루어지는데, 홀 가공 공정을 제외하여 전체적인 헤드의 형태를 제작하고 동박 기판 상에 미세 노즐 홀을 미세 방전 가공 공정 (micro electrical discharge machining process)을 이용하여 제작하였다. 기존 PCB 동박 상에 기계적 드릴 가공을 통해 제작 가능한 스루홀(through hole)의 크기는 최소 $250\mu\text{m}$ 인데 반해, 미세 방전 가공을 이용하면 $100\mu\text{m}$ 이하의 노즐 오리피스를 쉽게 가공할 수 있다. 그림 3.3.의 정전기력 PCB 잉크젯 헤드의 설계에서는 각각 싱글 노즐 오리피스를 갖는 잉크젯 헤드의 구조를 보여주는데, 그림 3.3. (a)에서는 전기적 절연 특성을 갖는 PCB 적층판 잉크 공급로 역할을 할 수 있는 홀을 먼저 제작한 다음, 동박을 적층하여 동박 위로 미세 방전 가공기를 이용하여 미세 노즐 오리피스와 양전극의 역할을 하는 홀을 가공하여 조립되는 헤드의 모습이다. 그림 3.3.(b)에서는 (a)의 설계에서 응용하여 헤드의 노즐 오리피스 하단부에 절연 층과 음전극을 구성한 두 전극이 헤드에 통합된 형태를 보여주고, (c)에서는 (b)에서 설계된 통합형 헤드에서 노즐 오리피스층 위로 텅스텐 니들 (tungsten needle)을 삽입할 수 있는 층을 적층하였다. 그림3.3.(c)에서 노즐 오리피스 층의 양전극 역할을 텅스텐 니들이 대신하면서 전기적 힘을 노즐 오리피스에 집중하는 역할을 하게 된다.

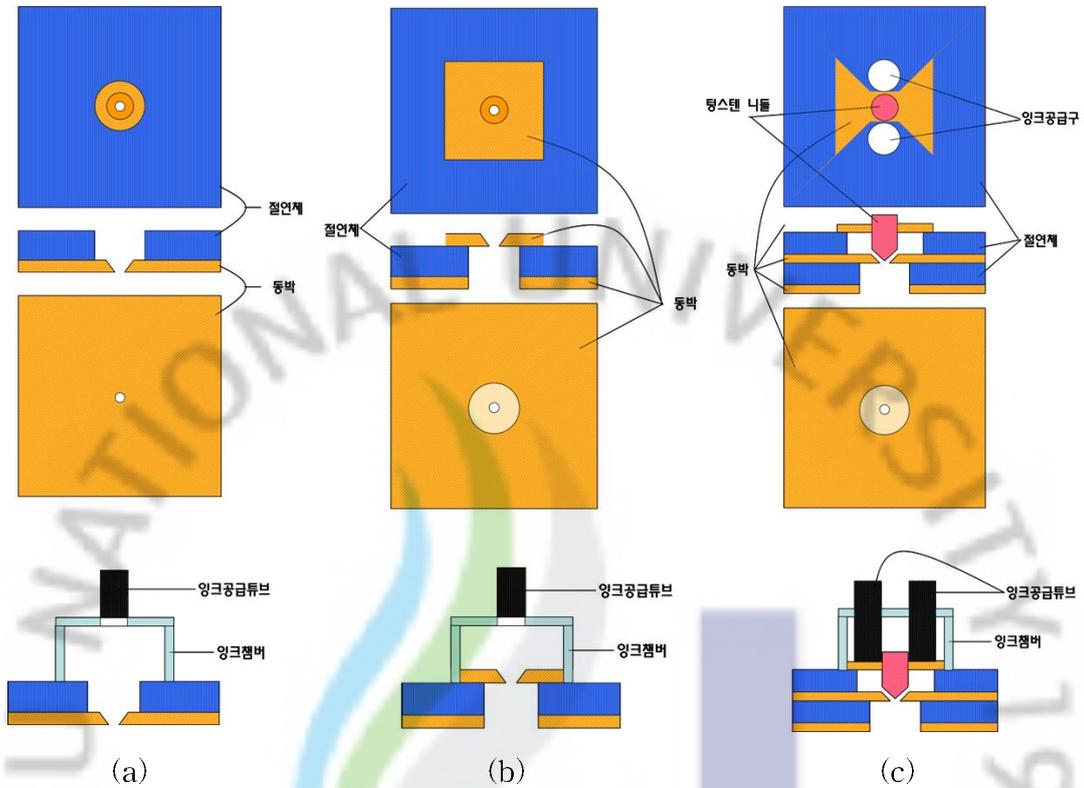


그림 3.3. PCB 잉크젯 헤드 설계.

실제 정전기력 PCB 잉크젯 헤드 제작에서는 그림 3.3.(a)의 형태를 응용하여 그림 3.4.과 같은 3 가지 형태를 헤드를 제작하였다. 그림 3.4 (a)는 그림3.3(a)에 서 보인 형태로서 동박적층판(copper clad laminate) 상에 미세 방전 가공기를 이용하여 $100\mu\text{m}$ 이하의 노즐 오리피스를 제작하였다. 액적 토출 실험 결과, 동박 상에 소수성 처리를 하지 않는 PCB 잉크젯 헤드의 경우 전도성 잉크가 직류 바이어스 전압에 의해 노즐 오리피스 상에 메니스커스를 형성하는 과정에서 잉크가 퍼지는 현상이 생겼는데 이를 보완하고자, 그림 3.4.(b)와 (c)의 두 가지 형태를 PCB 잉크젯 헤드를 제작하여 성능 실험을 하였다.

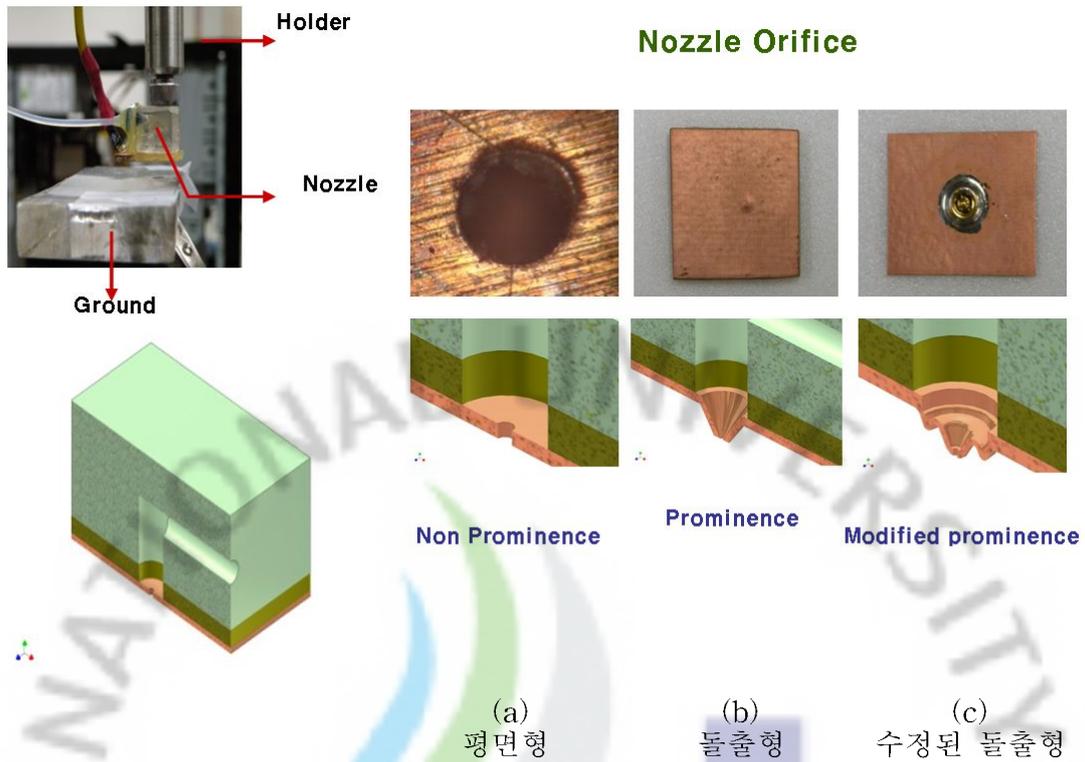


그림 3.4. PCB 잉크젯 헤드 제작.

2. PDMS 기반 헤드 설계

PDMS는 고분자 폴리머 화합물로서 광범위한 응용성을 가지고 있어 다양한 산업분야에서 상당한 가치를 지니는 기본재료로 소수성 표면, 화학적 안정성, 내열성, 투명 재질, 무독성의 특성을 갖는다. PCB 잉크젯 헤드에서 보인 노즐 오리피스 끝단에서 메니스커스가 번지는 문제를 PDMS 잉크젯 헤드가 갖는 소수성 표면의 성질에 의해서 해결이 가능하였으며, PDMS 잉크젯 헤드 노즐 오리피스 끝단에서 보다 큰 고접촉각을 갖는 메니스커스가 형성되었고, 직류 바이어스 전압 또한 낮출 수 있다. PDMS 잉크젯 헤드의 제작 공정은 그림 3.5.에서와 같이 몰드 제작, PDMS의 주입, PDMS의 소성, PDMS의 탈형 공정을 거치게 되며 최종적으로 얻어낸 헤드는 오리피스 크기가 $280\mu\text{m}$ 인 텅스텐 전극이 헤드의 오리피스 밖으로 돌출된 형태로 제작되었다. 텅스텐 전극부의 돌출은 노즐 오리피스 상

에 메니스커스 모양이 잉크의 표면 장력에 의해 텅스텐 전극을 따라 침예한 형태를 만들게 되는데, 이는 토출된 액적의 크기와 인가된 고전압을 낮추는데 효과적인 성능을 보인다.

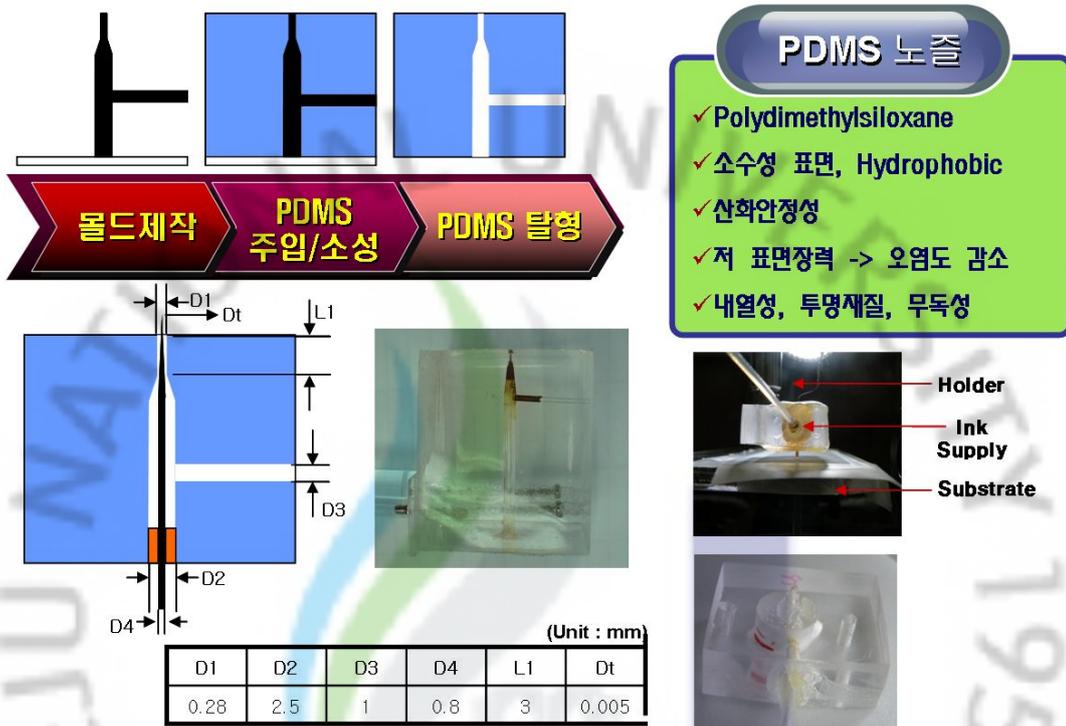


그림 3.5. PDMS 노즐 제작 및 특성.

3. MEMS 기반 잉크젯 헤드 개발

그림 3.6.은 MEMS 기반 공정을 거친 실리콘 헤드를 보여준다. 여기서 PDMS의 역할은 실리콘웨이퍼 위에 잉크 공급구를 형성해주는 역할로서 앞서 보인 PDMS 정전기력 헤드와는 판이하게 다른 용도이고 액적토출에 영향을 미치지 않는다. MEMS 헤드 제작 후, 실리콘 노즐 표면에 테플론 코팅처리를 하여 소수성 표면 성질을 확보하였고 헤드 개발에서 소수성 표면 성질의 확보는 잉크 챔버 내에 전계 형성 시 노즐 오리피스 상에 만들어지는 잉크 메니스커스가 헤드 표면으로 흘러가지 않고 정확한 액적을 만들기 위해서이다.

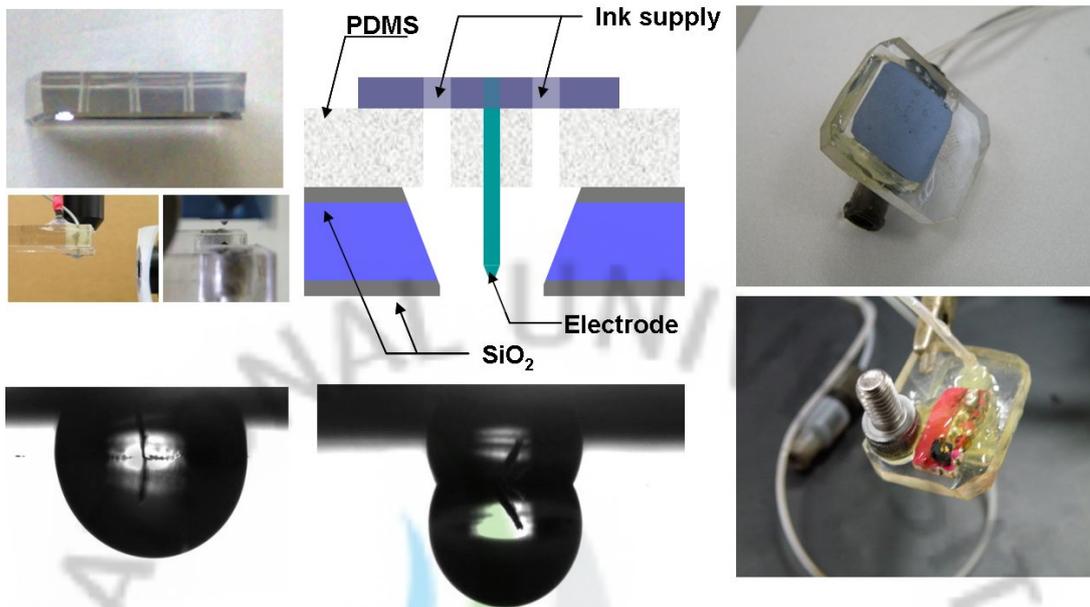


그림 3.6. MEMS 잉크젯 헤드 개발 및 소수성 특징.

4. 유리 모세관 잉크젯 헤드 개발

그림 3.7.은 유리 모세관 타입의 정전기력 잉크젯 헤드를 보여준다. 유리 모세관에 열과 압력을 동시에 가하여 수가지의 노즐 오리피스 직경을 갖는 헤드를 제작할 수 있다. 노즐 오리피스의 직경은 약 $100\mu\text{m}$ 크기에서부터 약 $1\mu\text{m}$ 정도까지 제작이 가능하였으나, 실질적으로 실험에 쓰인 범위의 노즐은 $5\mu\text{m}$ ~약 $50\mu\text{m}$ 까지 이다. 모세관 타입의 장점은 노즐이 실제 액적 토출 시간까지의 Warm-up(이하 워업)시간이 비교적 짧다는 점과 지속적으로 일관된 성능을 보여준다는 것이다. 하지만 선폭을 좀 더 줄이기 위한 공정변수는 모세관 노즐 오리피스 직경에 의존하는데 $10\mu\text{m}$ 근방부터는 전도성 잉크내의 금속 미세 입자끼리의 뭉침 현상으로 인하여 노즐 오리피스가 막히는 문제점이 발생하였고 30wt% 이상의 고점도 잉크 사용 시 모세관 장력이 강하여 정전기력만으로는 액적토출이 불가능하여 마이크로 용액 공급 장치의 공급 유량을 증가시켜 토출 압력을 증가시켰다.

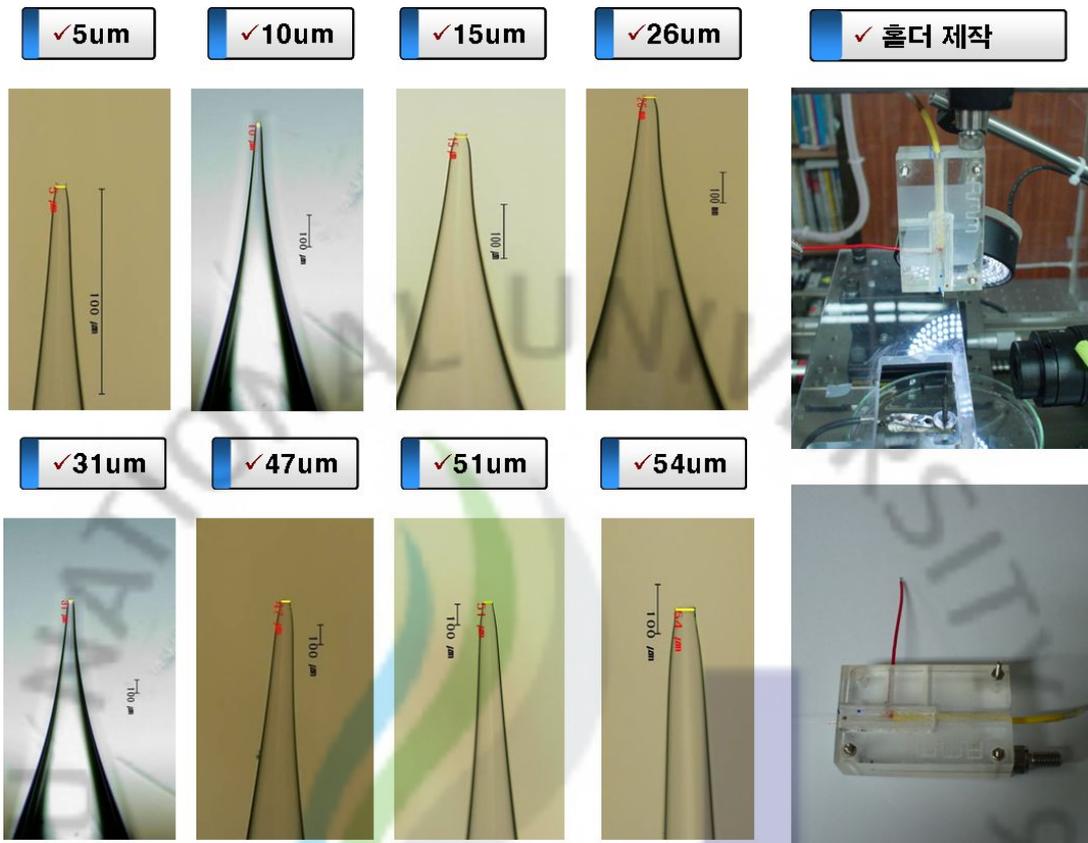


그림 3.7. 유리 모세관 잉크젯 헤드.

5. 통합 잉크젯 헤드 설계

그림 3.8.은 통합형 정전기력 잉크젯 헤드를 보여준다. 통합형 헤드란 핀투플레이트 방식과는 달리 접지가 헤드 유닛에 포함된 접지 통합형 헤드라고 할 수 있다. 접지 통합은 양·음 전극사이의 간격의 조절, 노즐 오리피스와 원형접지간의 정렬 문제 등으로 제작에 있어 매우 정밀한 제작 공정조건 요구하나 멀티헤드로써의 확장성과 별도의 접지 전극이 필요 없다는 점은 단일의 헤드로써 완성된 형태라고 볼 수 있다.

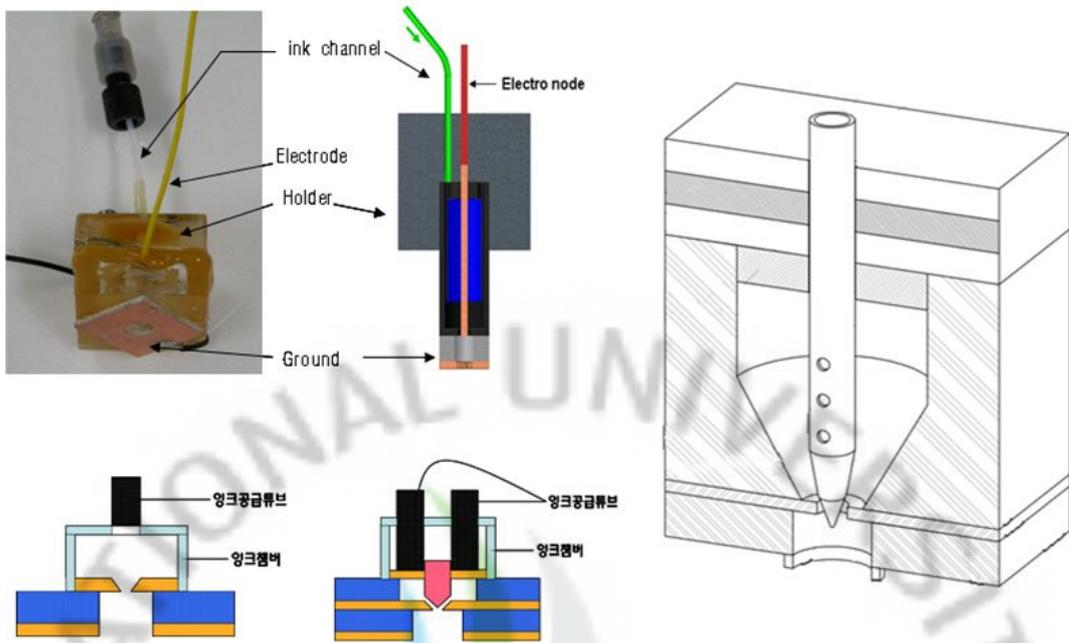


그림 3.8. 통합 잉크젯 헤드 설계.

6. 멀티 잉크젯 헤드 설계

정전기력 잉크젯 멀티 노즐 헤드의 필요성은 단순한 싱글 헤드의 확장으로 가져올 수 있는 패터닝 시간은 단축이나 범위의 확장뿐만이 아닌, 상이한 전도성과 필요에 따른 다양한 기능성 재료를 성과고 닌, 상패터닝 할 수 있다는 점이다. 멀티 노즐 설계에서 우선 고려되어야할 점은 노즐 간의 정전기력 간섭과 각각의 다른 특성의 잉크 분리 공급 문제, 그리고 양전극의 배확장뿐고정 방안 등을 들 수 있다. 또한 통합형 헤드으로써 제작 가능 여부와 노즐 막힘 현상장뿐같은 잉크 선택으로 인해 뒤따르는 변수를 고려해야 할 것이다.

싱글 헤드에서 멀티 헤드로의 확장 제작은 상당한 기술적 숙련도를 요구한다고 할 수 있다. 같은 공정에서 만들어진 싱글 헤드일지라도 똑같은 공정조건에서 결과가 미세하게 나타날 수 있고, 싱글 헤드에서의 성능이 멀티 헤드로 재구성시에는 전혀 기대와 다른 결과를 보일 수 있기 때문에 멀티 헤드 제작은 높은 수준의 기술을 요구한다. 먼저 멀티 헤드의 제작 시에는 인접 노즐과의 전기력 영향

을 고려하여야 하는데 정전기력 잉크젯 헤드 자체가 고전압의 인가로써 작동하기 때문에 전기장이 인접노즐에 영향을 주거나 혹은 영향을 받아 뜻하지 않은 동작을 할 수 있다. 노즐간의 전기장 영향력을 다중 물리 시뮬레이션을 통해 분석한 후 정전기력 멀티 노즐 헤드를 설계 한다. 그림 3.9.에서 보이는 바와 같이 PCB 노즐 헤드의 경우 앞서 통합형 헤드의 제작 기술을 응용하여 설계가 가능하였다. RP 노즐의 경우 중앙의 노즐 고정부를 제외한 총 8 개의 노즐 오리피스 를 가질 수 있는 헤드를 설계하였다.

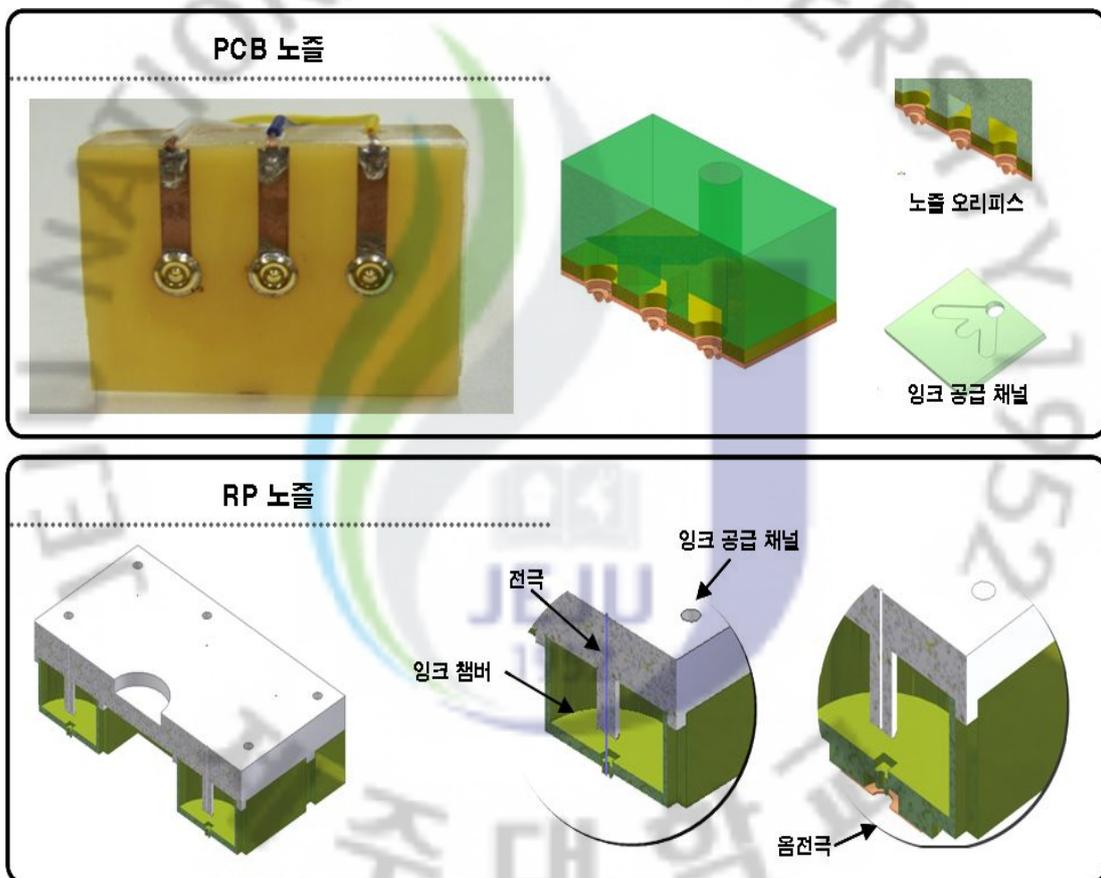


그림 3.9. 멀티 잉크젯 헤드 설계.

IV. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 및 고찰

1. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 및 결과

정전기력 잉크젯 헤드의 공정 실험에서 고려해야 할 변수를 표 4.1.과 같이 구분하였다. 먼저 잉크 특성의 기술적 요소인 점도, 표면장력, 건조특성, 캐리어의 종류는 잉크의 성능과 시스템 및 헤드에 따라 고려되어야 할 점이다.

액적 토출 특성의 토출 주파수와 액적의 균일성, 위성액적의 토출 여부, 액적 꼬리의 길이와 젯팅 신뢰성 등은 공정변수 중에서 고전압 특성에 많은 영향을 받는데, 고전압은 펄스 인가 시 주파수, 듀티비, 파형과 전압 등의 제어가 가능하다. 함수발생기를 통해 파형을 생성하고, 주파수는 직류 전원부터 2 kHz까지 인가하여 액적 토출 현상에 따라 세부적인 제어를 하였다.

기판의 경우 플라스틱 소재 유연 기판과 유리 기판의 소수성 표면처리를 통해 액적이 기판 표면에 기착 시 고 접촉각을 형성하여 퍼짐을 방지할 수 있고, 기판에 온도를 가할 수 있는 베이스 히터가 설치되어 있어 상온에서 80°C 까지 표면 온도를 확보 할 수 있다. 또한 잉크젯 시스템의 성능은 크게 공정 장비의 특성과 잉크젯 헤드의 성능 두 가지 요소에 의해 결정되는데, 특히, 정전기력 잉크젯 헤드의 경우 헤드 형태는 토출 메커니즘을 결정하는 중요한 요인이 되고 노즐 오리피스 사이즈에 따라 토출 가능한 액적의 사이즈가 결정되며 실리콘, 폴리머 구조체, 유리와 금속 등의 다양한 재료를 가지고 정전기력 잉크젯 헤드를 제조하여 액적 토출 실험을 진행하였다.

표 4.1. 정전기력 잉크젯 프린팅 공정변수

구분	기술 요소	제어 방법
잉크 특성	점도 표면장력 건조특성 캐리어 종류	• 잉크 선택 시 고려 사항
액적 특성	토출 주파수 액적의 균일성 위성 액적의 토출 꼬리 절단 길이	• 고전압 입력 펄스파의 주파수 제어 • 토출 모니터링을 통해 전압 제어로 특성 분석
토출 특성	액적의 직진성 노즐과 젖음 특성 노즐 막힘 젯팅 신뢰성	• 노즐 수평 맞춤, 음진극과의 정렬을 통해 해결 • 정전기력 잉크젯 헤드 소수성 표면 처리 • 실험 환경 조건(온·습도)조절, 잉크 점도 선택 • 실험 조건과 환경변수 데이터베이스 구축
기판 특성	기판 온도 피질 특성	• 베이스 히팅 플레이트를 통해 기판표면 온도 제어 가능 • 기판의 전처리(소수성 표면 확보)
헤드 특성	헤드 형태/ 재료, 노즐 크기	• 정전기력 잉크젯 헤드 설계 시 다중물리해석을 통한 시뮬레이션 분석 결과 고려
장비 특성	프린팅 속도/ 기판 이송 속도 젯팅 높이 미세 진동 패터닝 순서 반복성 잉크 공급 유량	• 정밀 기판 이송 장치 속도 모드 제어 • 헤드 이송 장치 위치 제어 모드 • 시스템 하부 진동 흡수 구조체 설치 • 통합 제어 프로그램을 통한 패터닝 과정 자동화 • 페루프 제어를 통한 장비 오차값 감소 • 마이크로 용액 공급장치를 통한 유량제어
결과 사양	선 두께와 폭 선 가장자리 균일성 접착성 소결 방법 소결온도 / 시간	• 노즐 오리피스 직경 조절과 기판이송 속도 제어 • 기판 표면 온도 제어 및 액적 토출 높이 제어 • 전도성 잉크와 기판간의 상호호환성 검토 • 전도성 잉크의 UV 경화, 열경화, 상온경화성 및 특성 검토

정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험에 사용된 입력 전압의 형태는 그림 4.1.에 나타내었다. 입력 전압의 고전압 펄스는 구형파를 사용하였다. 액적 토출이 이루어지는 최대전압은 V_{max} , 구형파의 최소값인 직류 기준전압을 V_{dc} , 구형파의 첨두치 전압을 V_{p-p} 로 하고 고전압 입력 파형의 접지를 V_g 로 설정하였다.

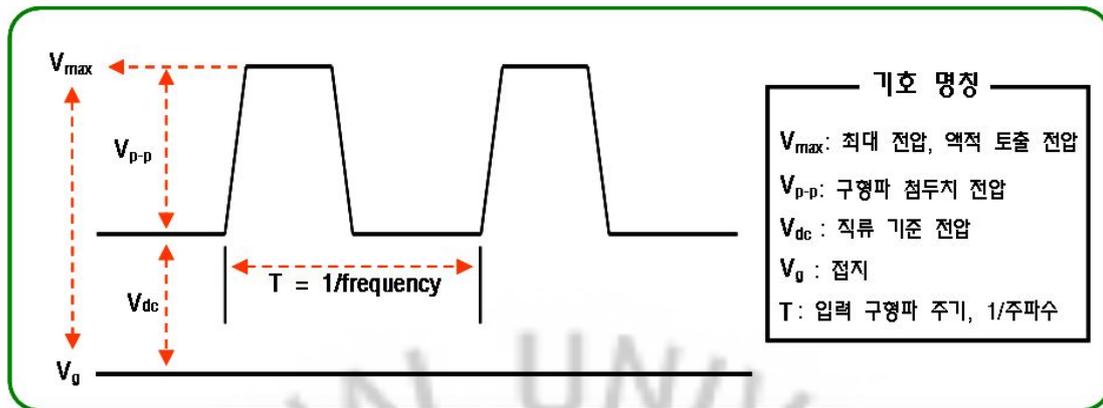


그림 4.1. 정전기력 잉크젯 헤드 공정 실험 입력 전압.

본 연구에 사용된 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템의 성능 실험에 사용된 금속 나노 입자 잉크(전도성 잉크)의 세부 파라미터들을 표 4.2.에 표시하였다. 잉크의 용제는 solvent가 사용되었으며, Ink1과 Ink2는 나노 입자 함량의 차이와 표면장력의 차이만 보이고 소성온도와 점도의 특성은 같다. Ink3, 4, 5도 마찬가지로 소성온도와 표면 장력은 차이는 거의 없지만, 점도와 나노입자함량을 다르게 한 잉크를 사용하였다. 전도성 라인 패터닝 시, 잉크내의 금속 나노 입자량의 증가는 패터닝의 전기적 성질에 영향을 미칠 수 있다.

표 4.2. 정전기력 잉크젯 헤드 실험용 금속 나노 입자 잉크

구분	점도	표면장력	나노입자함량	용제	소성온도
Ink 1	9~15cps	20.9dyn/cm	15wt.%	solvent	130~150℃
Ink 2	9~15cps	30~32dyn/cm	20wt.%	solvent	130~150℃
Ink 3	58cps	4.9dyn/cm	45wt.%	solvent	80℃
Ink 4	39cps	5dyn/cm	50wt.%	solvent	80℃
Ink 5	87cps	5.3dyn/cm	55wt.%	solvent	80℃

1) 정전기력 잉크젯 헤드 액적 토출 실험 및 결과

정전기력 잉크젯 헤드와 공정 모니터링 장치를 통해 전도성 잉크를 사용하여 액적 토출 현상을 비교·분석하였다. 헤드의 도식적인 모양을 각 그림 4.2.의 (a), (b), (c)의 좌상에서 비교할 수 있다. 헤드의 노즐 오리피스 모양은 우상에 나타내었고, 초기 노즐 오리피스 상에 형성되는 메니스커스는 좌하, 고전압 인가 후에 나타나는 테일러 원추의 모양을 우하에 표시하여 비교하였다.

그림 4.2.은 PCB헤드를 이용한 노즐의 액적 토출 실험의 비교·결과를 나타낸다. 그림 4.2. (a) 평면형 헤드는 노즐 오리피스의 하단면상에 표면처리가 용이하지 않아 잉크 주입 후 전압인가와 동시에 메니스커스 형성 단계에서 잉크가 표면에 퍼지는 현상과 함께 테일러 원추가 크게 형성되었다. 그림 4.2. (b)는 하단 동박부의 노즐 오리피스를 원추모양으로 수정하여 기존의 헤드보다 테일러 원추가 보다 첨예해지는 형태를 보였으나 노즐 측면으로 잉크의 퍼짐 현상은 계속되었다. 그림 4.2. (c)의 수정된 돌출형 헤드를 나타내는데 (b) 돌출형 헤드에서 보인 잉크 퍼짐 현상을 막고자 측면에 원형의 단차를 제작하여 잉크 퍼짐이 더 이상 진행이 되지 않도록 한 결과 안정적인 테일러 원추를 형성과 동시에 액적 토출이 이루어졌다.

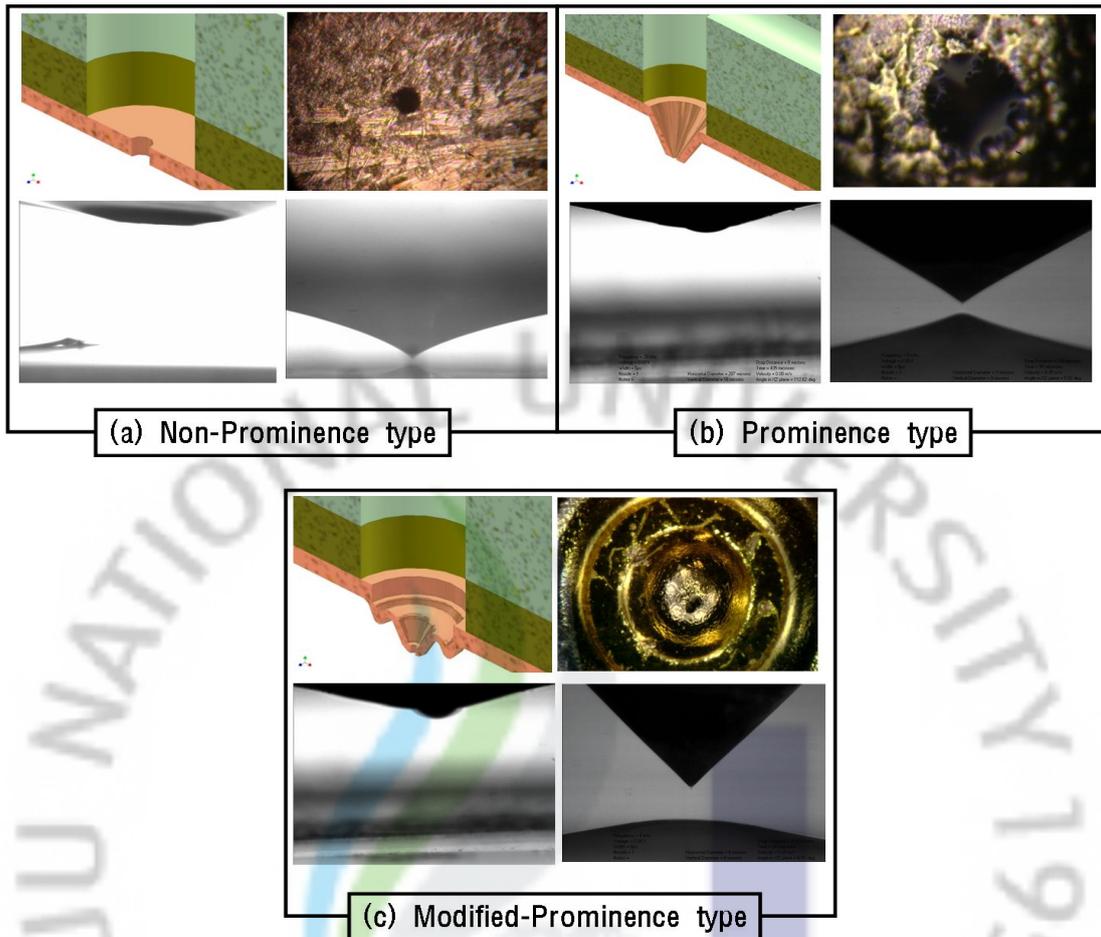


그림 4.2. PCB 잉크젯 헤드 노즐 오리피스 형태에 따른 테일러 원추 모양 비교

- (a) 평면형(non-prominence type),
- (b) 돌출형(prominence type), (c) 수정된 돌출형(modified-prominence type).

그림 4.3.는 노즐 오리피스 형태가 모세관 모양을 갖는 PDMS 잉크젯 헤드의 액적 토출 단계를 나타낸다. PDMS의 장점은 앞서 명시되었던 바대로 노즐 오리피스 표면 자체가 소수성 성질을 가지고 있어서 그림 4.2. (a)~(d)의 경우와 같이 별도의 화학적 표면처리 없이도 첨예한 테일러 원추가 형성되었으나, 신축성을 가지고 있는 PDMS 특성상 모세관 형태의 오리피스 제작 시 실패율이 높았으며, 쉽게 파손되고 내구성 또한 낮았다.

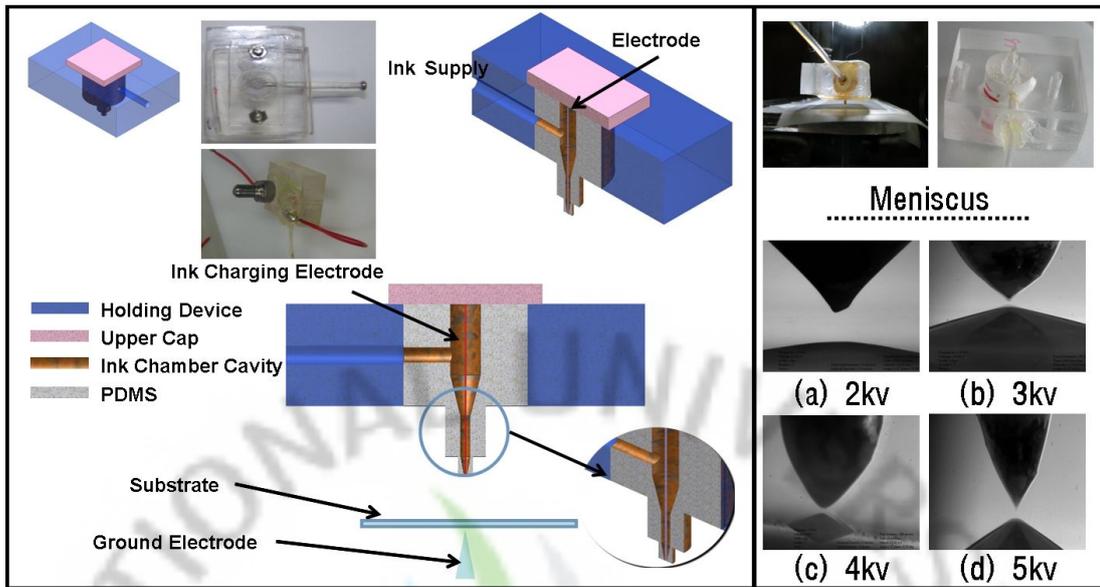


그림 4.3. 모세관 형태를 갖는 PDMS 잉크젯 헤드.

그림 4.4.은 모세관을 제거한 평탄한 노즐 오리피스 형태를 갖는 PDMS를 제작하여 액적 토출 실험을 진행한 결과를 보여준다. 접지의 형태를 핀 방식으로 구성한 결과 액적 토출 시퀀스는 그림 4.4. (a)와 같이 직류 고전압 기준에 의한 초기 메니스커스 형성 단계를 거쳐 (b)의 구형과 펄스 입력 후 전도성 잉크 액적이 토출되는 과정을 거치면서 다시 (c)와 같은 메니스커스 복귀와 동시에 2번째 액적 토출 초기 상태를 반복하는 구동을 보여주었다.

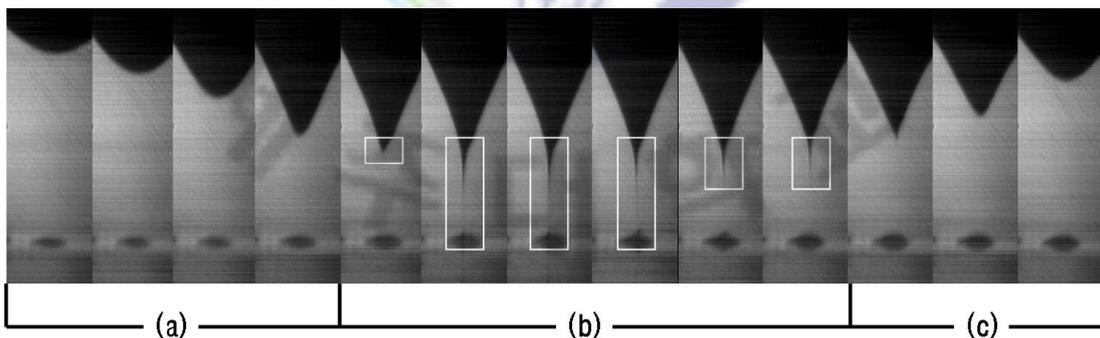


그림 4.4. 평탄한 노즐 오리피스를 갖는 PDMS 잉크젯 헤드의 액적 토출 모드 (a) 초기 메니스커스 형성 단계, (b) 액적 토출 단계, (c) 메니스커스 복귀 단계.

그림 4.5., 4.6., 4.7.은 평탄한 노즐 오리피스를 갖는 PDMS 잉크젯 헤드의 액적 토출 실험에 대한 내용을 정리한 것으로 고전압 직류 기준 전압, 고전압 구형파 침두치 그리고 구형파 입력 주파수를 바꿔 주면서 진행하였다. 먼저 비교적 낮은 주파수에서 천천히 변화하는 메니스커스의 형태를 보고자 그림4.5.의 구형파의 입력 주파수를 50Hz로 설정하였다. 고전압의 직류 기준 전압을 0에서부터 천천히 올려 초기 메니스커스 형성되는 지점을 1.3kV로 설정하였다. 그리고 고전압 침두치를 0.1kV씩 증가시켜 최초 액적 토출 지점을 1.5kV로 설정할 수 있었다. 그림 4.5.의 PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 1은 헤드의 최초 액적 토출 조건을 찾아내기 위해 진행되었고, 좀 더 안정된 조건을 찾기 위해 고전압 조건을 증가시킨 결과 그림4.6.과 그림4.7.의 직류 기준 전압 1.5kV, 최대값 1.7kV 그리고 주파수 150 Hz를 설정할 수 있었다.

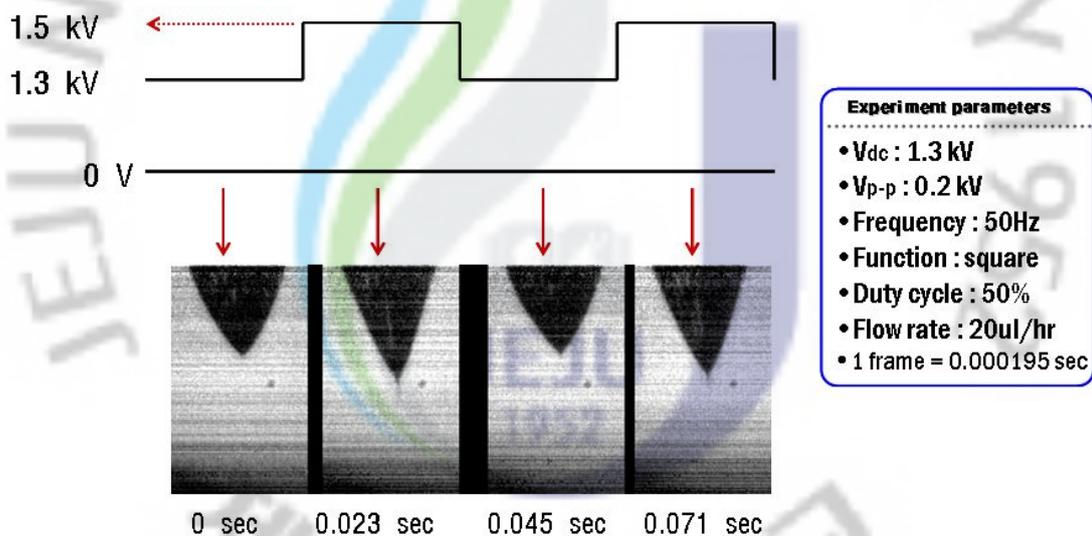


그림 4.5. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 1.

그림 4.6.과 그림 4.7.은 직류 기준 전압과 고전압 구형파 최대값을 1.5kV와 1.7 kV로 고정하고 구형파 입력 주파수를 150Hz에서 300Hz로 변화를 주면서 실험한 결과를 나타낸다. 그 결과, 액적의 토출 주기 역시 입력 주파수에 비례하여 300 Hz로 증가하였다.

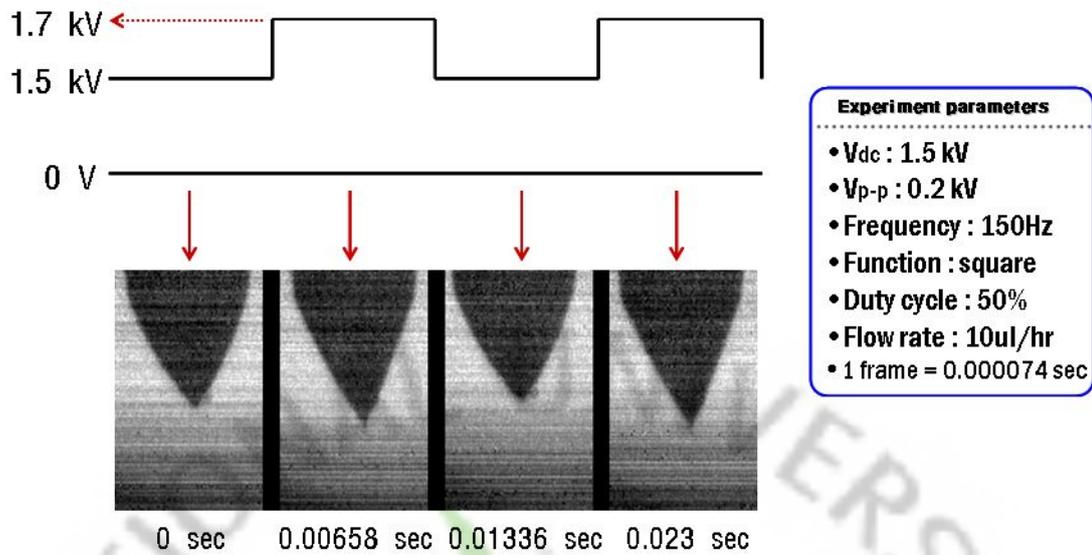


그림 4.6. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 2.

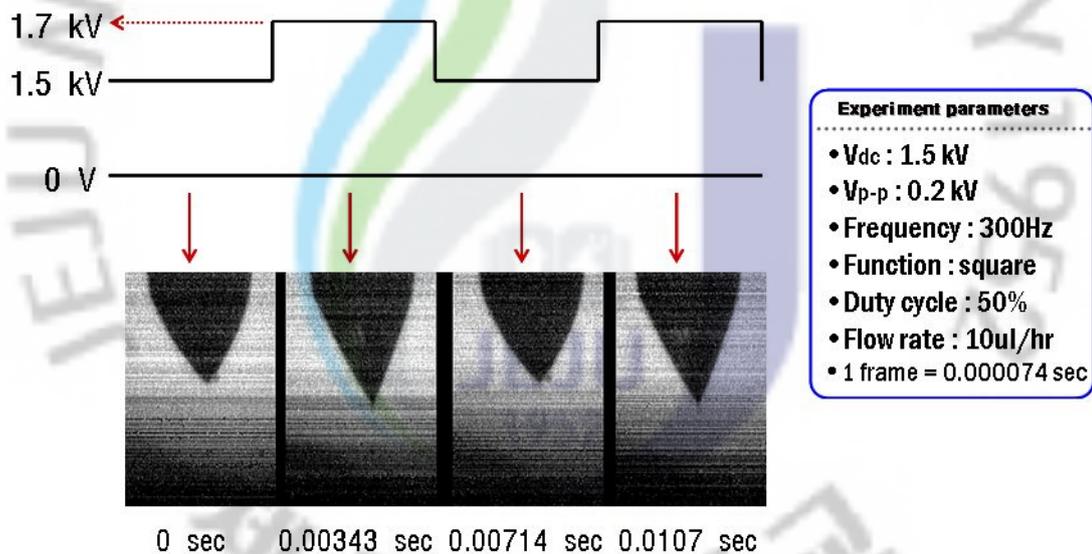


그림 4.7. PDMS 잉크젯 헤드 토출 실험 3.

그림 4.8.과 그림 4.9.은 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드의 액적 토출 실험에 대한 결과를 보여준다. 기본적으로 액적 토출의 전 과정은 3 구간으로 나눌 수 있고, 이에 대해 (a)구간은 초기 메니스커스 형성과정, (b)구간은 고전압 전계에 의한 전도성 잉크의 액적 토출과정과 (c)구간에서는 액적 토출 후 메니스커스가 초기 상태로 복귀하는 과정을 보여준다.

그림 4.8의 실험에서 구간(b)에서 (c)도중에 위성 액적의 분리를 확인할 수 있는데, 첫 번째 액적의 크기가 그림 37에서의 토출된 액적의 크기보다 크고 꼬리가 길다.

그림 4.9는 고전압 구형과 침두치를 0.5kV 증가시켜 토출된 결과로 초기에 형성되는 메니스커스의 크기가 좀 더 침예헤지고 주 액적 토출 시 크기가 작아져서 액적의 꼬리가 그림36과 비교했을 때 매우 짧다는 것을 알 수 있다. 또한 표 4.2.에서 명시한 바와 같이 토출된 액적의 꼬리의 길이는 위성 액적의 생성을 결정할 수 있다는 점을 알 수 있고, 액적의 토출 량 또한 꼬리 길이에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다.

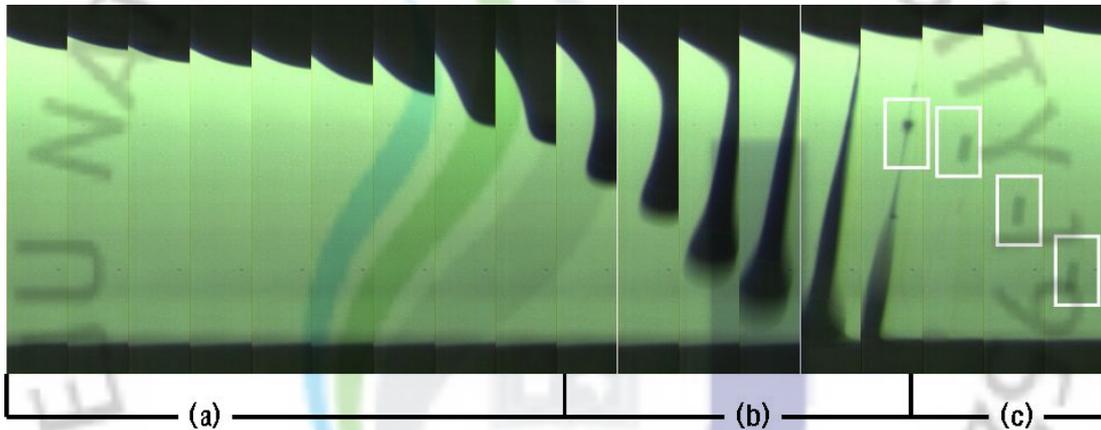


그림 4.8. 금속 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 1 (위성 액적 형성).

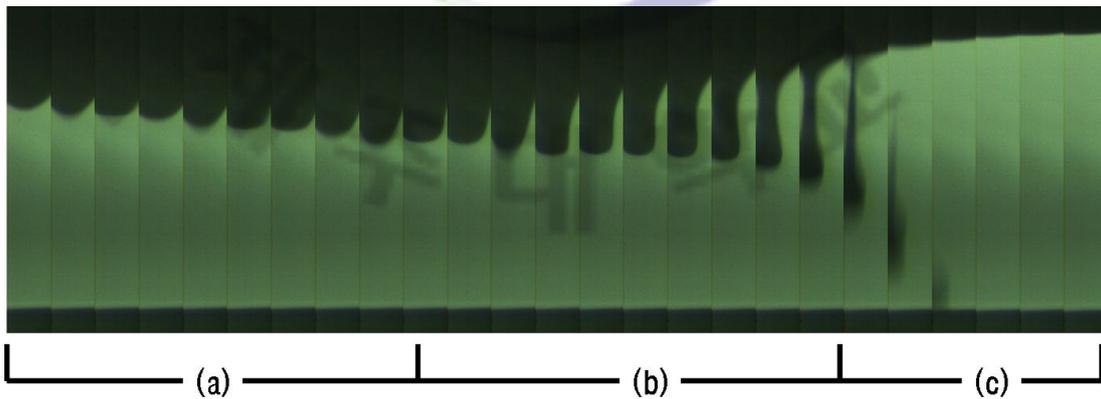


그림 4.9. 금속 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 2.

그림 4.10., 4.11.은 유리 모세관 타입의 잉크젯 헤드를 이용하여 각각 다른 금속 나노 입자 함량을 갖는 잉크를 사용하여 실험을 진행하여 비교할 수 있는 결과를 보여준다. 실험에 사용된 잉크는 표2에 명시된 Ink 3, Ink4 이며, 각각 나노 입자의 함량이 45 wt%, 50 wt%이고, 점도가 조금 차이를 보인다. 두 실험을 각 그림의 (b) 액적 토출 구간에서 비교를 하면 액적의 꼬리 길이가 다른 점을 알 수 있다. 잉크자체의 나노 입자의 함량에 따라 토출 구간의 시간상 변화를 예상하여 비교 실험을 진행하였지만, (a) 매니스커스 형성 단계부터 (b) 액적 토출 단계까지 많은 차이를 보이지 않았다. 하지만 토출된 액적 꼬리 길이 변화는 잉크의 점성과 나노 입자의 함량에 의해 영향을 받는다고 할 수 있었다.

그림 4.12.에서는 그림 4.11.의 실험상에서 입력 주파수 변수만 2배로 조정하면 결과 액적의 토출 주기가 2배 증가하였음을 보여준다.

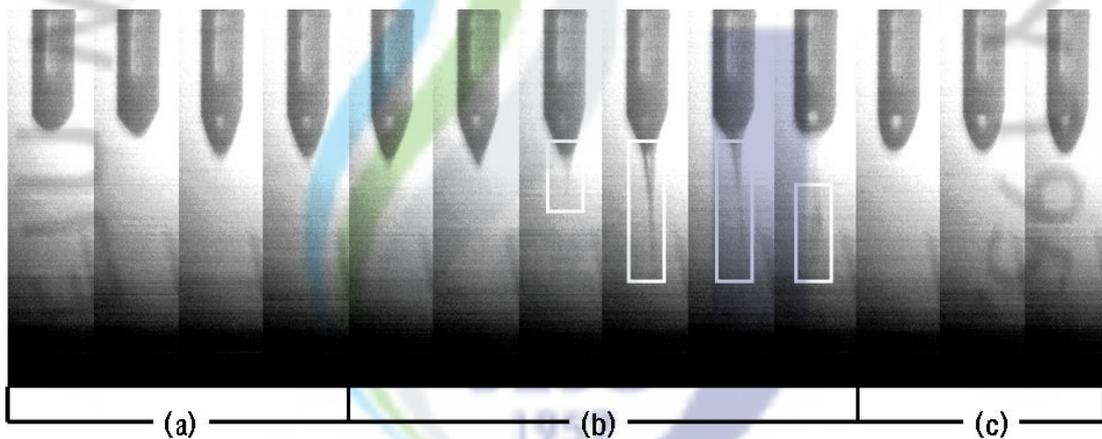


그림 4.10. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 1.

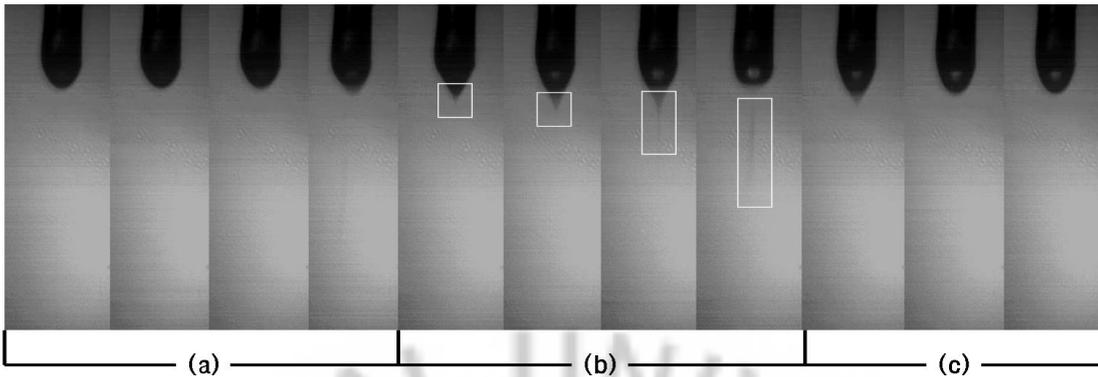


그림 4.11. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 2.

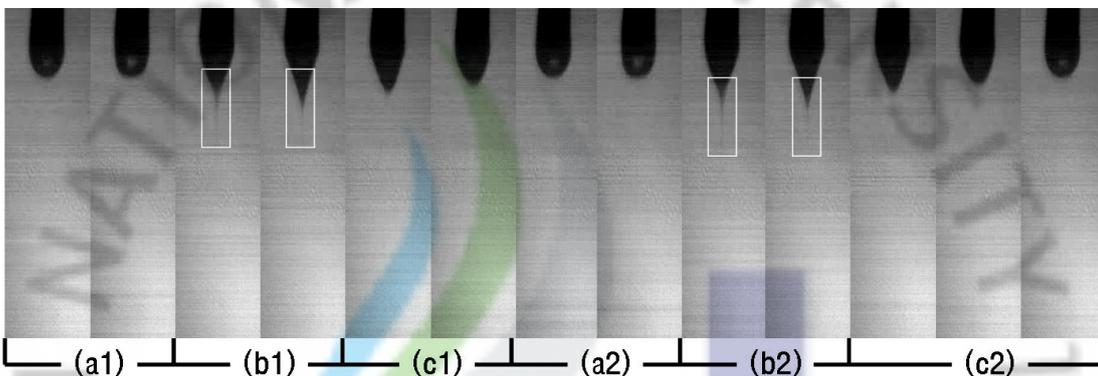


그림 4.12. 유리 모세관 잉크젯 헤드 토출 실험 3.

그림 4.13.은 앞서 실험되었던 유리 와 금속 모세관 타입의 잉크젯 헤드에서 관찰되었던 액적 토출 현상을 보여주고, 그림 4.14.는 Jaworek이 정리한 정전기력 액적 토출 모드에 대한 정리된 자료로 실험결과와 비교할 수 있다 [27]. 그림 4.13. (a)와 (b)에서는 그림 4.14.의 (b)와 같은 형태의 Micro dripping 모드를 보여주며, 헤드에 진동이 없고 정확한 토출 조건의 공정변수가 입력된 상태이다. 그림 4.13. (c)에서는 그림 4.14.의 (h)의 Cone-jet 모드를 보여주며, 헤드와 입력 공정변수는 안정하지만 잉크의 점성이 높을 경우 나타나는 현상이다. 그림 4.13. (d)~(i)의 경우 그림 4.14.의 (j)에서 나타내는 Ramified-jet 현상으로 Cone-jet 상태에서 무작위적인 가지 분무 현상이 어미 잉크 줄기에서 뺏어 나가는 현상으로 패터닝 결과에서 기관의 일정 범위 내에 비교적 균일한 분무가 이루어진다. 그림 4.13. (j)는 그림 4.14.의 (i)와 같은 Multi-jet 현상으로 고전압 인가 시 헤드의 진동과 함께 나타났으며, Ramified-jet 과 같은 분무 현상을 보인다.

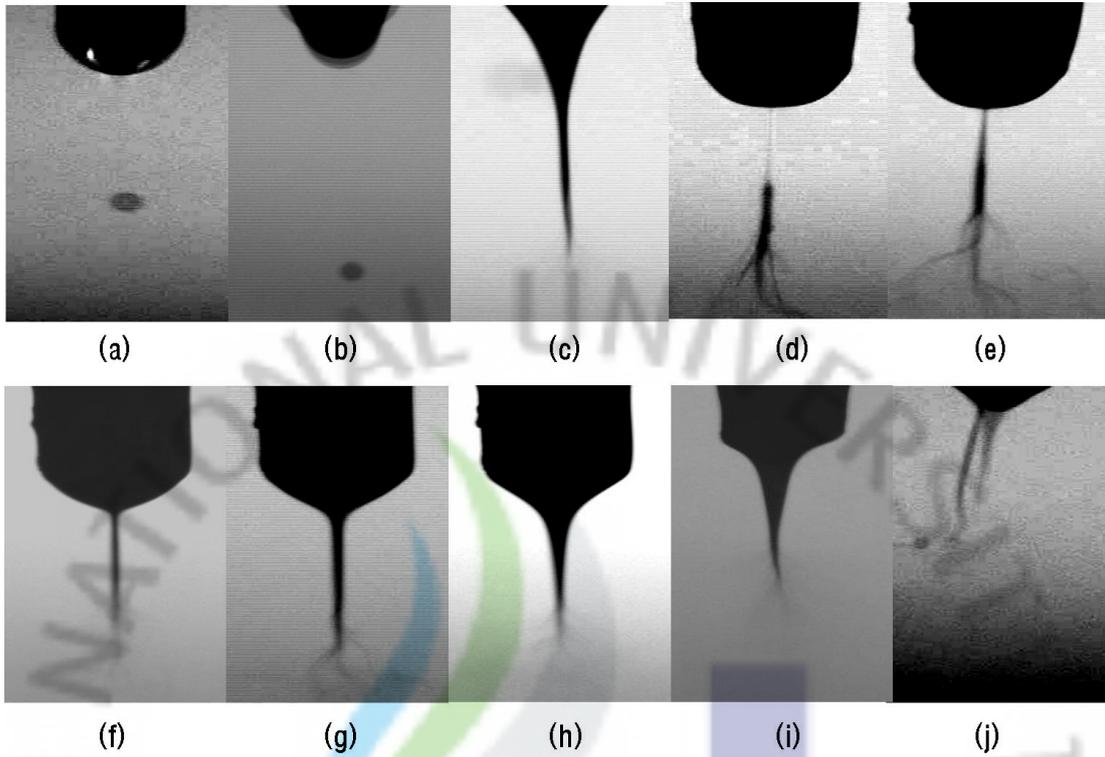


그림 4.13. 정전기력 잉크젯 모세관 헤드의 액적 토출 현상.

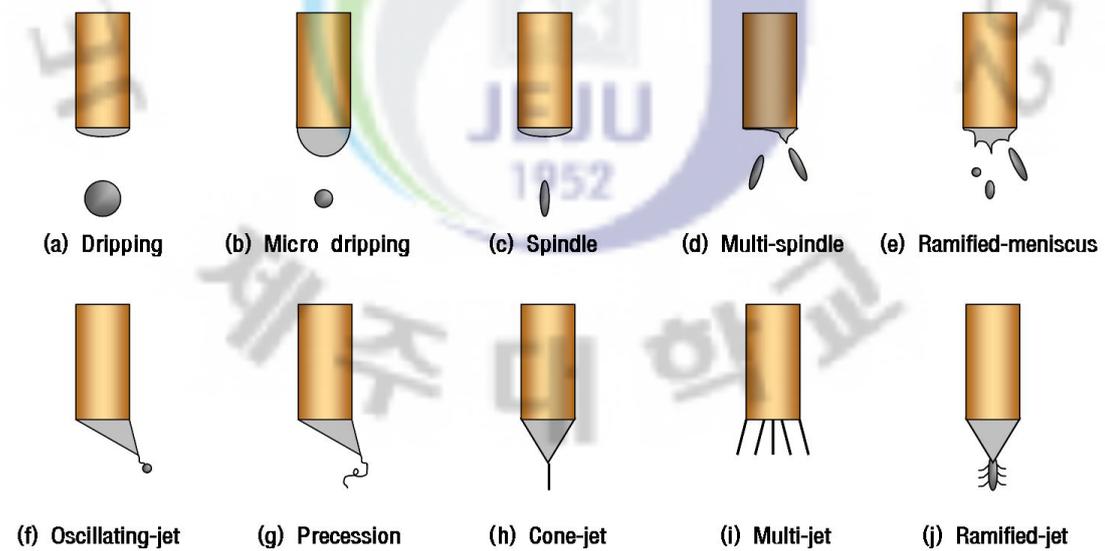


그림 4.14. 정전기력 잉크젯 헤드 액적 토출 모드 분류.

2) 전도성 라인 패터닝 실험 및 결과

공정 모니터링 장치를 통하여 정전기력 잉크젯 헤드의 특성을 잉크 종류별로 실험을 한 결과를 토대로 전도성 라인을 기판 상에 패터닝하는 실험을 하였다. 사용된 기판의 종류는 Photo paper, PET film, 슬라이드 글라스, PI film(폴리이미드 필름)를 가지고 잉크별로 액적 토출 조건을 달리하며 선폭을 비교하는 실험을 진행하였다.

표 4.3.에서 설정된 공정변수를 이용하여 PDMS 정전기력 잉크젯 헤드를 가지고 Ink1를 사용하여 그림 4.15.와 같이 전도성 라인 패터닝을 실시하였다. 표 4.3.의 (a)~(f)까지는 전압을 제외한 모든 공정을 동일하게 유지 하였는데, 전압 변화에 따른 선폭의 변화를 관찰하기 위한 것이다. 그림 4.15.에서의 전도성 라인 먼저 공정변수를 설정하고 같은 속도로 일정길이의 라인을 반복 실험한 결과를 보여주며, (a)의 경우 고전압 구형파 침두치 전압을 1.7kV로 직류성분을 1.5kV로 설정한 결과 약 50 μ m 정도의 선폭 결과를 얻어 낼 수 있었고, (b)에서는 침두치 전압만 2.2kV로 증가시킨 결과 30 μ m 정도의 선폭을 얻어냈다. (c), (d), (e) 그리고 (f)의 결과에서도 마찬가지로 침두치 전압만을 각각 2.5kV, 2.8kV, 3kV, 3.2kV로 계속 증가시키면서 패터닝한 결과를 보면 최종적으로 10 μ m 정도의 선폭을 얻어 낼 수 있었다. 그림 4.16의 그래프에서는 선폭과 전압간의 관계에서 전압이 상승함에 따라 선폭이 감소한다는 것을 알 수 있다.

표 4.3. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink1)

구분	전압 (최대값/기준전압)		이격거리 (노즐-기판, 기판-음전극)		주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a)	1.7kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(b)	2.2kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(c)	2.5kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(d)	2.8kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(e)	3kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(f)	3.2kV	1.5kV	250 μ m	2mm	500Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s

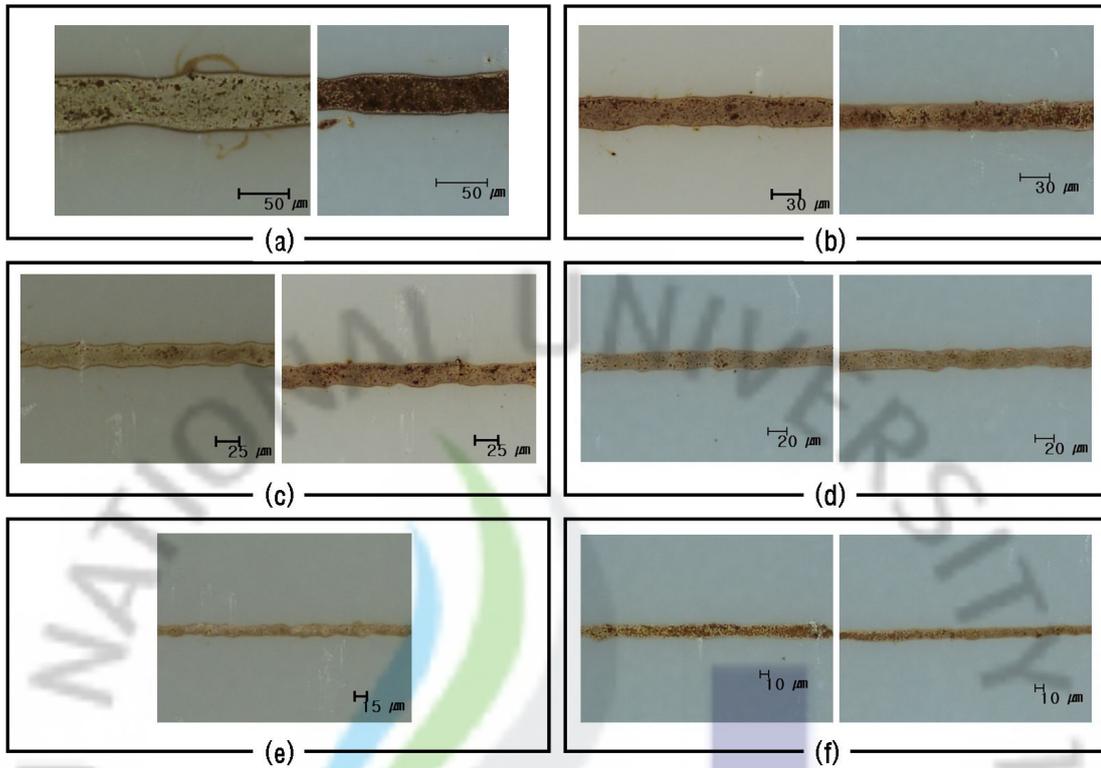


그림 4.15. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink1).

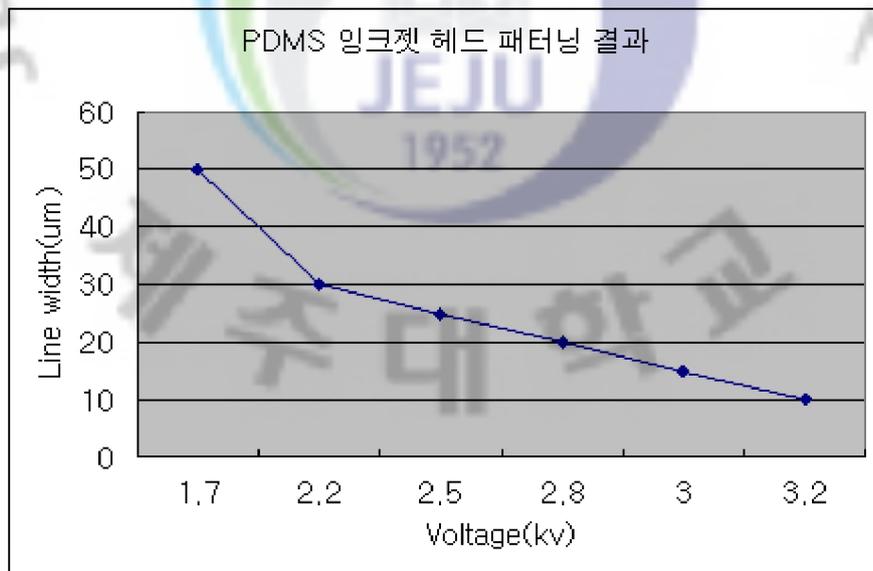


그림 4.16. PDMS 정전기력 잉크젯 헤드 패터닝 결과 그래프

X축 : 고전압 최대값, Y축 : 선폭.

표 4.4와 그림 4.17.은 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드로 Ink5를 사용하여 패터닝한 결과와 점도가 보다 높은 잉크를 사용했을 때 AFM을 이용하여 높이에 대한 데이터를 측정된 결과를 보여준다. Ink5의 최적화 공정변수를 표 4.4와 같이 입력하고 실험한 결과, 전도성 라인의 선폭은 약 $70\mu\text{m}$ 정도로 측정되었고 높이의 경우 $1.2\mu\text{m}\sim 1.5\mu\text{m}$ 정도로 측정되었다. Ink5의 경우 다른 잉크에 비해 80cps와 50%이상의 고함량 고점도의 특성을 가지고 있지만 $100\mu\text{m}$ 이하의 선폭을 만들어 낼 수 있었고, 기판과 전도성 라인 사이에 높은 단차를 형성할 수 있었다. 하지만 소성 온도가 낮은 특성을 보여 잉크젯 헤드의 오리피스 상에서 잉크 일부가 소결되어 잉크젯 헤드 오리피스가 막히는 문제점이 나타났다.

표 4.4. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink5)

구분	전압 (최대값/기준전압)	이격거리 (노즐-기판,기판-음전극)	주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a)	5kV / 2.5kV	$500\mu\text{m}$ / 2mm	300Hz	50%	$10\mu\text{l/hr}$	0.3mm/s

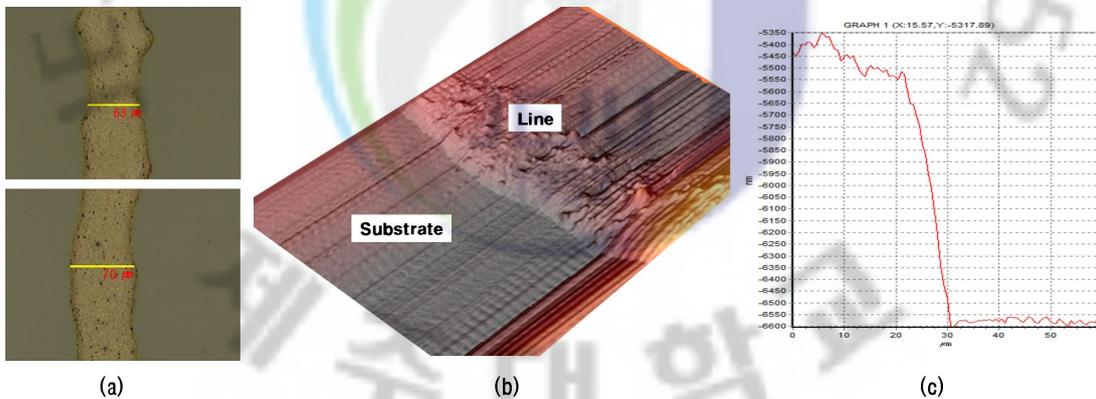


그림 4.17. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 높이 측정 결과(Ink5)

(a) 전도성 라인 선폭, (b) AFM 측정 이미지, (c) 패턴 높이 그래프.

표 4.5와 그림 4.18.에서는 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드를 이용하여 선폭 $200\mu\text{m}$, 선 간격 $300\mu\text{m}$ 의 전도성 라인을 패터닝 하였다.

표 4.5. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink2)

구분	전압 (최대값/기준전압)	이격거리 (노즐-기판,기판-음전극)	주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a)	4kV / 2kV	500 μ m / 2mm	300Hz	50%	7 μ l/hr	0.3mm/s

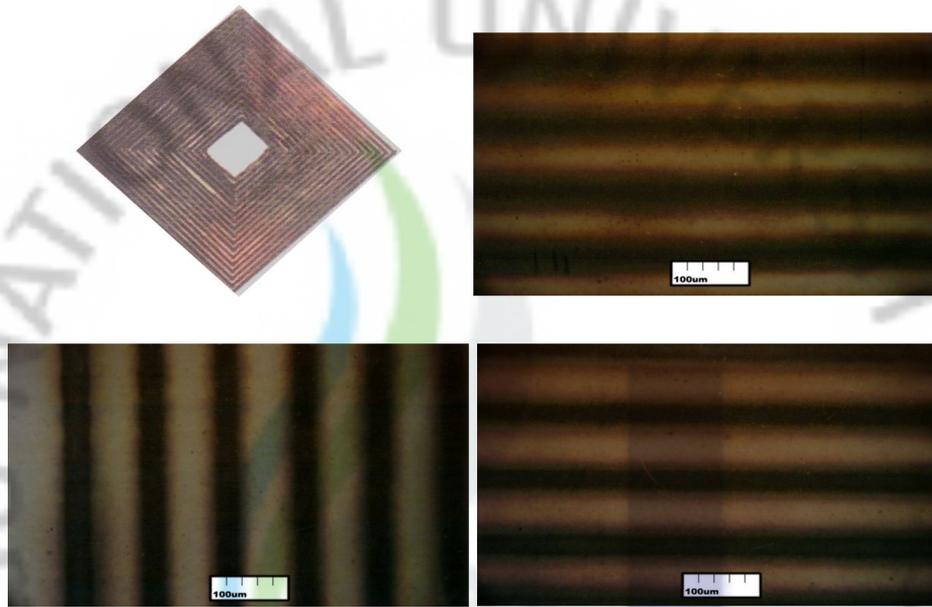


그림 4.18. 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink2).

표 4.6.과 그림 4.19.에서는 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드를 이용하여 전도성 라인 형성과 액적 토출의 2가지 방법, 소성 전·후의 잉크 특성에 대한 비교 실험을 하였다. 그림 4.19.의 (a),(b),(d)에서는 금속 나노 입자 함량에 따라 전도성 라인의 외각선 모양의 균일성을 비교해 보았고, (c), (d)의 경우 DOD 모드와 연속 분사 모드를 비교 실험하였다. (e), (f)의 경우는 Ink1을 사용한 패터닝 결과로서 소성 전 상태인 (e)에서는 양호한 결과로 보이거나 소성후의 (f)에서는 금속 입자들이 외각으로 몰리는 Coffee-ring 현상이 나타났다. (c), (f)를 비교해 볼 경우 금속 입자 함량이 많은 잉크를 사용이 유리하지만, 고함량 고점도의 잉크 사용 시 헤드의 오리피스가 막힐 수 있는 문제점 역시 가지고 있다는 점에서 잉크젯 헤드 선택 시 그에 상응하는 잉크의 개발이 이루어 져야 한다.

표 4.6. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink1,2,4)

구분	전 압 (최대값/ 기준전압)		이 격 거 리 (노즐-기판,기판-음전극)		주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a) (b)	5kV	2.5kV	500 μ m	2mm	300Hz	50%	20 μ l/hr	0.3mm/s
(c)	3kV	1.5kV	500 μ m	2mm	300Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(d)	5kV	2.5kV	500 μ m	2mm	300Hz	50%	50 μ l/hr	0.3mm/s
(e) (f)	2kV	1kV	500 μ m	2mm	300Hz	50%	20 μ l/hr	0.3mm/s

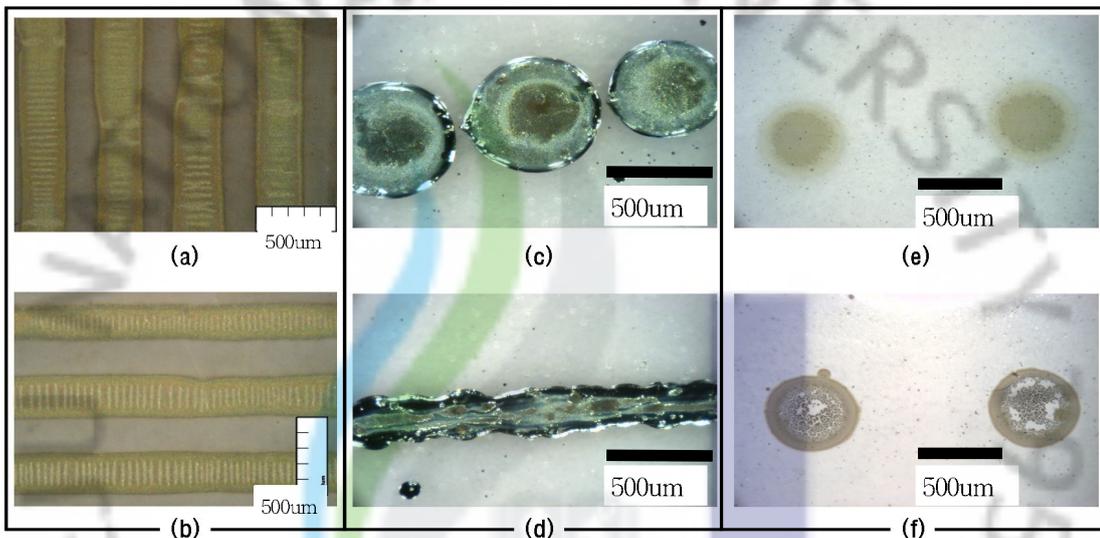


그림 4.19. 금속 모세관 잉크젯 헤드 잉크 특성 비교(Ink1,2,4).

표 4.7.과 그림 4.20.에서는 금속 모세관 타입 잉크젯 헤드를 이용하여 불특정 패턴에 대한 특성에 대해 실험하였다. 그림 4.20.에서는 불특정 패턴을 인쇄하면서 패턴 라인의 방향이 바뀌는 부분에서 전도성 라인 선풍이 증가하는 현상을 볼 수 있었다.

표 4.7. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink2)

구분	전 압 (최대값/ 기준전압)		이 격 거 리 (노즐-기판,기판-음전극)		주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a)	3kV	0.5kV	500 μ m	2mm	300Hz	50%	100 μ l/hr	0.3mm/s

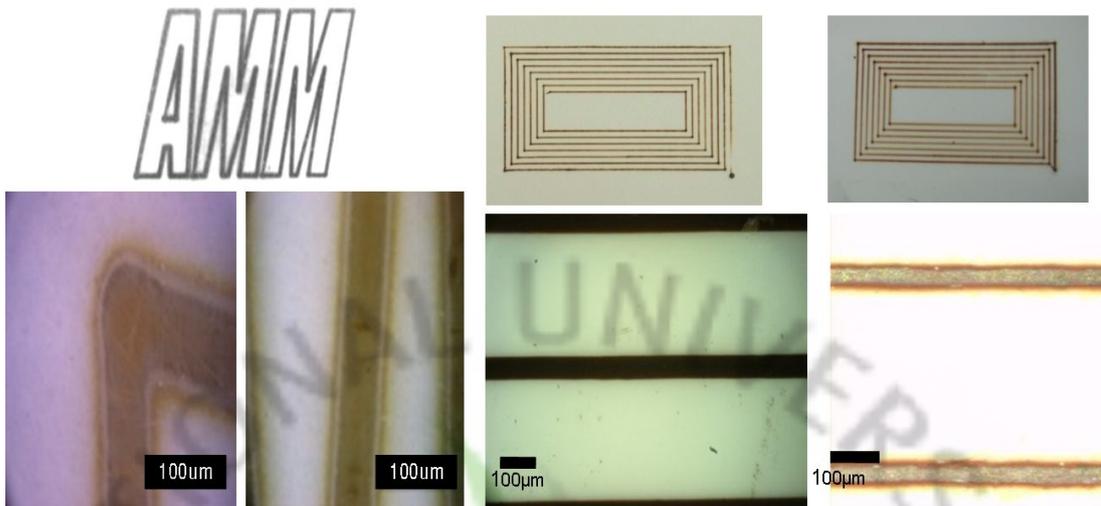


그림 4.20. 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과(Ink2).

표 4.8.과 그림 4.21.에서는 유리 모세관 타입 잉크젯 헤드와 Ink3을 이용하여 전도성 라인을 패터닝 결과를 보여준다. 그림 4.21.의 결과는 금속 모세관 헤드와 PDMS헤드의 특성에서 공통적으로 나타난 인가전압의 증가에 따른 전도성 라인 선폭의 감소 특성을 보여준다. 유리 모세관 타입 헤드 실험의 장점은 간단한 생산방법과 다양한 크기의 노즐 오리피스를 제작함으로써 거의 모든 종류의 잉크를 사용할 수 있다는 점이다.

표 4.8. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 공정 변수 (사용 잉크 : Ink3)

구분	전압 (최대값/기준전압)	이격거리 (노즐-기판,기판-음전극)	주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
(a)	1.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s
(b)	2.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s
(c)	3.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s
(d)	4.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s
(e)	5.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s
(f)	6.5kV / 0.5kV	500µm / 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s

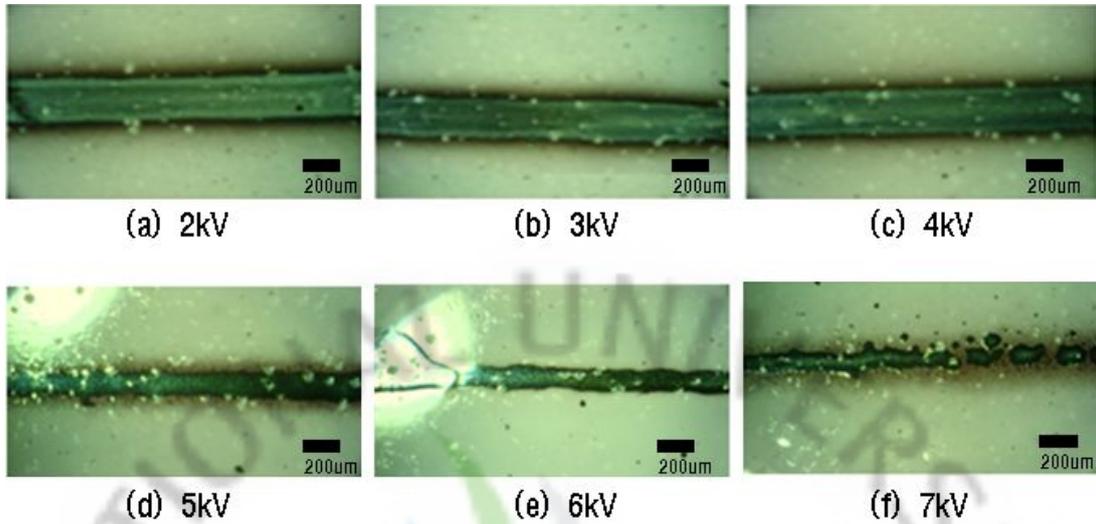


그림 4.21. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패턴링 결과(Ink3).

표 4.9와 그림 4.22.에서는 유리 모세관 타입 잉크젯 헤드를 이용한 다양한 패턴 형태를 제작하며 잉크젯 시스템의 패턴 드라이브 성능을 테스트하였다. 그림 4.22.의 결과에서 사선방향의 패턴과 직선방향의 패턴을 연속적으로 생성하여 지속적인 전도성 라인 패턴링 가능 여부를 테스트하였다.

표 4.9. 유리 모세관 잉크젯 헤드 패턴링 공정 변수 (사용 잉크 : Ink2)

전 압 (최대값/기준전압)	이 격 거 리 (노즐-기판,기판-음전극)	주파수	듀티비	잉크공급 유량	이송 속도
3kV 0.5kV	500µm 2mm	300Hz	50%	100µl/hr	0.3mm/s

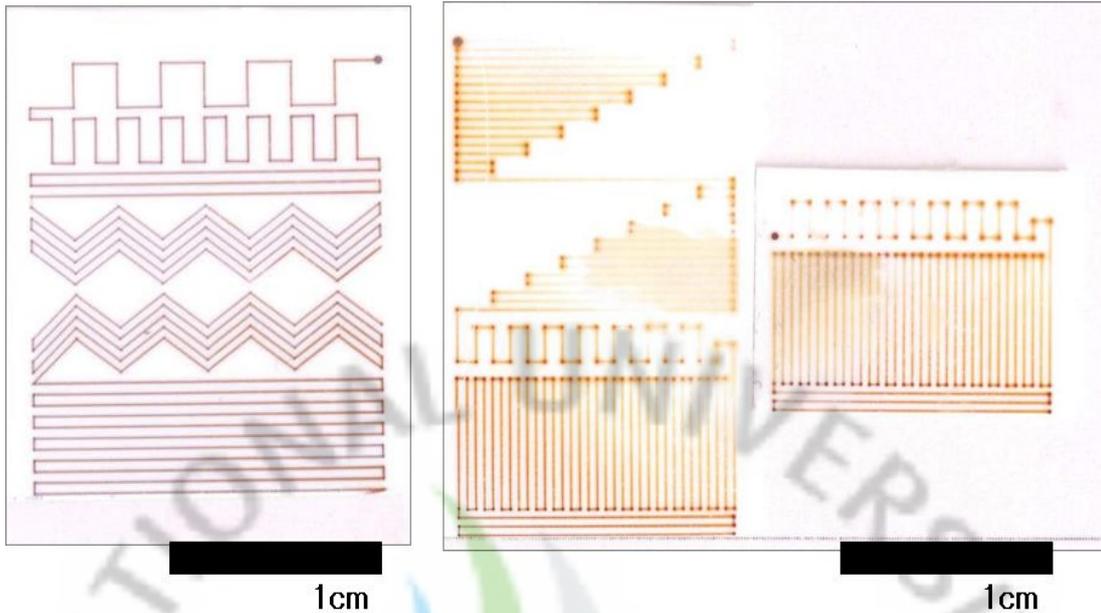


그림 4.22. 유리 모세관 잉크젯 헤드를 이용한 응용 패턴 제작(Ink2).

2. 고찰

전기수력학 잉크젯 시스템의 공정 변수 조건을 설정하여 각각의 잉크젯 헤드 별로 실험을 진행한 결과를 아래 표 4.10과 4.11에 정리 하였다. PCB 잉크젯 헤드와 MEMS 잉크젯 헤드의 경우 노즐 오리피스 상에서 잉크 메니스커스 형성 후 고전압 인가 시 테일러 원추에서 액적이 분리되는 데는 성공하였으나, 기판 상에 패터닝 시에는 메니스커스가 진동하거나 노즐 표면상으로 넓게 퍼지는 불안정한 모습을 보여 패터닝 실험은 불가능하였다. PCB헤드의 공정 토출 조건은 기본 메니스커스가 2kV에서 형성 되었고, 최초 액적은 메니스커스 형성 전압에서 침두치 전압 2kV를 더한 4kV에서 토출되었다. MEMS 헤드의 경우 메니스커스 형성 전압은 2kV로 같았지만 침두치 전압 3kV를 더해 액적을 토출하였다. 두 가지의 결과는 노즐의 재료에 따라 같은 잉크를 사용함에도 토출 조건이 달라질 수 있다는 사실과, 정전기력 잉크젯 헤드 제작 시 노즐의 재료에 따른 토출조건을 고려해야할 것이다.

표 4.10. PCB, MEMS 잉크젯 헤드의 토출 특성

잉크젯 헤드종류	최초 액적 토출 조건			사용잉크	패터닝 시 문제점
	입력 전압	입력 주파수	잉크 공급 유량		
PCB	4kV	300Hz	150 μ l/hr	Ink 1	메니스커스
MEMS	5kV	300Hz	200 μ l/hr	Ink 1	불안정

PDMS, 유리모세관, 금속모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과는 아래 표 4.11에 정리하였다. PDMS 헤드의 노즐 오리피스는 280 μ m로 모세관 타입의 헤드보다 비교적 컸지만, 각각의 헤드의 선폭 사양을 비교한 결과 PDMS 잉크젯 헤드가 가장 좋은 성능을 보여주었다. 이와 같은 결과는 PDMS 잉크젯 헤드의 구조에서 양전극의 역할을 하는 텅스텐 니들이 노즐 오리피스 밖으로 나와 전도성 잉크의 메니스커스 형성 시 좀 더 침예한 모양을 만들어 액적 토출 시 형성되는 테일러 원추를 안정적으로 쉽게 만들 수 있기 때문이다. 유리 모세관 잉크젯 헤드는 가장 많은 크기

표 4.11. PDMS, 유리모세관, 금속 모세관 잉크젯 헤드 패터닝 결과

잉크젯 헤드종류	최초 액적 토출 조건			결과사양		사용잉크
	입력 전압	입력 주파수	잉크공급 유량	최소 선폭	패터닝 속도	
PDMS 헤드	1.3kV	500Hz	50 μ l/hr	10 μ m	0.3mm/s	Ink 1
유리 모세관	2kV	300Hz	100 μ l/hr	100 μ m	0.3mm/s	Ink 2, 3
금속 모세관	3.5kV	300Hz	7 μ l/hr	70 μ m	0.3mm/s	Ink 1,2,4,5

V. 결 론

본 논문에서는 정전기력 잉크젯 프린팅 기술의 핵심적인 구성요소인 다양한 정전기력 잉크젯 헤드를 설계하고 제작하였다. 정전기력 잉크젯 헤드의 설계를 위해 기본적인 헤드의 구조를 분석하였다. 구조적 원리에 따라 헤드의 노즐 오리피스와 잉크 챔버를 제작할 수 있는 재료를 선택하여 가공하였다.

PCB 잉크젯 헤드의 경우, 기존의 PCB제조 공정을 응용하여 노즐 오리피스와 잉크 챔버를 제작하였고, 실제 제작 된 3가지 응용 형태를 가지고 액적 토출 실험을 진행하였다. PDMS 재료가 가지고 있는 소수성 표면 성질을 이용하여 PDMS 잉크젯 헤드를 제작하였다. 전극부를 외부로 돌출시킨 PDMS 잉크젯 헤드는 선폭 $10\mu\text{m}$ 의 성능을 보여주었다. MEMS 공정 기술을 이용한 MEMS 잉크젯 헤드는 테플론 표면 처리를 통해 소수성 표면을 확보하였지만, 메니스커스 형성 과정이 불안정하였다. 다양한 노즐 오리피스 직경을 가질 수 있는 유리 모세관 잉크젯 헤드는 $100\mu\text{m}$ 급의 라인을 안정적으로 패터닝할 수 있었다. 유리 모세관의 안정적인 액적 토출을 통해 기관 상에 다양한 형태의 응용패턴을 제작하였다. 금속 모세관 잉크젯 헤드는 $70\mu\text{m}$ 급의 라인을 패터닝할 수 있었고, Ink3을 제외한 나머지 잉크에서 안정적인 메니스커스 형태를 보였다.

PCB, PDMS, MEMS, 유리 모세관과 금속 모세관등의 정전기력 잉크젯 헤드 실험 조건을 잉크특성, 액적토출특성, 헤드특성 그리고 결과사양 등의 세부적 요소로 설정하였다. 정전기력 잉크젯 헤드를 이용하여 기관 상에 패터닝 실험을 한 후, 결과에 따라 각 헤드별 성능을 비교하였다. 액적 토출 특성에서는 PDMS, 유리 모세관, 금속 모세관 잉크젯 헤드가 안정된 메니스커스 특성을 보여주었다.

정전기력 잉크젯 헤드 개발을 통해 기존의 잉크젯 시스템 분야에서 사용되고 있는 압전 소자, 열 방식 등의 잉크젯 헤드를 보완하고자 하였다. 향후, 지속적인 정전기력 잉크젯 헤드 설계와 시스템 설계에 관한 연구를 통하여 멀티 잉크젯 헤드를 구현하고, 정밀 시스템 장치 개발을 통하여 고성능 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템을 구현하여야 하겠다.

참고 문헌

1. Rayleigh, L., 1882. "On the Equilibrium of Liquid Conducting Masses Charged with Electricity", *Phil. Mag.*, vol 14, pp 184-186.
2. Zeleny, J., 1914. "The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring th Electric Intensity at Their Surfaces", *Physical Review*, vol. 3, Issue 2, pp. 69-91.
3. Taylor, G. I., 1964. "Disintegration of Water Drop in an Electric Field", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Volume 280, Issue 1382, pp. 383-397.
4. S. Lee, D. Byun, S. J. Han, S. U. Son, Y. J. Kim, H. S. Ko, 2004. "Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid", 2004 MHS, Nagoya, Japan.
5. 김동수, 김강대, 김명섭, 배성우, 김정수, 2008. "플렉시블 전자소자를 위한 프린팅 기술", 한국정밀공학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp.965-966
6. 최현철, 이택민, 강현욱, 김충환, 성형진, 김동수, 2008. "실버잉크 그래비아 프린팅에서의 독터링에 대한 연구", 한국정밀공학회 2008년도 춘계학술대회논문집, pp.957-958
7. Lee, Dae-young, Shin, Yun-soo, Park, Sung-Eun, Yu, Tae-U, Hwang, Jung-ho, 2007, "Electrohydrodynamic Printing of Silver Nanoparticles by Using a Focused Nanocolloid jet," *Applied Physics Letters*, Vol.19, pp.90-92.
8. Kim, Y. J., Lee, S., Ko, H. S., Byun, D., Han, S. Yang, J. H., 2006. "Electrostatic Ejection of Micro-droplets Containing Carbon Nanotubes," *Trans. KSME B*, Vol.30, No.1, pp.82-86.
9. Hakiai, K. Ishida, Y. Matsuzaki, K.Baba, A, Asano, T, 2005. "Electrostatic

Droplet Ejection Using Planar Needle Inkjet Head," Japanese J. Appl. Physics, Vol.44, No.7B, pp.5781-5785.

10. Eric R. Lee,, 2003. "Microdrop GENERATION", CRC Press.
11. Le Hue, P. 1998, "Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology," Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 42, No.1, pp.49-62.
12. 이재갑, 변철수, 정호석, 2004. "마이크로 액적분사장치", 특허청, 한국발명진흥회, 2004년도 PM보고서
13. Joffre, C., Prunet-Foch, B., Berthomme, S., and Cloupeau, M., 1982. "Deformation of Liquid Meniscus Under the Action of an Electric Field", J. Electrostatics 13, 151.
14. Harris, M.T. and Basaran, O.A., 1993. "Capillary Electrohydrostatics of Conducting Drops Hanging FROM a Nozzle in an Electric Field", J. Colloid. Interface Sci. 161, pp. 389 - 413.
15. Harris, M. T., and Basaran, O. A., 1995. "Equilibrium Shapes and Stability of Nonconducting Pendant Drops Surrounded by a Conducting Fluid in an Electric Field", J. Colloid Interface Sci. 170, 308.
16. Wohlhuter, F. K., and Basaran, O. A., 1992. "Study of the Behavior of a Bubble Attached to a Wall in a Uniform Electric Field ", J. Fluid Mech. 235, 481.
17. Sherwood, J. D., 1988. "Breakup of Fluid Droplets in Electric and Magnetic Fields", J. Fluid Mech. 188, 133.
18. Eggers, J., and Dupont, T. F., 1994. "Drop Formation in a One-Dimensional Approximation of the Navier-Stokes Equation", J. Fluid Mech. 262, 205.
19. Papageorgiou, D. T., 1995. "Analytical Description of the Breakup of Liquid

- Jets”, *J. Fluid Mech.* 301, 109.
20. Eggers, J., 1997. “Nonlinear Dynamics and Breakup of Free-Surface Flows” *Rev. Mod. Phys.* 69(3), 865.
 21. Bailey, A. G., 1998. “Electrostatic Spraying of Liquids.” Research Studies Press Ltd., Taunton, England.
 22. Cloupeau, M., and Prunet-Foch, B. 1990. “Electrostatic Spraying of Liquids: Main Functioning Modes” , *J. Electrostatics* 25, 165.
 23. Sukhan Lee, Doyoung Byun, Sang Joon Han, Sang Uk Son, Yongjae Kim, Han Seo Ko, 2004. “Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid”, *Micro-Nanomechatronics and Human Science, 2004 and The Fourth Symposium Micro-Nanomechatronics for Information-Based Society*.
 24. Patrick K. Notz and Osman A. Basaran, 1999. “Dynamics of Drop Formation in an Electric Field”, *Journal of Colloid and Interface Sciences*, 213, pp. 218-237.
 25. A. Castellaos, 1998. “Electrohydrodynamics”, Springer, Wien. R. J. Melcher, 1981. “Continuum Electromechanics”, MIT Press, Cambridge.
 26. Yuji ISHIDA, Keigo SOGABE, Shintaro KAI, and Tanemasa ASANO, 2008. “Droplet Ejection Behavior in Electrostatic Inkjet Driving”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 6, pp. 5281 - 5286.
 27. A. Jaworek, A. Krupa, 1999. “CLASSIFICATION OF THE MODES OF EHD SPRAYING”, *J. Aerosol Sci.* Vol. 30, No. 7, pp. 873-893.

본 논문과 관련된 저자의 발표 논문

1. 학술대회 논문집

- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rehman, M. A. A. Rehmani, Y. H. Doh, K. H. Choi, 2008. 4. "Study of Droplet Generation through Drop on Demand Electrostatic Inkjet for printed Electronics", 1st International Conference on R2R Printed Electronics.
- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rehman, S. J. Kim, H. C. Kim, K. H. Choi, Y. H. Doh, 2008. 5. "Simulation and experimental verification of Electrostatic behavior of Drop on Demand Inkjet system for Printing Electronics", 2008년도 한국재료학회 춘계학술발표.
- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rehman, M. A. A. Rehmani, Y. H. Doh, K. H. Choi, 2008. 6. "Fabrication And Design Of Hybrid Printed Electronics", The 10th Joint Symposium of Cheju National University and Nagasaki University on Science and Technology.
- **J. B. Ko**, A. Rahman, K. Rehman, S. J. Kim, D. S. Kim, K. H. Choi, Y. H. Doh, 2008. 6. "Study of Inkjet Printing Process for Printed electronics", 한국정밀공학회 2008년도 춘계학술대회 논문집.
- A. Rahman, **J. B. Ko**, Y. H. Doh, K. Rehman, M. A. A. Rehmani, K. H. Choi, 2008. 9. "Droplet Generation Process In Conductive Ink Under The Influence Of Electrostatic Forces", The fifth international conference on advanced materials and processing(ICAMP-5).

- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rahman, M. A. A. Rehmani, Y. H. Doh, K. H. Choi, 2008. 10. "Effect of Electrostatic Stricture On The Droplet Generation By Drop On Demand Electrostatic Inkjet System", 1st International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMap2008).
- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rahman, M. A. A. Rehmani, Y. H. Doh. K. H. Choi, 2008. 11 "Effect Of Flow Rate In The Generation Of Printed Line In Electrostatic Inkjet System", 2008년도 한국기계공학회 추계학술대회 논문집.
- A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rahman, M. A. A. Rehmani, K. H. Choi, D. S. Kim, Y. H. Doh, 2008. 11. "정전기력 잉크젯 시스템을 위한 Non-MEMS 기반의 정전기력 노즐 설계", Proceeding of Korean society of Precision Engineering.
- K. H. Choi, A. Rahman, **J. B. Ko**, K. Rehman, M. A. A. Rehmani, H. C. Kim, B. S. Yang, A. Ali, S. J. Kim, Y. H. Doh, 2008. 12. "Anticipation and Avoidance of Electro-Spray in the Printed Conductive Lines Using Electrostatic Inkjet Head with Conductive Ink", Cheju National University Institute of Advanced Technology.
- K. Rahman, A. Rahman, A. Ali, S. Khan, **J. B. Ko**, B. S. Yang, Y. H. Doh, K. H. Choi, 2009. 5. "Analysis and design of Electrostatic inkjet System", LOPE-C.
- **J. B. Ko**, K. Rahman, S. Khan, Y. H. Doh, D. S. Kim, K. H. Choi, 2009. 6. "실리콘 노즐 기반의 정전기력 잉크젯 액적 토출 시스템", 한국정밀공학회

2009년도 춘계학술대회.

- **J. B. Ko**, K. Rahman, S. Khan, Y. H. Doh, D. S. Kim, K. H. Choi, 2009. 6. "풍력제어기를 위한 Printed Electronics 기반의 유연기판 제조기술에 관한 연구", 한국동력기계공학회 2009년도 춘계학술대회.
- K. Rahman, A. Rahman, A. Ali, M A. A. Rehmani, S. Khan, **J. B. Ko**, K. H. Choi, 2009. 6. "Analysis of Electro-Static Drop-on-Demand Patterning of Conductive Lines and CNTs for Printed Electronics Applications", Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C 2009).
- H. C. Kim, **J. B. Ko**, D. S. Kim, Y. H. Doh, K. H. Choi, 2009. 10. "정전기력 잉크젯을 이용한 고 종횡비 패턴 제작에 관한 연구", 한국정밀공학회 2009년도 추계학술대회.

2. 저널 논문

- K. Rahman, **J. B. Ko**, S. Khan, K. H. Choi, D. S. Kim, 2009. 6. "Simulation of Droplet Generation Through Electrostatic Forces", The 3rd International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology(ICMDT).
- K. H. Choi, A. Rahman, **J. B. Ko**, M A. A. Rehmani, A. Ali, Y. H. Doh, D. S. Kim, 2009. 8. "Development and Ejection Behavior of Different Material Based Electrostatic Inkjet Heads", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

3. 등록특허

- 1) 발명의 명칭 : 정전기력을 이용한 회로 배선 인쇄용 잉크젯 헤드 및 그 제조방법

발명자 : 최경현, **고정범**

출원인 : 제주대학교 산학협력단

출원번호(일자) : 10-2008-0062823(2008.06.30)

등록번호(일자) : 10-0926495-0000(2009.11.05)

- 2) 발명의 명칭 : 정전기력을 이용한 매트릭스형 도전성 액체 토출 시스템

발명자 : 최경현, **고정범**, 카리드 래만

출원인 : 제주대학교 산학협력단

출원번호(일자) : 10-2008-0071938(2008.07.23)

등록번호(일자) : 10-0915376-0000(2009.08.27)

- 3) 발명의 명칭 : 정전기력을 이용한 매트릭스형 도전성 액체 토출 시스템

발명자 : 최경현, **고정범**, 카리드 래만

출원인 : 제주대학교 산학협력단

출원번호(일자) : 10-2008-0075214(2008.07.31)

등록번호(일자) : 10-0915377-0000(2009.08.27)

감사의 글

정신없이 바쁘게 지나간 두해 동안의 석사과정을 돌아보며, 항상 실수가 많고 준비가 부족했던 제 자신을 돌아봅니다. 처음 막연한 기대 속에 출발했던 대학원 생활이 어느덧 훌쩍 지나 학위 논문이라는 결실을 맺게 되었지만, 아직 더 배움이 많이 부족하다는 사실을 다시 한 번 깨닫게 됩니다.

먼저 이 논문이 나오기까지 많은 가르침을 주신 도양희 교수님과 최경현 교수님 두 분께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 바쁘신 와중에도 어설피고 실수가 잦았던 저의 글을 세세하게 봐주신 이광만 교수님께도 깊은 감사를 드리며, 논문에 관심을 가져주신 김경식 교수님, 고성택 교수님, 강민제 교수님, 김경연 교수님, 고석준 교수님께도 감사드립니다.

대학원에서 공부를 시작하며 서로 가장 많은 힘이 되어주었던 동기이자 선배인 수진이형, 10년 지기 친구이자 동기인 봉수에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 논문뿐만 아니라 저의 학업 과정에 진심어린 충고와 격려 그리고 연구에 가장 많은 가르침을 주신 선배 형찬이형에게 큰 감사를 드립니다. 과사에서 수고하시는 미나누나, 양현누나, 강숙인 선생님께도 감사를 드립니다. 같은 연구실에서 2년 동안 동고동락하며 서로 많은 도움이 되었던 Khalid, Asif, Ahsan, Adnan, Saleem에게도 고맙습니다. 그리고 전자공학과 01학번 친구들과 승진, 두훈, 성규, 재석이와 친구들, 선배님들께 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 끝까지 저를 응원해주신 저희 가족과 고모 그리고 할머니께 감사를 드리며 건강하고 행복하시길 기원합니다.

2009년 12월 논문을 마치며...