

碩士學位論文

유연성 전자소자 제작을 위한  
정전기력 기반의 프린팅 시스템 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스 工學科

金 俊 佑

2009 年 2月

碩士學位論文

유연성 전자소자 제작을 위한  
정전기력 기반의 프린팅 시스템 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스 工學科

金 俊 佑

2009 年 2月

# 유연성 전자소자 제작을 위한 정전기력 기반의 프린팅 시스템 연구

共同指導教授 崔勁賢, 金東洙

金俊佑

이 논문을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009 年 2 月


김준우의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長

委員

委員

김동환  
김동수  
최정현



濟州大學校 大學院

2009 年 2 月

# Development of Electrostatic ink-jet printing system for flexible electronics device fabrication

Jun-woo Kim

(Supervised by professor Kung-hyun Choi, Dong-soo Kim)

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

2009 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director,  
.....  
.....  
.....

(Name and signature)

.....  
Date

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 목 차

LIST OF TABLE	ii
LIST OF FIGURES	v
1. 연구배경	1
2. 연구목적	4
3. 프린팅 시스템	5
3-1. 접촉식 인쇄 방식	5
3-2. 비접촉식 인쇄 방식	9
4. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템	13
4-1. 잉크젯 프린팅 기술의 현황	13
4-2. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 정의	16
4-3. 정전기력 기반 잉크젯 의 요소기술	18
4-4. 정전기력 기반의 프린팅 시스템 연구 및 해석	19
4-4-1. 모델링	19
4-4-2. 인가전압에 대한 시간에 따른 전기장 해석	20
4-4-3. 싱글 노즐에 대한 전기장 해석	28
4-4-4. 멀티 노즐에 대한 전기장 해석	30
4-4-5. 액적 토출 및 증착 해석(Droplet ejection and deposition)	32
4-5. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 개발	37
4-5-1. 고전압 발생장치와 제어장치	37
4-5-2. 이젝터간 토출량 편차 교정 장치	38
4-5-3. 패턴 드라이버	41
4-5-5. 잉크공급/순환/농도 검출 시스템	43
4-5-6. 패턴 불량 검사 및 수정장치	45
4-6. 정전기력 기반의 프린팅 테스트 실험장비 설계	50
5. 정전기력 기반의 잉크젯 실험 및 고찰	54
5-1. 전도성 잉크 토출 실험	54
6. 결론	60
참고문헌	61
Abstract	62

## 그림 목차

- 그림 1. 인쇄전자의 개념
- 그림 2. 인쇄전자 기술의 새로운 응용분야 및 전망
- 그림 3. 인쇄전자소자 응용 제품의 예
- 그림 4. 플렉소 인쇄
- 그림 5. 그라비아 인쇄
- 그림 6. 오프셋 인쇄
- 그림 7. 잉크젯 기술의 분류
- 그림 8. 잉크젯 기술의 응용분야
- 그림 9. 잉크젯의 종류
- 그림 10. 잉크젯 프린팅된 50  $\mu\text{m}$ 급 전극패턴 (자료: Plastic Logic, UK)
- 그림 11. 잉크젯 프린팅을 이용한 미세패턴의 기술발전 추이
- 그림 12. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 개념도
- 그림 13. 정전기력 잉크젯 실험장치
- 그림 14. 정전기력 해석을 위한 노즐 모델링
- 그림 15. 경계 조건
- 그림 16. 정전기력 잉크젯 해석 모델링 & 해석 메쉬
- 그림 17. Applied Voltage Function 500V~1000V
- 그림 18. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 19. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 20. CASE 1 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF
- 그림 21. Applied Voltage Function 0-500V
- 그림 22. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 23. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 24. CASE 2 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF
- 그림 25. Applied Voltage Function 0-1000V
- 그림 26. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 27. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s
- 그림 28. CASE 2 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF

- 그림 29. 싱글노즐
- 그림 30. 싱글노즐에서 패턴의 위치에 따른 전기장의 세기 분포
- 그림 31. 멀티노즐
- 그림 32. 멀티노즐에서 각 노즐의 전압에 따른 해석결과
- 그림 33. 각 경우에 대한 glass 표면에서의 전기장 세기
- 그림 34. Inkjet Geometry model
- 그림 35.  $t = 0$ , 잉크와 공기의 분포  $v=0$
- 그림 36. 액적의 시간에 따른 속도 분포
- 그림 37. 액적 토출 시뮬레이션
- 그림 38. ITI사 FNS drive method의 전압파형
- 그림 39. 고전압 고출력 펄스발생의 기본 구조
- 그림 40. 잉크젯 헤드의 이젝터 입력 전압 형태
- 그림 41. AWG 시스템
- 그림 42. AWG 시스템의 유저 인터페이스
- 그림 43. SPI 통신 프로토콜을 이용한 패턴드라이버 개념도
- 그림 44. 멀티 헤드 패터닝 기법
- 그림 45. 잉크 공급 및 순환 시스템과 농도 검출 및 유지 시스템
- 그림 46. 불량 패턴 검사 장치 개념
- 그림 47. 불량 패턴에 의한 소실된 혹은 잘못된 패턴 이미지 추출 원리
- 그림 48. 불량 패턴의 2가지 경우
- 그림 49. 소실된 패턴 수정 공정 개념도
- 그림 50. 오류 패턴 제거 공정 개념도
- 그림 51. 정전기력 잉크젯 실험장치 설계도면
- 그림 52. 정전기력 기반의 잉크젯 실험장치 제작
- 그림 53. XY Stage 구동부와 노즐부
- 그림 54. High Voltage Power Supply & High Voltage Pulser
- 그림 55. Roll-to-Roll + 정전기력 잉크젯 장비 설계
- 그림 56. Roll-to-Roll + 정전기력 잉크젯 제작
- 그림 57. 스테이지 구동 제어와 노즐 모니터링
- 그림 58. 인가전압에 따른 제팅 형상

그림 59. 인가전압에 따른 라인 패턴 형상

그림 60. 정전기력 잉크젯을 이용한 라인 패턴

그림 61. 정전기력 잉크젯 실험 장치를 통한 선폭 30  $\mu\text{m}$  패턴

그림 62. Line pattern 3D 두께 측정

그림 63. DoD 제팅 형상

그림 64. DoD 제팅을 위한 인가 전압 펄스 파형

그림 65. DoD 패턴 형상 사이즈 측정





## 표 목차

- 표 1. 응용제품에 따른 인쇄 장비의 개발 조건
- 표 2. IT Strategies社에 의해 예측된 인쇄전자/디스플레이 시장의 전망
- 표 3. 각 노즐에 인가되는 전압에 따른 해석의 케이스
- 표 4. 잉크와 공기의 물리적 매개변수
- 표 5. 정전기력 잉크젯 장비 구성
- 표 6. 실험 인가조건(실버나노잉크)



## 1. 연구배경

산업기술의 고도화와 더불어 최근 IT, BT, NT 산업의 급속한 발전은 각종 전자, 정보통신, 바이오, 메디컬 기기, 극 초정밀 기기 부품의 소형화, 경량화, 고집적화를 요구하고 있다. 현재 한국이 세계 시장 내에서 기술 리더로서 이끌어 나가고 있는 전자 기술 분야는, CPU, 메모리와 같은 반도체 칩과 디스플레이 기기 등을 꼽을 수 있다. 반도체 칩의 경우, 회로의 선폭이 수십 나노미터 정도로 해상도 및 집적도가 매우 높으며, 기초 디바이스를 제작하기 위한 산업용 장비에 요구되는 스펙도 매우 높은 제품군에 속한다고 볼 수 있다. 디스플레이 시장은 눈으로 보이기 위한 디스플레이 장치를 구현하는 것이므로, 픽셀 사이즈가 수백 마이크로미터 이상의 경우가 대부분인 정도로 집적도가 매우 낮으며, 상대적으로 성능도 낮은 제품군에 속한다. 이와 같은 제품군을 기존 반도체 공정 등 고가의 탈피하여 다음 그림 1.과 같이 프린팅 공정으로 생산하려는 노력이 세계 각국 연구소, 기업, 학교 등에서 연구가 진행 중에 있다.[1-3]

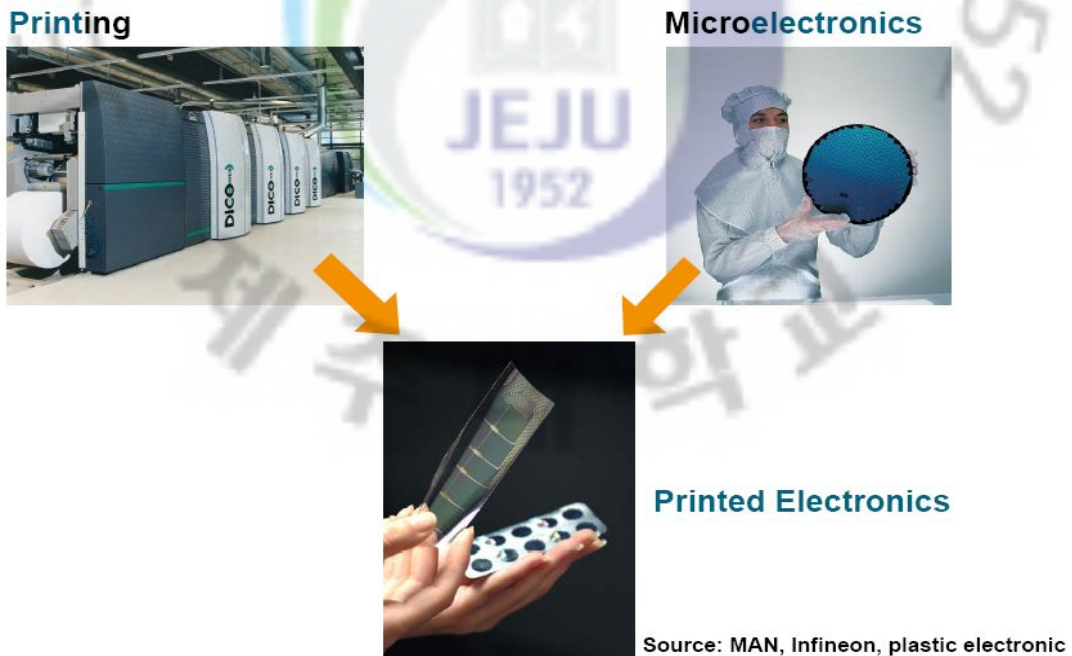


그림 1. 인쇄전자의 개념

인쇄전자란, 인쇄 기술을 활용하여 다양한 전자 부품을 생산하는 기술이다. 다양한 응용 가능성, 초박막, 높은 유연성을 가진 저가 대량 생산 방법으로 대형 광고판, 안내판, 일회용 디스플레이, RFID, 스마트 카드 등 활용도가 매우 높다. 기존의 반도체 프로세스는 노광기, 포토마스크, 포토레지스트와 같은 감광성 용액, 그리고 스퍼터링과 같이 재료 낭비요소가 많은 재료 증착기술, 고진공과 고온의 공정을 사용해야한다는 단점이 있다. 이에 반해 잉크젯 공정 기술은 환경 문제나 고가 재료 낭비 등의 거의 없고 그 공정단계를 대폭 단축시킬 수 있다는 장점을 가지고 있어서 기존의 공정을 프린팅 공정으로 대체하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 다음 그림 2.에서는 기존 포토리소그래피 방식을 잉크젯 프린팅 공정이 대체할 수 있음을 보여주고 그 활용분야를 나타내었다.

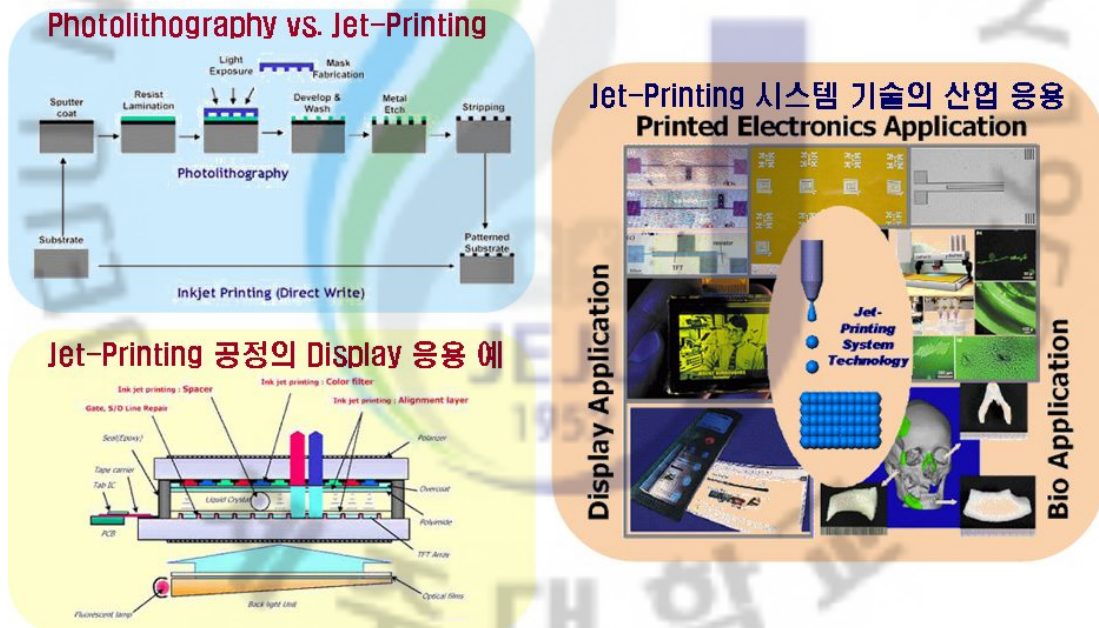


그림 2. 인쇄전자 기술의 새로운 응용분야 및 전망

RFID tag와 같은 대표적인 인쇄 전자소자나 e-paper, OLED, flexible display의 차세대 디스플레이 장비 및 fuel cell, solar cell, lab-on-a-chip, bio organic patterning 등 미래에 새로운 시장을 형성할 것으로 예측되는 제품들

은, 디바이스 크기는 수 마이크로미터에서 수십 마이크로미터 정도로 정밀도의 요구는 비교적 낮지만, 시장 경쟁력의 확보를 위해서는 넓은 면적 및 고속으로 양산할 수 있는 플랫폼 기술이 필요하며, 한번 사용하면 버릴 수도 있는 상대적으로 저가인 Disposable 제품이다. 이를 반도체, 디스플레이 시장 영역과 함께 표시를 한다면, 기술적 영역으로는 반도체와 디스플레이 시장의 중간 정도에 해당하며, 디스플레이 시장뿐만 아니라 인쇄전자가 응용되는 분야는 그림 3.에 나타내어지듯이 그 응용분야가 아주 다양하다.

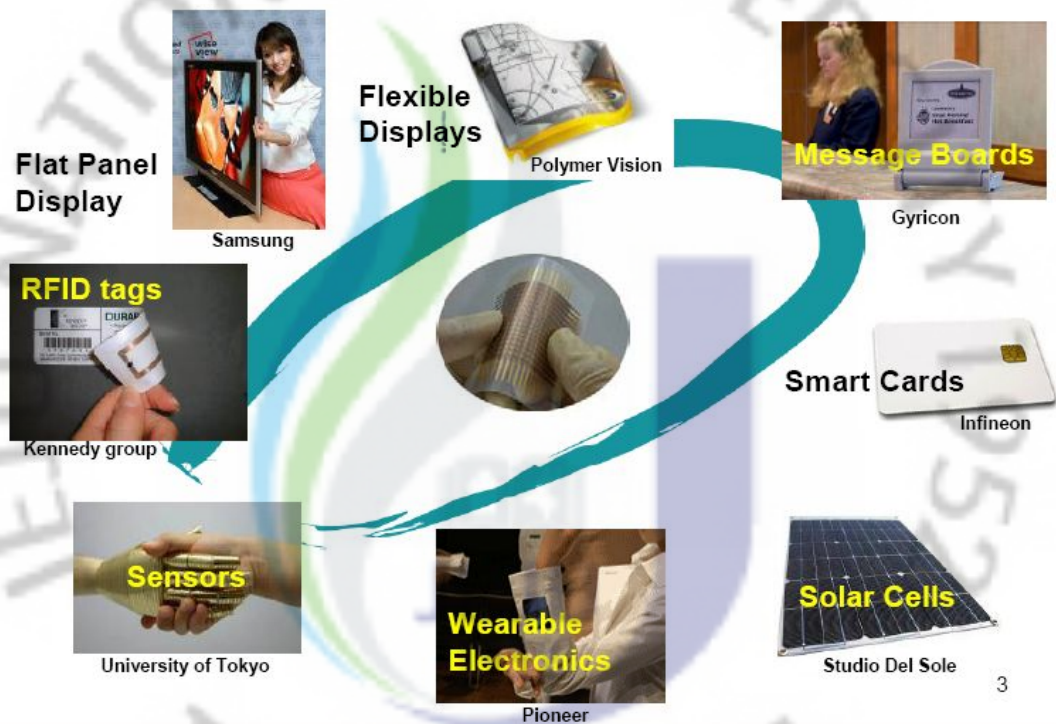





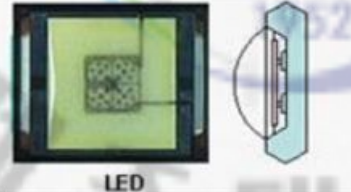
그림 3. 인쇄전자소자 응용 제품의 예

인쇄전자를 위한 프린팅장비의 경우, 미디어 인쇄라는 매우 커다란 시장이 있기 때문에, 장비시장이라 하더라도, 기본적으로 시장의 규모가 매우 커서 세계 주요 회사, 연구소, 대학 등에서 연구 개발이 수행되고 있다. 프린팅장비의 경우 매우 기술집약적인 장비로써, 선진 기술을 쫓아가는 것이 쉽지 않고, 대부분의 전통적으로 독일을 중심으로 한 유럽과 일본 등의 선진국에서 기술을 주도하고 있다.

## 2. 연구목표

정전기력 기반의 잉크젯 기술을 연구하여 기존 잉크젯들의 단점을 보완함과 동시에 타 여러 인쇄 방식의 장점을 취합하여 차세대 유연성 전자소자의 제작을 위한 고해상도 미세패터닝 장비개발에 목적을 두고 연구하였다. 인쇄전자소자의 각 응용제품 별 요구사항을 다음 표 1.에 간략하게 나타내었다.

표 1. 응용제품에 따른 인쇄 장비의 개발 조건

	Application	조건
FPD	 Filter      광학 Sheet      전극	선폭 : 10~30 $\mu$ m 두께 : 10 $\mu$ m 얼룩 없을 것.
L/F, TCP	 Lead Frame      Tape carried Package	선폭 : 최소 5 $\mu$ m 두께 : 2 $\mu$ m이상 Hole Size : 1~15 $\mu$ m 양면 Align : $\pm 2\mu$ m
PCB	 PCB	선폭 : 최소 5 $\mu$ m 두께 : 12 $\mu$ m이상 Hole Size : 1~15 $\mu$ m 양면 Align : $\pm 2\mu$ m
Lighting	 LED	Gap : 30 ~ 40 $\mu$ m OverFlow(B) : Flip의 2/3이하 이종 재질 : 동시 공정

본 논문에서는 최종적으로 위와 같은 응용제품의 요구 조건에 맞추어 생산이 가능한 프린팅 공정장비 시스템을 제작을 목표로 연구 하였다. 다음에서 차례로 인쇄 전자를 위한 프린팅 기술에 대한 이해를 위하여 전반적인 프린팅 시스템에 대하여 서술 하였고, 연구 목표로 하는 정전기력을 이용한 잉크젯 프린팅 시스템의 해석 및 장비 제작, 그리고 제작한 장비로 실험한 결과들을 제시 하였다.

### 3. 프린팅 시스템

#### 3-1. 접촉식 인쇄 방식

##### 1) 플렉소 인쇄(flexographic press, aniline printing press)

볼록판인쇄의 일종으로 유연한 수지 또는 고무볼록판을 사용하고 용제 건조형 잉크를 사용하는 인쇄방식이다. 활자조판, 선화볼록판, 망볼록판 등에 열경화성 수지를 가열 가압하여 만든 모형에 천연고무 또는 합성고무나 플라스틱을 가압가열하거나, 화선이 단순한 경우에는 고무에 직접 조각하여 인쇄판을 만든다. 인쇄기는 고무제 잉크집롤러, 금속성 잉크문힘롤러(애닐록스롤러), 판통 및 압통으로 되어 있으며, 일반용에는 인쇄 유닛을 겹쳐 쌓은 스텝 타입, 늘어나기 쉬운 필름용에는 중앙에 압통을 장치한 드럼타입, 또 골판지용·중장용에는 직선형인 라인타입을 사용한다. 복판이 쉬우며 비흡수성의 소재에도 인쇄된다. 또 속건성 잉크를 사용하므로 인쇄와 연속하여 푸대만들기 및 따내기 등의 가동도 할 수 있다. 예전에는 아닐린염료를 착색제로 하는 잉크를 사용하였으므로 아닐린 인쇄(Aniline printing)라고 불렀다. 판재·인쇄기·제판법 등이 개량되어 근년에는 제조의 재현성이 양호하여 미국에서는 신문 인쇄에 사용되기도 한다. 다음 그림 4.에 플렉소 인쇄의 공정을 도시 하였다.

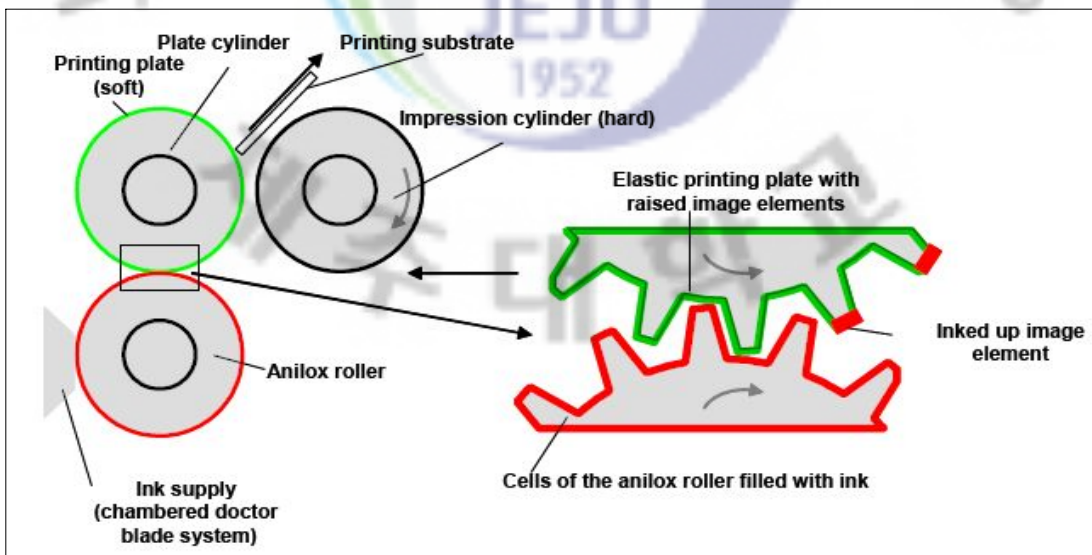


그림 4. 플렉소 인쇄

## 2) 그라비아 인쇄(Gravure printing [오목인쇄])

볼록판과 반대로 판의 움푹 들어간 부분에 잉크를 채워, 튀어 나온 부분의 불필요한 잉크를 긁개(Doctor)라고 하는 금속제 기구로 긁어내어, 움푹 들어간 부분의 잉크를 압력(인압)을 걸어 피 인쇄물에 전이 시키는 방식이다. 이 방식은 금속판을 직접 조각한 조각오목판인쇄와 사진기술을 응용한 금속 롤을 부식제판하여 서적인쇄, 회화의 복제, 플라스틱필름으로 인쇄 등 광범위하게 사용되고 있는 그라비아인쇄(Intaglio Printing, Gravure printing)가 있다. 오목판인쇄에는 그라비아인쇄(정식적으로는 포토그라비아인쇄(Photo Gravure Printing, Roto Gravure Printing)라고 부른다.)가 대표적이다. 오목판인쇄방식에는 잉크를 누르는 작용을 하지 않기 때문에 화선의 선명성을 잃지 않고, 잉크를 질게 내릴 수 있다. 그라비아 인쇄된 인쇄물의 표면을 확대경으로 살펴보면, 망점이 많이 보인다. 그라비아의 판은 작은 셀로서 형성되고, 그 속에 잉크가 들어가 채워지면 잉크는 긁개(Doctor)에 의해 긁혀져 필요한 잉크만 남도록 되어 있다. 그라비아인쇄에는 화선의 농담을 제판의 방식에 따라 판의 깊고 낮음, 또는 망점의 크고 작음으로 조정한다. 다음 그림 5.는 그라비아 인쇄의 공정을 간략하게 보여주고 있다.

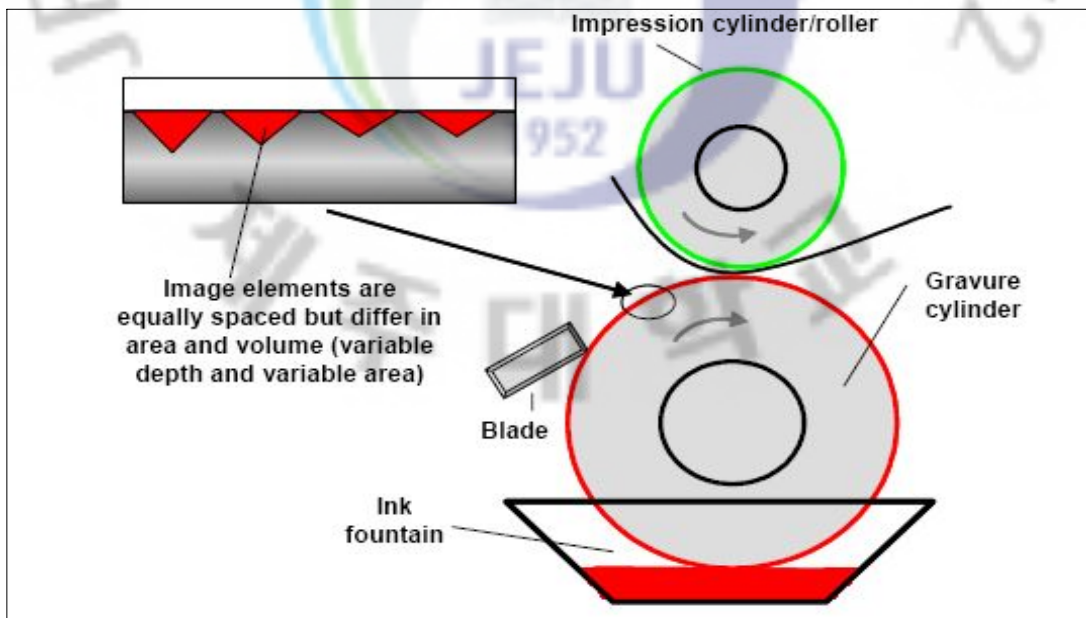


그림 5. 그라비아 인쇄

그라비아 인쇄는 다음과 같은 장점 등이 있다.

- 1) 금속제의 판과 저점도의 용제 타입 잉크를 이용하므로 여러가지 피인쇄체에 인쇄가 가능하다.
- 2) 판의 수명이 길고 고속인쇄적성이 있다.
- 3) 얇은 종이, 유연한 필름등에도 인쇄가 가능하다.
- 4) 앤드레스(Endless) 인쇄가 가능하다.
- 5) 색의 농담 재현성이 우수하다.
- 6) 피인쇄물은 면이 고른 필름을 사용하여야 인쇄 효과가 좋아진다.
- 7) 열봉함 되는 부분에 인쇄가 있으면 접착강도가 떨어진다.

### 3) 오프셋 인쇄(Offset printing)

보통의 인쇄가 판면에서 직접 종이에 인쇄되는 데 비하여, 오프셋인쇄는 판면에서 일단 잉크화상을 고무블랭킷에 전사하여, 거기에서 피인쇄체에 인쇄하는 방법이다. 전자를 직접인쇄라고 하며, 후자를 간접인쇄(indirect printing)라고 한다. 금속 평판 인쇄는 거의 오프셋인쇄 방식이기 때문에 일반적으로 오프셋인쇄 즉, 평판인쇄라는 관념을 가지고 있다. 그러나 이 방법은 볼록판 또는 오목판 인쇄에 이용되기도 한다. 오프셋인쇄의 장점은 정밀한 화선이 비교적 표면이 거친 종이에선 선명히 인쇄되며 직접인쇄보다 판면의 내쇄력이 크다.

평판인쇄기의 일종으로 판면의 잉크를 블랭킷이라고 부르는 고무시트에 한번 옮기고 다시 그 블랭킷 위의 잉크를 종이에 전사하는 방식의 인쇄기판을 평평한 반상에 설치하는 평대식과 원통형의 동체에 설치하는 윤전식이 있는데, 윤전식이 일반적이다. 윤전식의 인쇄 유닛부는 주로 판통 · 고무통 · 압통 및 판면에 잉크를 공급하는 잉킹 장치와 물을 공급하는 축임물 장치로 구성되어 있으며, 다음 그림 6.에 롤투롤에서의 오프셋 인쇄 방식을 나타내었다.



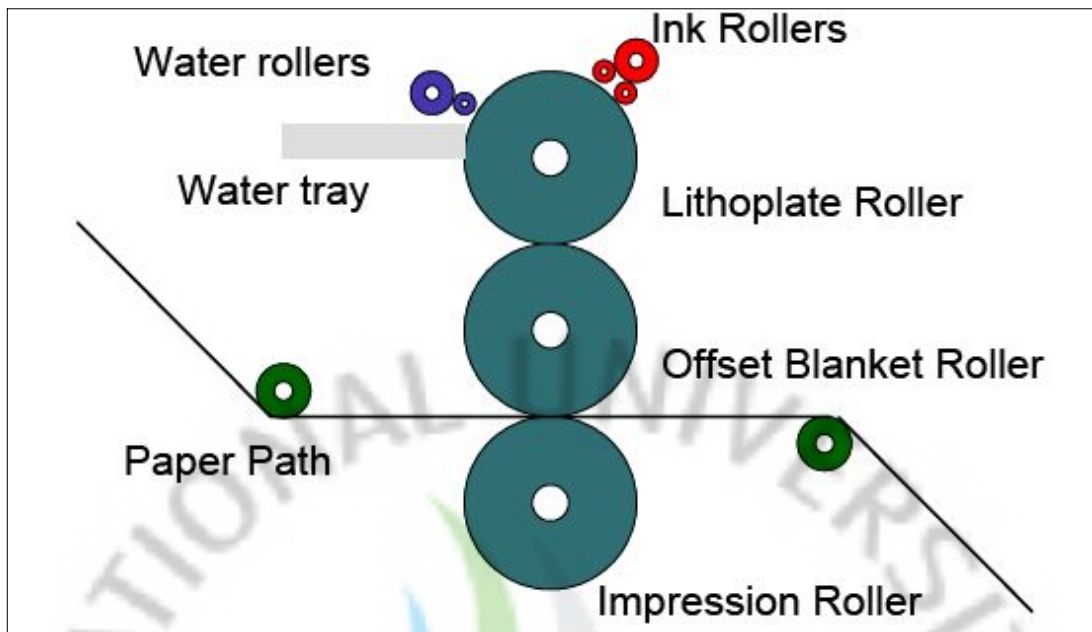
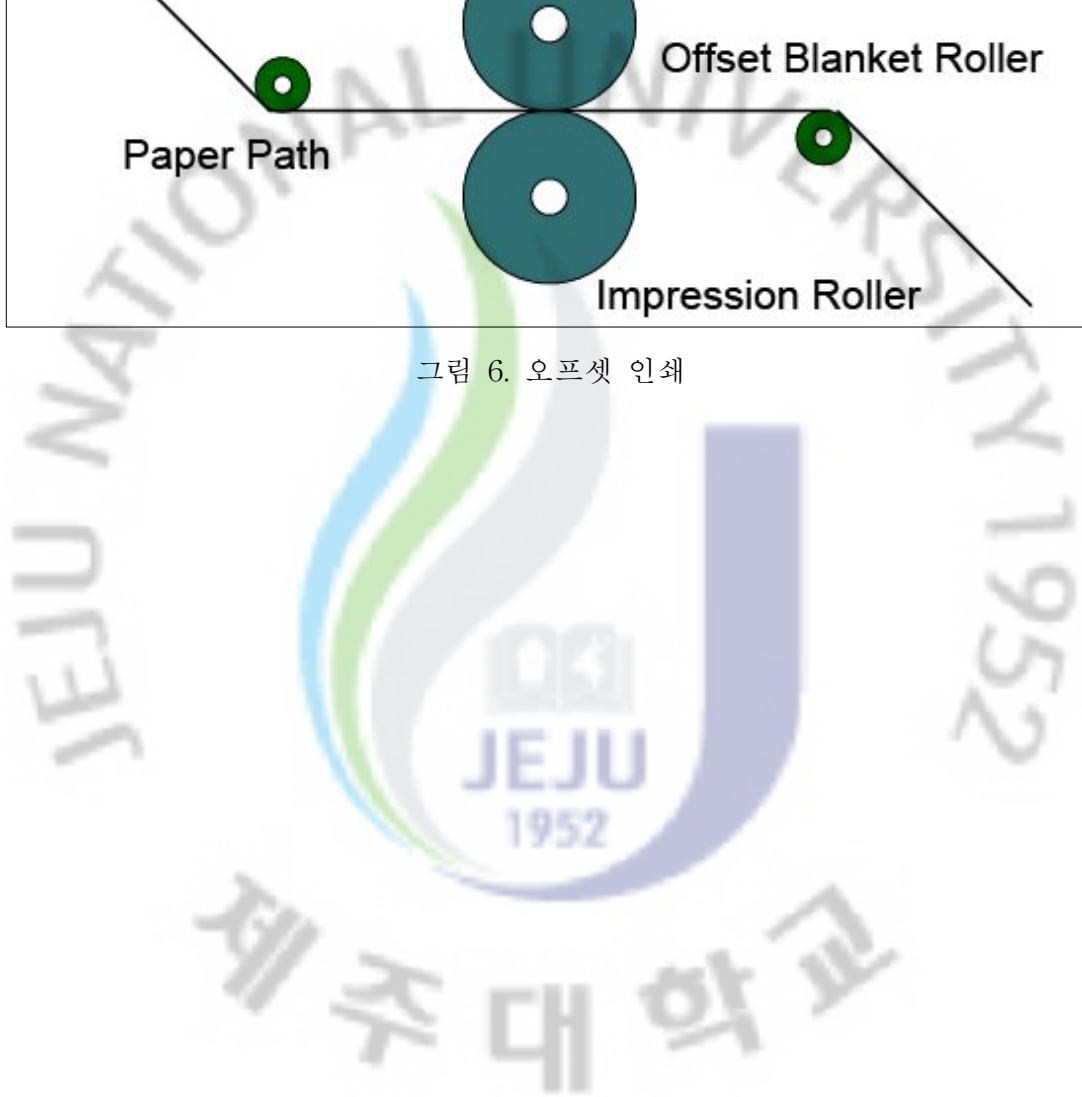


그림 6. 오프셋 인쇄



### 3-2. 비접촉식 인쇄 방식

#### 1) 잉크젯 프린팅 기술

잉크젯 프린팅 기법은 잘 알려져 있듯이 사무용 인쇄방식의 혁신적인 전환을 가져온 새로운 인쇄기술이다. 수 년 전까지만 해도 인쇄 시장을 독점했던 충격식 인쇄방식 (dot matrix printer)와 구별되는 저소음 저비용 비접촉방식의 인쇄기술로, 분사 방식에 따라 연속분사(continuous jet) 방식과 DOD (drop-on-demand) 방식으로 나뉜다.

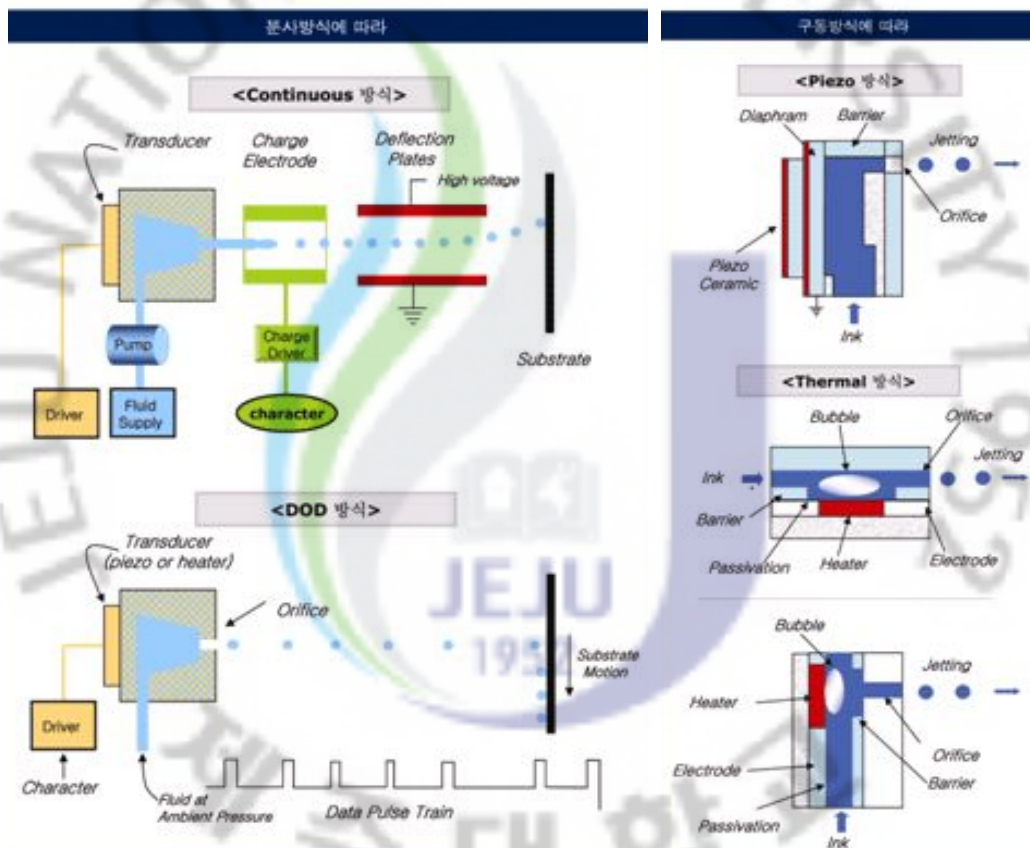


그림 7. 잉크젯 기술의 분류

위 그림 8.에 분류하였듯이 연속분사방식은 고압으로 수십 마이크로미터 크기의 노즐을 통해 잉크를 분사하고, 형성된 잉크 액적을 고전압을 걸어 대전시킨 후, 편향판 전극의 전압 제어를 통하여 잉크 액적을 편향하거나 잉크 회수통으로 재순환시킨다. 연속분사 방식은 고속인쇄의 장점이 있으나, 액적 궤

적 제어장치와 잉크 회수 시스템의 복잡성으로 주로 바코드 제조 같은 산업용 인쇄용으로 사용이 제한되어 있다. 반면 DOD (drop-on-demand) 방식은 전기적 신호를 통하여 필요시에만 잉크를 분사시키는 방식으로 시스템이 매우 단순하다. 현재 널리 사용되고 있는 잉크젯 프린트 기술이라 함은 필요할 때마다 잉크 방울을 토출시켜 피 인쇄체에 인쇄하는 방식, 이 drop-on-demand 방식을 말한다..[6]

잉크젯 인쇄 기술은 목표로 하는 위치에 잉크를 비접촉방식으로 분사하기 때문에 종이를 비롯한 직물, 폴리머 등의 다양한 기판 (필름)에 자유롭게 인쇄할 수 있으며, 다양한 매체를 잉크의 형태로 선택적으로 신속하게 적당한 해상도 수십 마이크로미터로 패턴 할 수 있다. 이러한 장점으로 최근에는 잉크젯 프린팅을 사무용, 광고용, 텍스타일(textile) 인쇄 뿐 아니라 생명공학, 화학, 전기전자 등의 분야에서 다양한 용도로 연구개발하고 있으며, 그 응용 분야는 다음 그림 9.에 나타내었다.

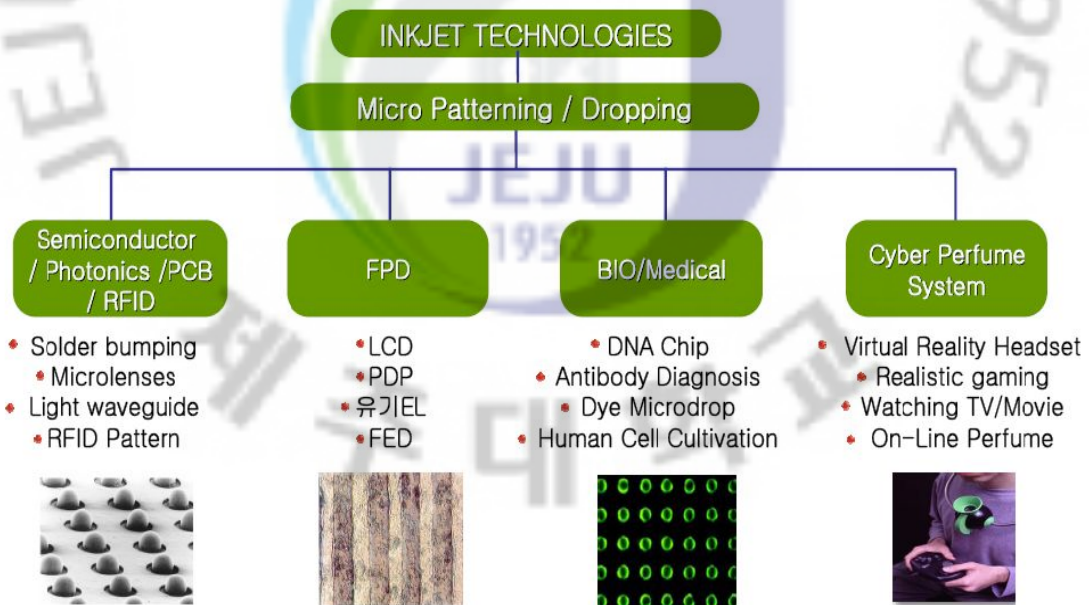


그림 8. 잉크젯 기술의 응용분야

특히 획기적인 제작비용의 절감이 필요한 플렉서블 일렉트로닉스(디스플레이

이, 전자페이퍼(e-paper), RFID (Radio Frequency Identification) 등) 분야에서는 기존의 반도체 공정의 대체 공정으로 잉크젯 인쇄 공정이 각광 받고 있다. 노광/식각(potolithography), 고온/진공 증착(high temperature vacuum deposition) 등 여러 고가 공정을 사용하는 일반적인 반도체공정에 비해, DOD (drop on demand) 잉크젯 인쇄 방식은 공정 최소화, 독성 폐기물 최소화, 설계/제조 요구시간 단축, 대형화 가능 등의 장점이 있어, 잉크젯 인쇄 기술을 이용한 직접쓰기 방식에 관한 연구개발이 학계 및 산업체에서 활발히 진행 중이다.[4]

잉크젯 DOD 프린팅 방식에는 여러 가지 방식이 있으나 현재는 이전 그림 8.에 보여 지듯이 열을 이용한 가열방식의 thermal ink-jet 방식과 피에조 소자의 압전을 이용한 piezo ink-jet 방식만이 크게 발전되어 있다.[5]

#### ① 가열방식 잉크젯(Thermal Bubble Ink-jet)

가열방식의 잉크분사장치는 기관에 구비된 매니폴드(manifold)와, 기관 상부에 형성된 격벽에 의해 한정 구속되는 잉크 채널(channel) 및 잉크 챔버(chamber)와, 잉크 챔버 내에 구비되어 있는 히터(heater)와, 노즐 플레이트(nozzleplate)에 구비되어 잉크 액적을 분사시키는 노즐을 포함하고 있으며, 이러한 가열방식의 잉크분사장치는 다음과 같은 동작을 통해 액적을 분사 시키게 된다. 히터에 전압이 공급되면 열이 발생하고, 이 열에 의해 잉크 챔버 내에 채워진 잉크가 가열되어 버블이 생성된다. 다음으로 상기 생성된 버블은 계속적으로 팽창되고, 따라서 잉크 챔버 내에 채워진 잉크에 압력이 가해지고, 노즐을 통해 잉크 액적이 노즐외부로 분사된다. 이후, 매니폴드로부터 잉크채널을 통해 잉크 챔버 내부로 잉크가 흡입되면서 잉크 챔버는 잉크로 재충전된다.

#### ② 압전방식 잉크젯(Piezo Ink-jet)

압전소자(Piezo Actuator)방식은 피에조 압전기(Piezo Electric)를 이용해서 분사하는 방식으로 압전소자(Piezo Actuator)를 이용하여 기계적인 압력으로 잉크를 분사하는 방식이다. 프린터가 압전소자에 전기신호를 보내면 압전소자

가 진동을 하게 되고 이 진동의 압력으로 잉크가 노즐구멍 밖으로 밀려 나는 것이다. 빠져나간 부분은 모세 현상과 관성법칙 등에 의하여 채워진다. 피에조 방식은 전류 제어로 잉크의 분출을 정밀하게 제어할 수 있다는 점이 장점이다. 잉크방울이 부풀어 오를 때 압전소자의 전류를 제어하는 시간을 조절하면 밀려나가는 잉크방울의 크기를 조절할 수 있다. 때문에 노즐이 크면서도 잉크방울을 작게 만들 수 있으며 하나의 노즐로 다양한 크기의 잉크방울을 만드는 멀티 사이즈 도트기능도 실현할 수 있다.

### ③ 정전기력 잉크젯

본 논문에서 주요로 다룰 잉크젯 공정으로써, 현재 잉크젯 시장의 대부분을 차지하고 있는 가열방식의 열에 의한 잉크의 변형과 압전방식의 노즐 구경에 대한 미세 잉크방울 크기에 대하여 재료잉크의 물리적 한계 등 기술적 한계에 다다랐다는 문제점이 부각되면서 그 문제점들을 타계할 수 있는 한 방향으로 정전기력을 이용한 잉크젯 기술에 대한 연구가 많은 곳에서 진행 중에 있다.

그러나, 아직까지는 나노 크기의 미세 잉크 방울 분사를 위하여 1kV 이상의 고전압이 필요하다는 한계와 여러 가지 제반 사항에 대한 연구가 미흡한 상황 이어서 지속적인 투자와 연구가 필요하다.

#### 4. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템

##### 4-1. 잉크젯 프린팅 기술의 현황

반도체 프로세스는 phase shift mask, immersion technology 등의 개발과 더불어 물리적 광학회절한계를 극복하기 위한 보조적 수단들의 개발로 말미암아 드디어 2006년 삼성에서 50 nm의 패턴선폭을 가지는 D램을 개발하는 등의 성공을 거두어왔다. 그러나 기존의 반도체 프로세스는 노광기, 포토마스크, 포토레지스트와 같은 감광성 용액, 그리고 스퍼터링과 같이 재료 낭비요소가 많은 재료 증착 기술, 고진공과 고온의 공정을 사용해야한다는 단점이 있으며, 일각에서는 이를 대체하기 위한 기술로써 프린팅 공정을 이용하고자하는 시도가 시작되었다. 1980년대 이후부터 잉크젯, 그라비아/플렉소, 오프셋, 레이저, 스크린 프린팅과 같은 다양한 프린팅 공정들이 시도되었다.

1980년대 이후부터 시작된 미세패턴 직접 인쇄방식은 당시 큰 주목을 받지 못하였다. 그러나, 1990년대 후반부터 21세기에 인쇄를 통한 저가의 디스플레이, 유연성 디스플레이 등과 같은 새로운 신규시장이 창출될 것이라는 전망과, 대면적화와 더불어 장치산업화 되어가는 TFT-LCD 산업에서 고비용의 노광공정을 대체하기 위한 요구에 의해서 본격적인 주목을 받기 시작하였다. 특히, 잉크젯 공정의 경우 다음 표 2.에서 볼 수 있는 바와 같이 디스플레이 산업에의 적용이 가장 유력시 되고 있는데, 가장 큰 이유 중 하나는 노광공정에서와 같은 마스크, 그리고 롤 프린팅에서와 같은 마스터 플레이트의 사용이 불필요하며, 재료의 사용효율을 극대화시킬 수 있다는 점에서 기인한다고 본다.

표 2. IT Strategies社에 의해 예측된 인쇄전자/디스플레이 시장의 전망

Item	2004 Market size	2010 Market size	2005 Investment	2010 Investment	R2R	Inkjet	Hybrid
Display	\$ 80M	\$ 450M	\$ 75M	\$ 225M	5%	75%	20%
Lighting	\$ 40M	\$ 300M	\$ 140M	\$ 850M	15%	5%	80%
Solar Cell	\$ 20M	\$ 100M	\$ 40M	\$ 250M	10%	5%	85%
Sensor	\$ 10M	\$ 80M	\$ 30M	\$ 100M	0%	5%	95%
Packaging	\$ 15M	\$ 250M	\$ 50M	\$ 250M	20%	10%	70%
Total market	\$ 170M	\$ 1,205M	\$ 380M	\$ 1,840M	22%	10%	68%

디스플레이 산업에서 TFT-LCD의 컬러필터의 경우, 롤 프린팅(일본 : Toppan)과 잉크젯(일본: Sharp, Toppan, DNP, 한국: 삼성전자, LG Philips LCD), 레이저 전사법(일본: Nakan, 미국: DuPont, 3M, 한국: 삼성전자, LG Philips LCD) 등의 프린팅 방법들이 다양하게 시도되었으나, 지금은 잉크젯 공정이 주류를 이루고 있는 것으로 알려져 있다.

잉크젯은 그림 10.에 보인 바와 같이, 피에조, 열, 음향계, 정전기력 그리고 Aerosol-Jet의 방식으로 분류되고, 각각의 방법들이 다양하게 시도되고 있다.

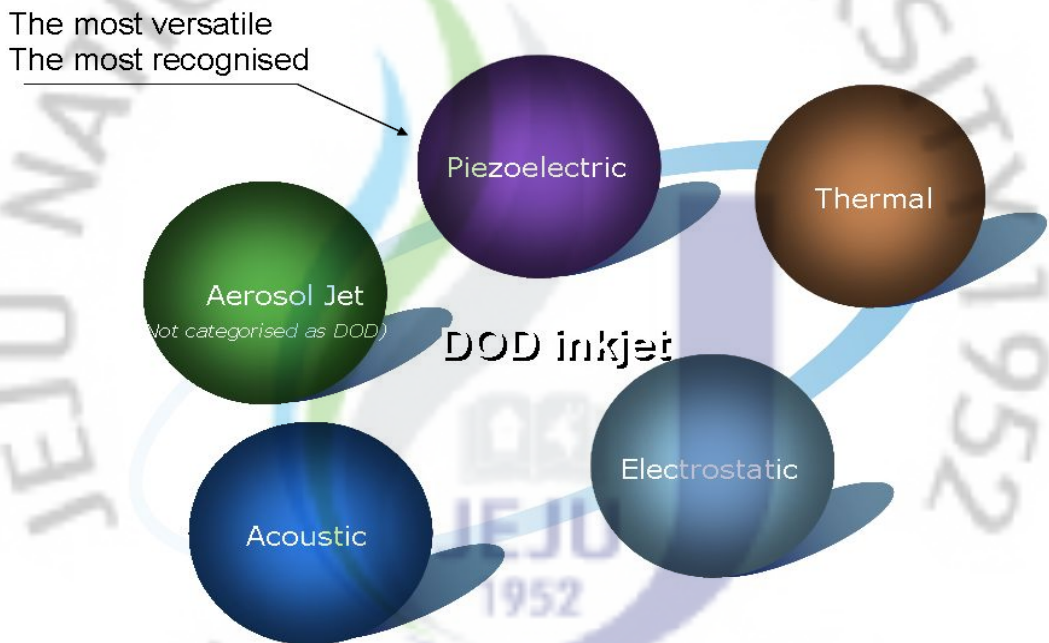


그림 9. 잉크젯의 종류

잉크젯 시스템 중에서 가장 광범위한 지지를 받고 있는 피에조 타입의 잉크젯 프린트 헤드를 이용한 미세선폭 구현은 일본의 Seiko-Epson사가 신 에너지 산업기술 종합 개발 기구(NEDO)의 지원을 받아, 50  $\mu\text{m}$ 급 전극패턴이 형성된 20층 적층회로 기판을 2004년 시연하였다. 또한, 일본의 Seiko-Epson사의 경우 최소선폭 30  $\mu\text{m}$ 급의 해상도를 잉크젯으로 직접 패턴하는 실증실험에 성공하였다고 발표하였다. 영국의 Plastic Logic사의 경우 그림 10.에 보이는 바와 같이 유연성 디스플레이에 전극패턴을 행함에 있어 최소선폭 50 $\mu\text{m}$ 을 구현하였음을 발표하였다. 미국의 Fuji Dimatix사는 자사의 SX3 헤드로 20 $\mu\text{m}$ 의

패턴을 행하였음을 2006년 발표하였으며, 동 분야에서 양산이 가능한 잉크젯 프린트 헤드로는 가장 미세한 선폭의 구현에 성공하였다. 그림11. 에는 현재 잉크젯 프린팅을 이용하여 미세패턴 기술의 발전 추이를 나타내고 있다.

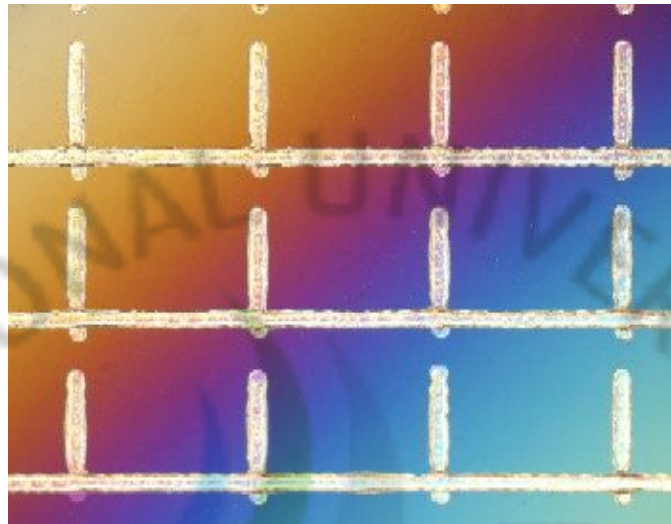


그림 10. 잉크젯 프린팅된 50 μm급 전극패턴 (자료: Plastic Logic, UK)

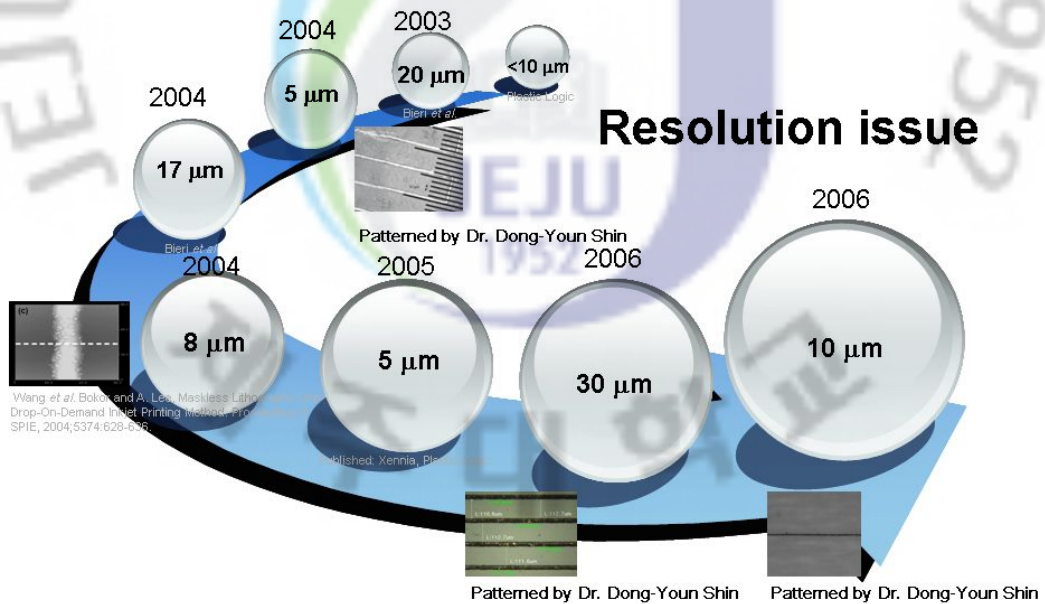


그림 11. 잉크젯 프린팅을 이용한 미세패턴의 기술발전 추이

이와 같이, 선진 각국의 기업체와 연구소에서는 50μm 이하의 선폭을 잉크젯



을 이용하여 구현하기 위해 집중적인 연구개발을 수행하고 있으나, 현재 개발된 피에조 잉크젯용 잉크의 물리적인 한계 상 선폭을 줄이면서도 충분한 두께를 확보하는 것은 기술적 한계가 어려움으로 남아있다. 이러한 기술적 어려움을 극복하기 위해 본 연구에서 제안하는 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅은 전하를 띤 입자들을 이젝터 끝단으로 집중시킨 후 토출시키는 방식으로써, 유효농도를 크게 증가시킬 수 있으며, 그로인해 충분한 두께를 얻을 수 있다는 이점이 있다.

#### 4-2. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템의 정의

정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템이란, Printed Electronics(PE, 안테나, 전극, 배터리, 트랜지스터, 다이오드 등), Printed Graphics(시각화 된 이미지 및 문자) 및 추가적인 전자소자 등, 태양전지, RFID, 유연디스플레이, 스마트 패키지 등의 차세대 인쇄전자 소자 및 제품을 생산을 목표로 하는 프린팅 공정장비이다. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여, 다양한 점도의 전도성물질, 반전도성물질, 절연성 물질을 각각의 정밀도 특성에 맞도록 인쇄전자 소자 및 제품을 대량 생산해내는 시스템으로 이처럼 프린팅 된 인쇄전자소자 및 제품들은 본 연구에서 개발하는 장비를 이용하여 시각화된 이미지가 인쇄되고, 정밀한 기능이 필요로 되어 반도체칩이 필요하거나, 외부로의 단자연결을 위한 패키징이 필요할 경우도 패키징이 가능한 시스템이다.

정전기력 잉크젯 기술은 정전기력을 이용하여 잉크젯 방식의 패턴 프린팅이 가능한 기술로써 전도성 및 비전도성 용액을 노즐의 막힘 현상 없이 고속, 대면적 나노 프린팅이 가능한 공정 기법이다. 기존의 잉크젯 프린팅의 경우 점차 노즐 구경을 줄임으로써 미세선폭 패턴에의 적용 시 잉크젯 프린트 헤드의 수율 저하와 공정 적용 시 노즐 막힘 등에 의해 공정 안정도가 저하되는 문제점의 극복이 가능하여 새로운 차세대 인쇄 기술로 평가되고 있다. 전기장에 의한 유체의 변형을 통해 Cone-jet을 형성하여 수백 나노에서 수백 마이크로에 이르는 액적을 형성하는 기술로서, 최근에는 전기적 신호, 유체의 물성 과 같은 다양한 조건에서 Cone-jet 현상을 만들어내고 이를 정전기력을 이용하여

패터닝하는 기술이며, 최근에는 인가되는 고전압에 일정 형태의 펄스를 주어 DoD 방식으로 인쇄 가능한 공정으로 차세대 잉크젯 기술로써 각광받고 있는 기술이다.

정전기력 잉크젯 프린팅 헤드 시스템 기술의 개요를 다음 그림 12.에 나타내었다. 정전기력 잉크젯 프린팅 헤드 시스템은 기존의 잉크젯 프린트 헤드와는 달리 잉크에 주입된 전하에 의해 유발되는 정전기적 상호인력을 바탕으로 기관 상에 패턴을 행하는 장치이다. 또는, 잉크 내에 정전기 반발력을 이용하여 분산되어있는 입자들과 동일한 전하를 주입함과 동시에 기관 상에 반대 전극을 설치하여, 이젝터와 기관 상에 형성된 고전압 장에 의해 유도된 잉크 내 분산 미립자들에 의해 기관 상에 패턴을 행하게 되는 원리를 이용한 것이다.

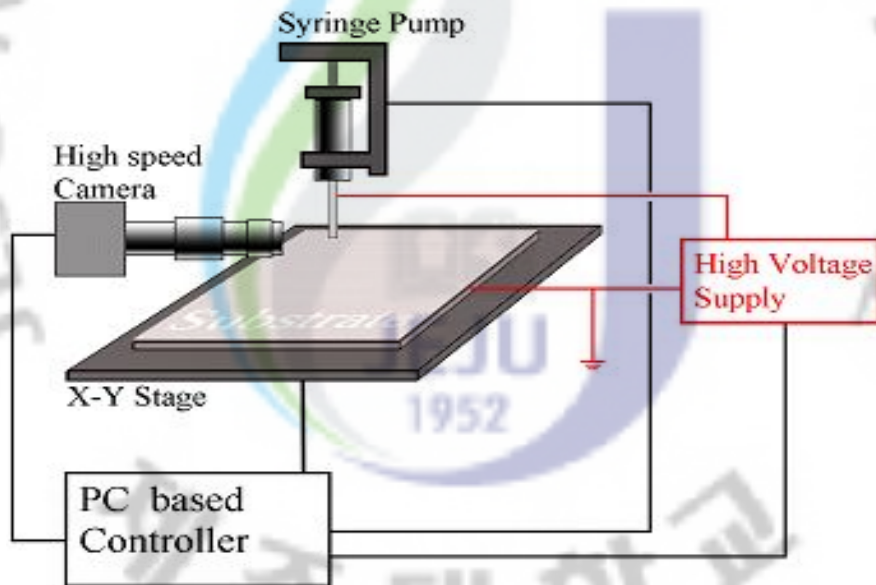


그림 12. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 개념도

정전기력 잉크젯 프린팅 헤드 시스템은 용액을 넣은 미세노즐과 그것과 대응하는 기관전극과 고전압전원으로 구성된다. 고전압이 모세관에 인가되면 전기장 집중효과에 의해 미세노즐 끝에 극도로 큰 전기장이 발생하며, 집중 형성된 전기장은 미세노즐 끝부분의 용액표면에 전기이중층을 형성한다. 이중정전

하를 가지는 이온들은 표면에 집중되고 표면이 불안정에 의해 콘이나 제트의 형태로 분사된다. 분사된 미세방울은 전기장에 의해 유도되며, 용매가 증발하여 축소, 분리되어 패턴을 만들며 증착하게 된다.

기존의 잉크젯 기술과는 달리 정전기력 잉크젯은 대중적이지 않으므로, 소재와 하드웨어 개발측면에서 기존 인프라를 활용하기 어려운 면이 있다. 특히, 대면적 기판상에 패턴하기 위한 정전기력 잉크젯의 응용은 현재까지 영국 TTP사가 일본의 업체와 함께 시도하고 있다는 것 외에는 알려진 바가 없다.

#### 4-3. 정전기력을 이용한 잉크젯의 요소기술



그림 13. 정전기력 잉크젯 실험장치

정전기력 잉크젯 시스템은 위 그림 13.에서 보여지는 바와 같이 하드웨어적으로 다음과 같은 장치들이 요구된다.

- ① 잉크에 전하를 주입하기 위한 미세 니들
- ② 잉크가 토출될 이젝터
- ③ 전하를 띤 입자들이 토출되는 경우에는 소모되는 잉크 미립자들을 보충해

주기 위한 농도 모니터링 장비

- ④ 전하를 띤 입자들이 소모되어 전기적 밸러스가 붕괴됨으로 인해서 발생할 수 있는 문제점들을 해결하기 위한 요소 부품
- ⑤ 고전압 발생기 및 제어장비
- ⑥ 정전기력 잉크젯의 패턴을 수행하기 위한 패턴 드라이버
- ⑦ 불량패턴을 인라인 측정할 수 있는 시스템
- ⑧ 불량 패턴을 제거 또는 수정하기 위한 리페어 장비.

핵심적으로 정전기력 잉크젯의 작동 방식 상 고전압 발생장치와 제어장치, 그리고 잉크 모니터링 시스템과 순환 시스템, 잉크 공급시스템과 정량 토출 검사장치가 필수적이다.

#### 4-4. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 연구 및 해석

##### 4-4-1. 모델링

정전기력 잉크젯 액적 생성 특성을 평가하기 위해 유한 요소법을 이용하여 정전기력 해석을 수행했다. 정전기력 해석은 축 방향 좌우대칭 기법을 이용하여 2차원 형상으로 단순화하여 시켜 수행 한 후 다음 그림 14.와 같이 모델링 하고 3차원 형상으로 확장하여 이해 및 시각화를 높였다.

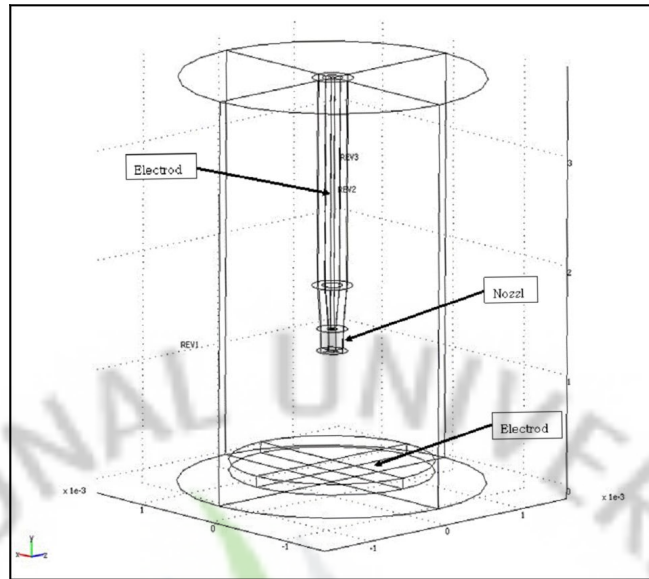


그림 14. 정전기력 해석을 위한 노즐 모델링

#### 4-4-2. 인가전압에 대한 시간에 따른 전기장 해석

시간에 따른 전압 및 정전기력 분포를 입력 전압별로 해석 하여 비교 분석 하였다. 액적은 노즐 끝단의 정전기력 세기에 의해 액적 생성 형태가 변하므로 정전기력 특성은 매우 중요한 변수이다. 해석을 위한 모델은 그림 16.에 나타나는 바와 같이, 노즐부에 양전극(electrode)을 Substrate부에 음전극을 연결 하였다. 이때 노즐 직경은  $100\mu\text{m}$ 을 선정하였다.

해석을 위한 지배방정식은 다음과 같다.

$$-\nabla(\epsilon\nabla V(t)) = \rho(t)$$

여기서  $\epsilon$ 는 유전율,  $\rho$ 는 전하 밀도,  $V$ 는 전위이다.

또한 그림 15.에 보여지는바와 같이 경계 조건을 다음과 같이 주었다.

$$V(t) = f(t) : \text{Pulse Fuction}$$

$$V(t) = 0 : \text{Insulation}$$

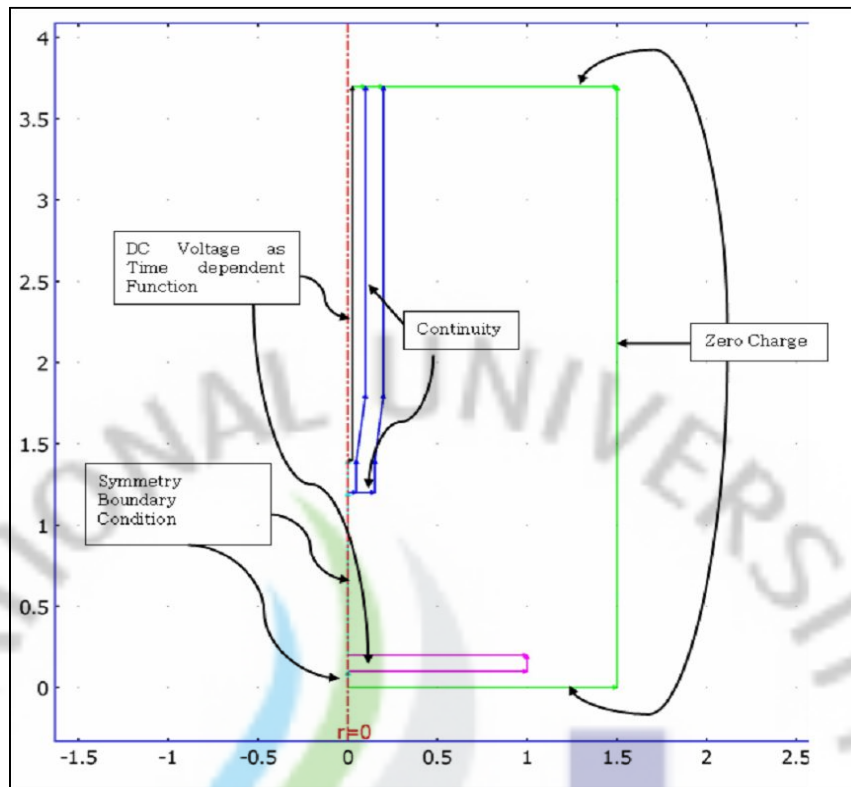


그림 15. 경계 조건

그림 16.에서는 해석을 위한 정전기력 잉크젯의 모델과 3D 메쉬 모델을 나타내었으며, 이때 외부 환경은 메쉬 크기를 크게 하였으며, 잉크 노즐부는 메쉬 사이즈를 상대적으로 작게 잡고 해석의 정확도를 높였다.

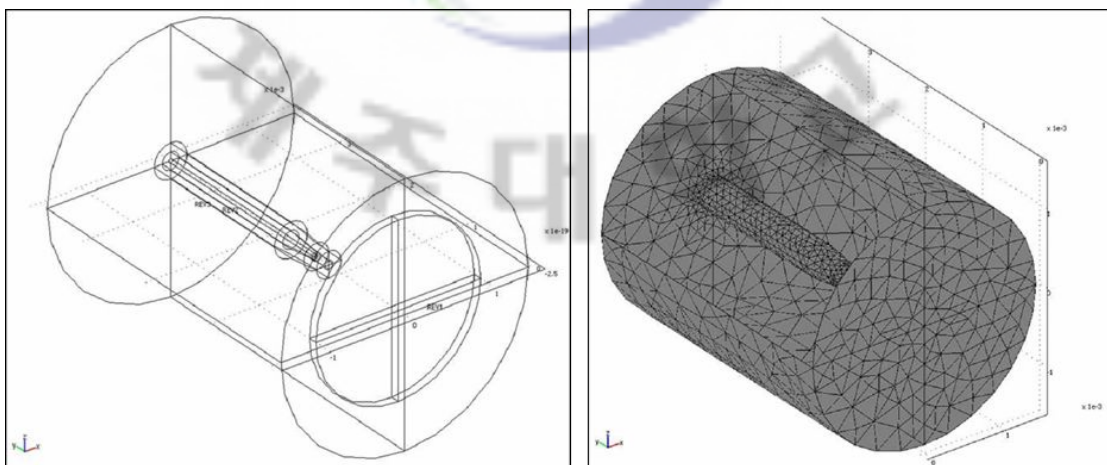


그림 16. 정전기력 잉크젯 해석 모델링 & 해석 메쉬

위와 같은 모델링에 경계조건을 입력한 후 인가전압을 크게 3가지 경우로 적용하여 노즐 해석을 수행하였다. 인가 입력 전압 함수는 Dot-on-Demand 잉크젯을 위하여 디지털 펄스 함수로 주었다.

1) CASE 1 : 인가 입력 전압 : 500V~1000V

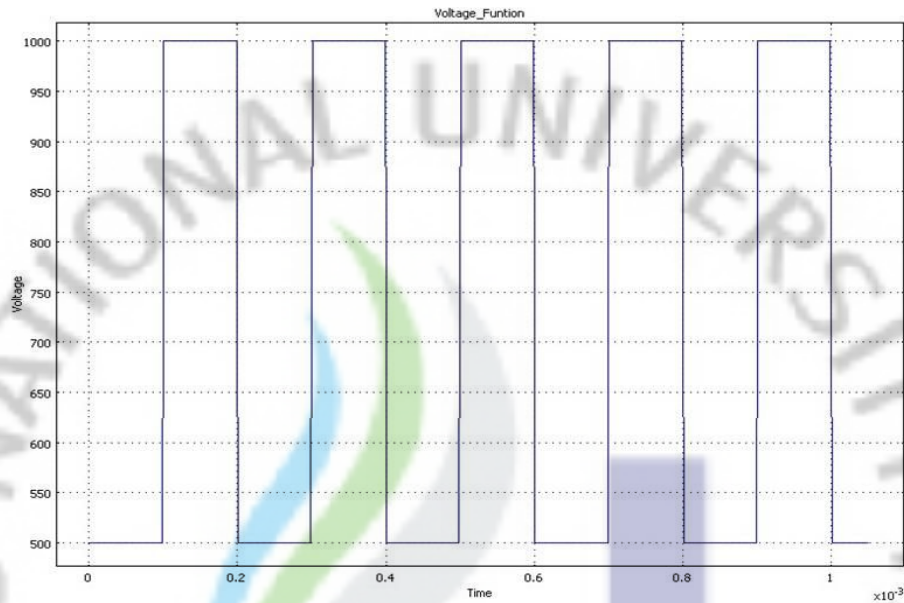
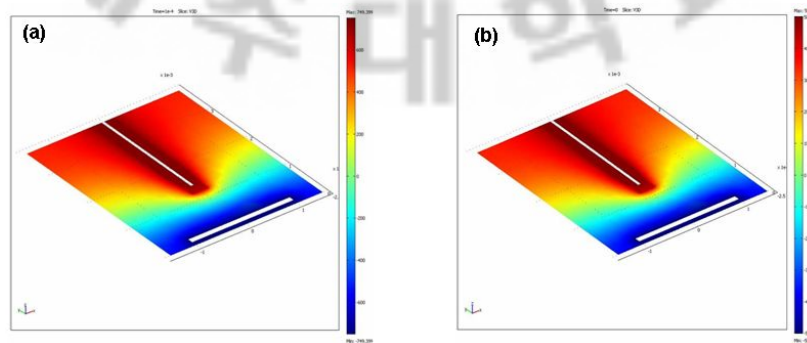


그림 17. Applied Voltage Function 500V~1000V

CASE 1에서는 그림 17.과 같이 입력 인가전압을 500V~1000V로 주었고, 이에 대해 시간에 따른 노즐 주위의 Electro Potential과 Electro-Field의 세기와 영역을 그림 18.와 그림 19.에서 보여주고 있다. 그 해석 결과를 그림 20.에 나타내고 있다.



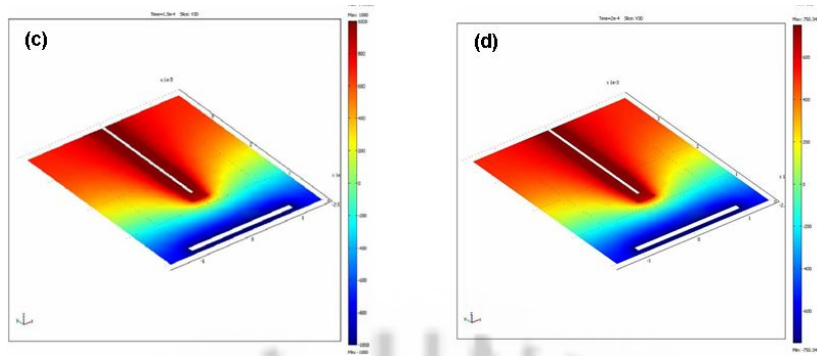


그림 18. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s

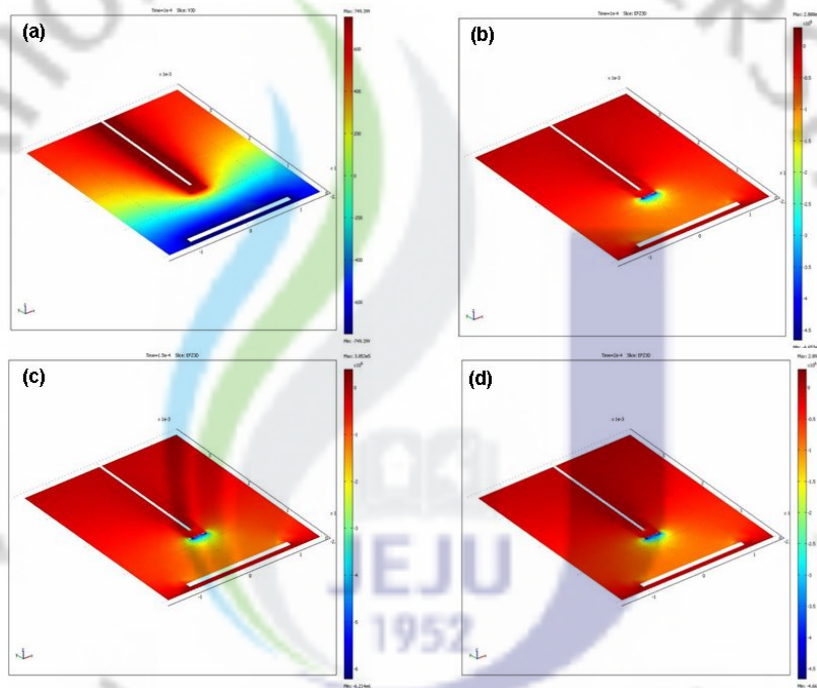


그림 19. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s



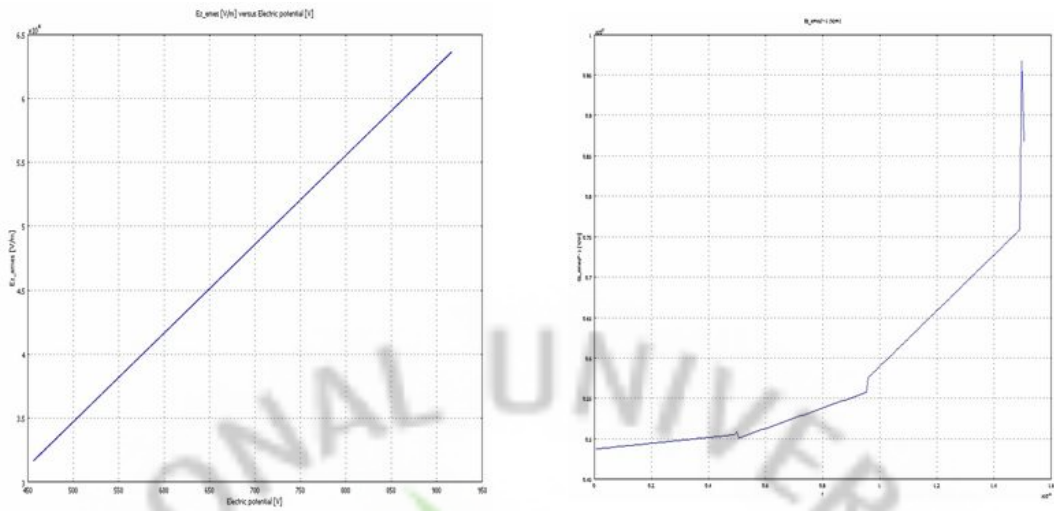


그림 20. CASE 1 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF

2) CASE 2 : 인가 입력 전압 : 0V~500V

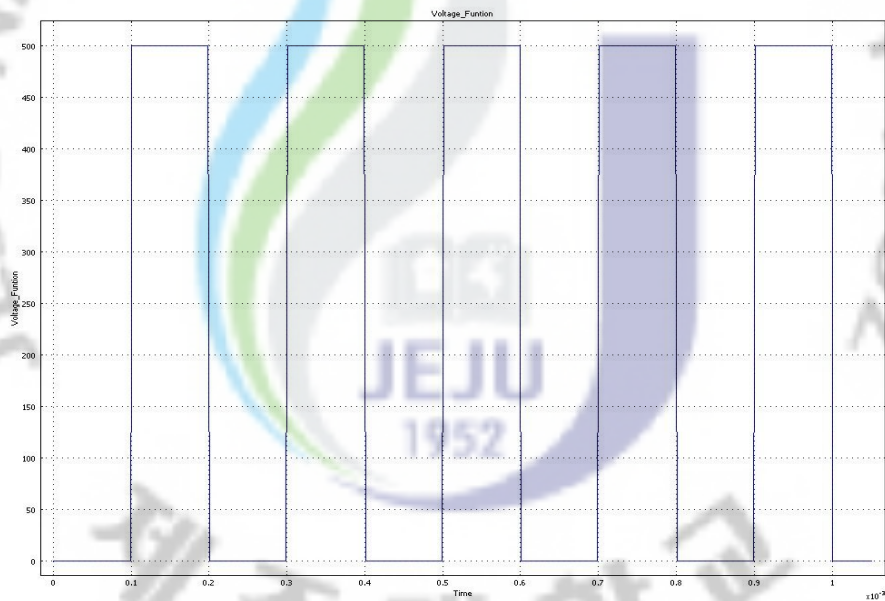


그림 21. Applied Voltage Function 0-500V

CASE 2에서도 CASE 1과 같은 방식으로 인가전압을 그림 21.에 나타내었듯이 인가전압을 0V~500V의 디지털 파형을 주었고, 이에 대해 시간에 따른 노즐 주위의 Electro Potential과 Electro-Field의 세기와 영역을 그림 22.와 그림 23.에서 보여주고 있으며, 그 해석 결과를 그림 24.에서 나타내고 있다.

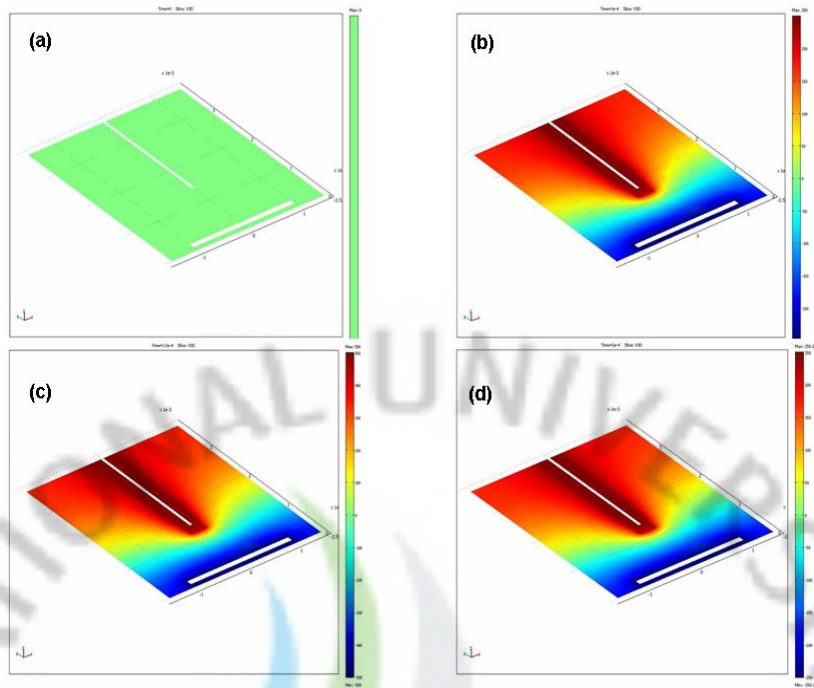


그림 22. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s

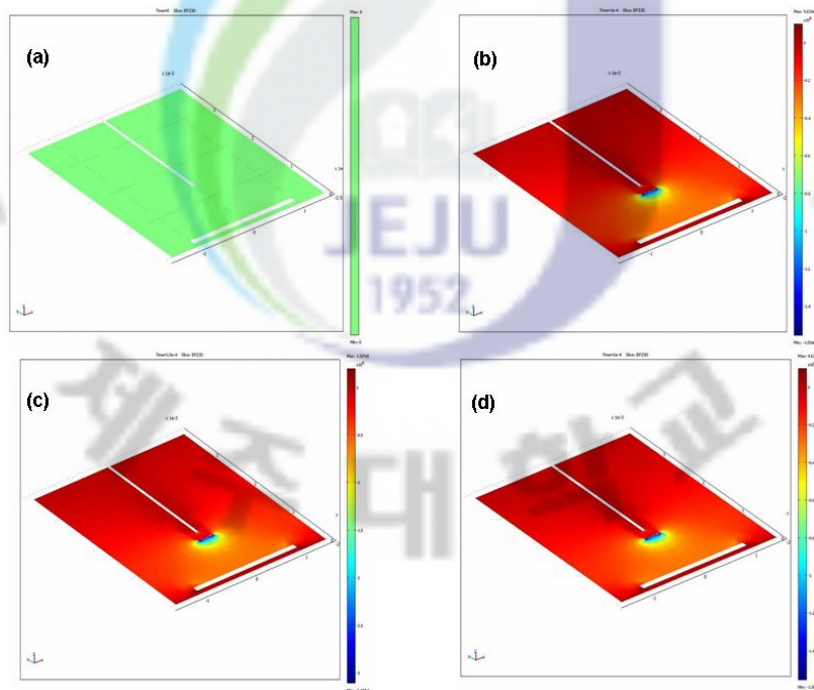


그림 23. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s

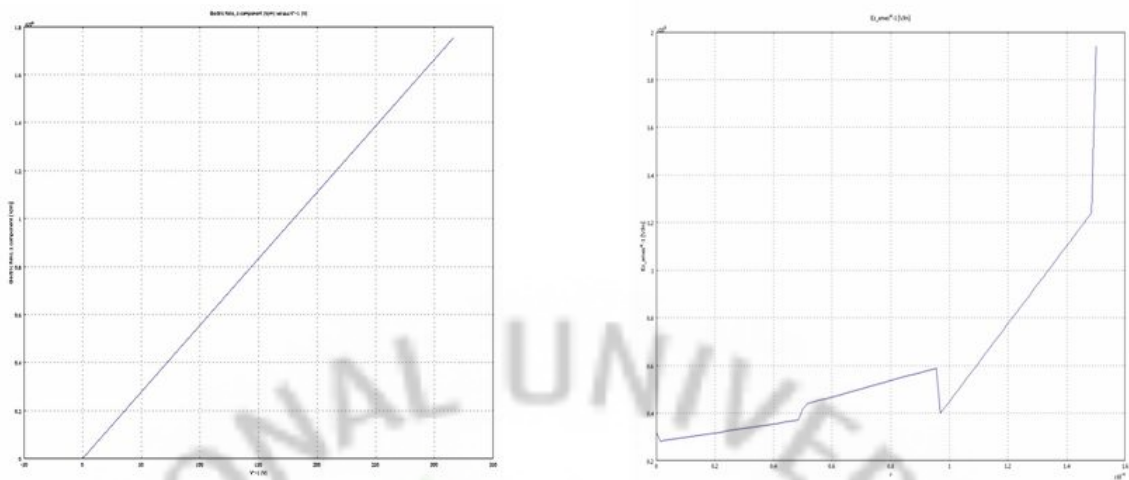


그림 24. CASE 2 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF

3) CASE 3 : 인가 입력 전압 : 0V~1000V

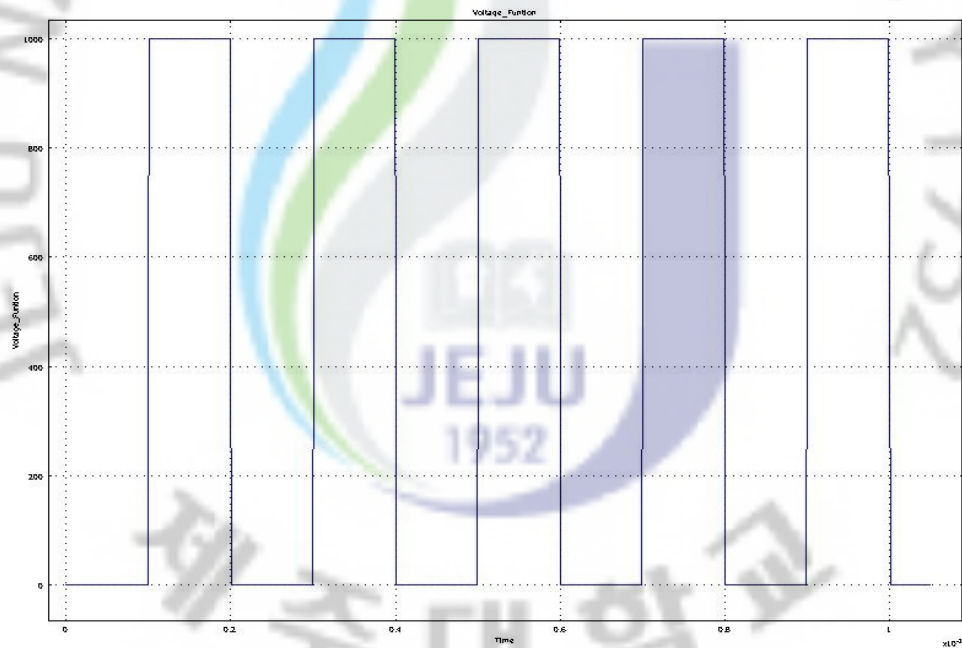


그림 25. Applied Voltage Function 0-1000V

CASE 3에서도 역시 CASE 1과 같은 방식으로 인가전압을 그림 25.에 나타내었듯이 인가전압을 0V~1000V만큼의 디지털 파형을 주었고, 이에 대해 시간에 따른 노즐 주위의 Electro Potential과 Electro-Field의 세기와 영역을 그림 26.와 그림 27.에서 보여주고 있으며, 그 해석 결과를 그림 29.에서 나타내

고 있다.

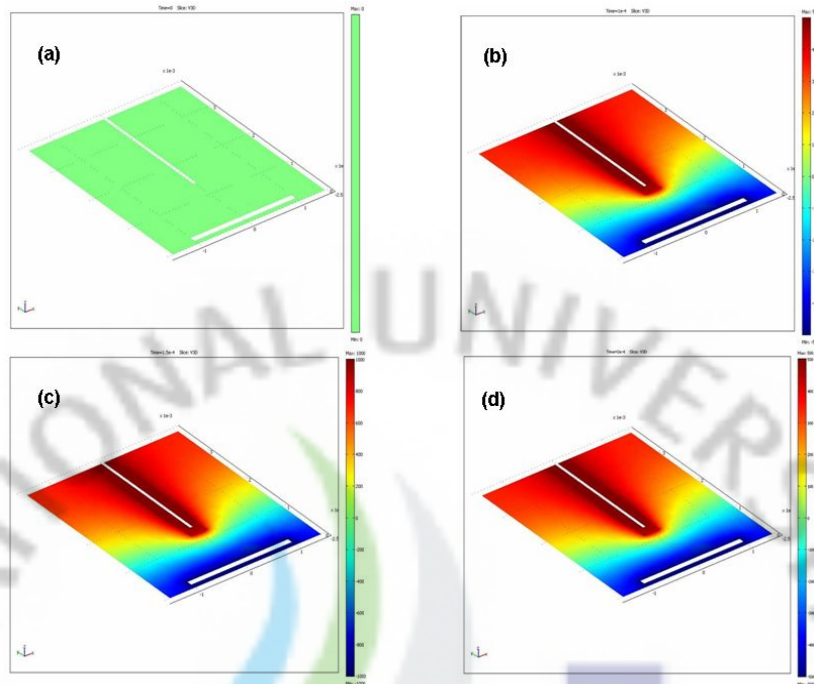


그림 26. Electro Potential Distribution (a)=0.1, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s

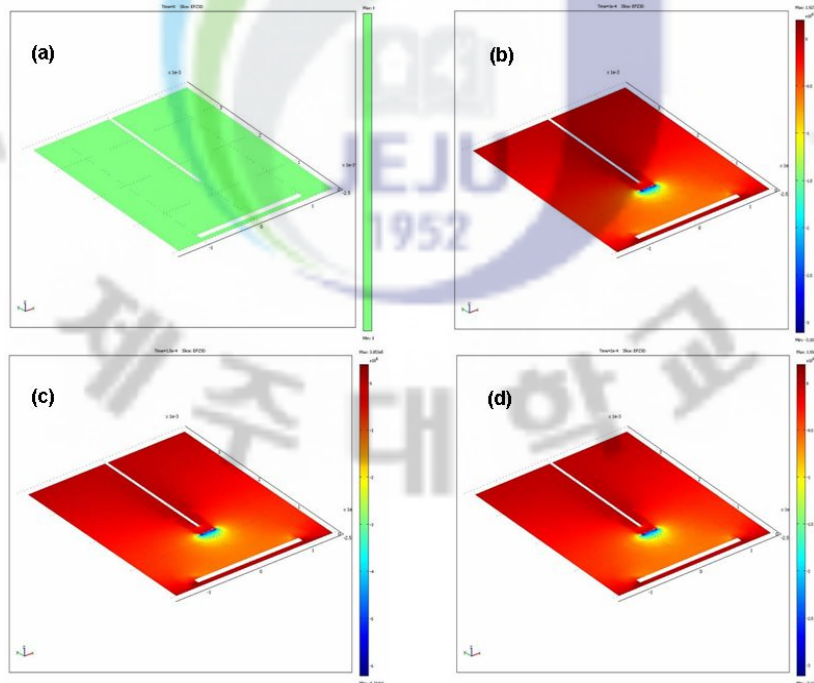


그림 27. Electro Field Distribution (a)=0, (b)=0, (c)=0.15, (d)=0.2m/s

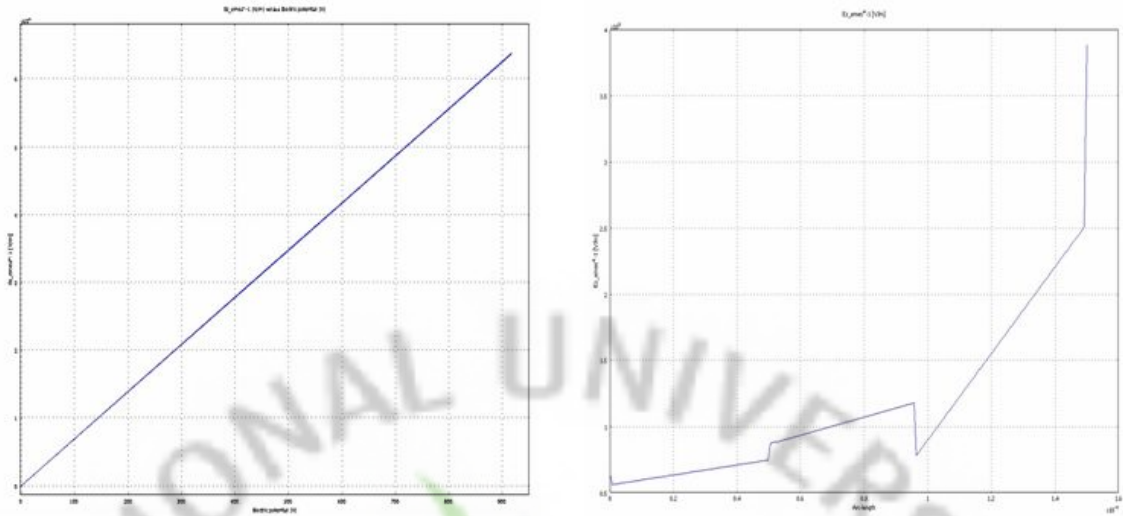


그림 28. CASE 2 Voltage에 따른 EF & 노즐중심부터 거리에 따른 EF

#### 4-4-3. 싱글 노즐에 대한 전기장 해석

기존 패턴이 잉크토출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 싱글노즐과 기존 패턴닝 되어진 패턴에 대한 정전기장 해석을 수행하였다. 그림 29는 해석 대상인 싱글노즐과 glass substrate 위에 패턴된 실버 패턴을 보여주고 있다. 그 영향도를 미세하게 적용할 수 있도록 강한 고전압에 대하여 실험하려 전극에는 5kV의 전압을 인가하였으며, 실버 패턴이 전극으로부터 x만큼 떨어진 상태에서 전기장 분포를 알아보았다.

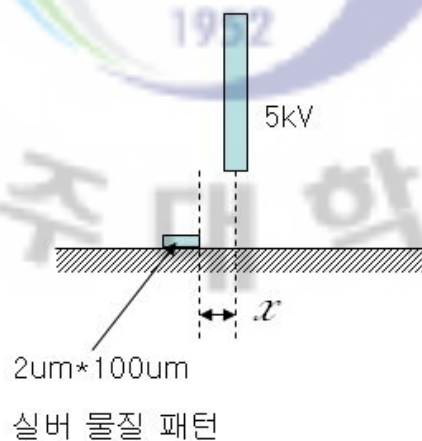
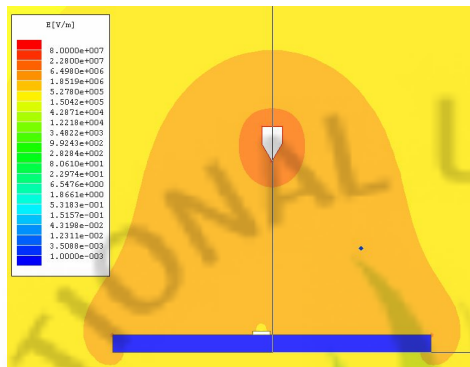
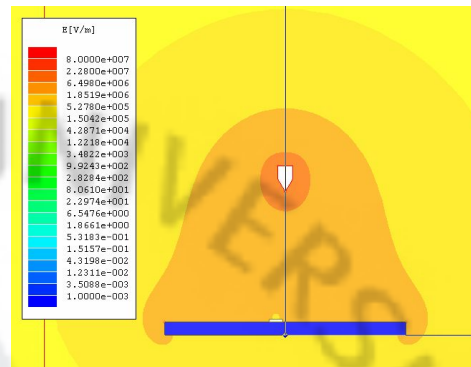


그림 29. 싱글노즐

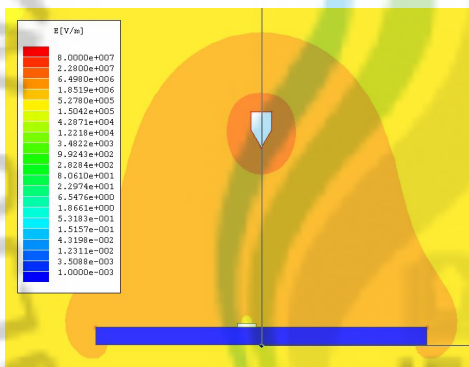
기존 패터닝되어진 패턴의 위치  $x$ 를  $10\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$ ,  $30\mu\text{m}$ ,  $40\mu\text{m}$ ,  $100\mu\text{m}$ 의 5가지 경우에 대해서 해석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 30.에 나와 있는 바와 같다.



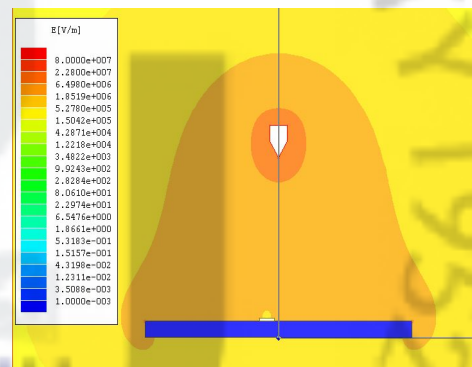
(a)  $x=10\mu\text{m}$ 일 때 (case 1)



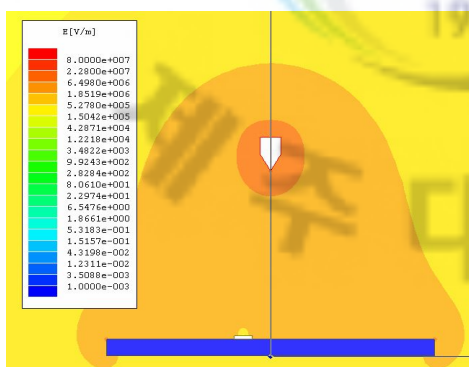
(b)  $x=20\mu\text{m}$ 일 때 (case 2)



(c)  $x=30\mu\text{m}$ 일 때 (case 3)



(d)  $x=40\mu\text{m}$ 일 때 (case 4)



(e)  $x=100\mu\text{m}$ 일 때 (case 5)

그림 30. 싱글노즐에서 패턴의 위치에 따른 전기장의 세기 분포

그림 30.에서 보여지다시피 5kV에서의 강한 고전압에서도 기존패턴의 위치에 따른 전기장의 세기 분포는 기존에 형성된 패턴의 위치에 따라서 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

#### 4-4-4. 멀티 노즐에 대한 전기장 해석

멀티노즐간의 강한 고전압에 대한 상호 영향도를 알아보기 위하여 3개의 노즐이 나란히 배열되어 있을 때, 전기장 세기의 분포가 주변 노즐 간에 어떤 간섭 영향을 미치는지 알아보았다. 그림 31.는 해석대상인 멀티노즐의 형상을 보여주고 있다. 그림과 같이 3개의 노즐이 나란히 있고, 각 노즐에 인가되는 전압이 표 3.과 같을 때, 전기장의 분포에 대해 해석을 수행하였다.

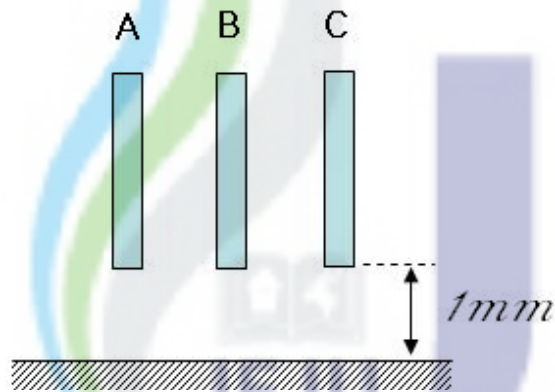


그림 31. 멀티노즐

표 3. 각 노즐에 인가되는 전압에 따른 해석의 케이스

Case 1	A: 0V, B: 5kV, C: 5kV	Case 4	A: 10V, B: 0kV, C: 10kV
Case 2	A: 5kV, B: 0kV, C: 5kV	Case 5	A: 0V, B: 20kV, C: 20kV
Case 3	A: 0V, B: 10kV, C: 10kV	Case 6	A: 20V, B: 0kV, C: 20kV

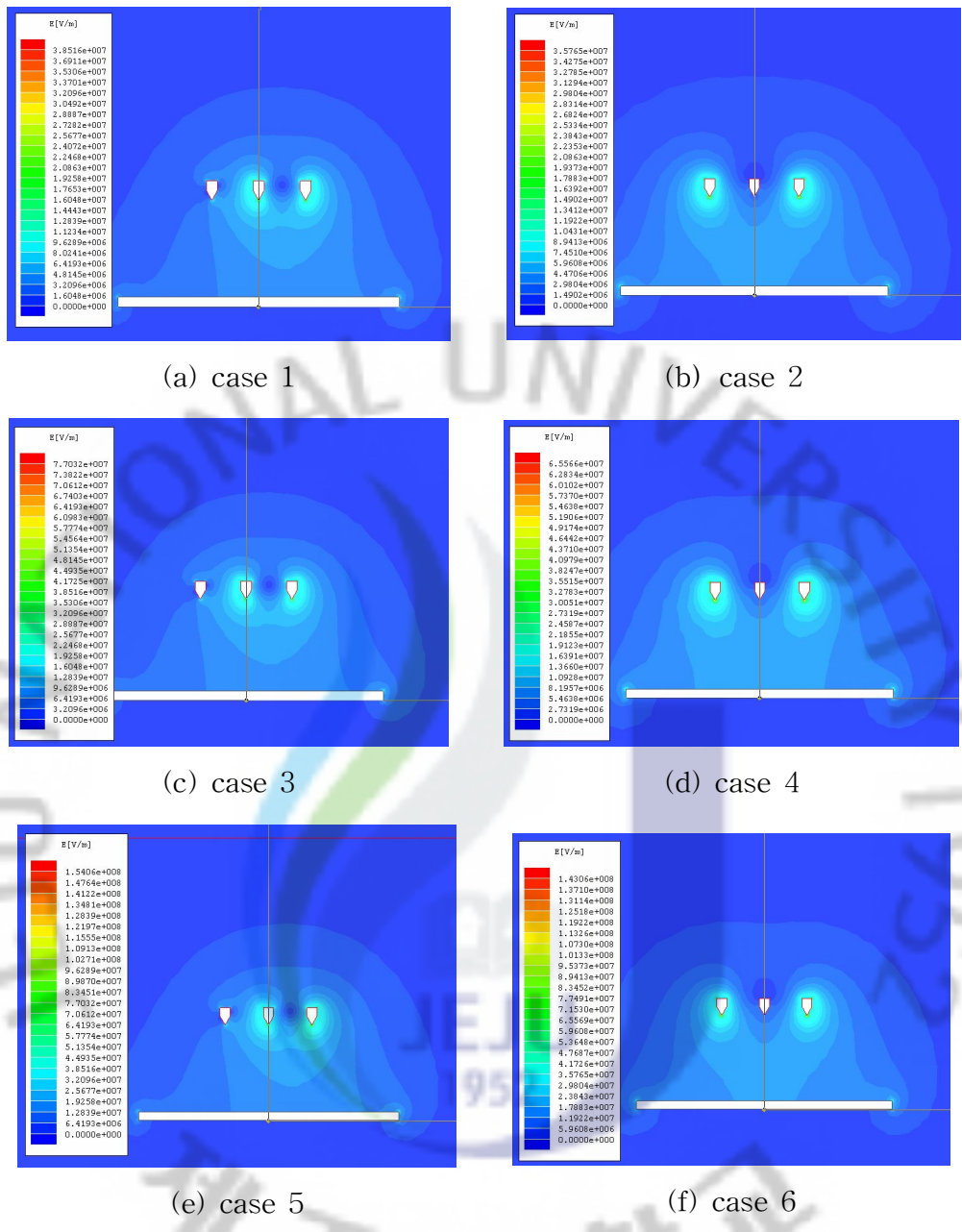


그림 32. 멀티노즐에서 각 노즐의 전압에 따른 해석결과

그림 32.에 각 경우에 대한 전기장 해석의 결과를 보여주고 있으며, 각 경우에 따른 인가전압은 위 표 3.에 따라 인가하였다. 그림 32.의 각 CASE에서 알 수 있듯이 인접한 노즐의 경우 주위 노즐의 위치와 전압의 세기에 따라 전기장의 분포가 달라짐을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 알기 위해서, 각각의 경우에서 glass 표면에서의 전기장의 세기를 그래프로 나타내어 보기로 하였



고, 그 결과는 다음 그림 33.의 그래프에 나타내었다.

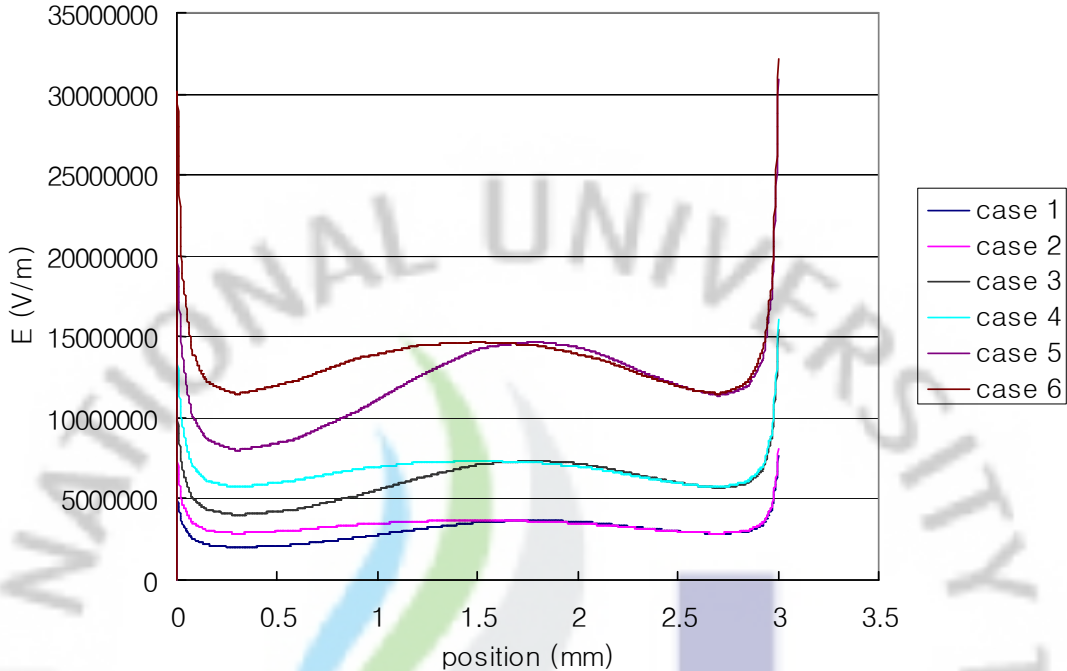


그림 33. 각 경우에 대한 glass 표면에서의 전기장 세기

#### 4-4-5. 액적 토출 및 증착 해석(Droplet ejection and deposition)

본 연구에서 사용한 잉크 노즐 기술은 노즐로부터 매우 미세한 액적을 토출하는 것이다. 이러한 기술의 핵심적인 내용은 액적의 낙하하는 속력과 낙하되었을 때 액적의 현상이다. 이러한 실험결과는 액적의 크기와 노즐에 가해지는 물리적, 전자기적 힘에 의해서 변하게 되는데 다양한 파라미터를 변화시킬 수 있는 시뮬레이션이 필요하다. 이러한 시뮬레이션을 통하여 유체 흐름의 이해와 설계된 시스템의 최적 설계를 할 수 있다. 시뮬레이션은 유한요소법을 이용하여 모델링되고, 지배방정식으로 다음의 식(1), 식(2)와 같이 Momentum transport와 질량보존의 법칙을 이용한 Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, 그 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) - \nabla \cdot (\mu (\nabla u + \nabla u^T)) + \nabla p = F_{st} \dots \dots \dots (1)$$

$$(\nabla \cdot u) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 나타내고,  $\mu$ 는 유체 점도(Ns/m<sup>2</sup>),  $u$ 는 속도(m/s),  $p$ 는 압력(Pa),  $F_{st}$ 는 표면장력을 나타낸다.

또한, 액적 충돌은 둥근 원형의 액적이 평평한 표면에 부딪히면 초기에는 관성력(inertial force)에 의해 수직축 방향으로 압축되었다가 표면을 따라 최대 크기로 퍼진 후, 다시 점도와 표면장력에 의해 형상이 결정된다. 충돌과 퍼짐은 수  $\mu s$ 이내에 완료된다. 충돌하는 동안에 액적은 표면장력에 의해 뭉치게 되는데, 표면장력에 대한 관성력의 무차원수는 Weber 상수로 식(3)과 같이 정의된다.

$$N_w = \frac{\rho d_d v^2}{\sigma} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $\rho$ 는 질량밀도,  $d_d$ 는 제팅시 드롭렛의 직경,  $\sigma$ 는 표면장력,  $v$ 는 드롭렛의 속도이다. 액적의 Weber 상수가 80을 초과하면 액적은 충돌하는 순간 작은 액적으로 분리되는 경향이 있다.

#### 1) 액적 토출 및 증착 해석을 위한 모델링

다음 그림 34.은 잉크젯의 노즐형상을 나타내는 것으로 좌우 대칭이기 때문에 선 대칭한 2D 모델을 사용하였다. 입구와 노즐사이의 공간은 잉크로 가득 차 있다고 가정을 하며, 잉크는 10 $\mu s$ 의 시간 동안에 입구쪽으로 계속 공급이 된다. 그 힘으로 잉크가 노즐을 통하여 흐름을 일으킨다. 표 4.에 잉크와 공기의 물리적인 매개 변수들을 나타내었다.

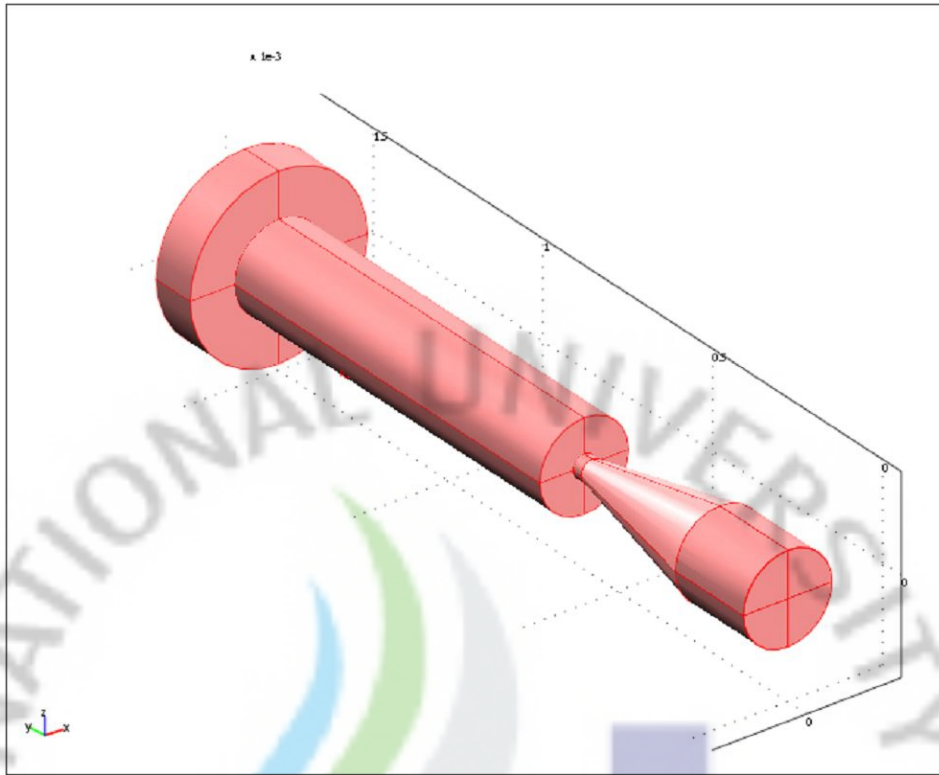


그림 34. Inkjet Geometry model

표 4. 잉크와 공기의 물리적 매개변수

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic Viscosity (Ns/m <sup>2</sup> )	Surface Tension (N/m)
Ink	1e3	1e-2	7e-2
Air	1.225	1.789e-5	

2) 액적 토출 및 증착 해석의 초기조건

그림 35.은 t=0 일 때의 초기 잉크와 공기의 분포를 나타내고 있으며, 초기 속도는 0이다.

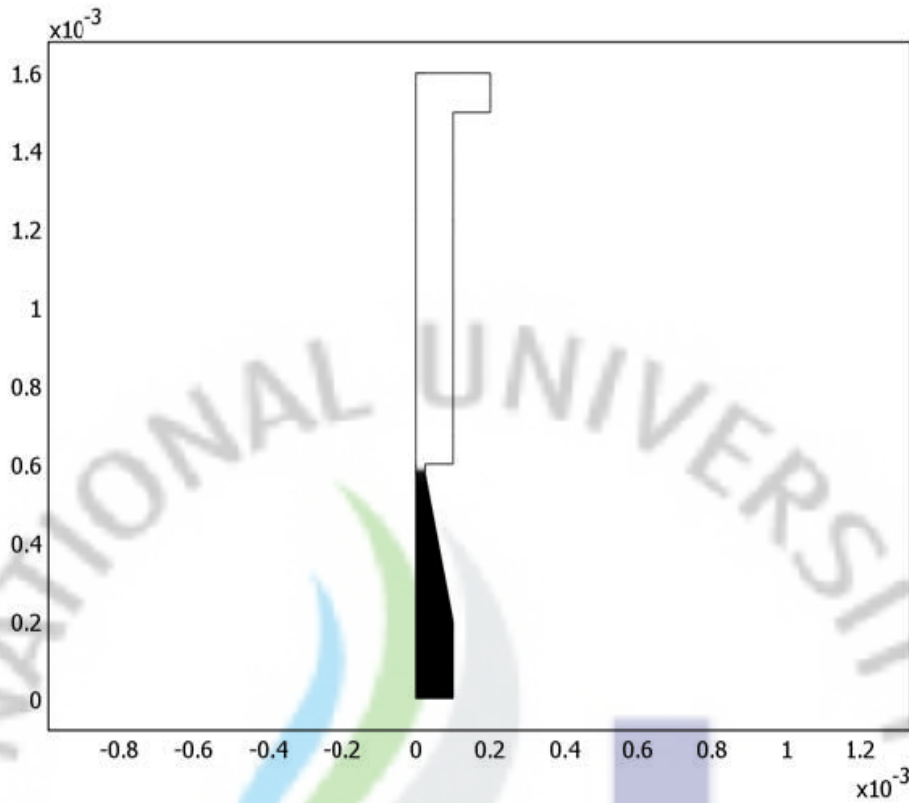


그림 35.  $t = 0$ , 잉크와 공기의 분포  $v=0$

### 3) 경계조건

입구 속도는 0에서 포물선 모양의 프로파일(Profile)을 가지고  $z$ -방향으로의 첫  $2\mu s$  동안 입구 속도는

$$v(r) = 5 \left( \frac{r+1 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} \right) \left( 1 - \frac{r+1 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}} \right) \text{ 이다.}$$

$r$ - 방향의 속도인  $u$ 에 대한 Navier 슬립(Slip) 조건은 다음과 같다.

$$u = -\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \text{ 여기서 } \lambda \text{는 슬립 길이이며, 메쉬 사이즈와 같은 차수로 정해진 다.}$$

### 4) 해석결과

그림 36.에는 시간에 따른 잉크 표면과 속도 필드를 나타내었다. 액적은 대략  $160 \mu s$  이 후 목표에 도달하였으며, 그림 37.에 시간에 따른 액적의 토출

시뮬레이션을 나타내고 있다.

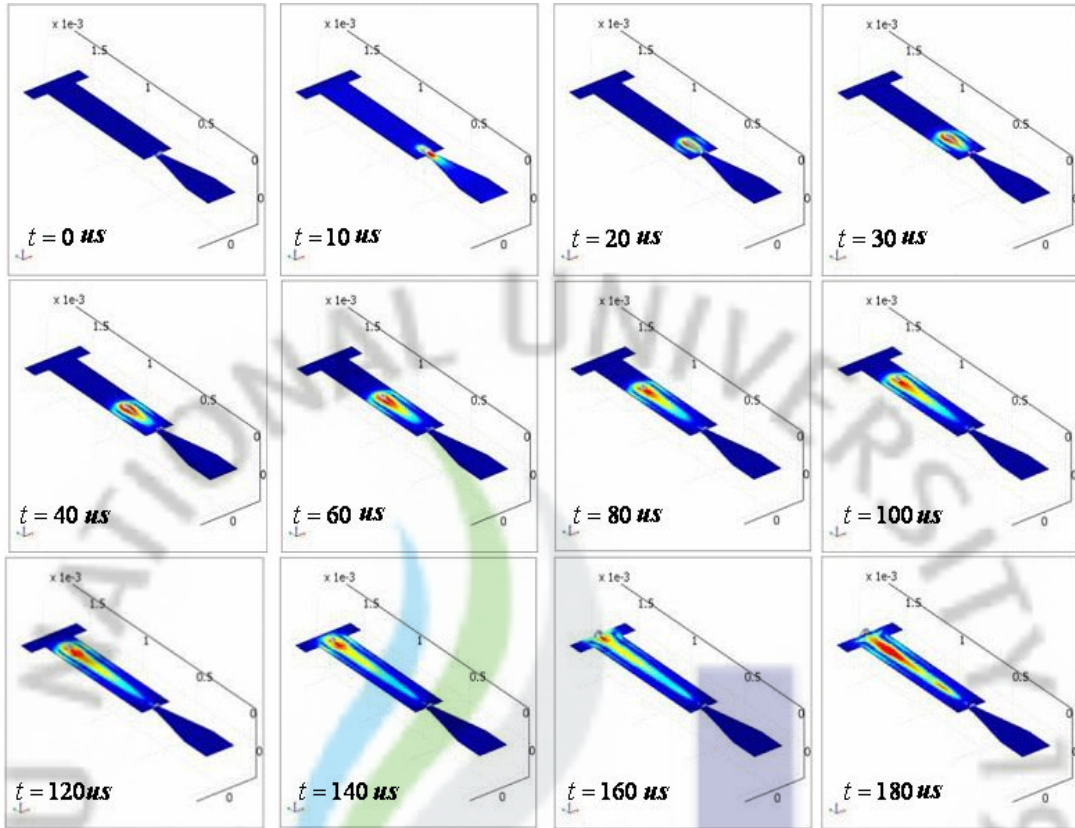


그림 36. 액적의 시간에 따른 속도 분포

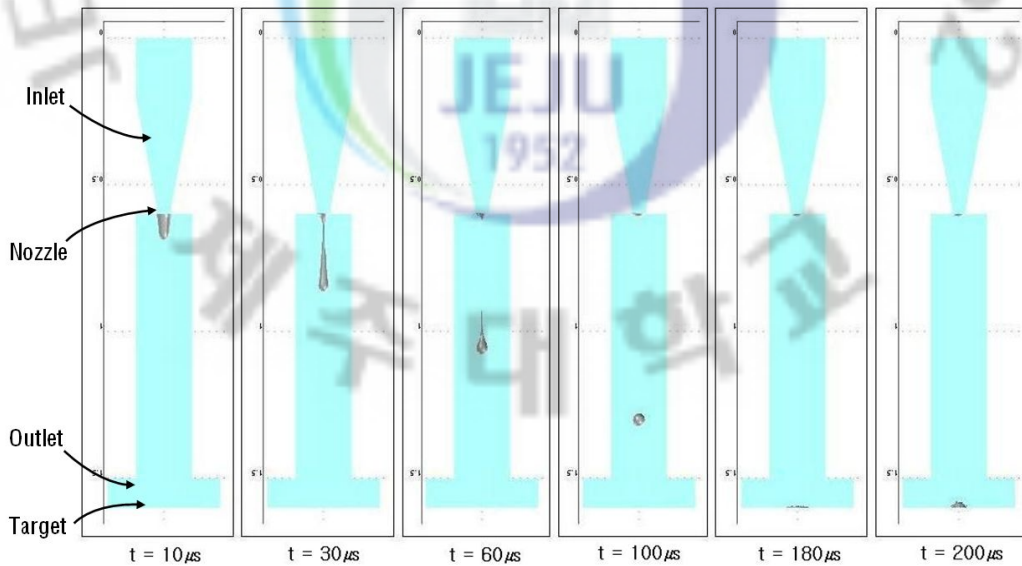


그림 38. 액적 토출 시뮬레이션

#### 4-5. 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템 개발

##### 4-5-1. 고전압 발생장치와 제어장치

기존의 PCB 기판에서 구리배선의 두께가  $10\mu\text{m}$ , PDP 전극배선의 두께가  $6\sim 7\mu\text{m}$ 인데 반해, 기존의 잉크젯으로 패턴을 행할 경우 두께가  $1\mu\text{m}$  내외여서, 잉크젯을 통한 PCB, PDP 전극배선의 제작은 많은 어려움을 겪어 왔다.

정전기력 잉크젯 프린트 헤드는 기존의 잉크젯 프린트 헤드와는 달리 잉크에 주입된 전하에 의해 유발되는 정전기적 상호인력을 바탕으로 기판상에 패턴을 행하는 장치이다. 또는, 잉크 내에 정전기 반발력을 이용하여 분산되어있는 입자들과 동일한 전하를 주입함과 동시에 기판 상에 반대 전극을 설치하여, 이젝터와 기판상에 형성된 고전압장에 의해 유도된 잉크 내 분산 미립자들에 의해 기판 상에 패턴을 전사한다. 그림 38.는 ITI사의 ESIJET™의 FNS drive method에 따른 전압제어를 보여준다.

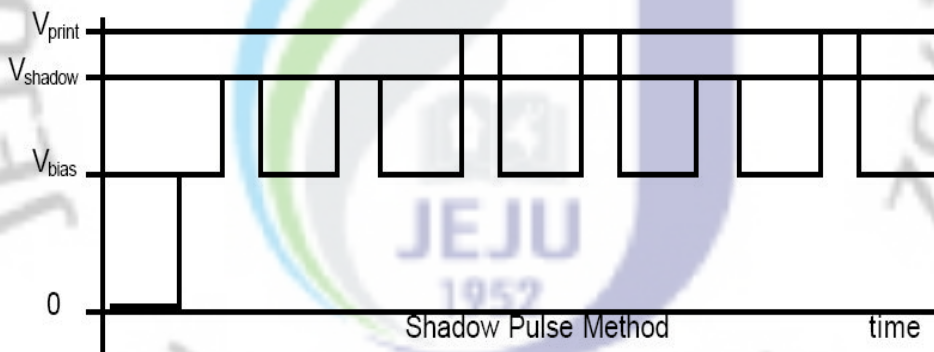


그림 38. ITI사 FNS drive method의 전압파형

잉크의 정전기력 토출을 위해서는 최대 수 kV에 이르는 고전압이 요구된다. 디스플레이 산업계에서 요구하는 월 생산량을 감안했을 때, TFT-LCD 8세대 기판을 기준으로 대략 60초의 tack time이 요구되며, 이에 대응하기 위한 프린팅 속도는 10 kHz 이상이어야 하며, 정밀한 잉크의 토출을 위해서는 안정적인 고전압 발생기술이 필요하다. 또한, 고주파 제어기술과 관련하여서는 고주파에서의 변형이 문제가 되고 있고 안정적인 고주파 제어기술이 필요하다.

고전압 고출력 펄스발생기 제작기술은 플라즈마, 레이저, 방송장비, Radar 설비 등의 핵심기술로써 Thyatron, Crossatron, Ignitron, Gridded Vacuum Tube, Triggered Vacuum Switch, Rotary Spark Gap, SCR, Pulse Power Thyristor 등의 스위칭 소자를 이용해 nano-second~micro-second 단위의 짧은 시간동안에 수십J~수백kJ 단위의 고 에너지 펄스를 생성하고, MPC (Magnetic Pulse Compressor, PT(Pulse Transformer), PFN(Pulse Forming Network) 등을 적용해 여러 형태의 고에너지 펄스를 생성하는 장치이다. 이러한 펄스 발생기술은 스위칭 소자의 control 및 PT, PFN, MPC, 등의 설계·제작과 각각을 load 즉 Resistor, Capacitor, Inductor 및 이들의 복합 성분들과의 적합한 결합(Impedance Matching)이 핵심기술이다. 다음 그림 39.에 고전압 고출력 펄스발생기술의 기본 구조를 보여주고 있다.

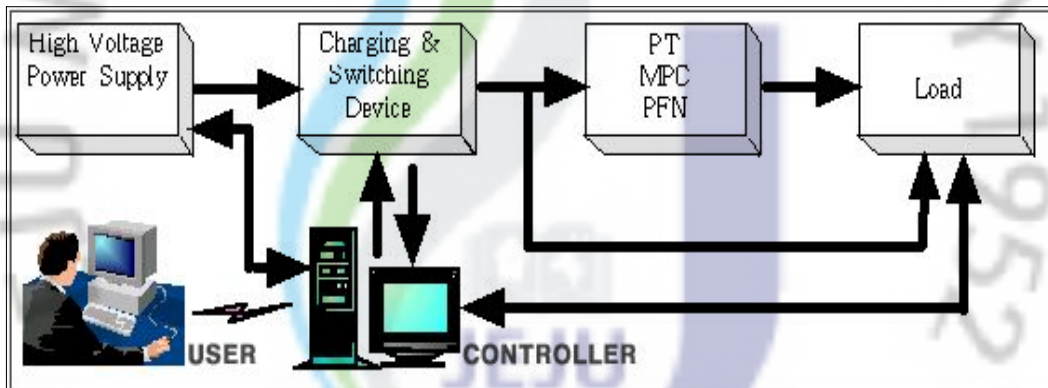
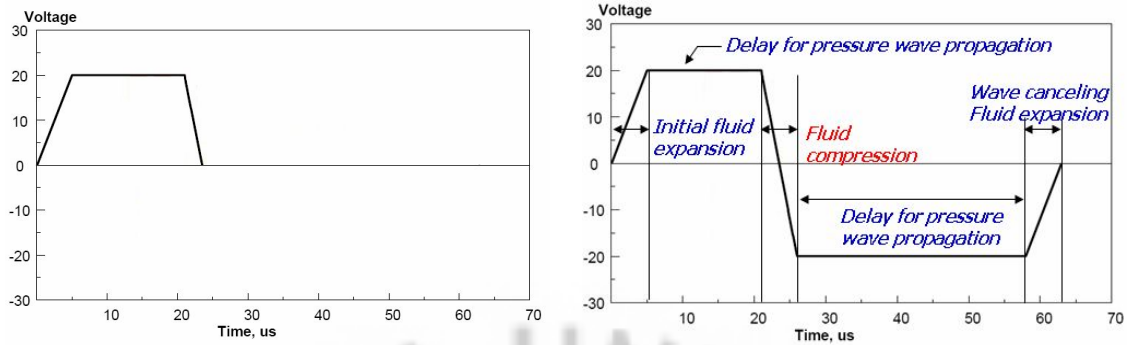


그림 39. 고전압 고출력 펄스발생의 기본 구조

#### 4-5-2. 이젝터간 토출량 편차 교정 장치

잉크젯 헤드의 경우 각 노즐에 분사되는 드랍의 형태가 피에조나 정전기력의 입력 파형 전압에 의존하여 변화가 된다. 드랍 형태의 변화는 이젝터 토출량의 변화를 의미하며 따라서 안정적인 드랍 형태의 유지는 일정한 토출량을 유도하게 된다. 따라서 이젝터 토출량 교정 장치에서는 각 노즐에서 분사되는 드랍의 형태를 일정하고 안정적으로 유지함으로써 페턴의 불량률 없애고 고른 thickness를 가지게 만드는 것을 목표로 하는 것이다.



(a) unipolar 방식의 입력 파형

(b) bipolar 방식의 입력 파형

그림 40. 잉크젯 헤드의 이젝터 입력 전압 형태

일반적인 피에조 잉크젯에서의 이젝터의 입력 전압 형태는 그림 40.에서 보듯이 크게 2가지 형태로 분류된다. (a)와 같은 유니폴라 방식의 입력 파형 형태와 (b)와 같은 바이폴라 방식의 입력 파형이 대표적인 예이다. 유니폴라 방식은 기본적으로 rising time과 duration time, falling time으로 구현되며 각각의 시간을 조절함으로써 드랍의 형태가 변화 되고 이에 따라 토출량이 변화되는 방식을 말한다. 이는 구현이 간단하고 드랍의 분사량을 쉽게 제어 할 수 있다는 장점이 있지만 분사된 드랍 종단의 형태를 제어 할 수 없고 세틀라이트 드랍 등의 주 드랍 외에 추가적으로 발생하는 소수 드랍들에 대해서 대처하기가 용이하지 못한 단점을 가지고 있다.

바이폴라방식은 분사 초기 드랍형태를 제어 할 수 있는 유니폴라 형태를 가짐과 동시에 드랍 종단의 형태를 변화 시킬 수 있도록 네거티브한 파형을 줄 수가 있는 형태로 구현되어 진다. 이는 세틀라이트 드랍등의 불필요한 요소를 제거 할 수 있는 장점을 가진 반면 입력 파형에 대한 변수가 증가하여 쉽게 접근이 힘든 단점을 가지고 있다.

정전기력을 이용한 잉크젯의 DoD 방식에서도 해결하여야 할 문제로써 이젝터의 토출량을 제어하기 위하여 싱글노즐의 잉크젯 헤드를 부착하여 카메라를 통하여 노즐에서 분사되는 드랍의 형태를 파악하고 이를 이젝터 입력 고전압에 반영하여 항상 일정한 형태와 양이 분사 될 수 있는 AWG 시스템을 연구하였다.



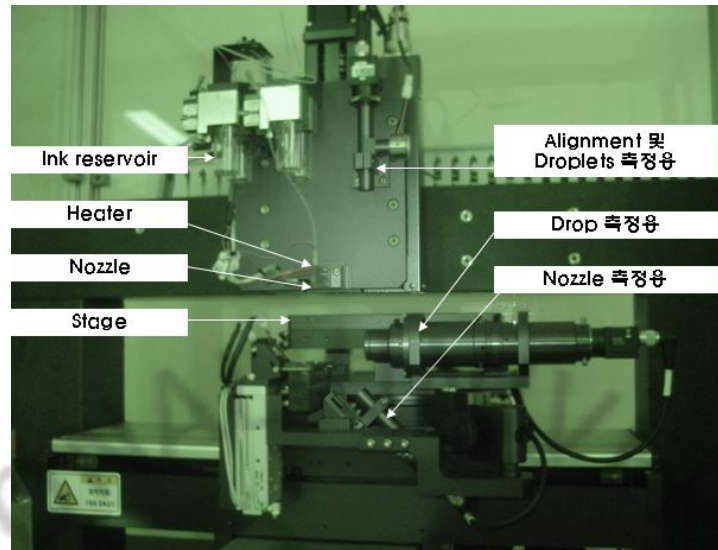


그림 41. AWG 시스템

잉크젯 싱글 노즐 AWG 시스템은 노즐 끝단에서 분사되는 드랍의 형태를 파악하고 사용자가 원하는 드랍의 형태나 량을 적절히 변화 시킬수 있는 시스템이다. 이젝터 토출량 교정 장치는 AWG 시스템 기반 하에서 각각의 노즐의 드랍의 형태를 파악하고 일정한 형태와 양이 유지 될 수 있도록 각 노즐에 전파되는 입력 전압을 제어함을 목표로 하고 있다.

AWG 시스템의 유저 인터페이스는 기본적으로 노즐 끝단을 디스플레이하고 드랍의 형태를 실시간으로 볼 수 있는 창을 가지고 있으며 노즐 입력 전압을 유니폴라나 바이폴라형태로 실시간으로 변화 시켜 드랍의 형태와 양을 제어 할 수 있도록 구성 되어있다.

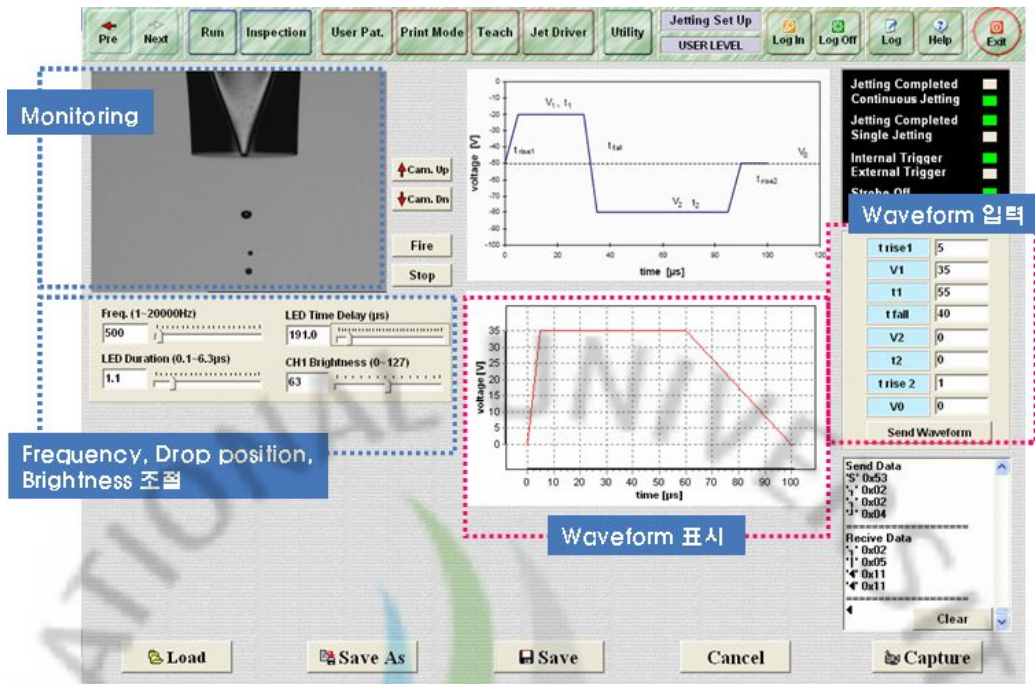


그림 42. AWG 시스템의 유저 인터페이스

본 연구에서는 잉크젯 노즐에서의 입력 파형에 따른 이젝터 토출량 제어 시스템인 AWG 시스템을 개발하고 연구하였으며, 유니폴라와 바이폴라의 입력 방식에 따른 차이점을 분석 하고, 정전기력 잉크젯 기술 역시 각 노즐에서 이와 같은 모니터링 후 입력파형 조절을 통한 토출량 교정 장치를 채택 할 예정이며 향후 높은 연구 결과의 성과가 기대되는 부분이다.

#### 4-5-3. 패턴 드라이버

##### 1) 패턴 드라이버의 개념

패턴 드라이버는 잉크젯 헤드에서 분사되는 잉크 혹은 다양한 재료를 일정한 형상으로 패터닝하는 장치이며, 이는 비트맵이나 Raw파일과 같은 임의의 형상 정보 데이터로부터 프린팅 시스템에 해당 데이터를 전달하는 역할을 수행한다. 정전기력을 이용한 잉크젯 헤드의 경우도 이와 마찬가지로 다양한 형상 정보 데이터로부터 각각의 노즐에 대해 분사 정보 데이터를 필요로 한다. 헤드는 X, Y축의 평면상에서 각 축의 이동정보에 따라 비트맵파일과 동기화된 데이터 정보 시그널을 생성하고 생성된 시그널을 헤드에 전달하여 줌으로 해

서 사용자가 원하는 형상으로 원하는 재료의 분사가 가능하다.

패턴 드라이버는 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 데이터를 생성하는 부분이며 이는 임의의 비트맵 형상으로부터 각 픽셀의 데이터를 추출하는 과정이다. 두 번째는 데이터를 처리하는 부분이다. 이는 추출된 각 픽셀의 데이터를 각각의 분사 방식에 맞게 혹은 노즐의 개수에 맞게 데이터를 분할하고 나누는 역할을 수행하게 된다. 세 번째는 처리된 데이터를 헤드의 움직임에 맞게 동기화 되어 전송하는 부분이다. 헤드는 기본적으로 헤드가 이동하거나 스테이지가 이동하는 방법으로 이동하게 된다. 따라서 각각의 방법에 대해 현재의 헤드 위치를 파악하고 파악된 헤드의 위치에 맵핑되는 데이터를 전송함으로써 분사되는 재료의 패턴링이 가능해진다. 그 개념을 다음 그림 43.에 나타내었다.

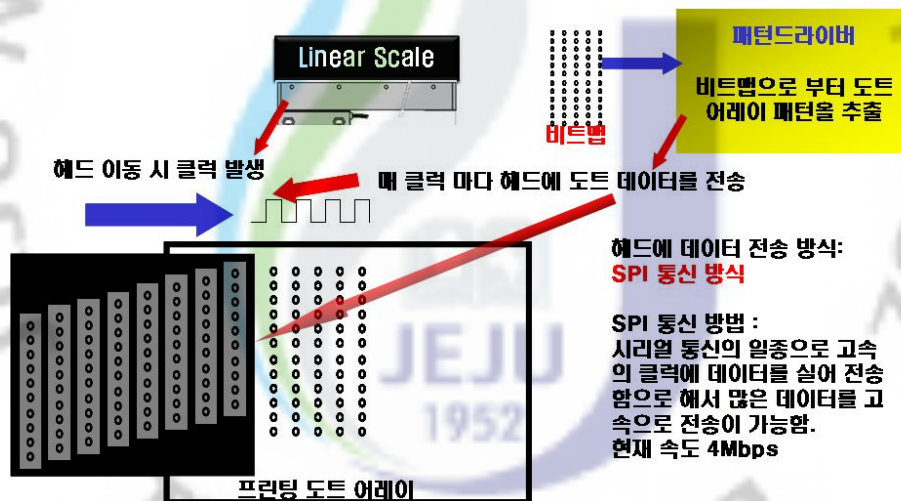


그림 43. SPI 통신 프로토콜을 이용한 패턴드라이버 개념도

## 2) 패턴 드라이버 제작

싱글헤드 패턴드라이버는 싱글 헤드에 대해 비트맵을 패턴링 할 수 있도록 설계 제작 되었으며, 실제 프린팅과정에서 패턴링 결과를 검증하기에는 많은 시간이 소요 되므로 패턴드라이버 제작 시에는 LCD를 이용한 시뮬레이션 보드를 제작하여 실제 패턴링 결과와 동일한 효과를 가지도록 구현 하도록 하였다. 헤드가 이동시 전송되는 데이터를 검증하기 위하여 소형 모터 엔코더를

연결하여 동작 테스트를 수행하였다.

멀티헤드 패턴드라이버의 경우 프린팅 헤드가 2개이상의 멀티헤드로 구성할 것이며, 임의의 비트맵을 헤드 개수로 나누어 패터닝 할 수 있도록 제작되었다. 다음 그림 44.는 기본적인 2헤드의 멀티헤드 패터닝 기법과 싱글헤드 패터닝 기법을 비교한 것이다.

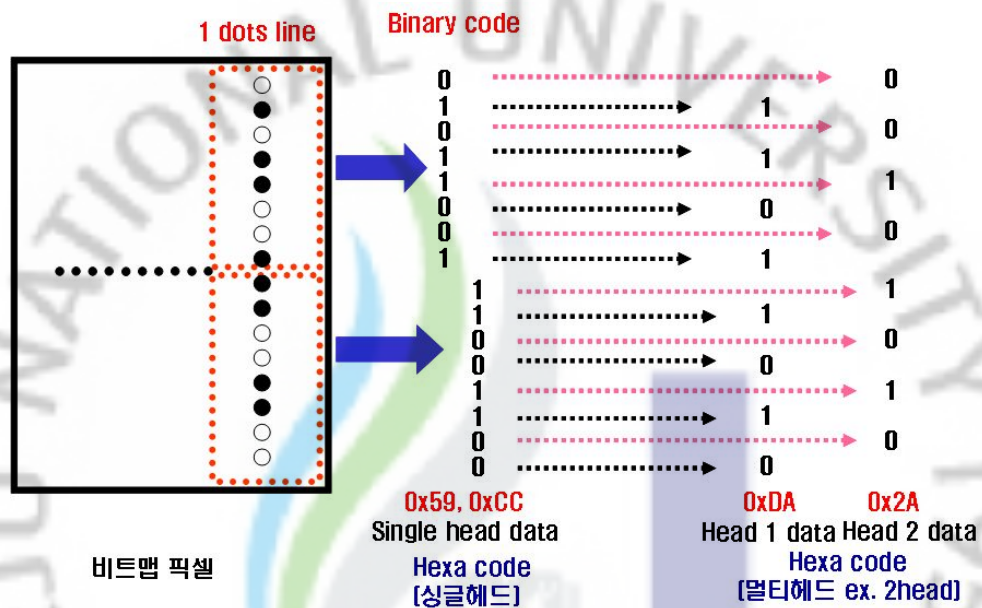


그림 44. 멀티 헤드 패터닝 기법

#### 4-5-4. 잉크공급/순환/농도 검출 시스템

메인 잉크 공급 시스템은 2가지 이상의 여러 가지의 잉크를 공급하는 역할을 수행한다. 이는 각각의 잉크로부터 메인 잉크 공급 챔버내로 유입되는 양을 밸브를 이용하여 조절하게 된다. 이는 검출된 현재 농도로부터 각각의 용액이 토출되어야 할 양을 판단하고 이를 각각의 용액마다 가변적으로 조절이 가능하도록 설계 하였다. 또한 레벨 센서를 이용하여 메인 잉크 내에 존재하는 잉크의 양을 측정하고 PC에서 일정 레벨을 유지하도록 각각의 용액들의 밸브를 제어한다.

잉크 순환 시스템의 경우 챔버내에 존재하는 잉크를 일정시간 혹은 일정 간격으로 지속적으로 순환 시켜주어야 한다. 인쇄전자를 위한 잉크젯 공정의 특

정상 다양한 용액들의 조합으로 메인 잉크가 생성되기 때문에 순환 시스템이 없을 경우 각 용액의 밀도에 따라 층분리 현상이 발생 할 수 있으므로 현재 용액으로부터 유입되는 양, 메인 잉크 챔버내에 존재하는 잉크의 양에 따라 모터를 회전 시켜 프로펠러를 구동함으로써 균일하게 용액이 섞일 수 있도록 설계 되어야 한다. 이는 PC로부터 현재의 농도나 메인 잉크의 양을 측정하여 프로펠러의 속도를 가변 시킬 수 있도록 구현 되어야하며 다음 그림 45.에 그 개념도를 도시하였다.

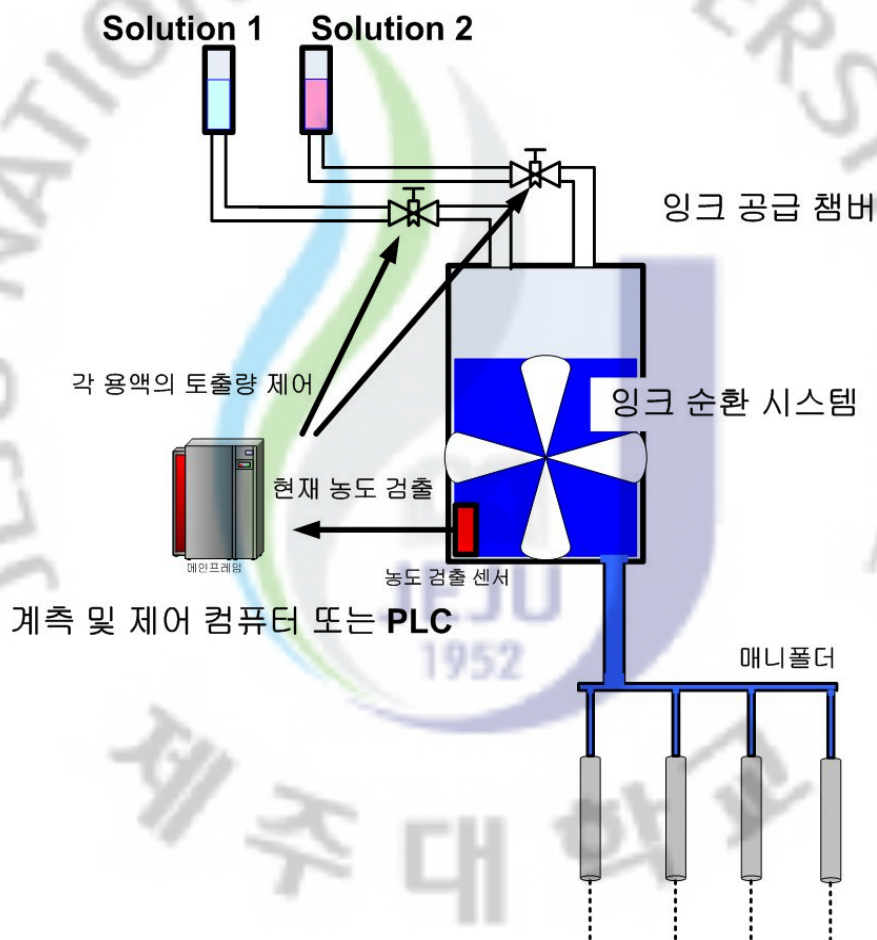


그림 45. 잉크 공급 및 순환 시스템과 농도 검출 및 유지 시스템

잉크 농도 검출 센서는 농도 센서를 잉크 챔버 하단에 부착하고 일정 농도를 유지 할 수 있도록 PC에 현재 농도 정보를 전송하고 이를 사용자에게 디

스플레이 시킬 수 있는 기능을 가지고 있어야 한다. 앞선 메인 잉크 공급 시스템과 잉크 순환 시스템은 농도 센서의 검출 정보에 따라 민감하게 반응하여야 하기 때문에 2개 이상의 농도 검출 센서를 장착하여 오류가 발생하지 않도록 구현되어야 한다. 또한 센서는 공급되는 잉크의 종류에 따라 교체 장착이 가능하도록 착탈식으로 설계되어야 한다. 액상의 잉크가 아닌 잉크에 분산되어있는 전하를 띤 입자들을 정전기력 잉크젯을 통해 토출하고자 하는 경우, 프린팅이 진행될수록 잉크에 함유되어 있는 입자들의 농도가 감소하는 문제점이 있다. 이에 대처하기 위해서는 잉크의 농도를 모니터링 할 수 있는 센서와, 농도 감소 시 입자들을 공급해줄 수 있는 정밀 잉크 공급시스템에 대한 연구가 요구된다. 전하를 띤 입자들이 이젝터 끝으로부터 전기장에 의해 토출될 경우, 이젝터 부위의 잉크 농도는 감소하게 된다. 따라서 전하를 띤 입자들을 이젝터 끝으로 이송할 필요성이 있는데, 일반적인 syringe pump를 이용할 경우, pressure fluctuation이 발생할 수 있으며 이로 인해 잉크의 토출량에 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 압력편차를 최소화할 수 있는 잉크 순환시스템을 개발하여야 한다.

#### 4-5-6. 패턴 불량 검사 및 수정장치

잉크젯 프린팅 기법을 이용한 패턴링 장치에서는 가장 큰 문제점 중의 하나가 노즐의 막힘 혹은 일정하지 못한 분사량에 의해 발생하는 불량 패턴이라고 볼 수 있다. 이는 과거부터 현재까지 잉크젯 공정이 산업 현장에 확산되어 쓰여 질 수 없었던 가장 큰 단점이며 현재 외국 장비를 비롯해 국내에서도 이러한 문제점을 해결하고자 다양한 방법으로 접근을 시도하고 있고 장치를 개발하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 패턴의 불량을 헤드에 입력된 패턴링 이미지와 실제 패턴링 되어 나온 패턴링 이미지를 비교하여 그 오차를 판단하여 오차가 클 경우 자동적으로 헤드를 크리닝하고 불량으로 판단된 패턴을 수정 보완하는 장치를 설계하고자 한다

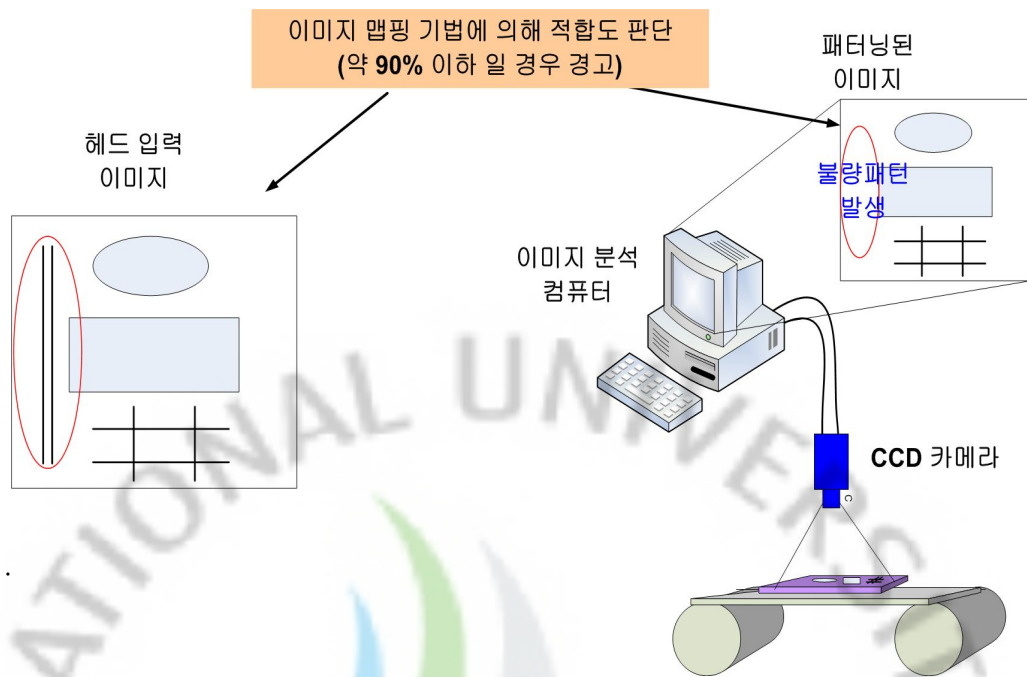


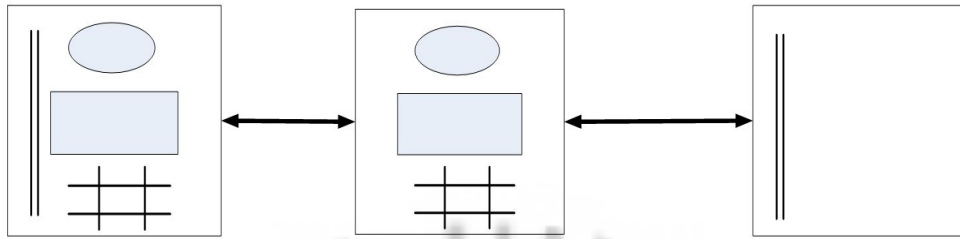
그림 46. 불량 패턴 검사 장치 개념

그림 46.은 불량 패턴을 검사하는 장치의 개념도이다. 패터닝된 결과를 CCD나 고정밀 카메라를 이용하여 이미지 영상을 추출하고 이를 처음 입력된 이미지와 비교를 하여 불량 패턴을 추출하는 것이다.

불량 패턴의 경우 이미지 매핑 기법에 의해 불량 패터닝된 부분과 그 부분의 데이터를 추출 할 수 있다. 이미지 매핑 기법에 의해 소실된 부분의 데이터를 추출하는 기법을 나타낸다. 헤드 입력 이미지와 카메라로부터 추출된 패터닝 된 이미지를 각 픽셀 정보 데이터를 비교하여 적합도를 판정하고 적합도가 일정 이하일 경우(사용자가 얼마나 우수한 품질을 원하느냐, 적용 제품군에 따라 적합한 한계 레벨은 달라질 수 있다.) 경고 메시지 후 헤드 청소를 실시한다. 또한 두 이미지의 픽셀 데이터를 XOR 시켜 소실된 패턴 이미지를 검출 하여 이를 수정 이미지로 활용 한다.

픽셀 정보 데이터 비교를 통한  
적합도 판정

두 이미지의 픽셀데이터를  
XOR하여 소실된 이미지 추출



헤드 입력 이미지

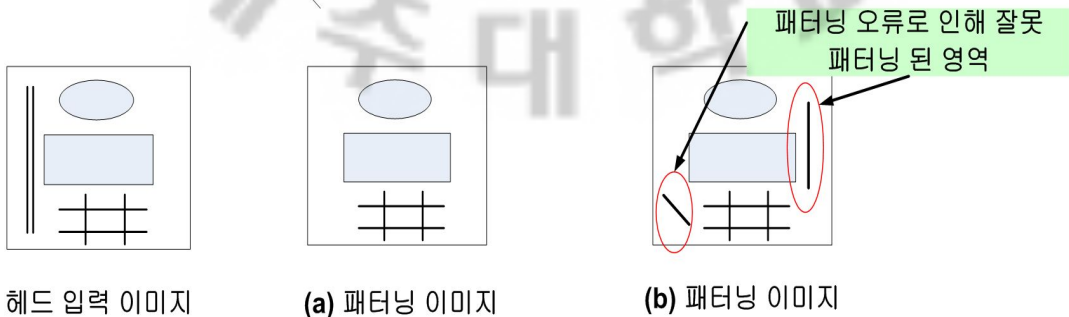
패터닝 이미지

소실된 패턴

그림 47. 불량 패턴에 의한 소실된 혹은 잘못된 패턴 이미지 추출 원리

패턴 불량 검사 장치를 이용하여 추출된 불량 패턴은 크게 두 가지의 경우로 나눌 수 있다. 첫째는 단순히 노즐 막힘이나 일시적인 드랍 형태의 불량으로 인해 헤드에 입력된 이미지에서 소실된 패턴만 나타났을 경우이다. 이는 패턴 불량 검사 장치를 통해 소실된 패턴의 이미지를 이용하여 소실된 패턴 영역만 재 패터닝 하여 복구 할 수가 있다. 두 번째는 소실된 패턴뿐만 아니라 원 패터닝 이미지와는 다른 패터닝이 되었을 경우이다. 이 경우는 소실된 패터닝 이미지와 오류로 패터닝된 이미지 두가지를 필요로 하며 오류로 패터닝 된 영역을 레이저나 화학적 제거제, 반도체 공정의 머신닝 제거 공정을 통해 제거를 하고 복구 작업을 수행하여야 할 것이다.

패턴 불량은 다음 그림 48.와 같이 2가지 경우가 나타날 수 있으며, (a)는 단순히 패턴의 소실된 영역만 나타나는 경우이고 (b)는 오류로 패터닝된 부분을 포함 할 경우이다.



헤드 입력 이미지

(a) 패터닝 이미지

(b) 패터닝 이미지

그림 48. 불량 패턴의 2가지 경우



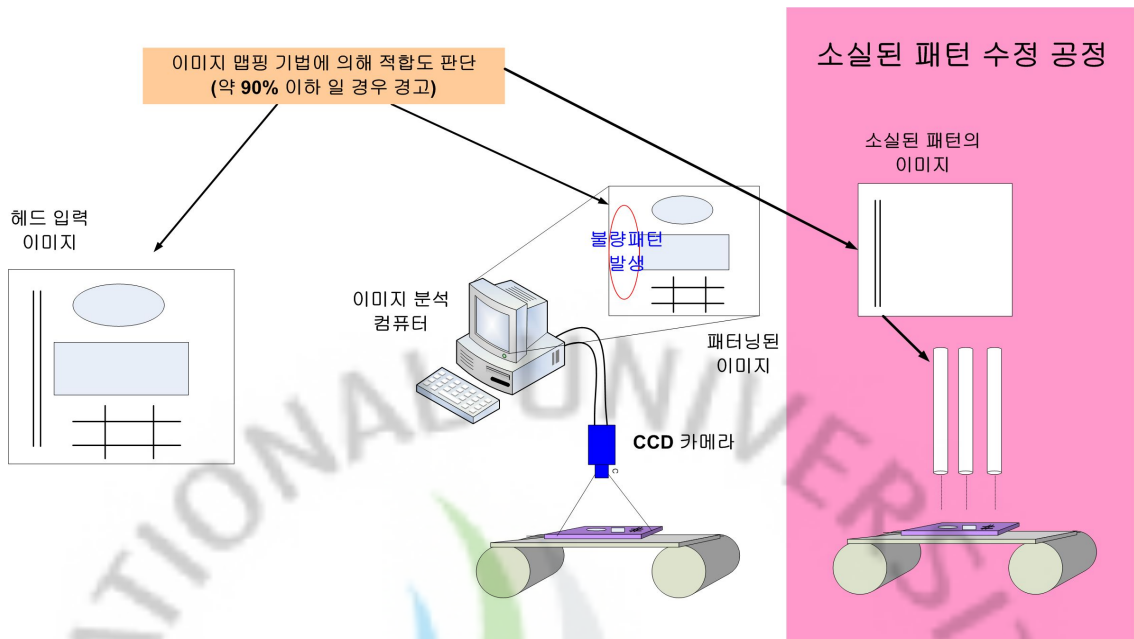


그림 49. 소실된 패턴 수정 공정 개념도

아래 그림 50.와 같이 오류 패턴 제거 공정을 통하여 오류 패턴을 제거하고 앞선 소실된 패턴 수정 공정(그림 49.)을 수행하여 최종적으로 오류를 제거하고 패턴을 복구하는 작업이 수행되어야 한다.

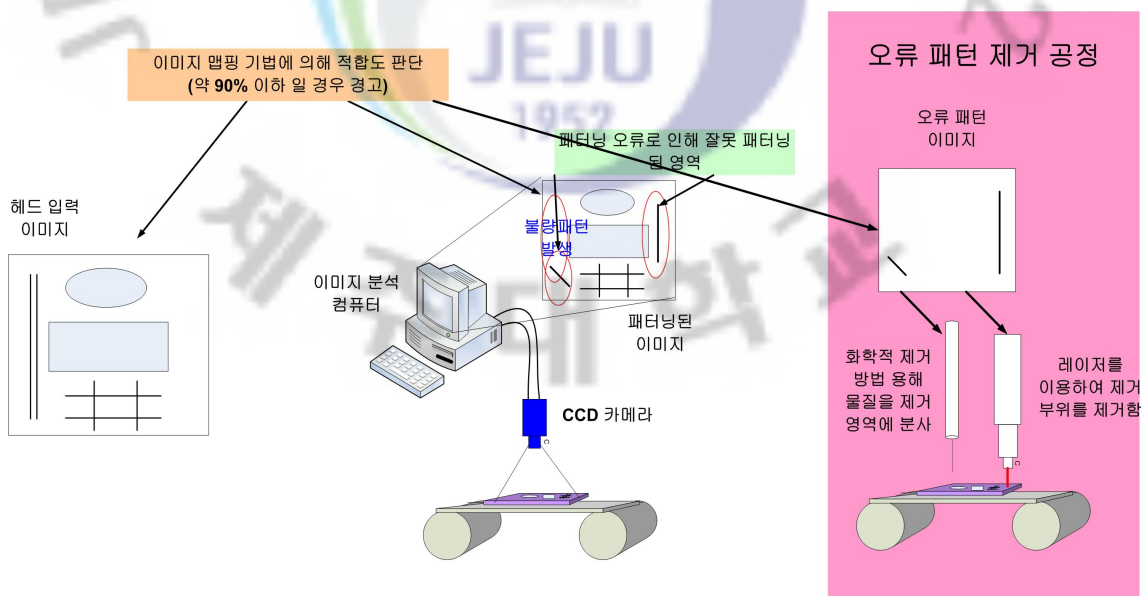


그림 50. 오류 패턴 제거 공정 개념도

본 연구에서는 불량 패턴을 가능한 줄여 정전기력 기반의 잉크젯 공정 뿐만 아니라 타 잉크젯 기술 분야에도 적용 될 수 있는 불량 패턴 수정 장치를 설계 제작할 목적으로 연구 하였다. 현재 오류 패턴 제거 방법으로는 화학적 용해제를 이용하는 방법과 레이저를 이용하여 제거 하는 방법을 제안하였는데 이는 패턴잉 용액의 특성에 따라 구분되어져 사용 될 것이다.



#### 4-6. 정전기력 기반의 프린팅 테스트 실험장비 설계

위의 정전기력 잉크젯에 대한 연구 조사 및 해석 결과 등을 바탕으로 정전기력 기반의 잉크젯 토출 테스트 장치를 설계 제작 하였고, 그림 51~54.에 그 설계도와 구성 장치의 사진을 나타내고 표 5.에 그 구성품을 기재하였다.

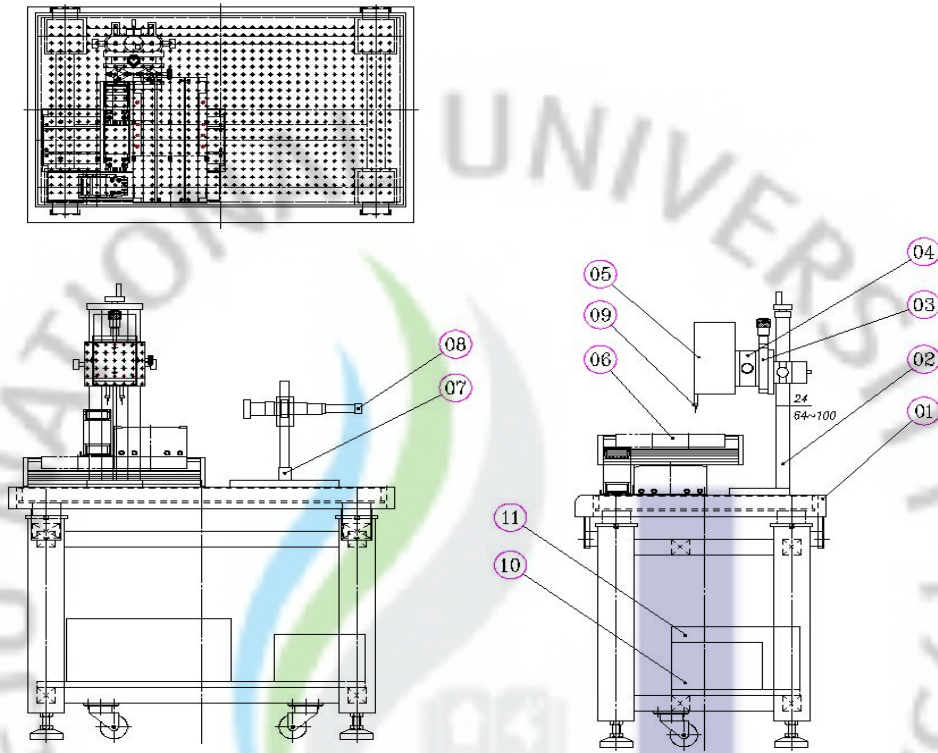


그림 51. 정전기력 잉크젯 실험장치 설계도면

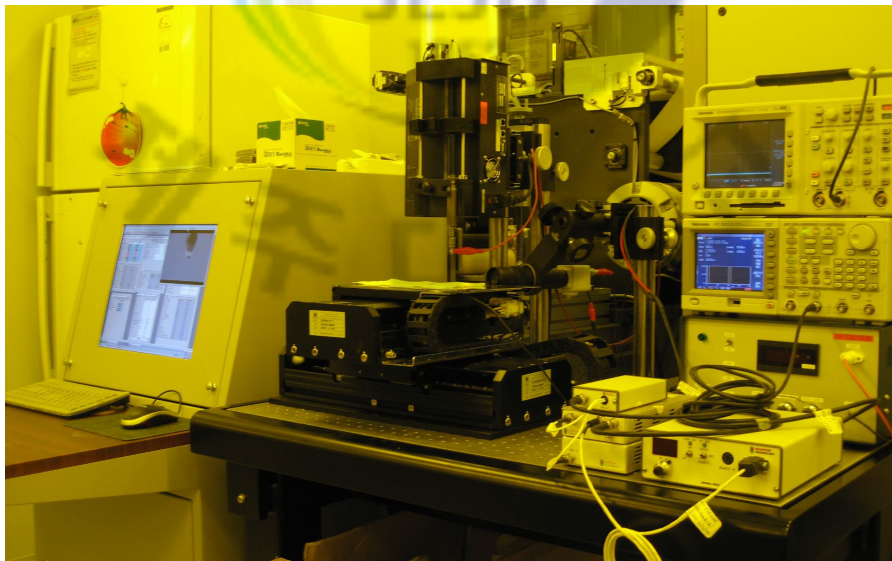


그림 52. 정전기력 기반의 잉크젯 실험장치 제작

표 5. 정전기력 잉크젯 장비 구성

번호	모델명	비고
1	HYBRID OPTICAL TABLE SYSTEM	방진 테이블
2		노즐부 높낮이 조절(큰폭)
3	Laboratory Jack, Dual Stable Rod, LJ-27	노즐부 높낮이 조절(u단위)
4		노즐부 전·후 조절
5	PHD 22/2000 Syringe Pμmp	잉크공급량 조절 펌프
6	SPSD200SxSD200-0201	2축(X, Y)구동 스테이지
7	모니터용 카메라 지지대	
8	XDC-10A	분사 모니터용 카메라
9	Nozzle : Metal Hub Needle(내경 110,160,210μm)	
10	DC HV CR811PN, Quantμm, Starfire 10DM	고전압발생장치, High Voltage Pulse Driver
11	컨트롤 PC	

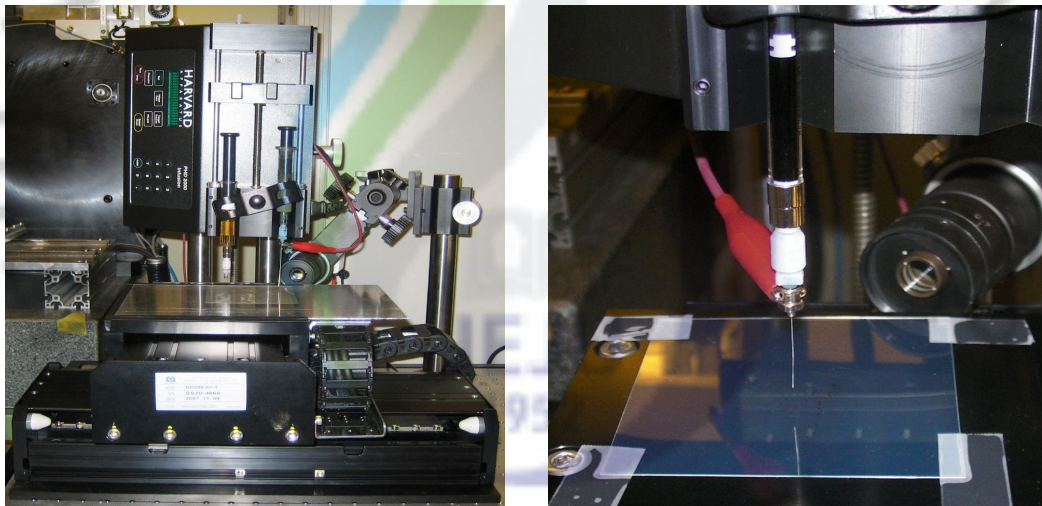


그림 53. XY Stage 구동부와 노즐부

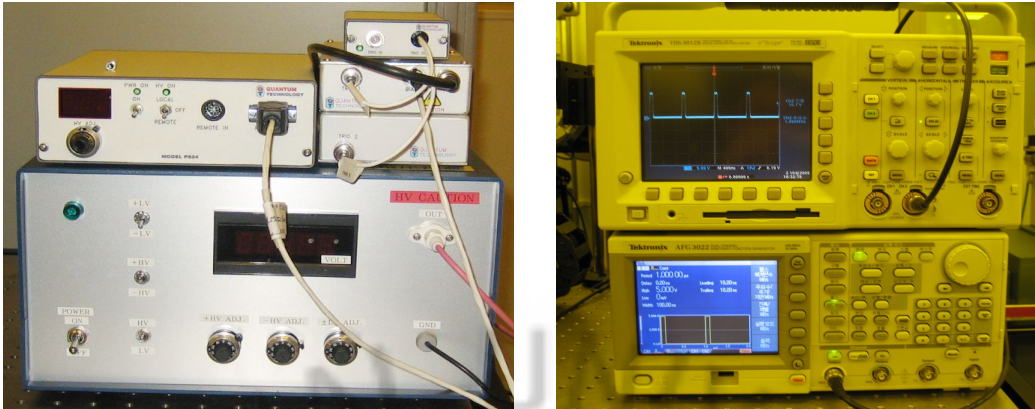


그림 54. High Voltage Power Supply & High Voltage Pulser

그리고 정전기력 기반의 잉크젯 장비의 토출량 시험 등 여러 실험을 통하여 안정적으로 정전기력 기반의 잉크젯 헤드를 개발 제작하였을 때 장착하기 위해 롤투롤을 이용한 웹 이송으로 기관 공급을 목적으로 그림 55.에서 처럼 R2R+정전기력 잉크젯 장비를 설계하였고 설계에 따라서 제작한 장비를 그림 56.에 나타내었다.

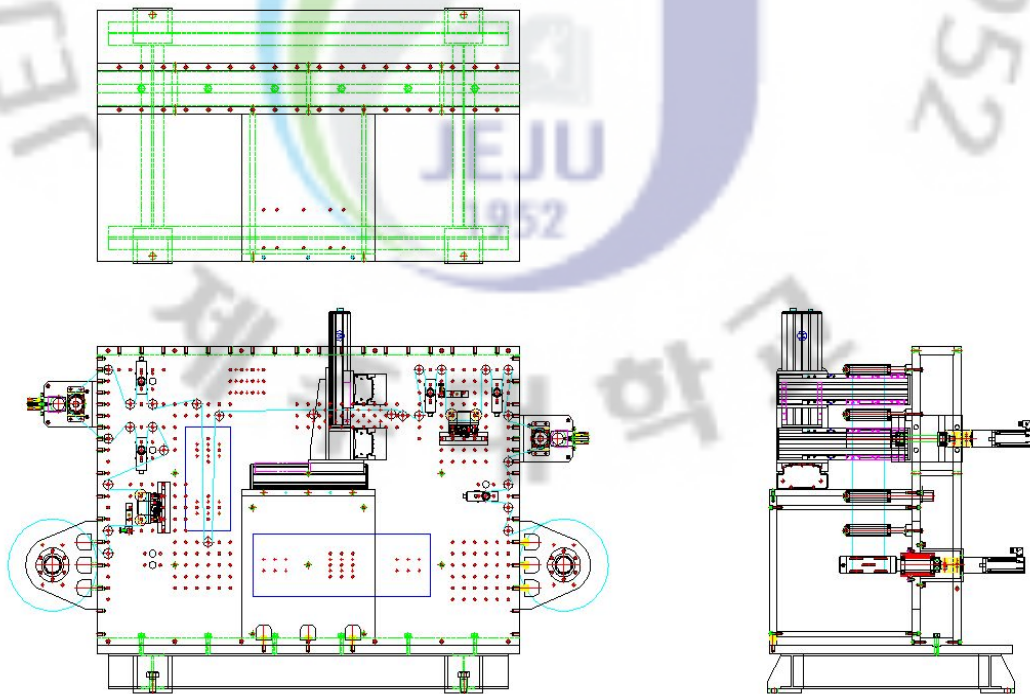


그림 55. Roll-to-Roll + 정전기력 잉크젯 장비 설계

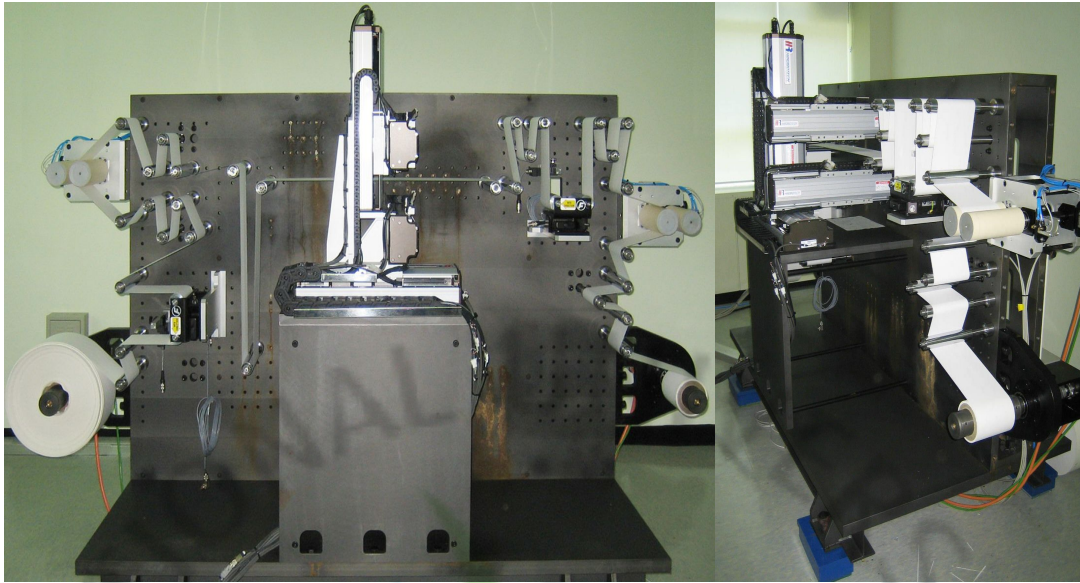


그림 56. Roll-to-Roll + 정전기력 잉크젯 제작



## 5. 정전기력 기반의 잉크젯 실험 및 고찰

### 5-1. 전도성 잉크 토출 실험

#### 1) 라인 패터닝 실험

정전기력 기반의 잉크젯 시스템 개발을 위하여 제작한 실험 장치를 이용하여 전도성 잉크에 대한 분사 실험을 수행하였다. 이때 사용되어진 잉크는 상용화 되어 판매중인 시마나노텍(Cima nanotech)의 잉크를 사용하였고, 다음 그림 57은 제작한 실험장비의 모니터링 사진이다.



그림 57. 스테이지 구동 제어와 노즐 모니터링

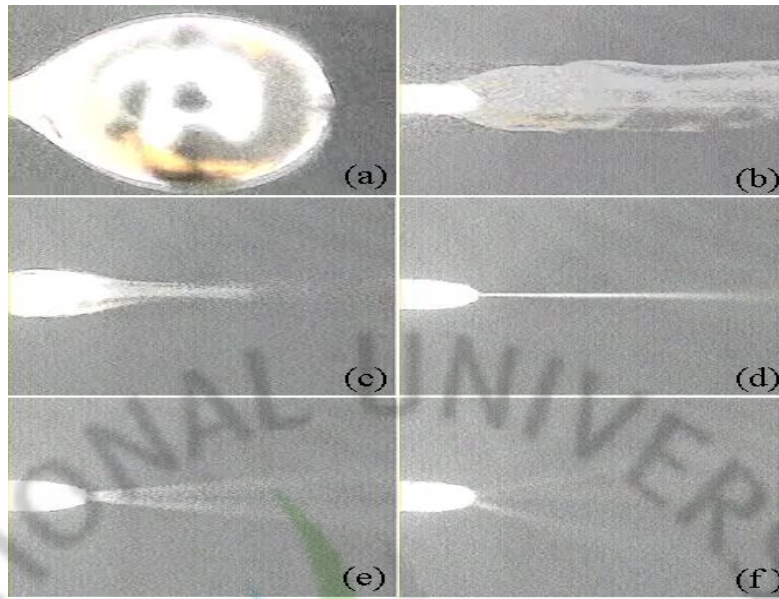


그림 58. 인가전압에 따른 제팅 형상

위 그림 58.은 제작한 장비로 잉크 토출 실험하였을 때 노즐 끝단에서 나타나는 인가전압별로의 제팅 형상이고, 아래 그림 59.는 인가전압 별로 패턴 형상을 보여준다.

2.0 kV, 70mm/s, 0.01ml/min, 3mm

2.0 kV, 50mm/s, 0.01ml/min, 3mm

2.0 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 3mm

2.2 kV, 100mm/s, 0.01ml/min, 5mm

2.4 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 5mm

2.2 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 5mm

2.0 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 5mm

1.9 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 5mm

1.8 kV, 10mm/s, 0.01ml/min, 5mm

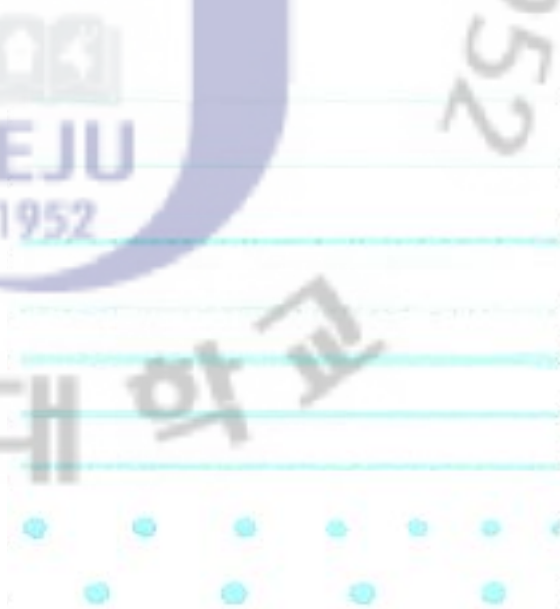


그림 59. 인가전압에 따른 라인 패턴 형상



수차례 반복된 패터닝 실험에서 인가전압, 노즐과 substrate 의 이격거리, 스테이지 이송속도 등 여러 가지 분사 조건에 의해 제팅 형상이 달라지는 것을 관찰할 수 있었고, 점도가 일정한 잉크재료를 제팅 할 경우 특히 인가전압과 substrate와의 이격거리, 두 요소가 제팅 형상에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.



그림 60. 정전기력 잉크젯을 이용한 라인 패턴

표 6. 실험 인가 조건(실버나노잉크)

Applied Voltage(kV)	Nozzle-Substrate distance(mm)	Stage Velocity (mm/s)	Applied ink Flow rate (ul/min)
1.814	2	200	5

그림 61.은 위 표 6.의 조건으로 제팅한 실험 결과로 직경이  $160\mu\text{m}$ 인 노즐로 선폭이  $30\mu\text{m}$ 인 라인패턴을 형성할 수 있었다.

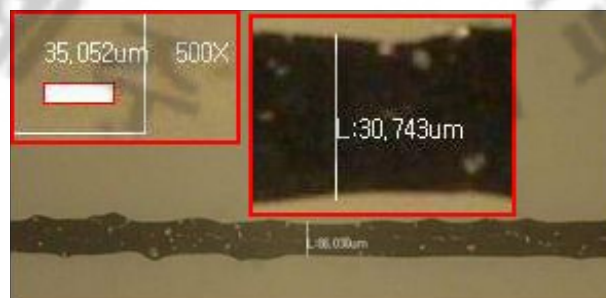


그림 61. 정전기력 잉크젯 실험 장치를 통한 선폭  $30\mu\text{m}$  패턴

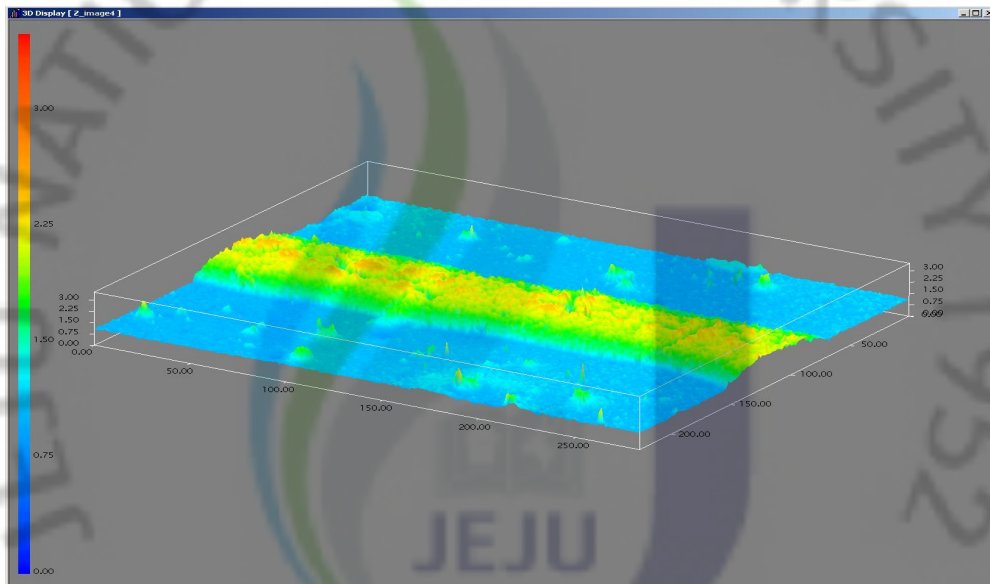
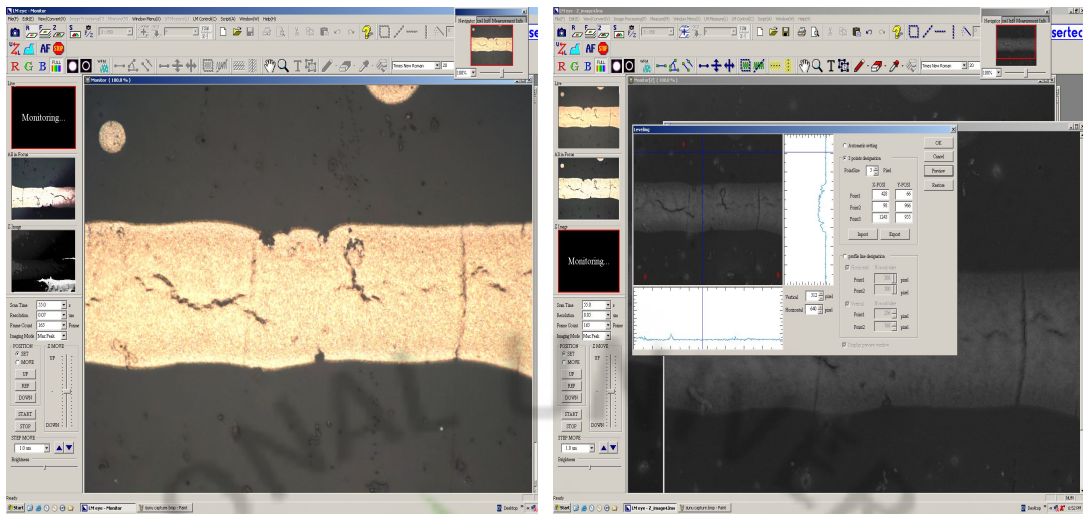


그림 62. Line pattern 3D 두께 측정

위의 그림 62.는 컨포컬 레이저 마이크로 스코프 장비로 측정한 결과 값으로 최소 미세선폭  $30\mu\text{m}$ 인 라인패턴의 두께를 측정하였고, 그 두께가 약  $10\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

## 2) DoD 패턴 실험

라인패턴에 이어 인가 고전압에 펄스를 주어 다음과 같은 DOD 패턴을 구현할 수 있었다. 다음 그림 63.은 DoD 패턴 당시 노즐 끝단 제팅 형상이고, 그림 64.는 고전압에 펄스의 디지털 파형을 나타내었다.



그림 63. DoD 제팅 형상

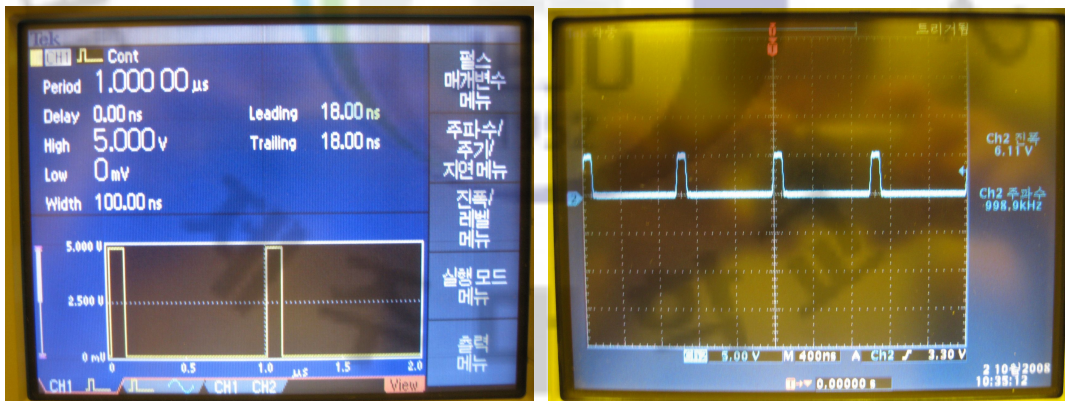


그림 64. DoD 제팅을 위한 실제 인가 전압 펄스 파형

Cone-jet 의 지속적인 패터닝이 아닌 DoD 패터닝을 위하여 인가전압에 1~2ns 의 rising time과 falling time, 그리고 주파수 간격을 조정하여 제작된 실험 장치

에 수십번의 테스트를 수행하여 최적의 조건을 구하여 DoD 패터닝을 구현하였다. 이때 인가된 고전압은 1.5kV~1.9kV의 펄스를 주었으며, 주파수는 1kHz이다.

다음 그림 65.는 위의 조건에서 실제 패터닝 된 패턴으로 dot 사이즈는 직경 70  $\mu\text{m}$ , 높이 약 10 $\mu\text{m}$ 으로 측정 되었다. 표면 갈라짐 현상은 후처리 과정에서 희석되었던 용제가 증발되며 형성되어진 것으로 후 처리상 유의하여야 할 것이다.

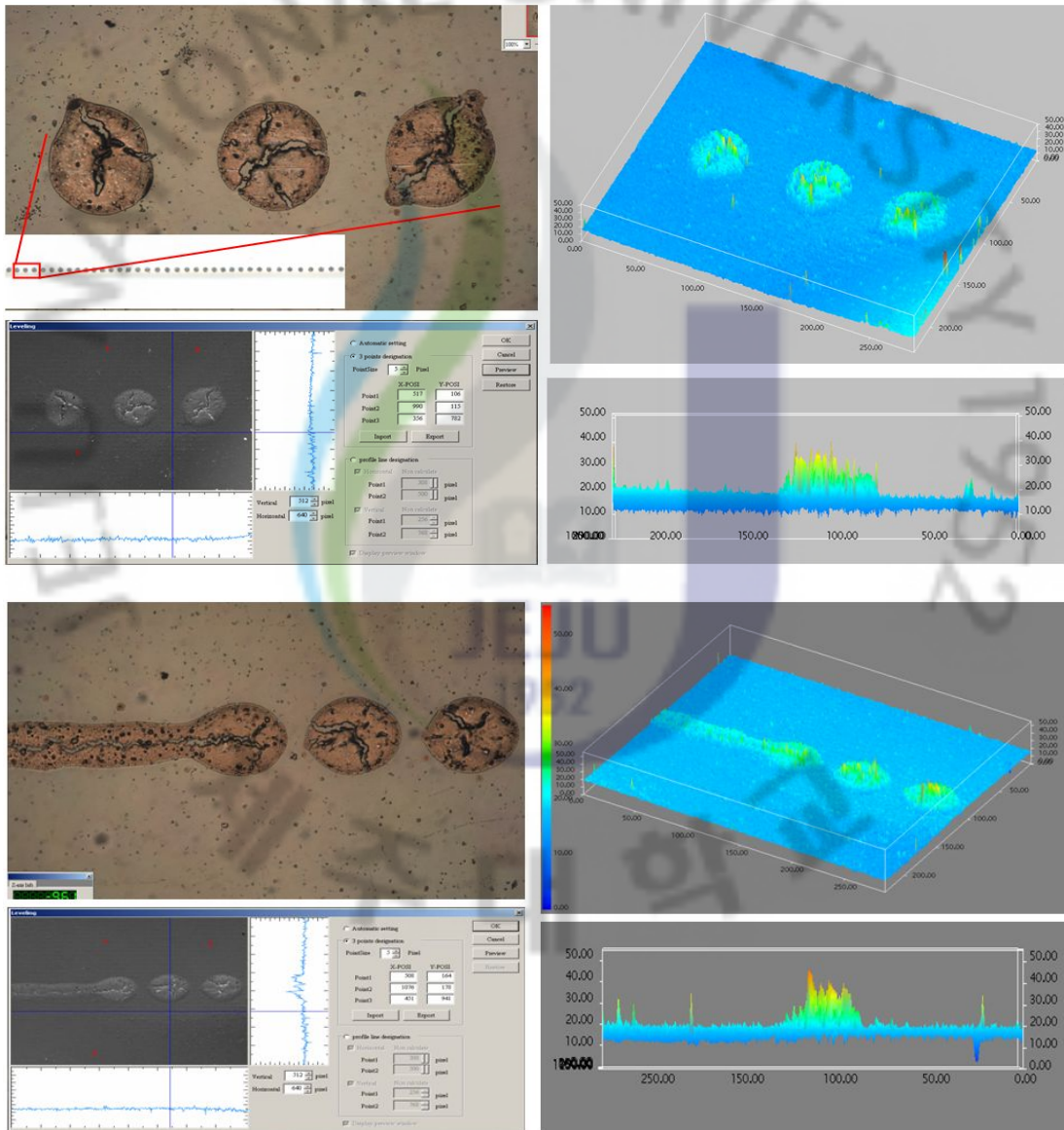


그림 65. DoD 패턴 형상 사이즈 측정

## 6. 결론

정전기력을 이용한 잉크젯 기술의 경우 세계적으로 80년대 후반부터 제안되었으나 그 기술개발은 최근에서야 이루어지고 있는 초기단계의 기술이다. 미세방울 토출을 위하여 수kV 이상의 고전압이 필요하고 형성되는 액적의 크기를 제어하기 위해서는 인가되는 여러 가지 조건들의 영향을 고려하지 않을 수 없는 실정이다.

이러한 문제점들에 대하여 본 논문에서는 기존 잉크젯 방식과는 달리 정전기력을 이용하여 제팅 할 수 있는 프린팅 시스템을 제작하였고 이에 대해 수백 V에서 수kV에 이르기까지 여러 가지 분사조건들에 대하여 시뮬레이션 하 며, 공정연구를 수행하였다.

정전기력을 이용한 잉크젯 공정을 연구하는 과정으로 노즐 모델링을 하였고, 유전을 전하밀도 전위 등 여러 가지 경계조건을 가정하여 토출을 위한 시뮬레이션을 상용프로그램인 Comsol을 이용하여 수행하였다. 또한 시간에 대한 Electro field의 변화를 측정하여 노즐 설계에 대한 이론을 제시하고 이에 맞추어 정전기력을 이용한 잉크젯 장비를 설계 제작 하였다.

위 제작한 정전기력 잉크젯 실험 장비로 실험한 결과 내경  $160\mu\text{m}$ 의 노즐, 인가전압  $1.814\text{kV}$ 의 정전기력 잉크젯 방식으로  $30\mu\text{m}$ 의 미세라인 패턴을 형성하였고, 인가전압  $1.5\sim 1.9\text{kV}$ 의 고전압 펄스를 이용하여 직경  $70\mu\text{m}$ 의 DoD 패턴을 형성하였다.

본 논문에서 연구한 정전기력을 이용한 잉크젯 공정의 연구는 기존의 피에조 잉크젯방식과 가열식 잉크젯 방식의 문제점을 보완하기 위하여 진행되고 있으나 아직까지는 미흡한 점이 많다. 하지만, 앞으로 지속적인 연구가 이어진다면, 피에조방식과 열방식의 잉크젯에 비하여 더 많은 장점을 가질 수 있을 것으로 본다.

## 참고문헌

- [1] P. E. J. Legierse, 2001, "Inkjet Printing in the Electronics Industry", DDP2001, pp. 197-200.
- [2] S. F. Pond, 2000, "Inkjet Technology and Product Development Strategies", Torrey Pines Research, Carlsbad
- [3] Sirringhaus, H. et al. 2000, "High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits", Science 290, pp2123-2126.
- [4] E.Lee, 2003, "Micro-drop Generation", CRC Press.
- [5] S. Lee, D. Byun, S. J. Han, S. U. Son, Y. Kim and H. S. Ko, 2004, "Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid", 2004 MHS, Springfield: UOS Press, pp.6-9.
- [6] G.T.A.Kovacs, Micromachined Transducers Sourcebook. New York : McGraw -Hill, 1998, ch.9.
- [7] E.Lee, Microdrop Generation, CRC press, 2003
- [8] A. Sou, K. Sasai, T. Nakajima, "Control of Ink Transportation in Electrostatic Inkjet Printer," 2002 ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, Montreal, Quebec, Canada, July 14-18, 2002

# Development of Electrostatic ink-jet printing system for flexible electronics device fabrication

Jun-woo Kim

Department of Mechatronics Engineering, Graduate School of  
Cheju National University

## Abstract

For the current display process, the innovative micro pattern fabrication process using semiconductor process should be developed, which requires the expensive equipment, the limited process environment and the expensive optic-sensitive material. The effort of process innovation during past several years ends up the limit of cost reduction. The existing ink jet technologies such as a thermal bubble ink jet printing and a piezo ink jet printing are required to shorten the nozzle diameter in order to apply to the micro pattern fabrication. In this paper, as one way to cope these problems the micro pattern equipment based on the electrostatic ink jet has been developed and carried out some experiments.