



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

博士學位論文

고분자 소재 기반 마이크로 비드의 정밀 위치  
배열 공정과 응용 디바이스로의 적용 연구

濟州大學校 大學院

에너지應用시스템學部 電子工學專攻

梁 鳳 秀

2016 年 8 月

# 고분자 소재 기반 마이크로 비드의 정밀 위치 배열 공정과 응용 디바이스로의 적용 연구






指導教授 都 良 會

梁 鳳 秀

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2016 年 8 月

梁鳳秀의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 고 성택   
委 員 이 광빈   
委 員 도 양희   
委 員 최 경현   
委 員 양 용서 

濟州大學校 大學院

2016 年 8 月

# Research for precise array positioning process of micro polymer bead and applications of device using micro bead

Bong-Su Yang

(Supervised by professor Yang-Hoi Doh)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Doctor of Philosophy

2016 . 8 .

This thesis has been examined and approved.



Thesis Committee chair, Sung-Taek Ko, Prof. of Electronic. Eng.



Thesis Committee member, Kwang-Man Lee, Prof. of Electronic. Eng.



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



Thesis Committee member, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics. Eng.



Thesis Committee member, Yong Suk Yang, Prof. of Electronic. Eng.

August 2016

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. 서론 .....	6
II. 폴리머 기반 마이크로 비드 .....	9
1. 마이크로 비드 구조 .....	9
2. 마이크로 비드 기반 활용 분야 연구 현황 .....	12
1) 전자/전기 분야 .....	13
2) 화학 분야 .....	13
3) 바이오 분야 .....	14
III. 마이크로 비드 정밀 토출 기술 .....	17
1. 마이크로 비드의 기능성 부여를 위한 필요 기술 .....	17
2. 마이크로 비드 응용 기술 .....	20
1) 마이크로 비드 유도에 의한 배열 방식 .....	20
2) 마이크로 비드 토출에 의한 배열 방식 .....	23
3. 정전기력 기반 토출 기술 .....	28
1) 시스템 구성 .....	28
2) 공정 기술의 이론적 배경 .....	29
4. 마이크로 니들 기반 토출 기술 .....	34
1) 시스템 구성 .....	35
2) 공정 기술의 이론적 배경 .....	37
5. 마이크로 캐필러리 기반 토출 기술 .....	40
1) 시스템 구성 .....	40
2) 공정 구성 .....	42

IV. 마이크로 비드 정밀 토출 공정 기술 비교 .....	45
1. 각 공정 별 마이크로 비드 토출 실험 시 고려사항 .....	45
1) 마이크로 비드의 용액 내 분산성과 토출특성 연구 .....	46
2) 인가 전압에 따른 공정 연구 .....	49
3) 마이크로 니들 형태에 따른 주입균일 특성 변화 연구 .....	52
4) 비드 토출용 헤드 높이에 따른 공정 결과 .....	54
5) 비드 토출용 헤드 내부 압력에 따른 공정 결과 .....	56
2. 공정 기술 별 실험 결과 비교 및 분석 .....	59
3. 응용 분야 적용 연구 .....	64
1) 마이크로 비드 기반 디스플레이 제조 공정 .....	65
2) 마이크로 비드 기반 신축성 센서 .....	69
V. 결론 .....	75
참고 문헌 .....	78

## LIST OF FIGURES

Fig 1. Gold nano particle coated micro beads .....	10
Fig 2. Equation and structure of coated microbead .....	11
Fig 3. Shape of metal coated micro bead .....	12
Fig 4. Example of utilizing micro bead in conductive film .....	13
Fig 5. Various applications of micro bead .....	14
Fig 6. Magnetic biosensor using micro bead .....	15
Fig 7. Immunoassay process for GMR sensor based on micro bead .....	15
Fig 8. Method for sorting micro bead in substrate having micro sized trap holes .....	21
Fig 9. Bead align system using surface acoustic wave .....	22
Fig 10. Cross-section of nano field extraction thruster system .....	23
Fig 11. Bead array positioning technology based on micro tip .....	24
Fig 12. Bead array positioning technology based on micro hole-cup .....	25
Fig 13. Process of ejecting micro bead based on electrostatic force .....	28
Fig 14. Configuration of ejecting system based on electrostatic force .....	29
Fig 15. Energy equation of micro bead in liquid .....	30
Fig 16. Electrostatic force effect in micro bead ejecting system .....	31
Fig 17. Process of ejecting micro bead based on micro needle .....	34
Fig 18. Configuration and design for micro needle type head .....	35
Fig 19. Design of micro needle type head .....	36
Fig 20. Configuration and process of micro needle type head .....	37
Fig 21. Meniscus state in accordance with needle tip surface .....	38
Fig 22. Process of ejecting micro bead based on micro capillary .....	40
Fig 23. Design for micro-capillary type head .....	41
Fig 24. Configuration of micro-capillary type head .....	42
Fig 25. Single micro bead capture by internal capillary pressure .....	45

Fig 26. Dispersion rate with variety of time in each viscosity solution .....	47
Fig 27. Images of bead ejecting process classified by viscosity .....	48
Fig 28. Graph of ejecting process by supplying voltage .....	51
Fig 29. Image of capturing micro bead by supplying voltage .....	54
Fig 30. Results of ejecting micro bead by height of head .....	55
Fig 31. Process of micro bead capture by capillary pressure in head .....	56
Fig 32. Image of micro bead ejecting process by changing inner pressure .....	57
Fig 33. Results of micro bead ejecting process by inner pressure .....	57
Fig 34. Structure and operation of micro bead based electronics display .....	66
Fig 35. Structure of electronics paper's pixel using micro bead .....	68
Fig 36. Image of strain sensor and test equipment for micro bead .....	71
Fig 37. Graph of measurement data for strain sensor .....	72
Fig 38. Graph of measurement data for strain sensor using micro bead .....	72
Fig 39. Effect of micro bead in agnw strain sensor device .....	73



## LIST OF TABLES

Table 1. Property of micro bead based on polymer .....	11
Table 2. Application technologies of using micro bead's property .....	18
Table 3. Comparison with utilization of micro bead ejecting technologies .....	26
Table 4. Setup parameters for micro bead ejecting process .....	43
Table 5. List of micro bead ejecting process and its research .....	45
Table 6. Materials list of micro bead ejecting process .....	47
Table 7. Parameters of micro bead ejecting process .....	48
Table 8. Results of micro bead ejecting process in 100 cs .....	49
Table 9. Results of micro bead ejecting process in variety of supply voltage .. .....	50
Table 10. Characteristics of micro bead ejecting process related to micro needl e surface .....	52
Table 11. Parameter of micro bead ejecting process .....	53
Table 12. Standard of Performance for micro bead ejecting and align process .....	59
Table 13. Image of each micro bead align process .....	60
Table 14. Comparison with Results of each micro bead ejecting process .....	63
Table 15. Applications of ejecting and align process for micro bead .....	64
Table 16. Manufacturing process of display device using micro bead .....	66
Table 17. Comparison with each of micro bead ejecting process .....	67
Table 18. Property and requirements for manufacturing process of e-paper dis play using micro bead .....	68
Table 19. Characteristic and structure of strain sensor using micro bead .....	69
Table 20. Image of strain sensor surface based on agnw and micro bead .....	70

## ABSTRACT

Microbeads with size ranging from hundreds of nanometers to tens of micrometers are fabricated using various polymerization techniques forming polymeric chemical bonds between the particles. They have been widely utilized in applications including display panels, and chemical, electrical, and bio sensors. In recent studies, research has been carried out on the use of microbeads in sensing applications and their chemical and electrical functionalities have been investigated for that purpose. Most of present research about micro beads focuses on the influence, measurement, and control of electrical and chemical properties of the microbeads in a micro-fluid and its own. Those studies have been limited to utilize single bead simple solutions.

The research presented in this thesis is based on the technology of the system and process used for precise positioning and release of the spherical microbeads at a desired location on the target substrate. The microbeads used were produced by depositing a nano-scale gold thin film coating on a polymeric material. We can take advantage of the precise positioning of microbeads and individual bead discharge control process and employ this method in bead-based device fabrication applications. To thoroughly investigate the process of microbeads precise control and placement, 3 different types of dropping techniques were studied. One of the techniques used electrostatic force based discharge technology while the other two were microneedle based discharge and capillary based ejection techniques. The system was developed in house with customized process head and controller and it was used for continuous microbeads array printing.

The position precision and droplet uniformity results obtained from the different processes used show that each process has its own pros and cons.

The major technological differences among them were related to the shape and uniformity. The capillary based technique for microbeads dropping exhibited the best and most reliable results in terms of position, precision, and uniformity. Based on the excellent output, the capillary based method can be applied in device based applications like electronic paper and elastic sensing devices. The results indicate that the developed process can be viably used in the manufacturing of functional devices.

## I. 서 론

고분자 소재 기반의 마이크로 비드는 마이크로 사이즈의 직경을 갖는 고분자 소재의 입자를 말하며 고분자 소재가 가지고 있는 고유의 특성을 활용하여 마이크로 레벨의 엔지니어링 분야에 널리 활용되고 있는 소재이다[1]. 마이크로 비드 입자는 입자 표면의 미세 특성을 바탕으로 생물학적 혹은 화학적 미세 반응을 유도하는 반응체 부착이 가능한 특징을 가지고 있으며 이러한 형태의 응용 분야 혹은 마이크로 사이즈를 기반으로 하는 미세 검출 시스템[2]이나 미세 제어 시스템에 가장 널리 사용되고 있다. 마이크로 비드 기반 센서 연구 분야에서는 이러한 마이크로 비드에 추가적인 공정 과정을 거쳐 연구 및 활용용도에 맞는 기능을 구현하게 되는데 마이크로 비드에 대한 가장 일반적인 추가공정으로는 마이크로 비드 표면에 코팅 과정을 거쳐 고기능성 비드를 제조하는 공정이 있다. 이러한 코팅 공정을 통해 마이크로 비드 표면에 검출하고자 하는 물질에 대한 반응성을 갖으며 기능성 소재가 표면에 코팅된 마이크로 비드가 제작된다[3]. 이와 같은 마이크로 비드에 대한 기능을 구현하는 다양한 소재 및 공정 기술 방안 중 마이크로 비드에 대한 정밀 위치 내 배열 형상을 제작하는 공정 기술이 근래 연구가 진행되고 있다. 그 중 유체 내 마이크로 비드의 유도에 의한 배열 형상 제작 기술과 비드 입자의 개별 토출 기술이 가장 대표적인 비드 입자 활용 공정 기술로 각 배열 공정은 다른 특징을 가지고 있다. 비드 입자 유도 배열 방식은 외부 힘에 의한 유체 내 비드 입자의 일정한 배열 형상 제작이 가능하며 마이크로 비드의 개별 토출 기술은 유체 내 비드 입자의 개별 분리 및 토출을 통한 배열 형상 제작이 가능한 공정 기술이다. 비드 입자의 유도 배열 기술은 대량 입자의 배열 형상 제작이 용이하나 microfluidic 기반 기술로 응용 디바이스 적용 분야에 한계성을 가지고 있다. 반면에 비드 입자의 토출 기술은 상대적으로 마이크로 비드를 활용하는 다양한 응용 디바이스 제조 공정 내 적용이 가능하나 위치 정밀도에서 보완이 필요하다. 본 연구에서는 기존 마이크로 비드 배열 공정이 가지고 있는 장점을 가지고 있으며 각 공정 기술의 단점을 보완하는 기술로 마이크로 비드 토출 기술을 사용하여 고정밀도를 갖는 비드 입자 배열 기술로 활용하고자 하였다.

마이크로 비드에 대한 정밀 토출 기술에서는 비드의 개별 분리 및 정밀 토출 기술이 비드의 형상 패턴 제작에 중요한 부분으로 균일한 토출이 비드 기반 응용 디바이스 제작에 필수적인 요소이다. 따라서 마이크로 비드를 활용하는 토출 공정 기술에서는 공정 기술 별 비드의 분리 및 토출을 위한 정밀한 공정 변수가 존재한다. 본 논문에서는 이러한 마이크로 비드의 정밀 분리, 토출 공정을 통해 비드의 기능성을 구현하고 이를 통해 응용 분야에 적용하기 위한 공정 기술로 정전기력과 마이크로 니들, 캐필러리 기반 배열 공정 기술을 연구하였다. 일반적으로 정전기력 기반 토출 공정과 마이크로 니들 기반 토출 공정은 전극으로의 전압 인가에 의한 용액토출과 흡착, 토출과정이 진행된다. 그러나 정전기력 기반 토출 공정은 분산상태 변화에 의한 비드 토출 형상이 불균일하였으며 마이크로 니들 토출 공정의 경우 헤드 내부 유동변화에 의해 비드 흡착이 불균일하여 토출 공정에 영향을 주었다. 이러한 마이크로 비드의 정전기력 기반 토출 공정 결과, 인가전압에 의해 형성되는 전기장의 영향으로 마이크로 비드의 연속적인 토출과 비드 형상은 확인할 수 있었으나 공정 횟수 대비 토출량은 균일하지 않았고 1회 토출 시 비드 토출량도 불균일하였다. 이에 마이크로 비드의 토출 균일성을 보완하고자 마이크로 사이즈의 메탈 전극과 정밀 스테이지를 사용하는 마이크로 니들 기반 토출 공정 기술을 적용하여 공정을 진행하였고 정전기력 기반 토출 공정보다 양호한 비드 토출 형상을 확인하였다. 다만 공정 횟수 대비 토출량과 1회 토출 당 비드 토출량은 응용 디바이스에 적용하기 위한 수준보다는 낮았다. 마이크로 비드에 대한 개별 분리와 토출 공정이 안정적으로 진행되도록 마이크로 비드 토출 공정에 미세 공압제어를 통한 비드 개별 분리, 흡착이 가능한 마이크로 캐필러리를 적용하여 비드 토출 공정을 진행하였다. 마이크로 비드 토출 공정 결과, 이전 정전기력 기반 토출 공정과 마이크로 니들 기반 토출 공정보다 공정 횟수 대비 토출량과 1회 토출 당 비드 토출량이 균일하였으며 정밀 위치 오차 또한 1 $\mu$ m급으로 응용 디바이스에 적용 가능한 수준으로 확인되었다.

본 논문에서는 마이크로 비드의 공정 기술 및 응용 기술 연구인 금 나노박막 코팅이 형성된 폴리머 소재로 제조된 구형 비드의 정밀 위치 토출 기술에 대한 연구를 진행하였고 마이크로 비드의 정밀 위치에서의 개별 토출을 통해 비드 기반 응용 디바이스 제조공정으로 활용하고자 하였다. 그리고 마이크로 비드의 정

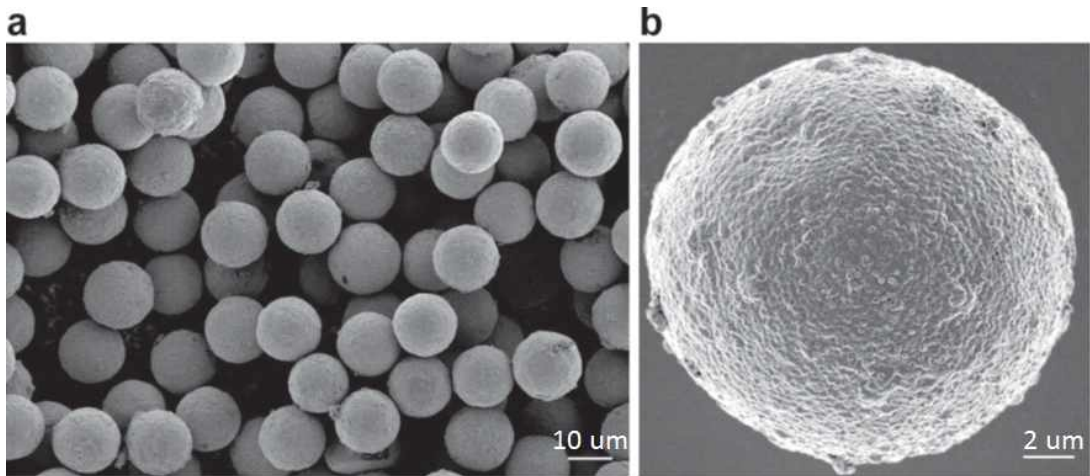
밀 토출 공정 기술을 실제 응용 디바이스에 적용하여 마이크로 비드와 토출 공정 기술이 응용 디바이스로 적용이 가능한지와 기능성 향상에 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과, 마이크로 캐필러리 기반 토출 공정 기술이 비드 토출특성과 위치 배열 특성에서 가장 균일한 값을 확인할 수 있었다. 또한 응용 디바이스인 전자종이 디스플레이 패널 제조 공정상에서 마이크로 비드를 사용하는 패널 내 주입하는 공정 기술이 요구하는 기술적 성능치를 만족하였으며 agnw(silver nanowire) 기반 센싱 디바이스에 마이크로 비드를 적용 시, 기존 센서 디바이스보다 전도특성과 신축특성 향상에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다.

## II. 폴리머 기반 마이크로 비드

마이크로 사이즈의 고분자 소재 기반 마이크로 비드는 다양한 용도로 활용성이 높은 입자로써 전기, 전자 분야를 비롯한 화학, 바이오 분야 등에 적용되고 있다 [4]. 마이크로 비드는 마이크로 사이즈의 직경을 갖는 고분자 소재로 구형 및 사용자의 용도에 따라 다양한 형태를 가지고 있으며 형상 및 합성 제작이 용이한 고분자 소재를 기반으로 제작된다. 또한, 마이크로 비드의 표면 처리를 통해 기능성 소재의 코팅 및 특성 제어를 바탕으로 마이크로 비드에 기능성을 부여하여 활용 분야에 맞는 용도로 사용된다[5]. 이러한 목적으로 사용되는 마이크로 고분자 소자는 입자크기 및 크기 분포도, 입자의 형태, 표면특성이 적용분야와 관련하여 중요한 요소로 작용한다[6]. 근래에 활용되고 있는 마이크로 비드 입자의 대부분은 2~20 $\mu\text{m}$  직경의 사이즈로 높은 가교도 및 일정한 입자 분포도를 바탕으로 LCD(liquid crystal display)등 디스플레이 패널 내부 일정 간격 형성을 위한 스페이서(spacer) 나 고분자 필름의 미끄러짐성 개선체(anti-slip agent) 등 여러 분야에서 사용되고 있다[7]. 본 연구에서는 마이크로 비드에 기능성을 부여하기 위해 금 나노입자를 표면에 코팅 처리한 비드를 공급받아 연구에 활용하였다.

### 1. 마이크로 비드 구조

마이크로 사이즈 고분자 비드 소자는 폴리스티렌(polystyrene) 혹은 폴리메틸메타아크릴레이트(polymethylmethacrylate) 등 화학적 결합이 이루어진 고분자 입자를 유제(emulsion) 중합법 등을 통하여 직경 수백 nm에서 수십  $\mu\text{m}$  크기로 제조한다. 이렇게 제조된 마이크로 비드는 용도에 따라 바이오센서, 디스플레이 등에 적용되고 있다[8].



**Fig 1. Gold nano particle coated micro beads[9].** (a) SEM image, (b) Magnified image.

본 연구를 위한 마이크로 사이즈 비드는 Fig 1 과 같이 구형 형상으로 제작되었으며, 기능성을 부여하기 위해 비드 외부에 200 nm 두께의 메탈 나노 박막을 형성하는 공정을 거쳐 제작되었다[9]. 제작된 마이크로 비드는 메탈 코팅에 의한 전도성을 갖으며 외부 전극의 전압 인가에 의해 형성되는 전기장에 의한 이동 유도 등 다양한 제어방법 적용이 가능하다[10]. 마이크로 사이즈의 비드를 사용하여 전기, 전자 분야 등 다양한 분야에 활용되기 위해서는 물리적 특성 및 화학적 특성이 용도에 맞게 제어가 되어야 한다. 예를 들어 디스플레이 패널에 적용되는 스페이서의 경우 대량의 비드가 사용이 되며 각 비드의 직경이 균일하게 유지되어야 한다. 이와 같은 경우 비드의 균일한 간격 유지를 통해 균일한 화소 구현이 가능하다. 가교도(crosslink)의 경우, 중합체 구조단위 수에 대한 가교점의 수 비율로 가교도가 높은 마이크로 입자의 경우 우수한 열 안정성 및 용매에 대한 안정성을 지녀 내화학성 및 열 저항성이 필요한 소자에 활용할 수 있다. 본 연구에서는 다음 Table 1 과 같이 분산도 및 가교도를 갖는 마이크로 비드를 적용하여 정밀 토출 공정에 활용하였다. 마이크로 비드의 평균 직경은 17.5  $\mu\text{m}$ 로 마이크로 비드를 활용하는 전자종이 디스플레이 패널 내 픽셀을 구성하는 각 셀의 광 투과 제어를 위한 공간을 고려하여 직경을 선정하였으며, 분산도 및 가교도 특성은 공동 연구가 진행된 전자종이 디스플레이 연구를 통해 마이크로 비



드의 기능성을 고려하여 도출되었다[11].

Table 1. Property of micro bead based on polymer

	마이크로 비드 샘플	비고
평균 크기	17.5 μm	-
분산도	coefficient of variation 8.3%	마이크로 비드 크기 편차
가교도	15%	-

금 나노입자를 마이크로 비드 표면에 증착하기 위해서는 다음 Fig 2 와 같이 화학적 도금 공정을 거쳐 금 나노입자를 표면에 부착하는 공정을 거친다. 이러한 과정을 거쳐 마이크로 비드가 전도성을 띄는 전극에 반응하는 소자로 적용할 수 있게 된다. 또한, 금 나노 입자의 점착성(adhesive)를 고려하여 PdCl<sub>2</sub>로 비드를 선 코팅 후, 도금 공정을 거쳐 최종적인 금 나노 박막을 비드 외부에 점착한다.

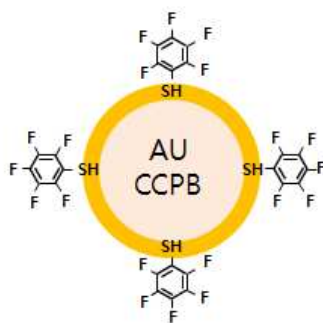
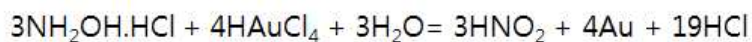


Fig 2. Equation and structure of coated micro bead.

금 나노 입자 및 환원액의 금속 입자 도금 과정을 제어하여 다음 Fig 3과 같이 200 nm급 나노 박막 코팅이 진행된 마이크로 비드를 얻을 수 있다. 본 연구를 위해 마이크로 비드는 동진세미캠에서 제작되었고 금 나노입자 코팅은 (주)노마디

엔을 통해 코팅 공정 후 최종 금 나노입자 기반의 마이크로 비드를 제공받았다. Fig 3은 마이크로 비드에 대한 금 나노입자의 코팅 공정을 통해 제작된 마이크로 비드의 코팅 단면을 측정된 사진[12]으로, 메탈 코팅을 통해 기능성을 부여 받은 마이크로 비드는 본 연구에서 전기적인 기능성을 부여받아 응용 디바이스 제조공정에 활용되었다.

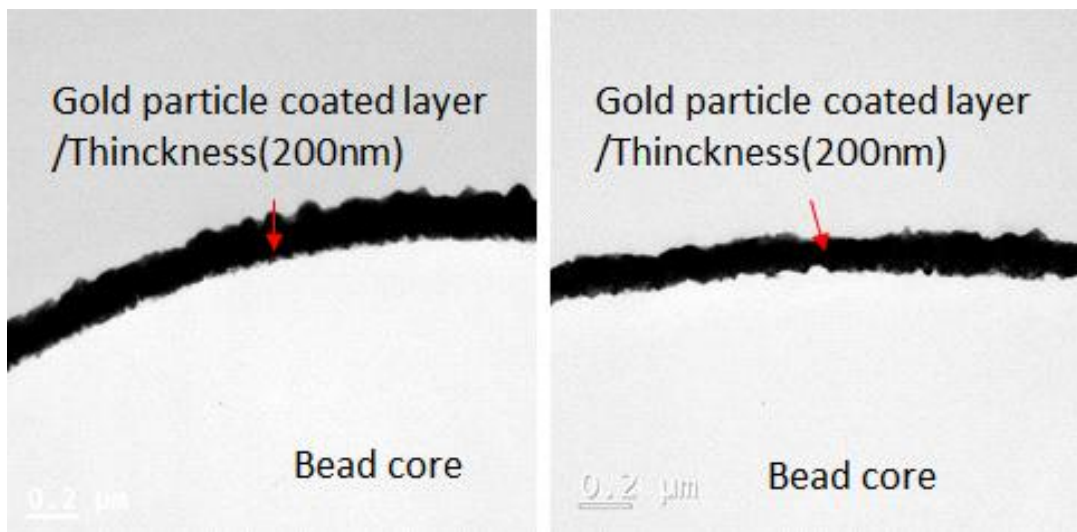


Fig 3. Shape of metal coated micro bead[12].

## 2. 마이크로 비드 기반 활용 분야 연구 현황

고분자 기반 마이크로 비드는 예전부터 주변 생활용품 및 다양한 분야에 널리 사용되어 왔으나 최근 지속적인 환경에 대한 오염 및 부작용을 우려하여 사용이 제한되고 있다. 다만 전기, 전자 및 화학, 바이오 분야 등에는 연구 용도로 활용성을 가지고 있고 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[13]. 근래에는 마이크로 비드의 형태, 소재, 화학적, 전기적 반응성 등을 활용하여 디바이스의 전극 소자[14], 디바이스 반응체[15] 등에 적용되고 있다.

## 1) 전자/전기 분야

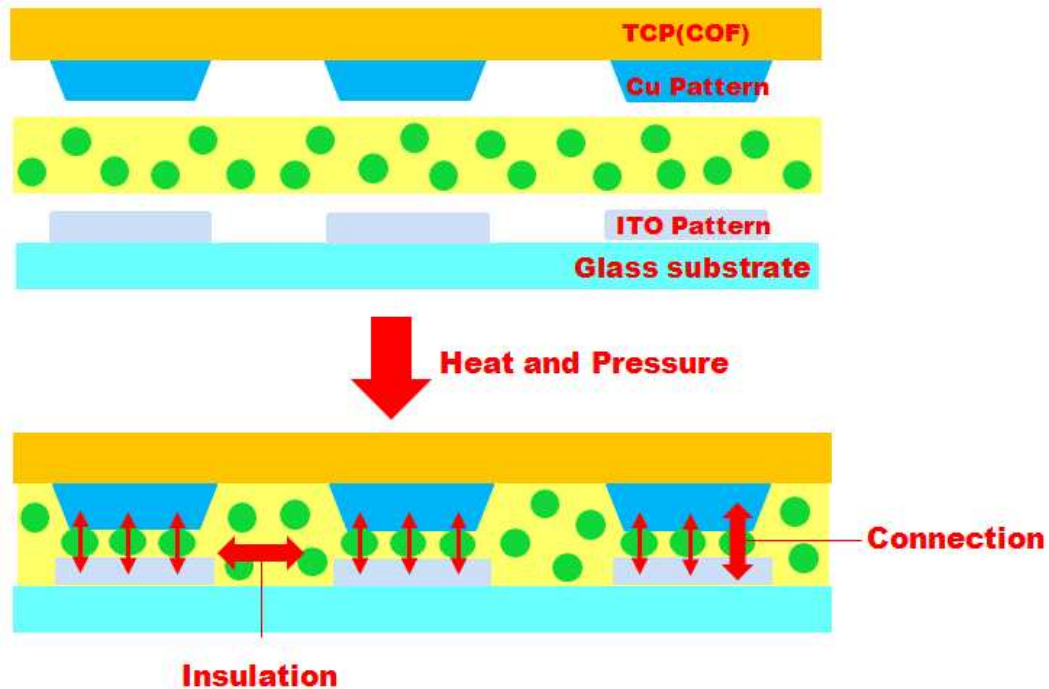


Fig 4. Example of utilizing micro bead in conductive film[16].

Fig 4는 최근 고집적, 고해상도 디스플레이에 대한 제조공정상에서 요구하는 성능 향상으로 인한 제조 공정상에서의 기능적 제한성과 관련하여 마이크로 비드를 각 부품간의 전기적 연결로 활용하는 제조기술에 대한 자료이다[16]. 점점간 전기적 연결이 필요한 부분이지만 기존 고온 납을 이용한 물리적 연결 방법이 불가능한 상황에서 메탈 마이크로 비드를 고분자와 혼합, 필름형태로 제작하고 전극 사이에 위치하여 압착 공정을 거쳐 전극 간 전기적 연결로 활용하는 기술이다. 근래 LCD 등 디스플레이 제조 공정에 활용되고 있으며 메탈 코팅 된 마이크로 비드를 필름 구조로 사용하는 특징이 있다.

## 2) 화학 분야

2013년 국내 고분자 소자 전문기업에서는 마이크로 비드의 화학적 특성을 응용

한 연구 및 개발을 진행하였다[17]. 마이크로 비드에 화학적 표면처리를 통해 자력 특성을 부여하고 이를 활용하여 필터링 기능을 구현하는 방식으로 Fig 5는 마이크로 비드를 화학적인 기능성을 부여하고 이를 활용하여 폐수의 효율적인 분리 및 처리에 대한 기능 구성을 보여주고 있다.

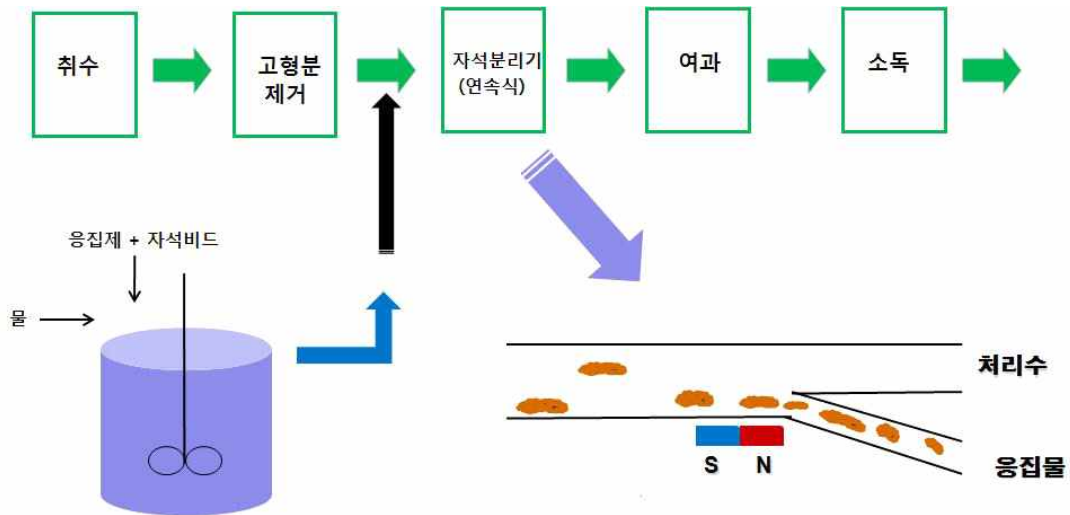


Fig 5. Various applications of micro bead[17].

기존 오폐수를 응집제를 이용하여 처리하는 공정을 개선하여 폐수에 대한 처리 과정에 응집제와 응집보조제인 고분자물질을 첨가하여 오염물을 제거하는 기존의 방식에서 벗어나 응집처리 과정에서 자성비드를 활용하고, 이들이 응집제와 오염물이 함께 응집된 상태에서 자기장 시스템을 활용하여 빠른 시간 내에 응집물을 처리수와 분리해내는 공정 연구를 진행하였다.

### 3) 바이오 분야

마이크로 비드 응용 분야 중 가장 널리 연구가 진행된 분야는 박테리아, 단백질 등 생물학적 세포수준의 검출 및 분석이 가능한 바이오센서 분야로 마이크로 사이즈 비드의 표면 제어를 통한 분석체의 흡착 또는 항체(anti-body)의 반응을 검출하는 방식이 대표적인 활용 분야이다[18]. Fig 6에서는 마이크로 비드를 단분자의 검출이 가능한 형태의 바이오센서로 활용하여 패턴에 전압인가를 통해

형성되는 자기장에 의한 GMR(giant magneto resistance) 센서 내 변화를 측정하는 방식의 센서로 비드에 흡착된 감지물질의 고분해성 검출이 가능한 특징이 있다[19].

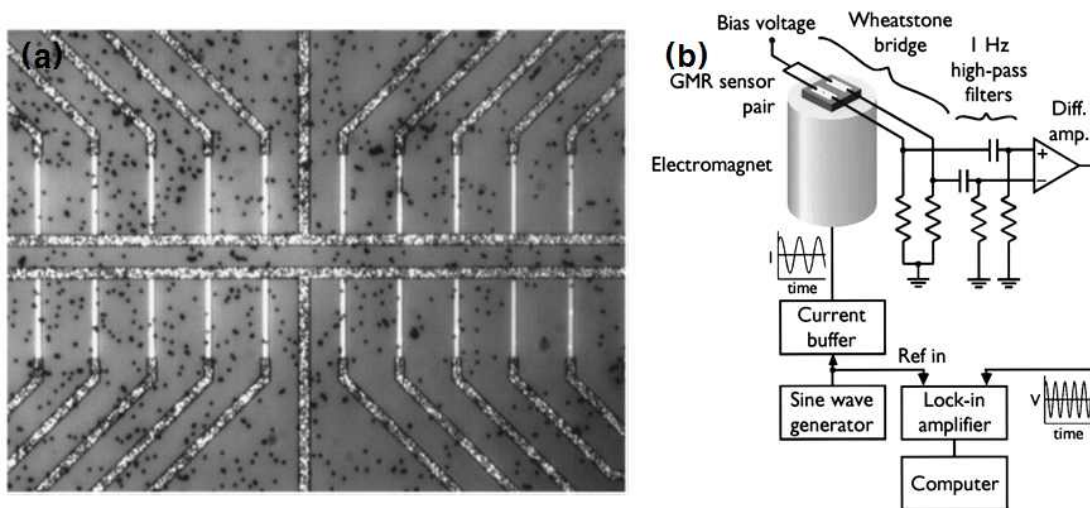


Fig 6. Magnetic biosensor using micro bead[19]. (a) Sensor pattern(250x250 μm), (b) Structure of sensor system..

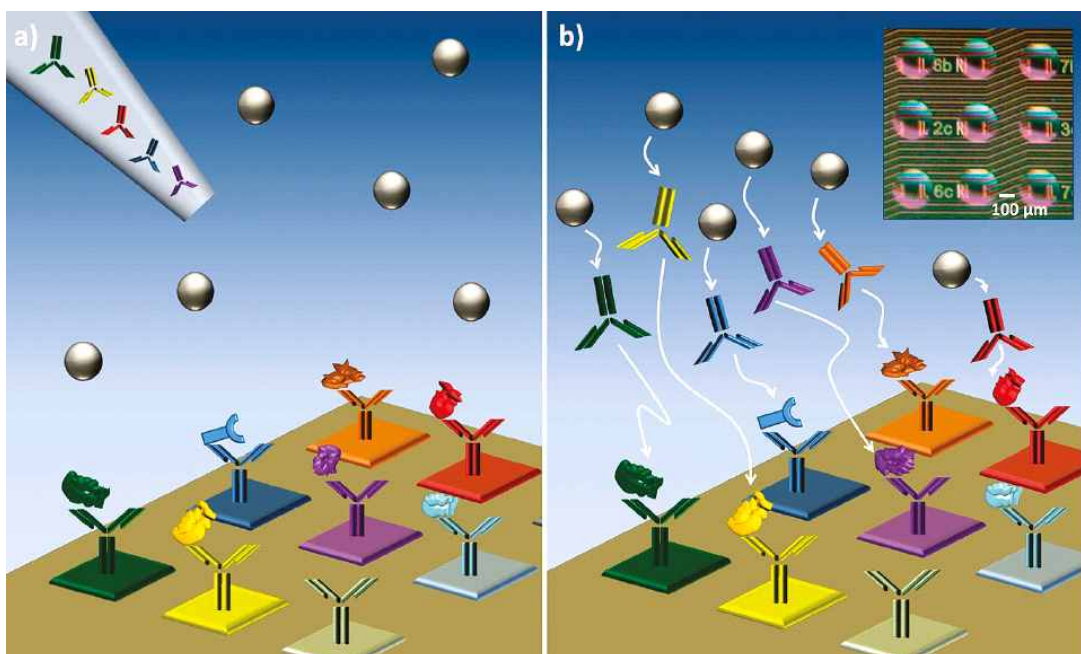


Fig 7. Immunoassay process for GMR sensor based on micro bead[20].

Fig 7에서는 마이크로 비드의 생체감지물질(bio-receptor)에 대한 기본적인 검출형태를 간략히 구성한 그림으로 일정 공간 내 유동하고 있는 마이크로 비드 입자 외부에 항체 등을 부착하여 검출입자를 인식하고 GMR 센서 기관 표면에 형성된 생체감지물질과 결합을 통해 센서에 의한 검출입자의 미세 검출이 가능하다[20]. 또한 GMR 센서 기반의 바이오센서 시스템을 구성할 경우, 탐지분자 분해능이 수백nm 수준으로 마이크로 비드 입자를 검출 및 판별할 수 있는 특징이 있다.

### III. 마이크로 비드 정밀 토출 기술

마이크로 비드를 응용분야에 활용하는 기술의 기본 형태는 크게 3가지 정도로 설명이 가능하다. 첫 번째는 마이크로 비드를 용액에 혼합하여 마이크로 유체 시스템(microfluidic system)에 활용하는 방안으로[21] 연속적인 유체 흐름에 의한 입자의 제어, 검출 등을 진행하는 기술이다. 일반적으로 초미세 회로의 반도체 기술과 나노기술, 생명공학기술 등의 집적으로 손톱만한 크기의 칩을 통해 진단 및 분석이 가능한 랩온어칩(lap on a chip)[22] 등의 형태로 활용된다. 두 번째 형태는 마이크로 비드 입자를 개별로 활용하는 방안으로 마이크로 비드에 화학적 증착 공정을 거치고 이를 일정한 위치에 고정하여 검출자로 활용하는 형태이다[23]. 이러한 경우, 마이크로 비드 외부에 코팅되는 소재에 따른 부착 반응체 및 항체에 대한 소재를 고려하여 기능을 구현하게 된다. 마지막 세 번째 형태는 마이크로 비드를 어레이 형태로 구성하여 비드 소재 특성 및 비드 형태 특성을 활용한 패턴 혹은 센서 디바이스로 활용하는 형태이다[24]. 이러한 형태는 마이크로 비드를 배열하거나 정밀 위치 토출 공정 기술을 적용하여 정밀한 위치에 물리적으로 이동시키는 방법으로 비드를 활용한다. 위의 3가지 마이크로 비드에 대한 활용 기술은 공통적으로 마이크로 비드에 대한 적합한 공정 기술이 적용되며, 이와 관련한 응용 연구를 위해서도 마이크로 비드의 활용을 위한 공정 기술이 뒷받침되어 한다. 따라서 응용 분야에 맞는 마이크로 비드의 제어 및 응용 공정 기술에 대한 선행연구가 필요하다.

#### 1. 마이크로 비드의 기능성 부여를 위한 필요 기술

일반적인 마이크로 비드는 고분자 소재를 기반으로 제조되며 분포도 외에도 열안정성, 용매 안정성 및 강도 등 물리적 특성을 통한 기능성 부여가 가능하여 마이크로 비드를 다양한 용도로 활용할 수 있도록 유도한다. 마이크로 비드의 물리적인 특성을 제어하여 기능성을 부여하는 방법 외 마이크로 비드에 기능성을 부여하는 방법으로 기계적으로 정밀 위치상에 비드를 주입하여 배열 혹은 일정 형

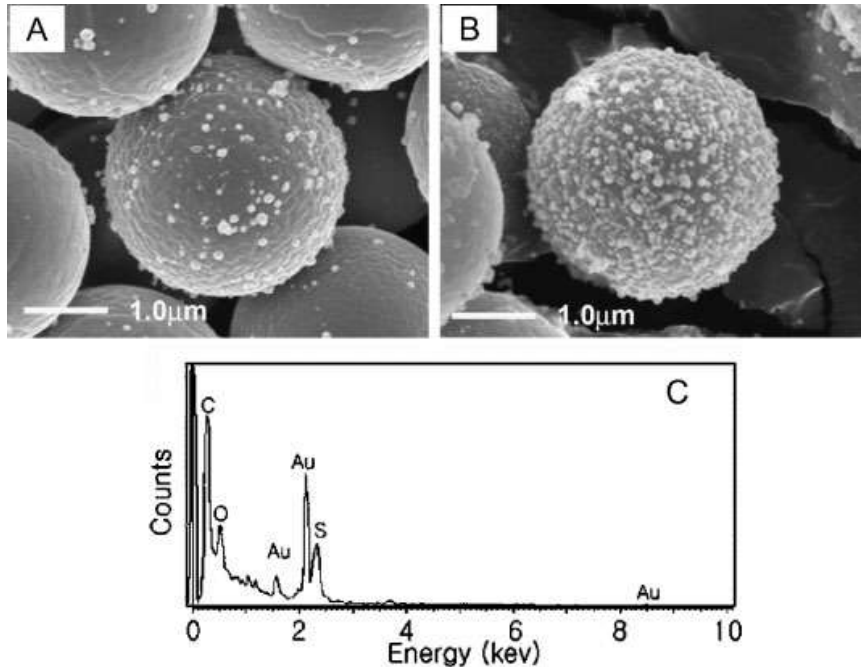
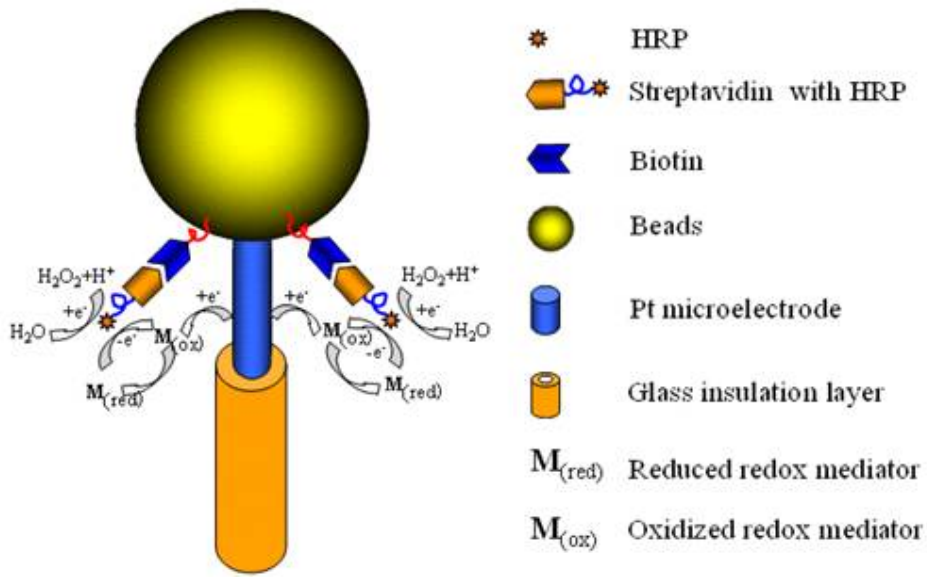


상을 제작하는 방법과 마이크로 비드 외부에 기능성 코팅을 통한 코팅 비드 제조 방법 및 바이오 소재를 적용하여 피검출체를 검출하는 방법 등이 있다. Table 2는 이러한 마이크로 비드의 기능성을 부여하여 각 용도에 맞게 활용한 대표적인 연구 기술을 보여주고 있다. 각 공정 기술은 마이크로 비드의 기능성을 활용하여 응용 디바이스 제조에 활용되었다.

**Table 2. Application technologies of using micro bead's property**

명칭	비드의 기계적 정밀 위치 주입 기술
적용 예시	<p>The diagram illustrates a two-step sorting process. In the first step, labeled '1차 Sorting', a tip is positioned above a yellow bead on a metal surface. An arrow indicates the tip's movement. In the second step, labeled '2차 Sorting', the tip has moved to the right, and the bead is shown being released. The text 'Tip 이동' (Tip movement) is between the two steps, and '자유낙하' (Free fall) is near the second step. Below the diagram are two photographs. The left one shows a computer monitor with a blue interface and the text '광학측정장치를 통한 비드 토출 공정 확인' (Confirmation of bead discharge process through optical measurement device). The right one shows a physical experimental setup with a microscope and a '마이크로 팁' (Micro tip) and '광학측정장치' (Optical measurement device) labeled.</p>
특징	<p>- 마이크로 사이즈 팁을 활용하여 팁과 비드 사이에 전압 형성에 의한 비드 흡착과 위치로의 토출 공정을 진행함.</p>



명칭	(전기전자)메탈 코팅 공정 기술[25]
적용 예시	
특징	- 마이크로 비드 외부에 금 나노 입자를 코팅하여 금 입자가 항체 부착용으로 활용됨
명칭	(바이오)검출체 흡착 기술[26]
적용 예시	
특징	- 마이크로 싱글 비드와 마이크로 전극을 연결하여 비드에 결합되는 biotin과 streptavidin에 의한 전기화학적 신호를 검출하는 방식임

## 2. 마이크로 비드 응용 기술(토출/유도에 의한 배열공정 기술)

마이크로 비드의 기능성과 관련된 연구 중 마이크로 비드 배열 기술은 마이크로 비드의 물리적 제어를 통한 기능성을 부여하는 공정 기술로 마이크로 사이즈 입자에 대한 정밀한 제어가 바탕이 된다. 또한, 마이크로 비드를 활용하는 응용 디바이스 제조 공정에 배열 공정 기술을 적용할 경우, 마이크로 비드의 기능성을 기반으로 배열 형상에 의한 응용 디바이스 특성 제어 및 기능향상이 가능하다. 이러한 마이크로 비드 입자를 제어하여 임의의 형상을 제작하는 방식으로 근래 연구가 진행되고 있는 대표적인 기술은 개별 입자를 토출하여 형상을 제작하는 방식과 입자를 유체 흐름으로 제어하거나 분리하는 방식이다. 두 가지의 마이크로 입자를 배열하는 방식은 각기 다른 특성을 가지고 있으며 이에 적용되는 제어 기술 및 공정 기술에 의해 적용되는 디바이스가 결정된다.

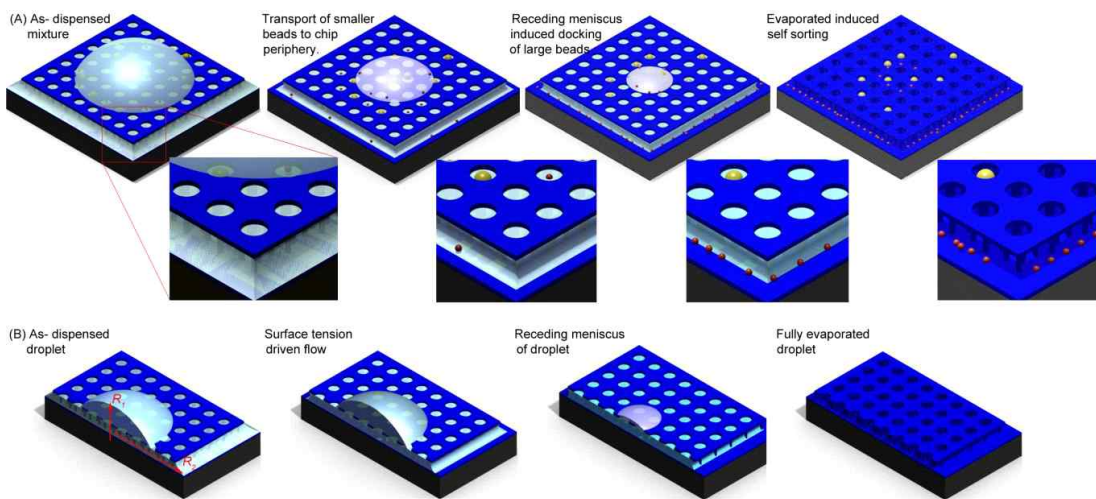
마이크로 입자의 유도 배열 공정 기술의 경우, microfluidic 기술을 기반으로 유체 내 입자의 흐름을 정밀하게 제어하여 입자의 배열 형상을 얻는 방식으로 근래 microfluidic 방식과 입자제어 기술을 혼합하여 생성되는 전기장 혹은 표면파를 통해 입자의 배열을 제어한다. 이 방식은 연속 흐름이 발생하는 유체 내 입자의 제어가 가장 중요한 기술로 DEP (dielectrophoresis) 혹은 Saw (surface acoustic wave) 방식이 마이크로 입자의 유도 배열 공정으로 가장 널리 사용되고 있다. 마이크로 입자에 대한 토출 및 배열 공정 기술은 개별 입자를 분리하여 토출하는 방식으로 입자의 분리 공정과 개별 토출 공정이 배열 공정 기술 상에서 중요한 공정 요소이다. 이러한 방식에서 주로 적용이 되고 있는 공정 방식은 정전기력 기반 입자 토출 형태 혹은 입자의 물리적인 주입 방식이며 이와 관련한 연구가 진행되었고 응용 공정에 적용되고 있다.

### 1) 마이크로 비드 유도에 의한 배열 방식

마이크로 비드에 대한 물리적인 배열 기술은 비드 입자를 외부에서 작용하는 힘으로 균일하게 배열하는 기술로 미세 유체 기술을 기반으로 다양한 형태의 입자 제어 기술이 적용되며 유체 기반의 바이오 센서 등이 이를 활용하는 대표적

인 응용 디바이스이다. Fig 8과 같이 마이크로 사이즈 기판에 트랩 홀을 갖는 대량 배열 및 분류 방식 또한 마이크로 비드 입자 배열 기술의 한 종류이다[27].

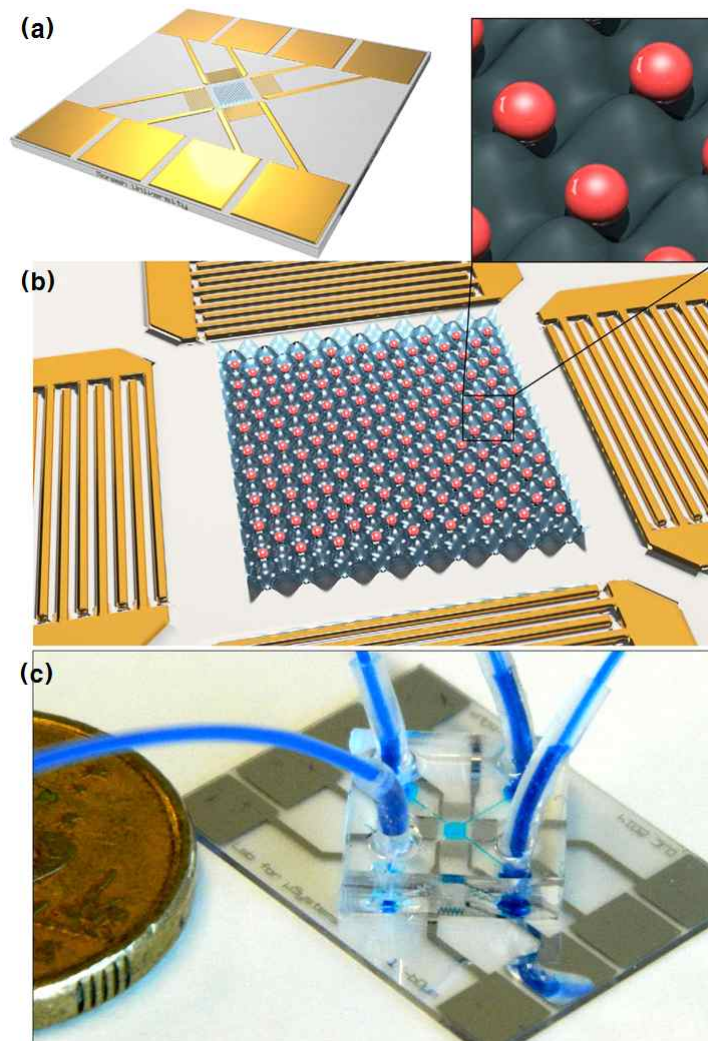
그림 상의 기판은 실리콘 기반 마이크로 머시닝 공정을 통해 대량의 마이크로 트랩 홀이 제작된 기판으로 0.2 에서 20  $\mu\text{m}$  사이의 비드가 주입되고 상대적으로 작은 사이즈의 비드는 기판 밖으로 분출되며 큰 사이즈의 비드는 기판 내에 머물게 되어 마이크로 사이즈 비드의 크기 별 분류 기술로써 효과적으로 동작이 가능한 특징이 있다.



**Fig 8. Method for sorting micro bead in substrate having micro sized trap holes[27].**

마이크로 입자 제어에 대한 유체 시스템의 활용 예로 유체 내 입자의 정밀 배열 제어 시스템을 구성하여 여러 방향에서 전파되는 표면파의 파장에 의해 생성되는 정상파(standing wave)로 인한 입자 배열을 유도하는 방식이 연구가 진행되었다[28]. Fig 9와 같이 시스템의 각 네 방향으로 표면파 생성 패턴이 위치하며 시스템으로 입자를 포함한 유체가 연속적으로 공급되고 공급되는 유체 내 입자는 각 네 방향으로 전파되는 표면파에 의해 일정한 간격으로 배열이 이루어진다. 이러한 배열 방식은 표면파 제어를 통해 대량 입자의 배열이 가능한 장점을 가지고 있으나 시스템 구성 시 표면파 생성을 위한 패턴 제작에 여러단계의 공정작업이 필요하며 제작된 패턴의 물리적 특성에 따라 동일 기판 상의 표면파의

파장이 균일하지 못하다는 단점을 가지고 있다. 그 결과, 표면파의 파장 변화에 의해 입자 배열의 균일성이 떨어지게 된다.



**Fig 9. Bead align system using surface acoustic wave[28].** (a) Image of micro bead align system, (b) Configuration of bead align and acoustic wave generation system, (c) Micro bead align system based on microfluidic method.

2) 마이크로 비드 토출에 의한 배열 방식

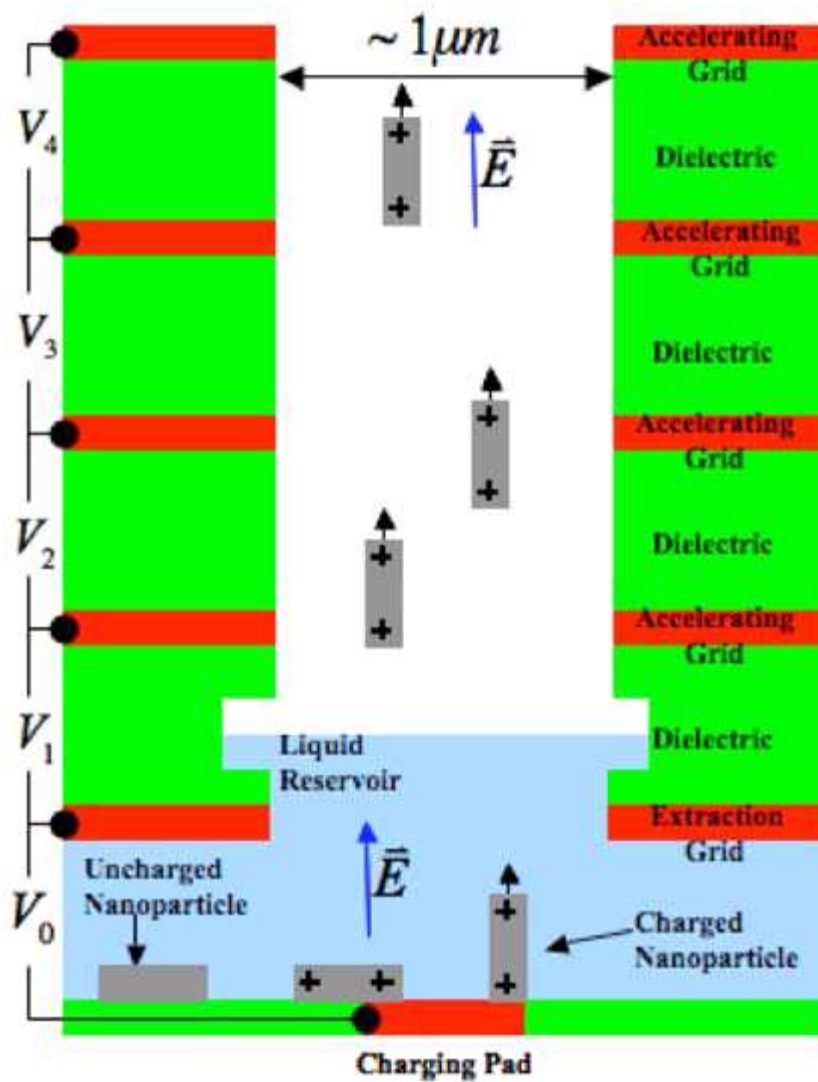


Fig 10. Cross-section of nano field extraction thruster system[29].

최근 MEMS(micro-electromechanical systems) 기반의 나노 입자에 대한 유사한 분출 시스템에 대한 연구가 진행되었다[29]. Fig 10은 이러한 나노 입자 분출 시스템에 대한 개념도로 입자에 대한 토출을 위해서 헤드 형태로 시스템을 구성하였으며 헤드 내부 나노 입자의 혼합 용액을 저장하기 위한 리저버와 리저버 상부에 연속적으로 전극과 유전체를 쌓아 올린 형태로 구성되었다. 시스템의 구



동은 나노 입자 토출을 위해 설치된 각 전극에 전위차를 가하여 발생하는 전기장에 의해 나노입자의 유체 상에서의 분리가 이루어지고 상부 전극의 전위차에 의해 토출이 발생하는 과정으로 진행된다. 이러한 나노 입자에 대한 토출 시스템은 본래 초소형 우주선에 대한 새로운 형태의 분사엔진을 염두에 두고 시스템 연구가 진행되었고 나노입자의 토출은 추진력을 얻기 위한 형태로 개발이 진행되어 실제 연구 내에서 진행한 토출 테스트에서도 나노 입자에 대한 개별 제어는 불가하였고 나노입자의 대량 토출이 가능한 특징을 가지고 있다.

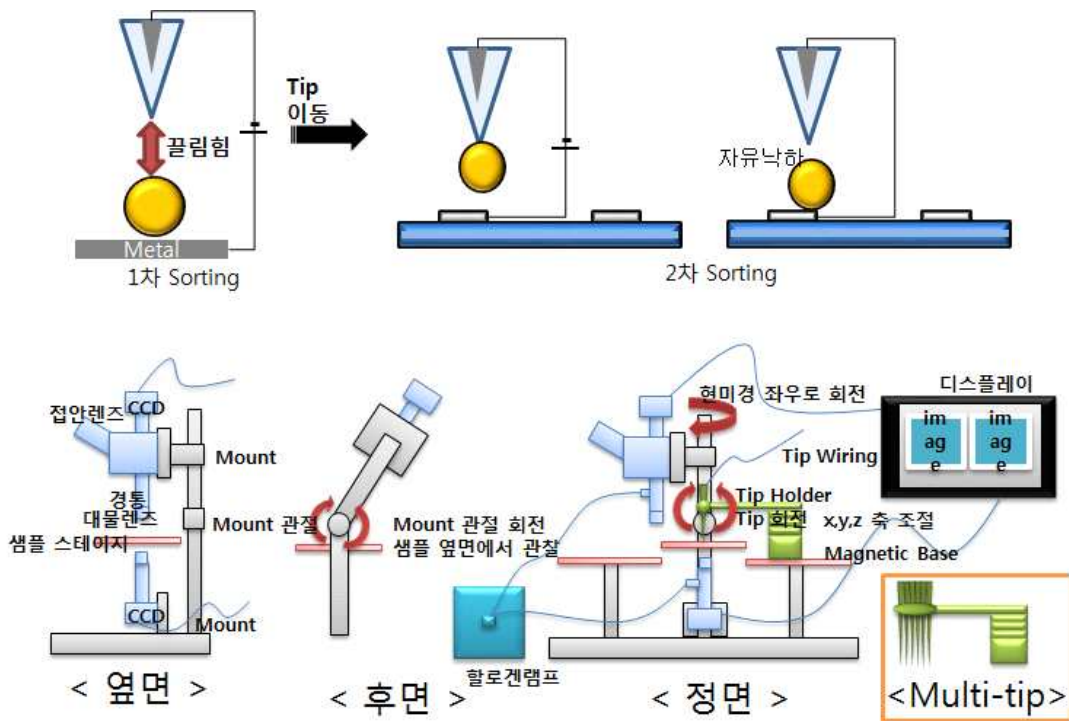


Fig 11. Bead array positioning technology based on micro tip.

최근 마이크로 비드의 정밀 위치에 대한 토출공정으로 나노 팁 기술과 미세 홀 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 마이크로 팁 및 홀컵 공정 기술은 마이크로 비드를 기반으로 하는 전자종이 디스플레이 제조 공정 내 마이크로 비드의 정밀 위치 주입 공정으로 선행연구가 진행되었던 기술로 각 공정 별 특징을 가지고 있다. 나노 팁 기술은 Fig 11과 같이 수 $\mu$ m 사이즈의 팁에 미세전압을 인가하여 비드를 팁 끝에 고정시키고 이를 주입하고자 하는 피 주입체에 자유 하강시켜

주입하는 기술이다. 정밀광학장치를 이용하여 주입하고자 하는 위치에 셋팅 후, 인가한 미세전압을 제거하여 비드 자체의 무게에 의한 주입이 진행된다. 나노 팁 방식은 주입하고자 하는 면적에 비례하여 나노 팁 배열을 증가시켜야 하고 주입 위치정밀도가 광학장치에 의해 결정되는 단점이 있어 비드의 대량 주입방식으로 는 한계가 있었다.

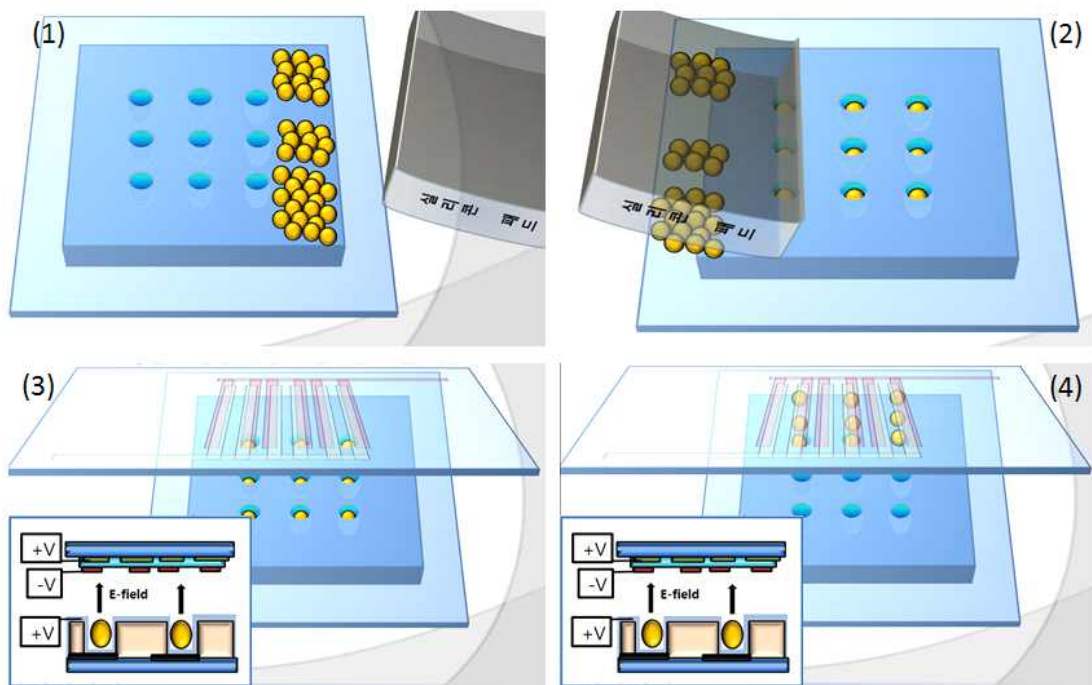


Fig 12. Bead array positioning technology based on micro hole-cup.

Fig 12는 마이크로 홀컵을 이용한 비드의 배열 공정 기술로 미세 홀 주입방식은 피 주입 면적과 동일한 면적의 기판 내 미세 홀 배열에 비드를 주입하고 미세 홀 배열 기판을 피 주입체와 동일한 면에 위치시켜 주입하는 방식이다. 주입하고자 하는 면적이 대면적인 경우에도 면적에 해당하는 주입체 제작이 가능하여 나노 팁 방식보다 대면적 주입방식으로 효율적이다. 그러나 마이크로 비드의 피 주입체 전체에 대한 균일한 주입공정 제어가 어렵고 주입공정 단계에서 사용하는 스퀴지가 마이크로 비드에 데미지를 입힐 수 있어 공정 후 기능성에 문제가 발생하는 단점이 있다.

입자 유도 형태와 입자 토출 형태의 공정 기술을 적용하는 각 마이크로 비드 정밀 배열 기술은 Table 3과 같이 배열 공정 균일성과 공정 후 기능성, 대량 주입 특성에 대해 각기 다른 장단점을 가지고 있다. 이를 기반으로 마이크로 비드에 대한 개별 토출 가능성과 토출 위치정밀도를 기준으로 기술에 대한 평가 시, 개별 토출 균일성 측면에서는 마이크로 팁 기반 공정 기술이 가장 안정적이며 위치 정밀도에서는 마이크로 유체 시스템이 가장 안정적인 공정 기술로 활용성이 예상되었다.

마이크로 비드의 유동에 의한 배열 공정 기술은 유체를 기반으로 한 micro fluidic 기반의 센서 디바이스 혹은 입자 분류 디바이스 형태에 가장 효율적으로 활용이 가능하다. 반면에 마이크로 비드의 토출에 의한 배열 공정 기술은 입자 형상을 외부에서 제어하는 방식이라 입자를 사용하는 디바이스의 제조 공정의 부분 기술로써 활용성을 갖는다. 또한, 마이크로 비드 입자 토출 기반 기술은 비드 입자의 개별 토출과 입의 형상 제작에 효율적으로 대응이 가능하여 본 마이크로 비드에 대한 응용 디바이스 연구에 적합한 공정 기술로써 연구 필요성을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 마이크로 비드에 대한 제어 공정 기술로써 마이크로 비드의 정밀 토출 공정 기술을 기반으로 마이크로 비드 입자에 대한 공정 기술 연구와 이를 바탕으로 응용 디바이스 적용 연구를 진행하였다.

**Table 3. Comparison with utilization of micro bead align technologies**

공정 기술		배열 공정 균일성	공정 후 기능성	대량 주입 특성	활용 형태
마이크로 비드 유도 방식	마이크로 비드 분류 배열 시스템	기관에 의한 배열 공정 가능	정상동작 가능	대량 주입 공정 가능	입자 분류 시스템
	마이크로 유체 시스템	개별 배열 제어 불가	정상동작 가능	대량 주입 공정 가능	유체 기반 센서
마이크로 비드 토출	나노입자 토출	개별 토출 및 배열	입자의 고속	대량 주입 공정 가능	소형 입자 분사 기술



방식	시스템	제어 불가	토출로 인한 데미지 발생		
	마이크로 팁 기반	광학정밀도에 의해 균일성 결정	정상동작 가능	공정 시간 요구됨	입자 제어 디바이스
	마이크로 홀 컵 기반	낮은 배열 균일성	비드 데미지 발생 가능성 존재	대량 주입 공정 가능	입자 제어 디바이스
응용 디바이스 공정 시 최소 필요 수준		1회 토출 당 1개	정상동작 가능	응용 공정에 따라 선택적	센서, 구동 디바이스

### 3. 정전기력 기반 토출 기술

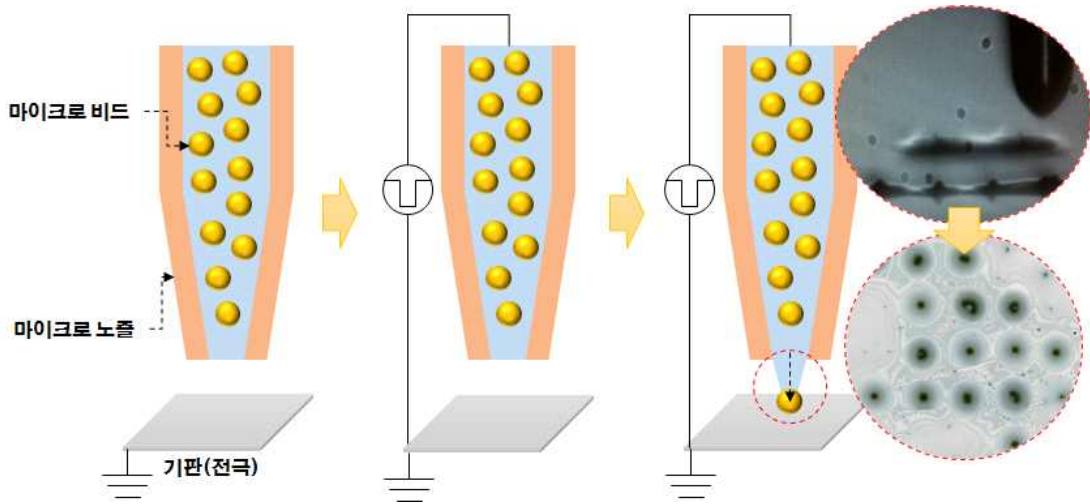


Fig 13. Process of ejecting micro bead based on electrostatic force.

정전기력 기반의 토출 공정은 헤드 내 전극 간에 형성되는 전기장의 흐름을 이용하여 미세액적을 정밀하게 토출하는 공정 기술로 Fig 13과 같이 기존 미세 패턴 용도로 활용되었던 나노/마이크로 패터닝 기술을 응용하여 혼합용액 내 비드의 정밀 토출을 유도하는 방식의 공정 기술이다. 혼합용액으로 존재하는 마이크로 비드와 용액 소재의 토출을 전기장을 통해 유도하여 정량 토출이 가능한 공정 특성을 이용, 정량 토출에 의한 비드 토출을 유도하는 특징을 가지고 있다. 비드는 헤드 내 용액과 분산상태로 존재하며 전압, 헤드 특성, 용액특성 등에 따라 비드의 토출 특성이 결정된다.

#### 1) 시스템 구성

마이크로 비드에 대한 정밀 토출, 배열 공정을 위한 정전기력 기반 공정 기술에서는 기존 정전기력 기반 토출 공정 기술에서 적용되는 헤드 및 제어 시스템에 대한 적용이 필요하며 이를 바탕으로 마이크로 비드에도 공정 적용이 가하도록 설정이 필요하다. 정전기력 기반 마이크로 비드의 정밀 토출 공정 기술 연구를 위해 정전기력 기반 토출 공정 기술 기반 공정 시스템을 다음과 같이 구성하

였다. Fig 14에서와 같이 마이크로 비드 토출 공정용 시스템은 헤드 토출부, 소재 공급부, 광학 모니터링부, 전압공급부로 구성되어 있으며 헤드에 공급된 소재 및 전압에 의해 용액/비드 토출 공정이 진행되고 이를 정밀광학장치를 통해 확인이 가능하도록 설정하였다[30].

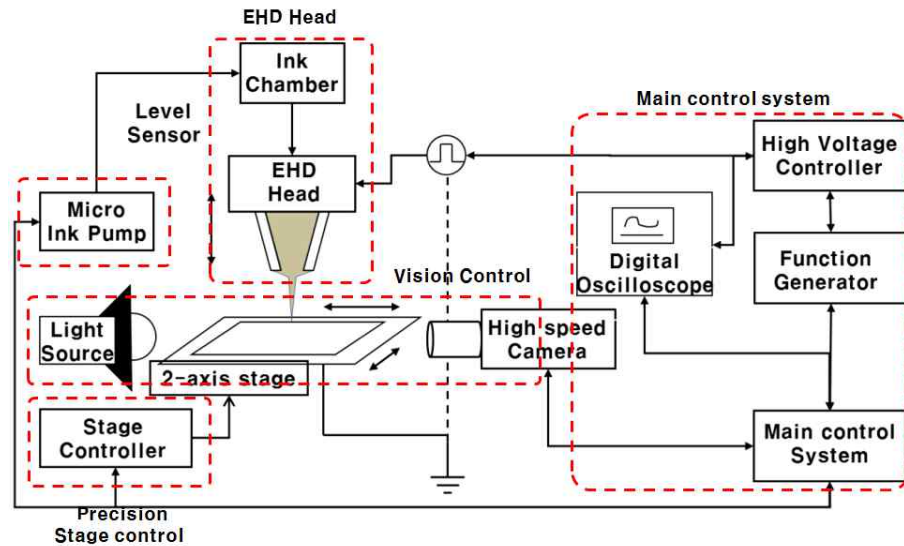


Fig 14. Configuration of ejecting system based on electrostatic force[30].

마이크로 비드 공정용 헤드 내 전극에 전압 인가가 가능한 전압 공급 시스템은 고전압의 고속 스위칭이 가능하고, 원하는 형태로 고전압 파형을 생성 및 헤드에 인가가 가능하다. 그리고 마이크로 비드 주입 공정용 전압 공급시스템은 파형 발생기를 통한 정밀 제어를 통한 파형의 출력펄스를 고전압 증폭모듈의 입력으로 전달하고 이를 원하는 형태로 증폭하여 헤드의 전극으로 공급할 수 있도록 구성하였다.

## 2) 공정 기술의 이론적 배경

정전기력을 활용한 마이크로 비드의 정밀 토출을 위해서는 정전기력 기반 토출 시스템내의 전압 인가에 따라 형성되는 전기장에 대한 영향과 마이크로 비드의 토출에 영향을 미치는 다양한 변수에 대한 고려가 필요하다. 공정 기술상에서 혼

합용액의 점도에 따른 혼합특성 및 토출 특성과 전압인가에 따른 비드의 전기장 영향 및 토출에 필요한 힘을 이론적 정리를 통해 확인하였다.

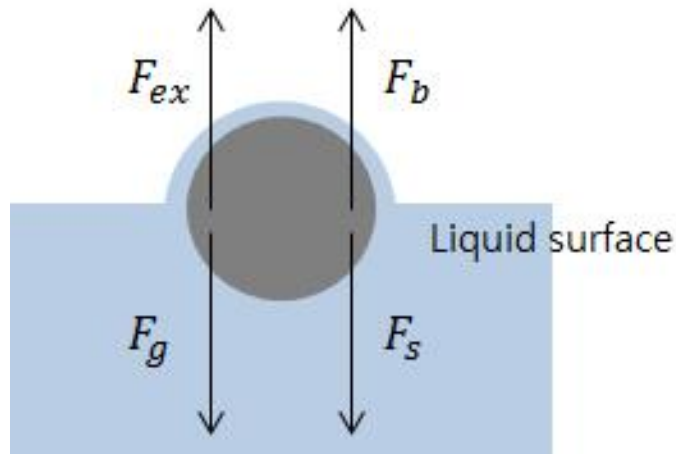


Fig 15. Energy equation of micro bead in liquid.

기존 정전기력 기반 토출 공정 기술은 미세 액적의 토출을 통해 마이크로급 혹은 더 작은 나노급 패턴을 형성하는 기술로 알려져 있다. 이러한 공정 기술은 고전압 인가를 통해 수pl이하 미세 액적 분리 및 패턴용 헤드 노즐을 통한 액적의 연속적인 토출과정과 이러한 과정을 거쳐 패턴을 형성한다. 이때 인가되는 전압의 형태에 따라 헤드 노즐에서의 메니스커스를 형성하고 미세액적 분리, 토출과 메니스커스 형상 복원과정이 반복적으로 형성되며 공정 변수로 전압이 미세액적의 안정적인 토출에 영향을 미치게 된다. 이러한 정전기력 토출 기술에서는 노즐 상의 맺힌 미세한 액적을 인가되는 전압의 제어를 통하여 초기 메니스커스 형성을 유도한다[31].

$$F_g - F_{st} + F_e = 0 \quad (1)$$

Fig 15와 같이 노즐과 잉크액적 간의 표면장력에너지  $F_{st}$ , 미세 액적무게에 대한 중력에너지  $F_g$ , 정전기장에 의한 유체에너지  $F_e$  간의 평형상태를 통하여 미세액적의 안정 상태를 유지한다. 이는 수식 (1)에서와 같이 미세액적의 중력에너지

지 및 정전기력 에너지와 노즐표면과 미세액적간의 표면장력에너지의 평형상태가 미세액적의 안정 상태를 위한 조건임을 보여주고 있다.

$$E_{tc} = (2\gamma\cos\alpha/\epsilon_0 R)^{1/2} \quad (2)$$

초기 안정된 액적형성 상태에서 토출에너지를 추가 인가하여 액적의 주기적인 불안정상태를 통한 미세액적의 토출을 이루는 과정을 통해 정전기력 토출 공정이 진행된다. 위의 수식 (2)에서 액체의 표면장력  $\gamma$ 과 노즐 상의 미세액적 형성 각  $\alpha$ , 진공 상의 유전율 $\epsilon_0$  및 노즐 토출구의 반경 $R$ 로 이러한 미세액적의 에너지 평형상태에서의 원뿔 형태와 유사한 초기 토출 상태로 형성되며 이러한 형태를 Taylor Cone이라 명칭 하였다. 이러한 초기 Taylor Cone 상태에서 전기장의 세기 $E_{tc}$ 는 Cone의 중심에서 가장 증가하며 액적의 표면장력 에너지가 클수록 이에 대한 전기장의 세기 또한 증가한다. 또한 인가되는 전기장은 유전율과 노즐의 반경과도 관련이 있다.

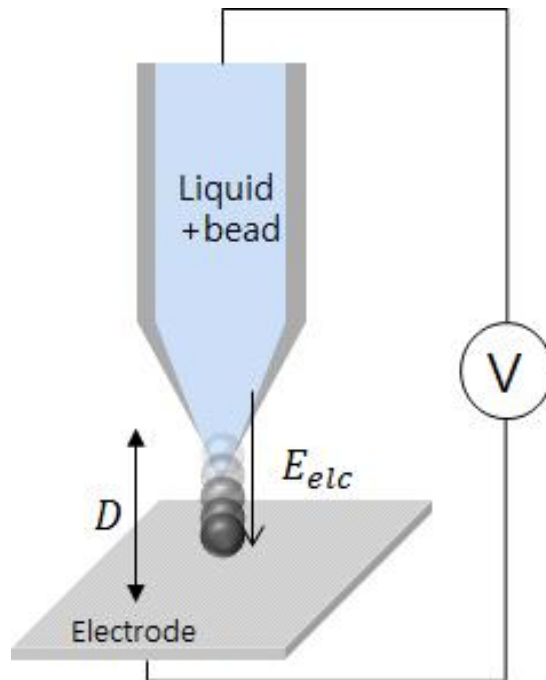


Fig 16. Electrostatic force effect in micro bead ejecting system.

N.J.Felici에 의해 정전기력에 의해 인가되는 전하량에 대해 분석 모델[32]이 제시되었고 이를 바탕으로 Fig 16와 같이 마이크로 입자에 대한 전기장 인가 모델은 기본적으로 식의 전극간의 전위차  $V$  및 전극간 거리  $D$ 에 의해 정리할 수 있다.

$$E_{bg} = V/D \quad (3)$$

앞서 유체 상에 분산되어 있는 마이크로 비드에 대한 에너지 평형 상태에 대한 식으로 정리를 하였고 각 에너지에 대한 특징적인 부분을 서술하였다. 그러나 마이크로 비드에 대한 정상적인 토출을 위해서는 인가전압을 통해 에너지에 대한 평형상태를 깨는 비드 토출이 가능한 전기장 형성이 필요하다. 마이크로 비드의 토출을 위한 힘  $F_{cx}$ 를 비드 표면에 미치는 전기장  $E_{cx}$ 와 구형 비드의 전하량  $q_{sph}$ 으로 정리하면 다음과 같다. 이때 구형 비드의 표면에 형성되는 전하량은 전극 간에 형성되는 전기장과 전극-비드 간의 거리에 의해 결정되며, 식(4)과 같이 정리된다.

$$q_{sph} \approx 2\pi^2\epsilon E_{bg} A_c (\xi_{sph}) \quad (4)$$

$A_c$  = integrated charging field-focusing factor

$\xi_{sph}$  = Ratio of spherical particle diameter to electrode gap

이를 기반으로 하여 용액 내 마이크로 입자에 대한 정전기력 인가량을 다음과 같이 정리하였다.

$$E_{ex,sph,thresh} \approx \frac{3\gamma(r + \delta_l) + g[(r + \delta_l)^3 \rho_l + 2r^3(\rho - \rho_l)]}{\pi^2 r^2 \epsilon_l E_{bg}} \quad (5)$$

용액 내 분산되어 있는 마이크로 입자에 미치는 전기장은 각 전극의 거리와 마이크로 입자에 대한 물리적 특성(반경  $r$ , 밀도  $\rho$ )과 용액의 물리적, 화학적 특성(유

전율 $\epsilon_l$ , 밀도 $\rho_l$ , 표면장력 $\gamma$ , 두께 $\delta_l$ )를 바탕으로 정리될 수 있다.

#### 4. 마이크로 니들 기반 토출 기술

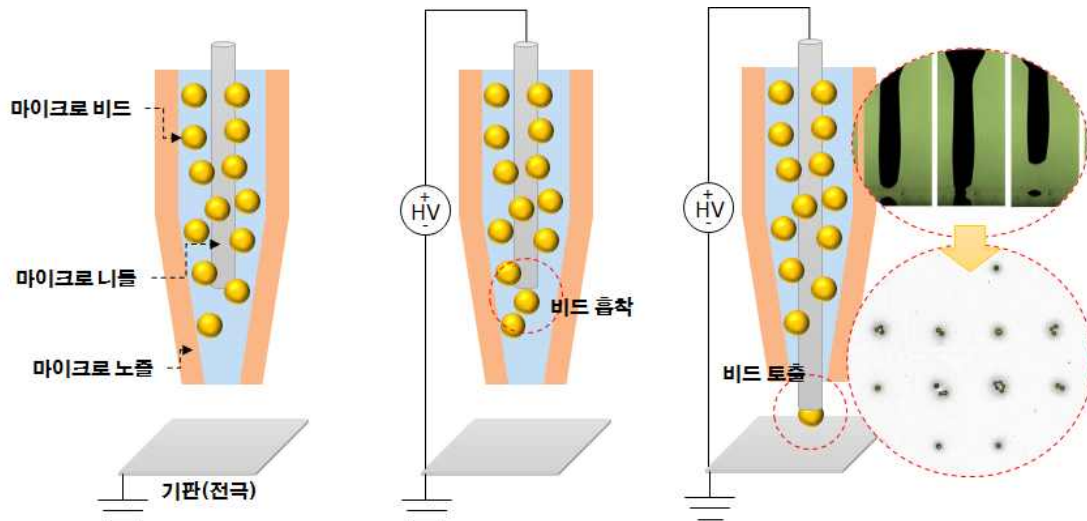


Fig 17. Process of ejecting micro bead based on micro needle.

마이크로 니들 기반의 마이크로 비드 토출 기술은 마이크로 사이즈의 니들의 연속적인 상하운동과 니들을 전극으로 사용하여 전압 인가에 따른 비드 이동, 흡착 공정을 결합한 형태의 토출 공정 기술이다. Fig 17과 같이 마이크로 니들 기반 마이크로 비드의 흡착, 토출 공정은 시스템 내 토출용 헤드로의 인가전압에 의해 생성되는 전기장으로 인한 마이크로 비드의 니들로 흡착, 토출 공정 과정이 가능한 특징을 가지고 있다. 이러한 니들 끝단에 비드의 일정한 흡착을 위해서는 용액 특성, 니들 특성, 전압 제어 특성 등의 연구가 필요하며 실제 시스템 구성 및 전용 헤드에 대한 제작이 필요하다.



1) 시스템 구성

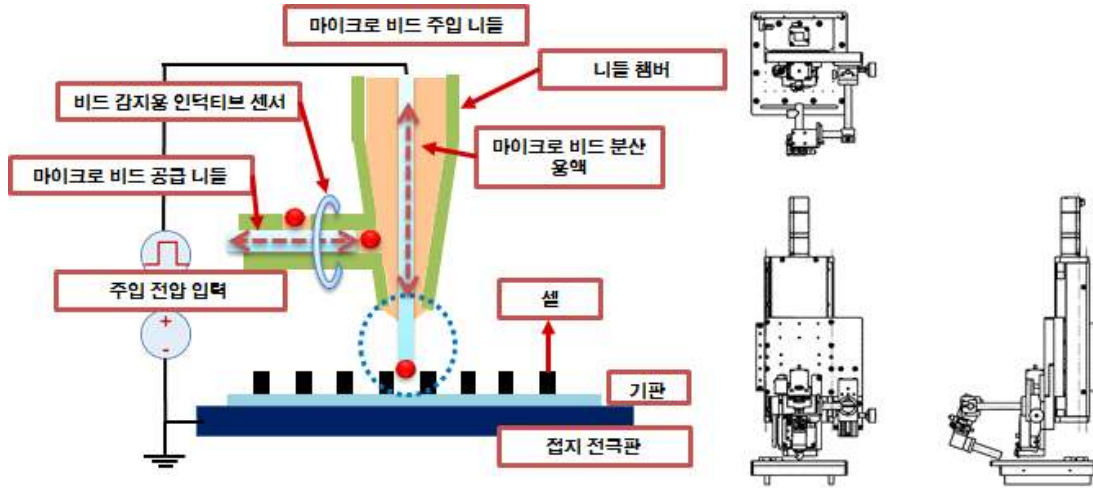


Fig 18. Configuration and design for micro needle type head.

마이크로 니들을 기반으로 마이크로 비드에 대한 공정을 진행하기 위해서는 일정한 속도와 이동 거리에 대한 정밀한 제어가 필요하며 챔버 형태로 마이크로 비드 혼합용액에 대한 일정한 유량 공급 및 제어가 필요하다. 마이크로 니들 기반 토출 공정을 위한 시스템은 Fig 18과 같이 마이크로 사이즈의 니들을 챔버 내에 삽입하여 니들의 왕복운동을 통해 주입하고자 하는 위치에 혼합형태의 용액을 주입하는 형태로 구성된다. 기존 정전기력 기반의 주입공정을 통해 미세액적의 분리 및 주입이 진행되는 데 반해 니들 타입 주입 기술은 마이크로 사이즈의 니들 팁에 맺히는 미세 용액을 분리하여 주입하는 공정이다. 이를 위해 분산 용액의 주입 및 정밀 공급이 가능하도록 마이크로 사이즈 니들을 적용하였다. 또한 정밀 왕복운동을 위해 수 마이크로급 정밀도를 갖는 위치 제어 모듈을 적용하여 미세 위치 제어가 가능하도록 구성하였다.

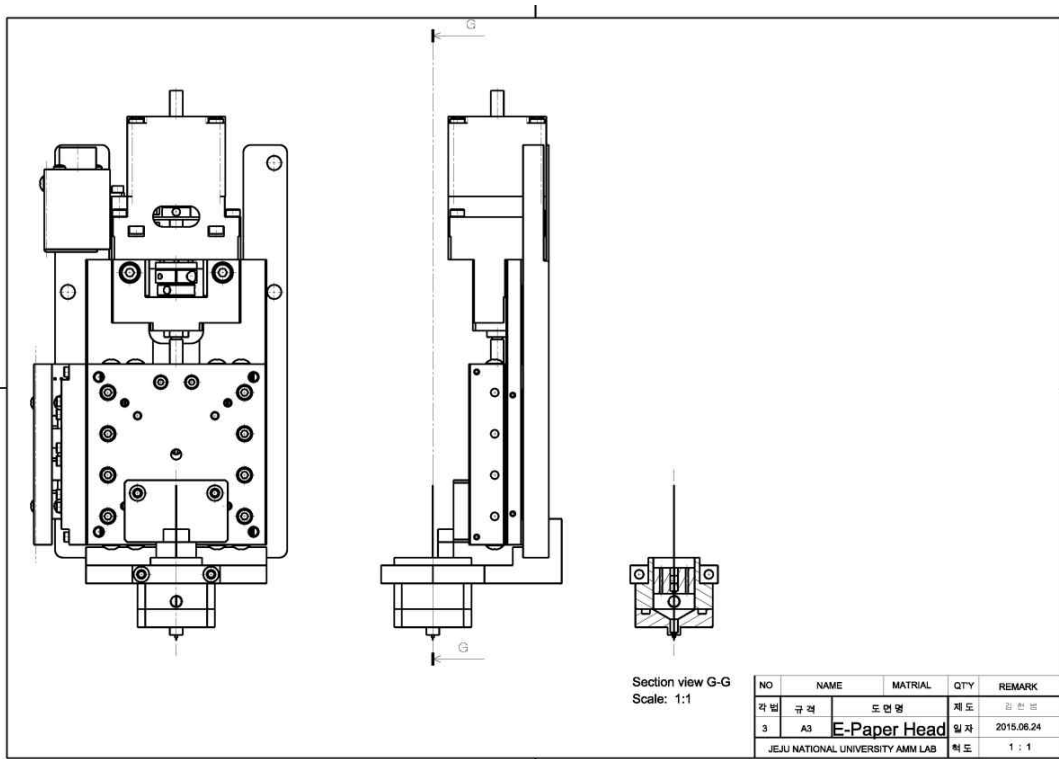


Fig 19. Design of micro needle type head.

Fig 19는 마이크로 니들 기반의 토출 공정을 위한 마이크로 비드 토출 공정용 헤드 시스템으로 상부 위치제어 시스템을 통한 정밀한 위치제어가 가능한 점이 특징이다. 또한, 헤드 시스템 내 상부와 하부가 분리되고 마이크로 니들이 상부와 연결되어 연속적인 상하운동이 가능하다. 마이크로 니들 기반 주입공정용 헤드 시스템에서 실시간 공정용 광학장치를 설치하고 니들 상하 이동에 의한 주입 공정을 확인하는 부분에 대한 보완점을 기반으로 설계 및 제작 작업을 진행하였다. 그리고 헤드 토출구와 가까운 위치에 실시간 헤드 내부를 확인할 수 있는 헤드 형태를 설계하였다. 내부를 확인할 수 있도록 투명 소재를 적용하여 헤드 내 니들에서 비드의 흡착, 주입 형상을 확인할 수 있도록 고려하여 설계를 진행하였다.

## 2) 공정 기술의 이론적 배경

마이크로 비드 배열 및 토출 공정을 위한 마이크로 니들 방식 헤드의 구조는 기본적으로 일정량의 마이크로 비드의 혼합 용액 소재를 포함하는 챔버와 챔버 내 마이크로 사이즈 니들로 구성되어 있다. 챔버 내 마이크로 니들의 상승 후 챔버 내 일정압력으로 비유동상태의 신축성 용액 일정량을 니들 끝단으로 분리하여 니들 하강 시, 이를 기판 상에 위치시키는 과정을 거치며 주입 공정이 이루어진다. 이를 통해 일정 미량의 용액 소재를 주입하고자 하는 위치에 마이크로급 위치 정밀도를 갖는 공정이 가능하며 이러한 공정을 통해 용액 내에 포함되어 있는 마이크로 비드의 토출 공정이 진행된다. 이는 마이크로 비드 정밀주입 공정 시, 드롭 사이즈를 결정하는 요인인 마이크로 니들의 직경 및 불활성 소재의 접촉면에 대한 표면장력 등의 요인을 제어하여 최적의 주입 및 드롭 사이즈를 제어할 수 있다.

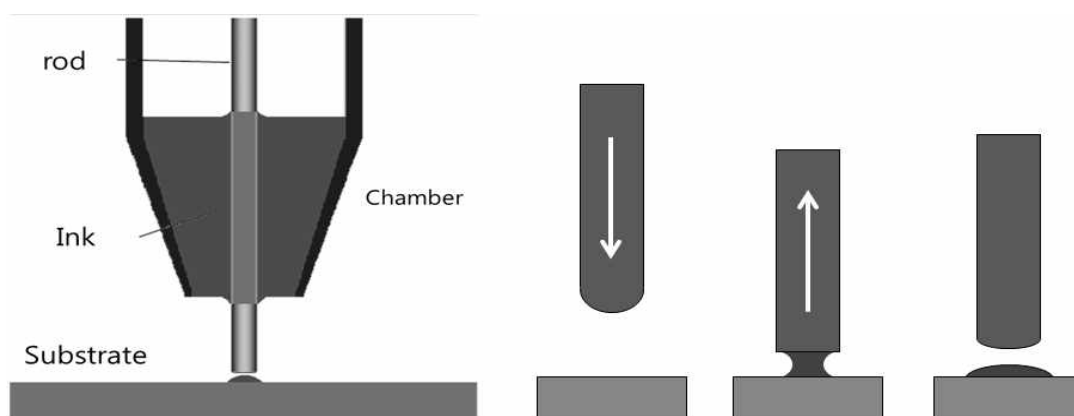


Fig 20. Configuration and process of micro needle type head.

Fig 20은 마이크로 니들 기반의 주입 공정을 위한 헤드의 기본적인 구성 및 공정 동작으로 챔버 내부에 존재하는 용액을 마이크로 니들을 통해 일정량 분리하여 기판상에 토출하는 방식으로 공정이 진행된다[33].

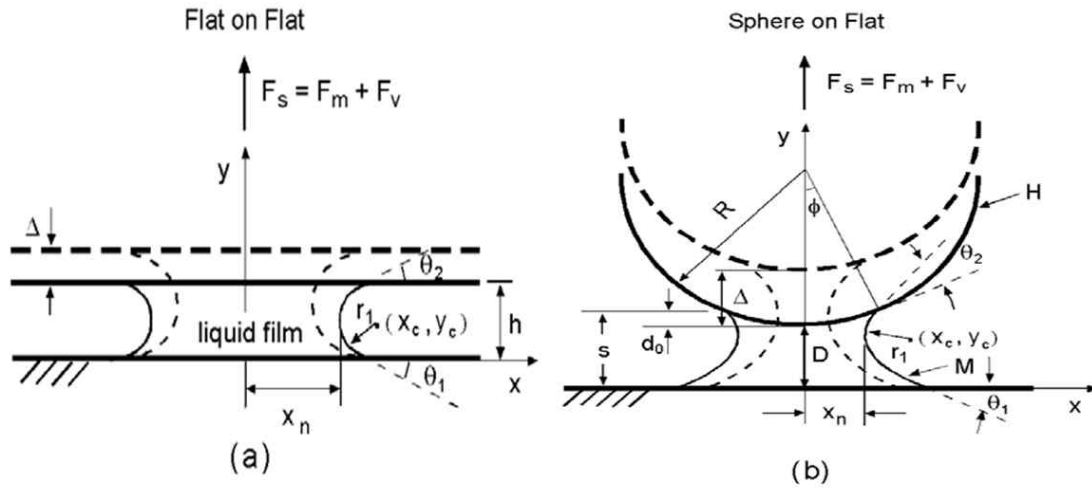


Fig 21. Meniscus state in accordance with needle tip surface[34]. (a) Flat surface, (b) Curved surface.

주입 공정 시 공정상에 작용하는 외부 힘  $F_s$ 은 수식 (6)과 같이 박막 표면과 마이크로 니들 표면에서 형성되는 메니스커스에 작용하는 메니스커스 힘  $F_m$ 과 소재특성에 의해 표면에 작용하는 점도 힘  $F_v$ 로 정리할 수 있다[34].

$$F_s = F_m + F_v \quad (6)$$

박막과 마이크로 니들 표면 사이에 메니스커스의 형태, 즉 두 표면을 분리할 때의 메니스커스의 점성력은 불활성 소재와 필름 간의 접착력과 관련이 있다. 또한 두 표면간의 접착력은 불활성 용액 소재의 특성 및 표면 상태에 따라 마찰력을 갖는다. 그리고 마이크로 니들 직경 면적의 형상에 따라 마이크로 니들의 운동에 의해 생성되는 메니스커스의 변화 형태가 나뉜다. 수식 (7)은 니들 운동에 따른 메니스커스 형성과 표면 사이에 작용하는 힘을 정리한 식으로 용액의 특성과 메니스커스 사이즈, 용액 부피에 따라 메니스커스 힘이 결정된다.

$$F_m = \frac{\pi x_n^2 \gamma (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)}{h} + 2\pi \gamma x_n \sin\theta_{1,2} \quad (7)$$

메니스커스 힘에 의한 메니스커스 면적은 주어진 조건(다양한 초기 액체 두께  $h$ , 접촉 각도  $\theta_{1,2}$ 와 지정된 분리 시간)상에서 메니스커스 전이에 의해 결정이 된다. 이들 표면에 맺힌 용액의 표면장력에 의해 맺힘 형상이 결정되고 박막 필름과 마이크로 니들의 각 평면에 형성되는 메니스커스 맺힘과 이를 분리하는 과정에서 발생하게 되는 메니스커스 각도에 의해 메니스커스 힘이 정리가 된다. 이에 대한 필름상의 토출사이즈를 제어하기 위해서는 용액 특성을 고려한 공정 변수에 대한 최적화가 필요하다.

$$F_v = \frac{3\pi\eta x_n^4}{4t_s} \left( \frac{1}{h_s^2} - \frac{1}{h_0^2} \right) \quad (8)$$

점도 힘의 경우, 두 표면에 맺힌 점도를 갖는 용액이 짧은 순간의 분리현상 때 발생하며 초기 및 분리상태에서의 두 표면사이 거리  $h_s$ 와 분리시간  $t_s$ 에 따른 식 (8)으로 정리하였다. 이때, 표면에서의 분리현상이 일어나는 시점에서의 사이 거리  $h_0$ 와 용액의 분리가 일어난 시점의 거리  $h_s$ 의 차이 및 용액 분리가 일어난 시점에서의 시간  $t_s$ 는 용액의 특성에 의해 영향을 받는다. 또한, 표면 사이 액적 분리공정에서 결정되는 토출 사이즈는 마이크로 니들 사이즈 및 신축성 용액의 표면 특성(표면장력  $\gamma$ , 점도  $\eta$ , 비중 등)에 의해 결정된다.

## 5. 마이크로 캐필러리 기반 비드 토출 기술

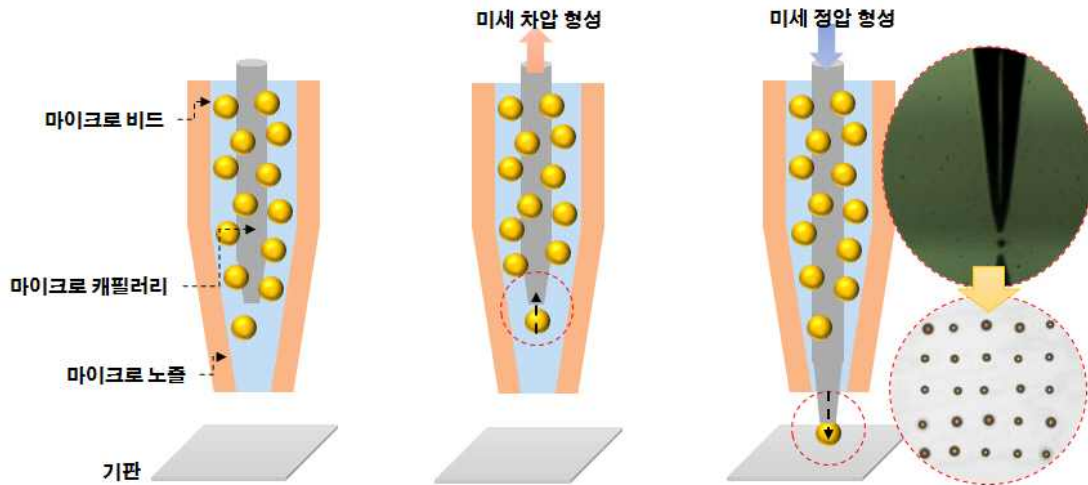


Fig 22. Process of ejecting micro bead based on micro capillary.

마이크로 캐필러리 기반의 마이크로 비드 토출 공정 기술은 앞서 마이크로 니들 기반 토출 공정 기술과 기본 토출 공정 형태는 유사하지만 캐필러리를 사용하는 공정에서 마이크로 비드의 흡착 단계에 영향을 미치는 공정 요소인 공압 제어에 의해 비드의 흡착과 토출 공정이 진행된다는 차이점을 가지고 있다. 따라서 정밀 공압 제어를 위한 별도의 공압제어모듈이 시스템 내 존재하며 마이크로 비드의 흡착과 토출에 대한 공압제어 공정변수가 존재하게 된다. 이러한 마이크로 캐필러리 기반의 마이크로 비드에 대한 토출 공정 과정은 Fig 22와 같이 헤드 내 혼합용액으로 존재하는 비드를 캐필러리의 정밀공압제어를 통해 개별 흡착과 토출을 진행하고 정밀 스테이지의 상하운동을 통해 토출하고자 하는 위치로 토출하게 된다.

### 1) 시스템 구성

마이크로 캐필러리 기반 토출 공정 기술은 정밀 공압 제어를 바탕으로 마이크로 비드의 흡착 및 토출이 이루어지는 방식으로 헤드 설계 시에도 이러한 공압 제어에 대한 기술이 적용되어야 한다. 이를 기반으로 헤드 내 비드 혼합용액이

일정량 주입되고 공압을 통해 챔버 내에서 일정하게 유지된다. 이를 위해 마이크로 사이즈의 직경을 갖는 마이크로 비드 토출용 헤드 및 시스템을 구성하여 정밀 토출 공정을 위한 공정 구성을 진행하였다. Fig 23은 마이크로 캐필러리 기반의 마이크로 비드 토출 공정용 헤드에 대한 구성도로 마이크로 사이즈의 비드에 대한 개별 주입 및 정밀 주입 공정을 위해 마이크로 직경을 갖는 마이크로 캐필러리 기반 주입용 헤드에 대한 설계를 진행하였다. 5 ~ 15  $\mu\text{m}$  급 직경의 마이크로 비드에 대한 개별 주입을 위해 마이크로 캐필러리 고정 가능한 리저버부 및 챔버부로 구성하고 리저버 및 챔버 외부에 공압 제어 장치와 연결할 수 있도록 피팅 연결부를 추가하여 챔버, 리저버 내부 압력 제어가 가능하도록 하였다.

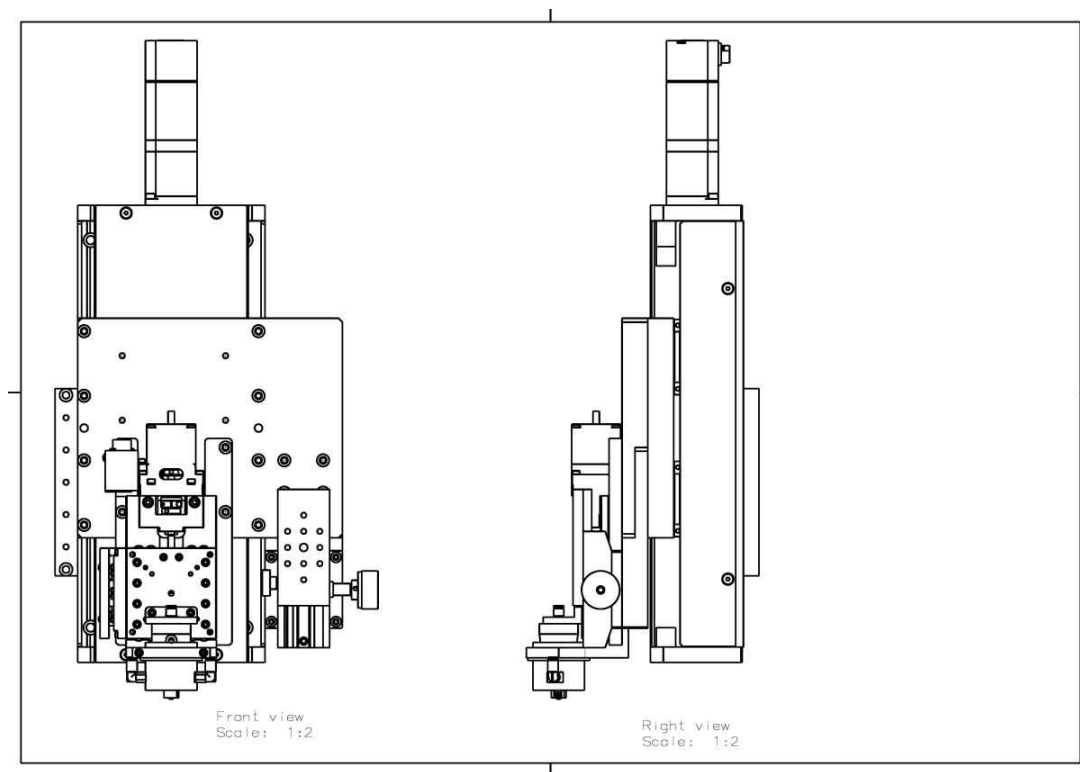


Fig 23. Design for micro-capillary type head.

마이크로 캐필러리 직경 및 챔버 내 유동을 고려하여 챔버 내부 구조 및 내부 시안성을 위한 투명 소재(글래스, 아크릴)를 헤드 외부에 부착하는 형태로 설계를 진행하였다. 그리고 리저버 및 챔버 외부에 공압 제어 장치와 연결할 수 있도록



록 피팅 연결부를 추가하여 챔버, 리저버 내부 압력 제어가 가능하도록 하였다. 또한 Fig 24과 같이 마이크로 캐필러리 기반 주입 공정용 헤드에 대한 모션 제어 및 공압 제어를 통해서 위치 이동 및 정밀 주입 공정이 가능한 헤드 및 시스템을 구성하고 이를 마이크로 캐필러리 내부의 전극 추가 및 전극 전압 인가를 통하여 비드 주입 공정에 활용하였다.

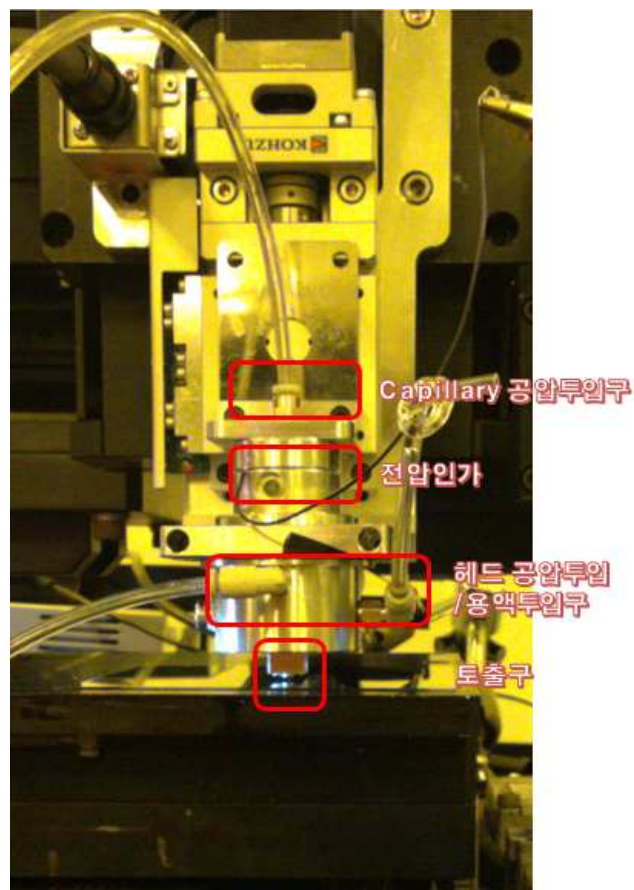


Fig 24. Configuration of micro-capillary type head.

## 2) 공정 구성

마이크로 비드의 정밀 주입을 위해 마이크로 사이즈의 직경을 갖는 캐필러리를 적용하여 마이크로 비드의 흡착 및 위치 토출 공정에 활용하였다. 마이크로 비드

흡착 공정을 위해 공압 제어 시스템을 리저버 및 챔버 내부와 연결하여 미세 차압을 설정하였고 챔버와 리저버 내 형성된 미세 차압을 통한 마이크로 비드 혼합 용액의 일정 유량 제어 및 캐필러리 토출구로의 비드 흡착 공정이 가능한 구조로 시스템을 구성하였다. Table 4는 마이크로 캐필러리 기반의 비드 토출 시스템의 공정에 적용한 마이크로 캐필러리 및 기타 설정 값으로 비드 사이즈 및 선행 연구를 기반으로 도출된 최적 공정 파라미터를 기반으로 공정이 진행되었다.

Table 4. Setup parameters for micro bead ejecting process

	설정	비고
사용된 모세관 직경	10~15 $\mu\text{m}$	$\leq$ 마이크로 비드 직경
적용 챔버 내부 용량	5ml	-
적용 압력(챔버)	0 ~ -0.5 (kPa)	공정 파라미터 적용
적용 압력(리저버)	0 ~ -1 (kPa)	공정 파라미터 적용

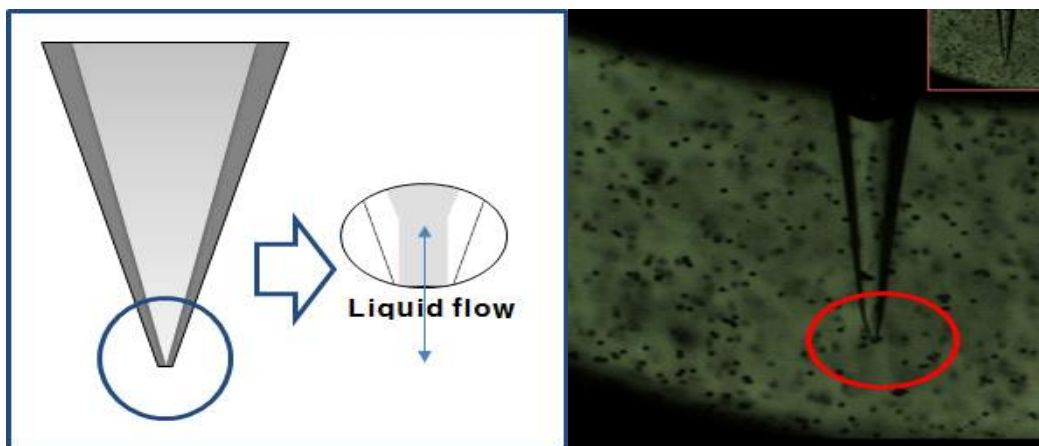


Fig 25. Single micro bead capture by internal capillary pressure.

마이크로 캐필러리 내 공압을 적용하는 경우, 캐필러리 내부 압력이 외부보다 낮아지게 되고 압력 차에 의해 외부 혼합용액이 압력 차에 비례하여 캐필러리

내부로 유동이 발생하게 된다. 이때, 혼합용액 내 일정하게 분산되어 있는 마이크로 비드가 마이크로 캐필러리 토출구로 이동하고 흡착하게 된다. Fig 25와 같이 마이크로 비드 흡착 공정에 적용되는 캐필러리의 직경은 마이크로 비드의 직경에 따라 변경되었으며 15  $\mu\text{m}$ 의 마이크로 비드 공정 시, 10  $\mu\text{m}$ 의 캐필러리를 적용하였다.

## IV. 마이크로 비드 정밀 토출 공정 기술 비교

### 1. 각 공정 별 마이크로 비드 토출 실험 시 고려사항

각 마이크로 비드의 정밀 토출 공정 기술은 공정 별 공정 변수를 가지고 있고 각 공정 변수에 따라 마이크로 비드의 흡착과 토출 공정에 큰 영향을 미치게 된다. 정전기력 기반의 비드 토출 공정의 경우 헤드 내 혼합용액에 분산되어 있는 비드의 정밀 토출 공정은 인가 전압에 의해 생성되는 전기장에 영향을 받아 미세 액적의 분리 및 토출 공정이 가능한 특징을 가지고 있다. 마이크로 니들과 캐필러리의 경우 비드의 토출 공정 상 공정 변수는 인가전압과 미세공압으로 니들과 캐필러리 상의 비드 흡착 공정에 인가전압과 미세공압이 영향을 미쳐 전체 공정상에 균일한 비드 토출이 가능한 특징을 가지고 있다. 이러한 마이크로 비드에 대한 토출 공정은 각 개별 비드에 대한 제어 및 토출 공정이 가능해야 하며 각 공정 별 비드 제어 방식에 대한 공정 분석 및 최적화가 진행되어야 한다. 따라서 각 비드 토출 공정 기술이 가지고 있는 공정 변수의 고려와 이에 대한 추가적인 공정 최적화 연구가 필요하다. 이와 관련하여 각 공정 별 마이크로 비드에 대한 정밀 토출 기술의 공정 특징을 기반으로 각 마이크로 비드 토출 공정 기술에 대한 세부 연구를 진행하였다. 세부 연구 과정은 Table 5와 같이 각 마이크로 비드에 대한 토출 공정 기술 별 공정 실험에 따른 세부 연구와 각 공정 별 고려사항 및 최적화를 위한 공정 변수 도출 순으로 진행하였다. 그리고 실험을 진행하여 얻은 각 공정 별 결과는 공정 간 성능 비교를 위한 공정 변수로 활용되었다.

Table 5. List of micro bead ejecting process and its research

	공정 기술	공정 실험	공정 변수
1	정전기력 기반 토출 공정 기술	마이크로 비드 용액 분산성 및 토출 특성	- 용액 점도
2			- 분산특성

3		인가전압에 따른 토출 공정	- 인가 전압
4	마이크로 니들 기반 토출 공정	전압인가에 따른 마이크로 니들 기반 토출 공정(전압)	- 인가 전압
5		마이크로 니들의 형상에 따른 토출 공정(니들)	- 니들 형태
6	마이크로 캐필러리 기반 토출 공정	마이크로 캐필러리 기반 토출 공정	- 헤드 높이 - 헤드 내부 공압

#### 1) 마이크로 비드의 용액 내 분산성과 토출특성 연구

앞서 정전기력 기반의 토출 공정 기술에 대한 이론적 정리를 통해 마이크로 비드에 영향을 미치는 공정 요소를 확인하였다. 이에 대해 정리된 모든 수식은 마이크로 비드의 용액 내에서의 일정한 분산상태를 조건으로 정리하였으며 실제 실험을 통해서 일정한 분산특성이 토출 공정에 영향을 미치는지 확인하고자 마이크로 비드에 대한 분산특성 연구를 진행하였다. 직경 15  $\mu\text{m}$ 의 메탈 코팅된 마이크로 비드를 동일한 특성을 갖는 10, 100, 1000 cs의 Silicone oil(KF-96)을 사용하여 마이크로 비드를 혼합 형태로 사용하였고 동일 시간 동안 분산 후 각 혼합용액의 상층에서 용액과 마이크로 비드의 분리현상이 일어날 때까지 걸린 분산유지 시간을 측정하였다. 그 결과, 마이크로 비드의 혼합용액 점도 별 분산상태의 차이가 발생하였으며 Table 6과 같이 마이크로 비드의 혼합 및 분산상태 유지시간이 각 용액 점도 별 5분, 10분, 30분으로 확인되었다.

Table 6. Materials list of micro bead ejecting process

소재	명칭	분산유지시간(분)
마이크로 비드	Au/Ni coated polymer ball ( $\phi$ : 15 $\mu$ m)	
용액 1	실리콘 오일(10cs)/KF-96	5
용액 2	실리콘 오일(100cs)/KF-96	10
용액 3	실리콘 오일(1000cs)/KF-96	30

전체 측정 면적 1 x 1 (mm<sup>2</sup>)에서 측정된 전체 마이크로 비드에서 뭉침현상이 발생하지 않은 마이크로 비드의 비율을 분산율(dispersion rate)로 정의하여 시간에 따른 분산율의 변화를 관찰한 결과, Fig 26에서와 같이 동일 시간에서 측정된 분산율은 점도에 따라 차이를 보였으며 1000 cs에서 상대적으로 양호한 분산상태 및 분산율을 확인하였다.

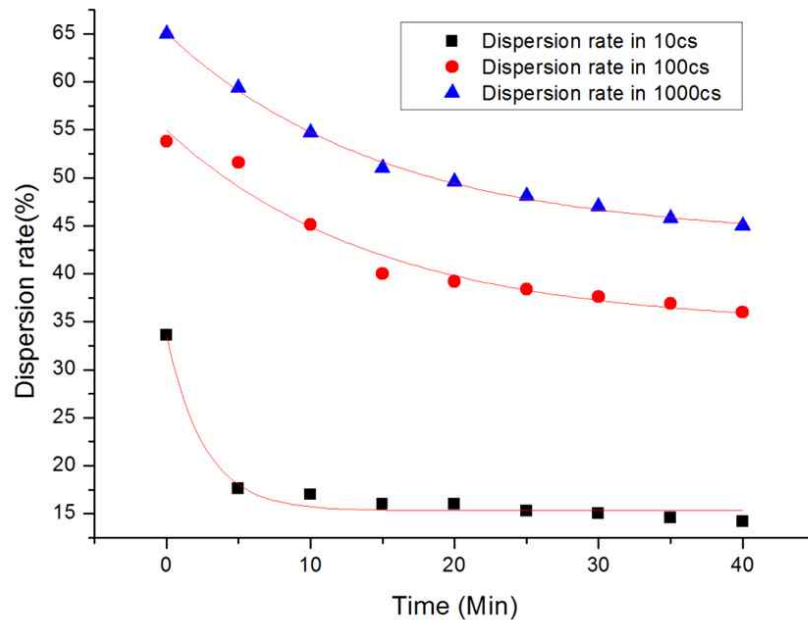
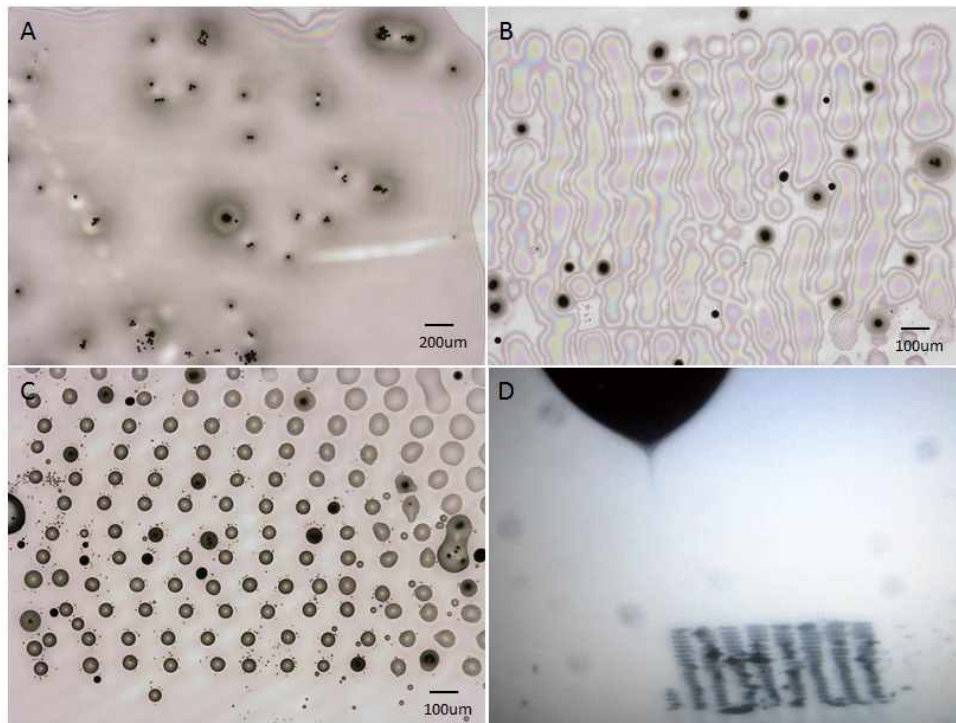


Fig 26. Dispersion rate with variety of time in each viscosity solution.

위의 마이크로 비드에 대한 분산특성을 바탕으로 이를 정전기력 기반 토출 공정 기술에 적용하였을 때 확인할 수 있는 공정 결과와 각 분산특성의 차이가 토출특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 각기 다른 분산율을 갖는 혼합용액의 주입특성을 확인하기 위한 동일한 정전기력 기반의 주입공정을 진행하였다. Table 7과 같이 공정에 필요한 공정 설정 값은 각 노즐 사이즈 150  $\mu\text{m}$ , 용액 공급 압력 0 ~ -3 kPa 및 1~7 kV 사이에서 인가전압을 제어하면서 각 용액의 주입공정을 진행하였다.

**Table 7. Parameters of micro bead ejecting process**

공정 변수	공정 값
노즐 사이즈 ( $\mu\text{m}$ )	150
공압설정 (kPa)	0 ~ -3
인가전압 (kV)	1 ~ 7



**Fig 27. Images of bead ejecting process classified by viscosity.**

(a) 10 cs, (b) 100 cs, (c) 1000 cs, (d) Image of process monitoring.



Fig 27는 각 용액 점도 별 마이크로 비드의 분산용액에 대한 정전기력 기반 토출 공정 결과 형상으로 각 용액 점도 별 주입 공정 결과에서 형상 차이 및 형상 내 비드의 존재 유무에도 차이를 보였다. 또한, 낮은 분산율을 갖는 용액의 주입 결과, 각 마이크로 비드의 뭉침 현상 발생 및 용액의 퍼짐으로 인한 정밀 주입 결과를 확인하기 어려웠으나 상대적으로 높은 분산율을 갖는 1000 cs에서 각 토출 별 양호한 비드 위치 배열 결과를 확인하였다.

Table 8. Results of micro bead ejecting process in 100 cs

공정 변수	공정 값
점도 (cs)	1000
토출 공정 횟수 (ea)	100
공정 범위 (mm <sup>2</sup> )	1.3 x 0.9
공정 횟수 당 토출 갯수 (ea /1 drop)	0.3

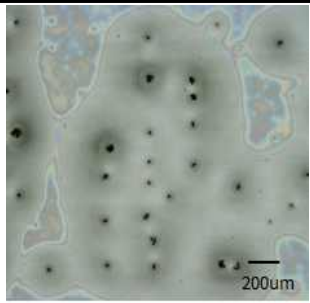
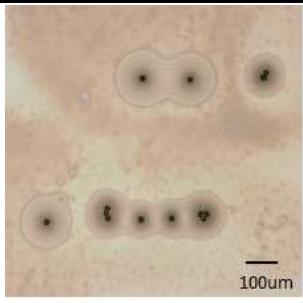
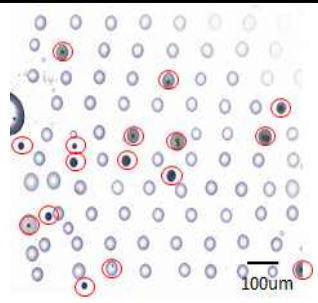
마이크로 비드를 기반으로 한 정밀 토출 공정에서 가장 안정적인 토출 형상 및 비드 토출 결과를 보인 1000cs에 대한 형상을 Table 8에서와 같이 광학측정장치를 사용하여 측정면적 1.3 x 0.9 (mm<sup>2</sup>)에서 주입된 용액 량과 용액 내 포함된 마이크로 비드의 비를 평균 주입량을 정의하여 1회 주입 당 0.3 ea의 산술적 값을 얻었다.

## 2) 인가 전압에 따른 공정 연구

정전기력 기반 마이크로 비드 토출 공정은 미세 용액의 분리 및 토출 과정이 전압 인가에 의해 이루어진다. 인가전압은 헤드 내 전극에 인가된 전압에 의해 형성되는 전극간 전기장과 비드 표면의 전하량을 결정하는 공정 요소로도 작용

하며 동일한 용액특성을 갖는 혼합용액 소재에 이를 적용할 경우, 전압차이에 의한 토출 공정에 차이가 발생하게 된다. 따라서 인가전압에 따른 마이크로 비드의 토출 공정 결과에 대한 연구를 통해 공정 변수인 인가전압에 대한 공정 최적화가 필요하다. 이와 관련하여 앞서 마이크로 비드에 대한 혼합을 통해 발생하는 분산특성과 분산특성에 따른 정전기력 기반의 토출 공정상에서 결과 형상에 대한 영향을 실험을 통해 확인하였다. 이를 기반으로 공정 기술인 정전기력 기반의 토출 공정상에서의 주요 공정 변수인 인가전압에 대한 최적 공정 실험을 진행하였다. 정전기력 기반 토출 공정에 적용한 전압형태는 일반 파형 발생을 통해 생성한 구형파(square wave)형태로 고전압 증폭모듈을 통해 kV급 이상으로 증폭하여 사용하였다. 또한, 토출 주파수의 경우 선행 연구를 통해 실리콘 오일 용액의 토출 가능 주파수로 얻은 1 Mhz를 기준으로 실험을 진행하였다.

**Table 9. Results of micro bead ejecting process in variety of supply voltage**

토출 형상			
토출 공정 변수	토출전압 : 1.1 kV(offset) 토출주파수 : 1 Mhz 공급압력 : -1.5 kPa	토출전압 : 3 kV(offset) 토출주파수 : 1 Mhz 공급압력 : -1.5 kPa	토출전압 : 6 kV(offset) 토출주파수 : 1 Mhz 공급압력 : -1.5 kPa
결과	- 낮은 점도의 유체와 혼합된 형태의 마이크로 비드의 토출 확인  - 토출된 유체는 낮은 점도로 인해 기관상에서의 퍼짐	- 인가전압 4kV이하에서는 용액 내 분산된 마이크로 비드 토출 미발생  - 6kV이상 인가 시 노즐 내 마이크로 비드의 토출구로의	- 일정간격의 용액 닷 토출 및 용액 내 비드 포함( 약 30%)

현상이 발생하여 전체적으로 유체의 몽침현상을 확인함	이동 및 분사 확인	
------------------------------------	------------	--

Table 9는 동일한 정전기력 기반 토출 공정상에서 인가 전압 차이에 의해 발생하는 토출 결과 형상을 정리한 자료로 정전기력에 영향을 미치는 주요요인인 전압의 변화에 의한 형상을 실험을 통해 확인하고자 하였다. 주입 인가전압 별 공정 진행 결과, 상대적으로 낮은 전압(약 1 kV)에서 혼합용액의 주입 형상을 확인 할 수 있었으나 주입량 제어가 불가하였고 인가전압을 증가시키며 관찰한 결과, 3 kV 및 6 kV에서 주입량 감소에 따른 주입형상 확인 및 용액 내 분산된 마이크로 비드의 형상을 확인 가능하였다. 그리고 6 kV이상의 인가전압에서는 1 회 주입 당 1~3 ea의 마이크로 비드 주입량 확인 가능하였다.

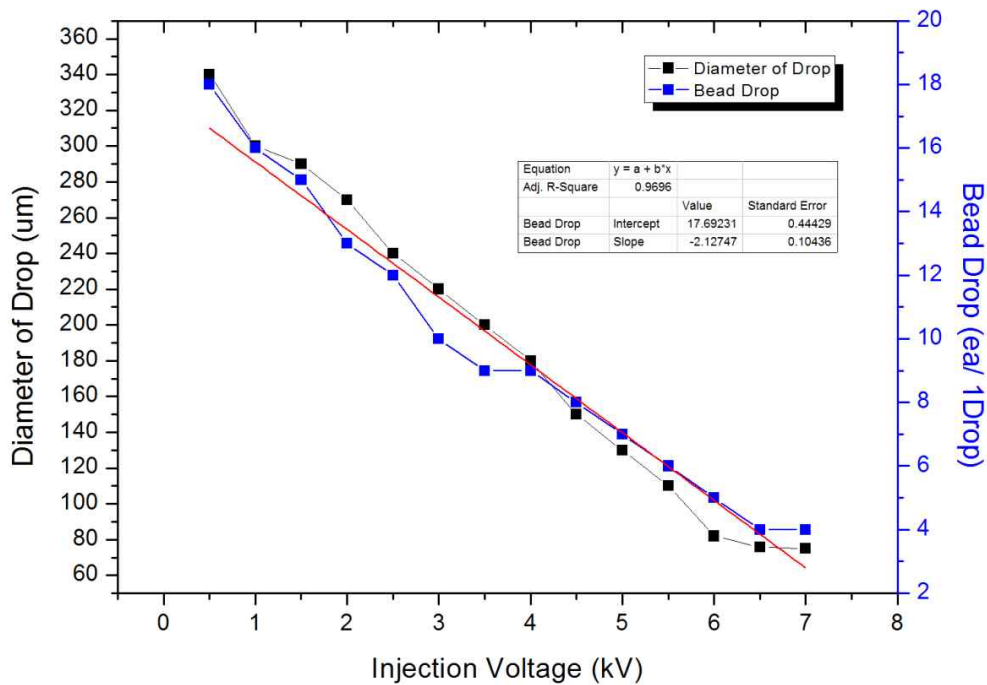


Fig 28. Graph of ejecting process by supplying voltage.

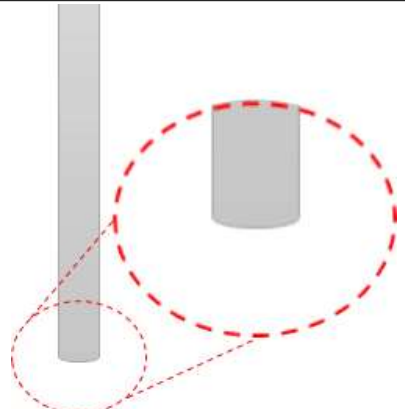
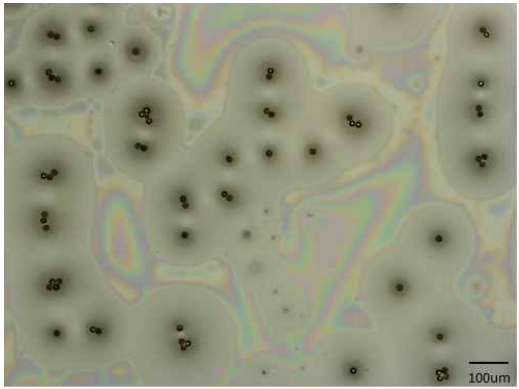
Fig 28와 같이 정전기력 기반 토출 공정 결과에 대해 인가전압에 따른 용액 주입 직경과 마이크로 비드 주입량에 대한 관계를 정리한 결과, 인가전압의 증가에

따라 점차 주입되는 용액의 직경 감소 및 혼합용액 내 포함된 마이크로 비드의 수량 감소를 확인 가능하였다. 또한, 그래프에서와 같이 전압의 증가에 따른 토출 형상의 감소 및 비드 토출 개수 감소에 대한 영향이 선형적으로 변화하였으며 용액의 특성에 따라 차이가 있으나 전압 증가에 따라 전기장의 집중화 및 미세 용액 분리가 가능함을 확인하였다.

### 3) 마이크로 니들 형태에 따른 주입균일 특성 변화 연구

앞서 마이크로 니들의 표면 형상에 따른 생성되는 기관과 니들 사이의 용액 표면 장력 및 메니스커스 힘, 용액 점도에 따른 힘이 공정에 대한 영향을 서술하였다. 이와 같이 마이크로 니들 단면 형태에 따라서도 니들과 기관 사이에서 진행되는 토출 공정에 대한 영향을 실험을 통해 확인하고자 하였다. 이를 위해 마이크로 니들의 형태에 따라 마이크로 비드의 주입균일 특성의 변화를 확인하기 위한 두 가지 형태의 마이크로 니들을 사용하여 동일한 주입 균일특성 테스트를 진행하였다. Table 10은 평탄형태 및 원뿔형태의 마이크로 니들의 형태에 따른 실험을 진행한 결과를 표로 정리한 자료로 표면 형태에 따른 결과 차이를 보여주고 있다.

**Table 10. Characteristics of micro bead ejecting process related to micro needle surface**

마이크로 니들 형상(끝단 형성)		주입균일 특성 결과
	<p>원뿔 (평탄형 직경 단면)</p>	

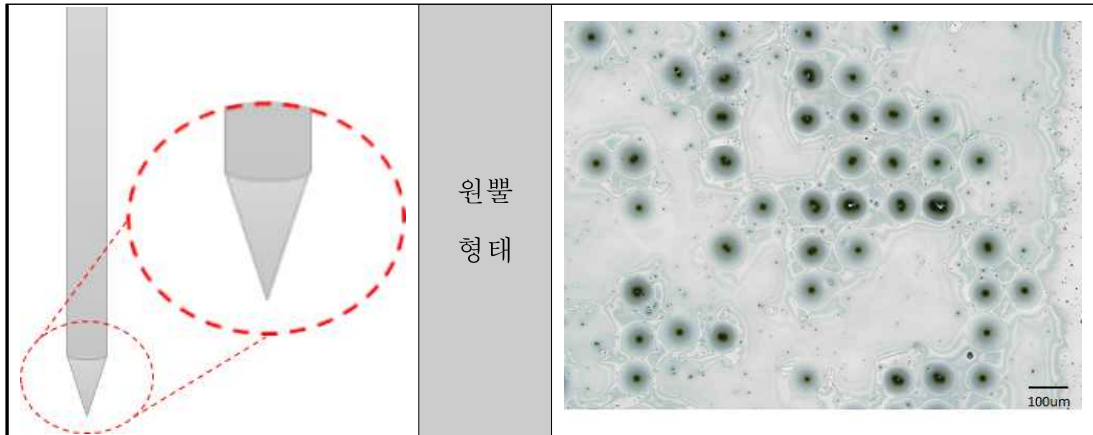


Table 11. Parameter of micro bead ejecting process

파라미터	설정값
소재	silicone oil:마이크로 비드(Au coated ball) 혼합비 100:1
공정 시스템	스테이지 이송 정밀도 : 10 µm급 스테이지 이송 속도 : 5 mm/s
헤드 시스템	이송속도 : 1 mm/s 이송정밀도 : 1 µm급

Table 11과 같이 동일한 공정을 적용하여 테스트를 진행한 결과, 마이크로 니들 끝단의 형태가 원통형(직경에 해당하는 부분은 평탄형태)은 주입 위치 특성에서 토출 형상 및 균일성이 비교적 안정적이지 못하였고 연구 목표인 비드의 개별 토출, 배열이 불가능하였다. 마이크로 니들 끝단의 형태가 원뿔 형태인 경우 전압 인가에 의해 전기장 집중 효과가 상대적으로 높아 헤드 내부에서 마이크로 비드에 대한 개별 흡착이 가능하였고 이를 기판 상에 토출하였을 때 비드의 배열 형상이 원통형보다 비교적 안정적으로 형성되었으며 니들의 절연 처리를 통한 집중 및 비드 주입 공정에 부합하였다.

마이크로 니들 끝단의 형태가 원뿔 형태를 실제 공정에 적용하기 위해 인가 전압 별 마이크로 비드 흡착여부를 확인한 결과, Fig 29에서와 같이 전압 인가 범

위 0.2~0.8 kV에서 인가하였을 때 0.2~0.5 kV에서는 전압에 의해 형성 되는 전기장의 세기가 마이크로 비드 흡착에는 부족하였다. 0.6 kV에서 가장 안정적인 마이크로 비드 흡착 현상을 확인할 수 있었으며 이후 전압 증가에 따라 비드의 분리 현상이 발생하였다.

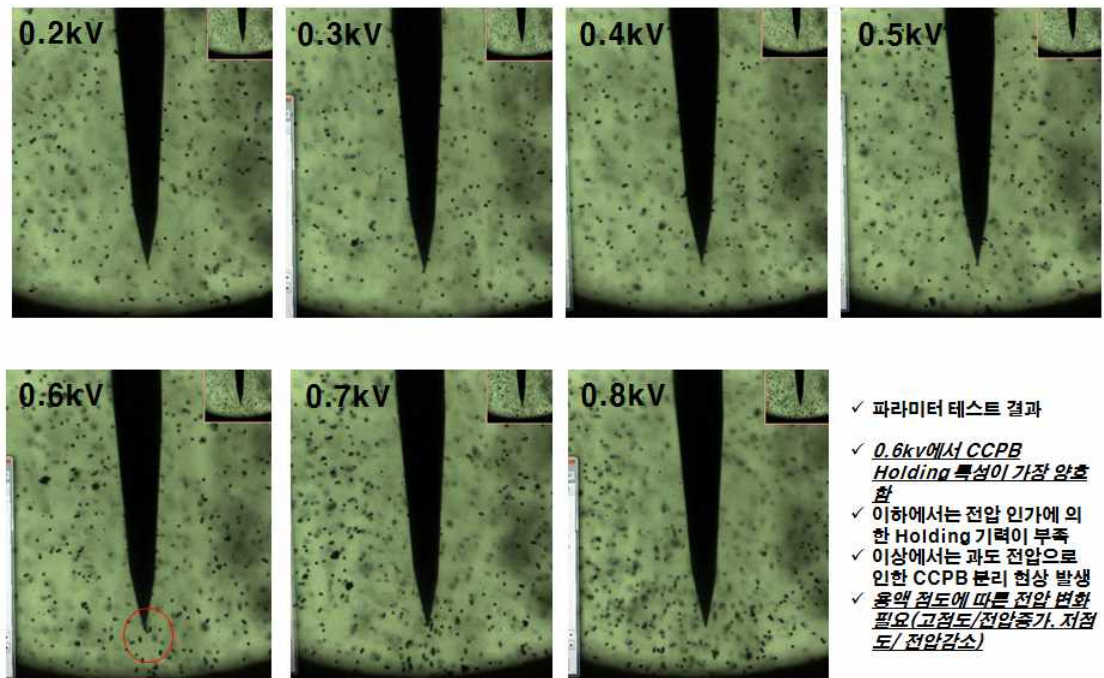


Fig 29. Image of capturing micro bead by supplying voltage.

#### 4) 비드 토출용 헤드 높이에 따른 공정 결과

마이크로 캐필러리 기반의 마이크로 비드 토출 공정 기술상에서 니들 끝단에 형성되는 미세액적의 표면과의 접촉, 분리 과정에서 발생하는 메니스커스 힘과 용액특성에 의한 점도 힘은 니들과 기관 표면 사이 거리에 따라 영향을 받는다. 헤드의 니들 혹은 캐필러리와 기관 간의 거리가 토출 가능거리보다 충분히 떨어져 있지 않은 경우 혼합용액 특성이 비드 토출에 영향을 주어 균일한 토출이 불가하며 반대로 토출 가능거리보다 멀리 떨어진 경우 공압 제어에도 비드의 균일한 토출 제어가 불가하다. 따라서 연속적인 용액의 분리현상에 의해 비드의 토출 공정이 이루어지고 안정적인 토출을 위해서는 거리에 대한 공정 연구를 통해 비드



토출 공정 시 기준 거리를 설정하기 위한 최적화가 필요하다. 이를 위해 각 공정 요소에 대한 실험을 통한 최적화를 진행하여 각 공정 별 특성 및 결과를 도출하였다. 마이크로 캐필러리 기반의 헤드 특성 상, 마이크로 비드의 토출을 위해 설계, 제작된 헤드는 일정한 거리를 설정하여 정밀 상하운동이 연속적으로 이루어지고 높이의 변화는 비드의 토출공정에 영향을 미친다. Fig 30은 마이크로 캐필러리 기반 비드 토출 공정을 진행한 공정 자료로 각 노즐의 높이에 따른 공정 진행에서 발생하는 현상을 정리하였다.

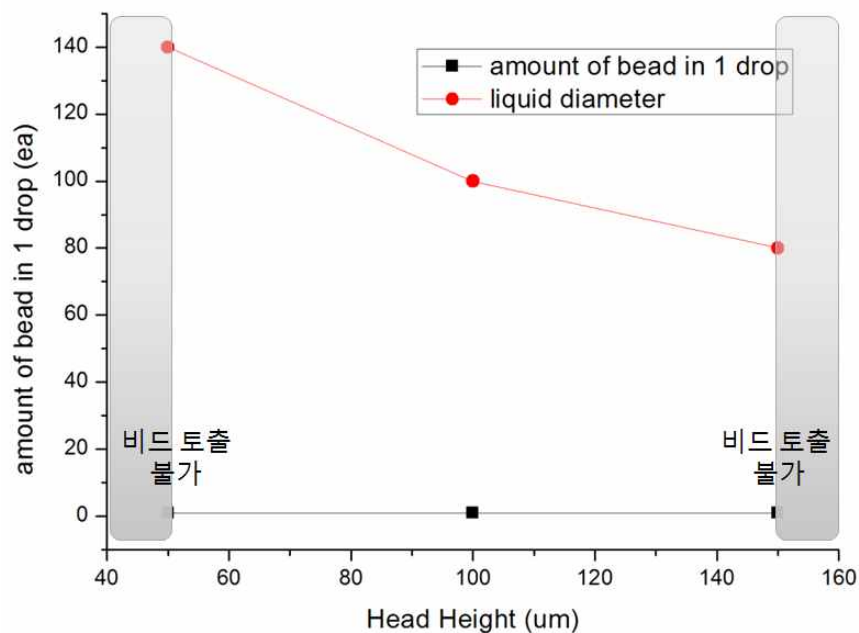


Fig 30. Results of ejecting micro bead by height of head.

헤드에 대한 높이(높이 범위( $\mu\text{m}$ ) : 50 ~ 500)를 변화시키면서 마이크로 비드에 대한 토출 공정을 진행한 결과, 토출 가능 높이 범위는 50 ~ 150  $\mu\text{m}$ 이며 토출되는 혼합용액은 높이에 따라 변화하였고 토출 용액의 특성 상, 낮은 표면 장력에 의한 기관 상에서의 퍼짐 현상으로 토출되는 비드와 별개로 용액 토출 형상은 넓었다.



### 5) 비드 토출용 헤드 내부 압력에 따른 공정 결과

마이크로 비드에 대한 흡착 공정은 헤드 내 챔버에 공급된 일정량의 혼합용액 내에 부유하고 있는 마이크로 비드를 효과적으로 흡착하여 원하는 위치에 정밀하게 토출하는 방식으로 진행되며 이를 위해서는 챔버 및 리저버에 형성되는 공압 제어가 필수적이다. 본 연구를 통해 제작된 공압 제어 시스템에서 비드 흡착을 위한 미세 차압 형성 및 미세 제어를 통해 비드의 흡착 및 토출 공정이 가능하였다. Fig 31은 마이크로 캐필러리 기반 비드 토출 공정 시 헤드 내부 챔버에 존재하는 혼합용액의 비드를 흡착하는 공정에 대한 동작을 보여주고 있다. 헤드 캐필러리 내부의 공압 제어를 통한 유동을 유도하고 이를 기반으로 비드를 흡착하여 원하는 위치에 토출 공정이 진행된다.

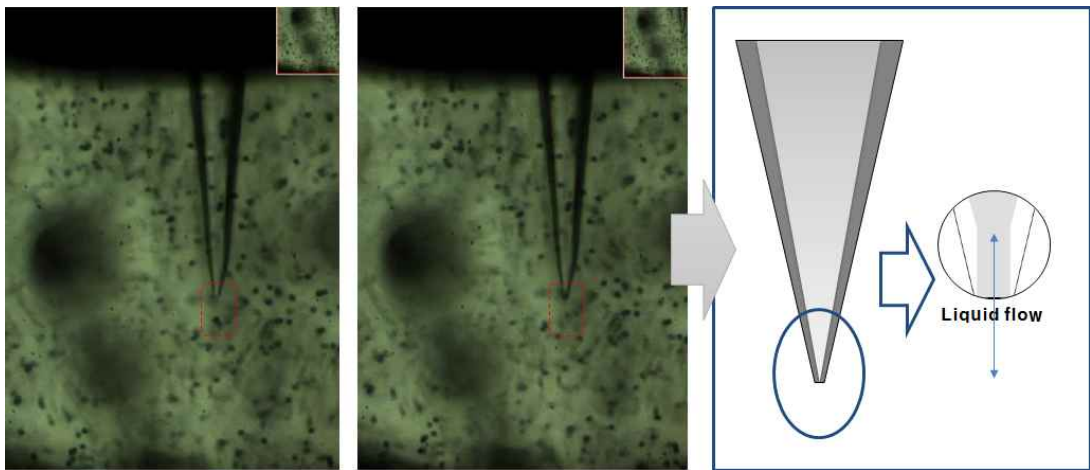


Fig 31. Process of micro bead capture by capillary pressure in head.

Fig 32에서와 같이 마이크로 비드에 대한 토출 공정 시, 챔버 내부 제어 압력 부족일 경우 용액의 경계면과 이를 공유하고 있는 비드의 유동이 발생하며 표면에 생성되는 표면 장력과 인력의 에너지 평형상태를 깨뜨리는 토출에 필요한 물리적 영향이 미미하므로 헤드 토출구에서 부착된 상태를 유지하게 된다. 또한, 이러한 상태가 지속적으로 유지하게 되면 표면에 비드는 용액의 유동에 따라 이동하여 비드 토출이 불가하게 된다.

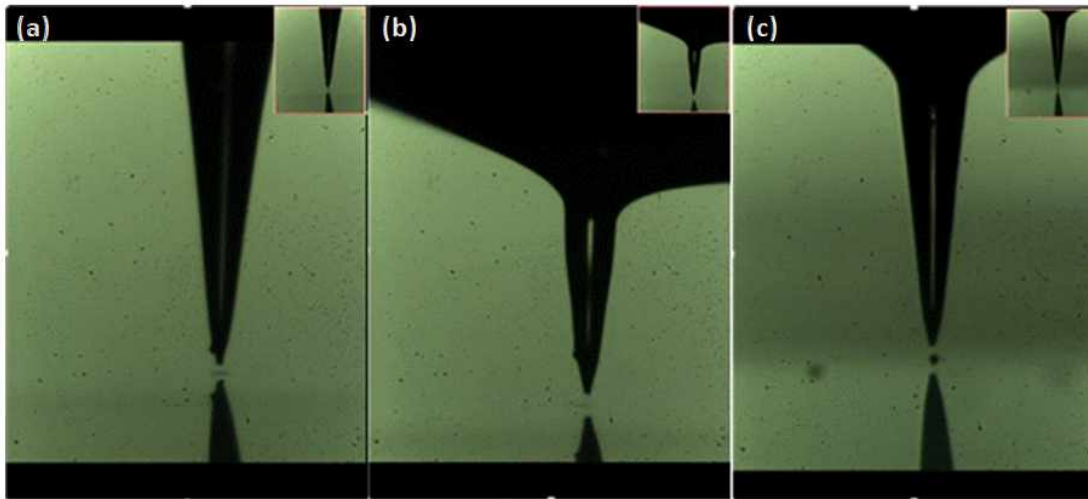


Fig 32. Image of micro bead ejecting process by changing inner pressure. (a), (b) Lack of pressure, (c) ejecting result in good condition.

이와 반대로 마이크로 캐필러리 내부 압력제어가 정상적으로 이루어지면 비드 토출이 이루어지는 공압 구간이 발생하며 이를 기반으로 공정을 진행하였을 때 Fig (c)와 같이 정상적인 비드의 토출 공정 결과를 얻게 된다.

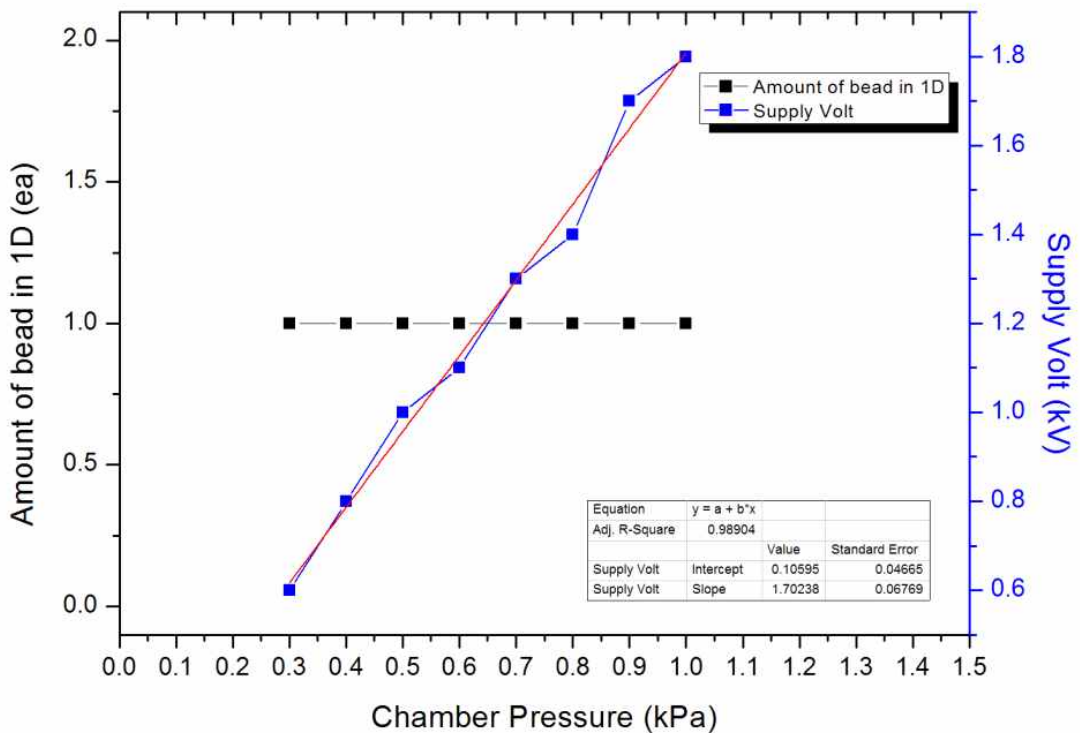


Fig 33. Results of micro bead ejecting process by inner pressure.

마이크로 비드에 대한 토출 공정을 정리하여 Fig 33의 그래프와 같이 챔버 내부 공압에 의한 토출 비드 개수와 비드 토출과 관련된 인가전압에 대한 내용으로 정리하였다. 마이크로 비드의 챔버 내 캐필러리의 압력에 의한 토출 공정 결과, 헤드 내부 챔버의 압력을 변화시키면서 마이크로 비드에 대한 토출 공정을 진행하여 토출 가능 압력은 0.3~1 kPa 사이에서 가능함을 확인하였다. 또한, 챔버 내부 압력 증가에 따라 토출에 필요한 인가전압이 증가하였고 과전압 공급 시, 공정을 방해하는 스파크가 생성되어 비드 토출이 불가능함을 확인하였다. 공급 압력 증가에 따른 인가전압은 증가하는 형태로 변화하였고 그 형상은 선형적으로 변화함을 보였다.

## 2. 공정 기술 별 실험 결과 비교 및 분석

마이크로 비드의 활용성을 위한 공정 중 본 연구를 통해 진행된 마이크로 비드 토출 및 배열 공정은 마이크로 비드의 특성을 활용하여 일정 형상 혹은 배열 구조를 통해 기능성을 구현하고자 하는 공정 방안이다. 이를 통해 비드의 기능성을 기반으로 비드를 활용한 다양한 형태의 디바이스 제조 공정으로 응용 발전시키기 위해 본 연구에서는 크게 3가지 형태의 마이크로 비드 배열 공정을 연구하였다. 각 공정 별 마이크로 비드에 대한 배열 공정 결과를 분석하기 위해서는 이에 대응하는 기준을 가지고 비교할 필요가 있으며 이를 위해 마이크로 비드의 토출 공정, 균일한 토출량 및 위치 토출에 대한 결과를 정리하였다.

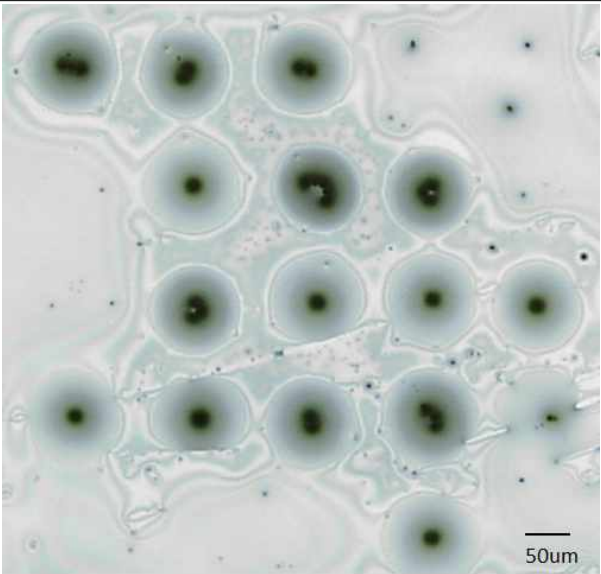
Table 12. Standard of Performance for micro bead ejecting and align process

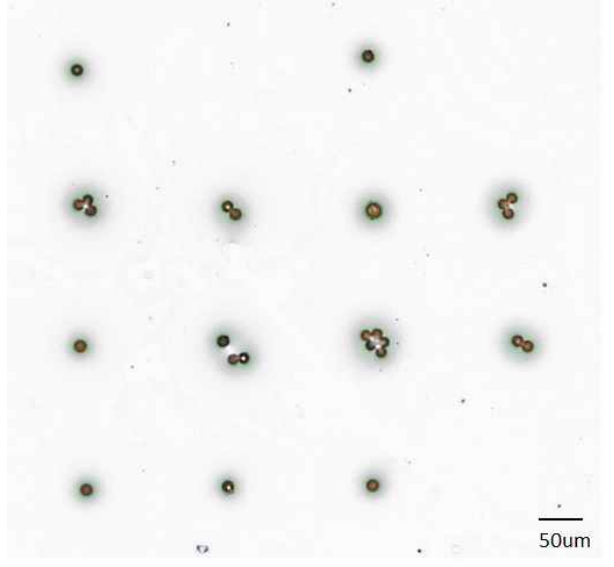
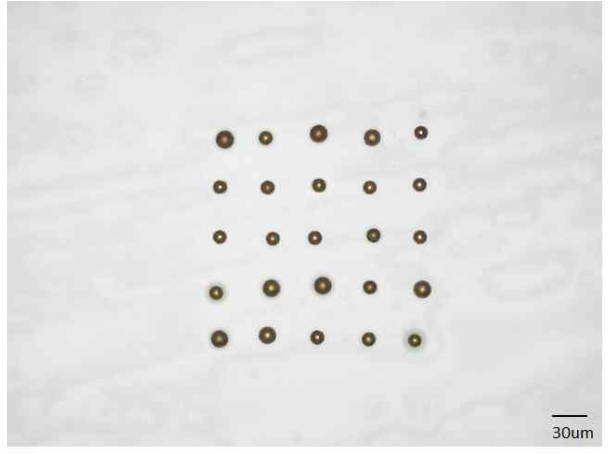
	기준	단위	비고
마이크로 비드 토출 형상	광학 측정을 통한 형상 확인	-	비드의 배열 형상 확인
비드 토출량	1회 토출 시 발생한 비드 토출량	ea/ 1 drop	비드의 개별 토출 여부 확인
위치 균일도	비드 배열 위치 균일도	$\pm\mu\text{m}$	각 비드의 위치 오차 확인

각 마이크로 비드에 대한 응용 디바이스 연구 분야에서 비교적 중요한 요소는 비드를 활용할 수 있도록 기능성을 부여하는 공정으로 본 연구에서는 마이크로 비드에 대한 정밀 배열 과정을 통해 기능성을 부여하는 공정 단계에 가장 적합한 공정을 도출하고자 하였다. 이에 비접촉식 토출 공정 중 관련 선행연구가 진행된 정전기력 기반 토출 공정과 접촉식 토출 공정 중 마이크로 니들을 기반으

로 한 용액 토출 공정을 마이크로 비드 토출 공정으로 적용하여 동일한 마이크로 비드 배열 공정을 진행하였다. Table 12에서와 같이 전체 공정은 각 마이크로 비드의 토출 및 배열에 대한 공정 결과를 비교하기 위해서 각 정전기력 기반 공정, 마이크로 니들 기반 공정 및 마이크로 캐필러리 기반 공정에 대한 마이크로 비드의 정밀 토출, 배열 공정 결과를 광학측정장치를 통해 측정 비교하였다. 그 결과, 마이크로 비드 배열 공정 전체에서 비드의 배열 토출 공정 결과를 얻었고 이를 광학측정장치를 통해 측정한 결과 다음 Table 13과 같이 각 공정 별 배열 형상을 확인하였다.

**Table 13. Image of each micro bead align process**

	마이크로 비드 토출/배열 형상	비고
정전기력기반 토출 공정		25회 토출

<p>마이크로 니들 기반 토출 공정</p>		<p>16회 토출</p>
<p>마이크로 캐필러리 기반 토출 공정</p>		<p>25회 토출</p>

정전기력 기반 공정 특성 상 용액 토출량 제어를 위한 공정 설정 시, 노즐 사이즈를 결정하게 되는데 노즐 사이즈에 따라 1회 토출되는 용액 토출량을 결정할 수 있다. 그러나 마이크로 비드 사이즈보다 큰 사이즈의 노즐을 적용하는 경우 노즐 내 비드 뭉침현상과 노즐 막힘을 고려하여 최소 2배 이상의 노즐을 사용해야 하고 이에 따라 비드 토출 제어에 영향을 미친다. 이를 기반으로 비드 토출 실험이 진행된 정전기력 기반 토출 공정 결과를 광학장치를 통해 측정하여 각 배열 위치에 비드 토출 형상을 확인할 수 있었으나 전체 비드 토출 공정상에서 토출된 비드의 비율이 25회 중 15회로 낮았다. 그리고 1회 토출된 형상 내 포함된 비드의 수량 또한 1~3개로 균일하지 않았다. 정전기력 기반 마이크로 비드의 토출 공정 형태는 인가전압에 의한 미세 용액의 분리와 토출을 통한 비드의

토출을 유도하는 형태로 균일한 비드의 토출을 위해서는 용액 내에서의 비드의 분산 상태가 균일하게 유지되어야 한다. 균일한 분산상태에서의 인가전압에 의한 전기장 유도를 통한 비드의 토출이 진행된다. 그러나 실제 실험을 진행하는데 있어 비드의 혼합용액 내 분산상태는 시간이 지남에 따라 물리적인 특성에 의해 침전 혹은 부유상태가 발생하게 된다. 따라서 정전기력 기반 토출 공정 상에서의 마이크로 비드 균일토출에는 한계점을 가지고 있어 이에 대한 토출 공정 기술의 균일성을 중심으로 추가 연구를 진행하였다. 마이크로 사이즈 직경을 갖는 마이크로 니들 기반 토출 공정의 경우, 일정한 배열 형상을 확인하였고 전체 16회 중 13회 토출 결과를 확인하였다. 또한 1회 토출 형상 내 1~5개의 비드를 확인하였다. 이는 마이크로 니들 공정 상, 용액 내 포함된 비드를 니들에 인가된 전압을 이용하여 흡착하는 공정이 필요하지만 용액 내 니들 이동에 의한 유동이 발생하여 비드 흡착을 방해하고 비드 흡착 후 토출하는 과정에서 유체의 경계면에서 흡착 특성 변화로 비드의 균일한 토출에 방해요소로 작용한 것으로 예상되었다. 한편, 마이크로 캐필러리 기반 토출 공정에서는 일정한 비드 배열 공정이 가능하였으며 공정 결과, 일정한 간격으로 개별 비드 토출 형상을 확인하였다. 마이크로 캐필러리 기반 공정 특성 상 캐필러리 내부에 형성되는 압력에 의해 용액 내 분산되어 있는 비드를 흡착, 고정하고 캐필러리 이동에 따른 용액 경계면에서의 표면 장력에 의한 흡착 특성에 미치는 영향을 줄여 균일한 비드 토출 특성을 갖으며 이러한 특성이 표와 같은 결과에 영향을 끼친 것으로 예상되었다.

#### 1) 주입 균일성 및 위치 오차

각 마이크로 비드 배열 공정에 대한 결과를 이미지 처리 프로그램을 통해 토출 횟수, 토출 균일성, 간격에 대한 분석을 진행하였고 이를 Table 14에서와 같이 정리하였다. 또한, 각 공정 별 결과를 바탕으로 수치적 비교를 위해 위치 오차에 대한 측정 데이터의 통계적 산술값을 정리하여 공정 별 비드 배열 간격의 표준 편차 및 표준오차를 획득하였다.



Table 14. Comparison with Results of each micro bead ejecting process

		정전기력 기반 토출 공정	마이크로 니들 기반 토출 공정	마이크로 캐필러리 기반 공정
비드 토출 형상		15회/25회	13회/16회	25회/25회
비드 토출 균일성		평균 1.04ea/1회당	평균 1.56 ea/1회당	평균 1ea/1회당
비드 평균 간격( $\mu$ m)(비 토출 간격 제외)		기준: 100 W:96.3/ H:95.2	기준:130 W:130.2/H:127	기준:50 W:50.1/H:51.1
산술적 수치(비 측정값 제외)	(비드 배열 간 격)분산	W:34.2/H:16.4	W:21.3/H:21.7	W:18.2/H:5
	표준 편 차	W:5.8/H:4.1	W:4.6/H:4.7	W:4.3/H:2.2
	표준 오 차	W:1.8/H:1.4	W:1.5/H:1.6	W:1/H:0.5

각 공정 별 마이크로 비드에 대한 토출, 배열 공정 결과를 정리하면 마이크로 캐필러리 기반 공정이 가장 균일한 비드 토출량과 배열 형성 시 비드 간 배열 간격이 가장 균일하게 형성되었음을 통계적 수치로 확인할 수 있었다. 기준 값을 바탕으로 각 측정된 데이터의 평균값에서 마이크로 캐필러리 기반 공정이 오차가 가장 적었고 표준 편차 및 표준 오차에서도 가장 적은 값을 보였다. 이는 토출 균일성, 위치 토출 특성 부분에서 마이크로 캐필러리 기반 공정 특성이 마이크로 비드 제어 공정으로서 가장 적합한 공정임을 보여주고 있으며 이를 활용한 디바이스 제조 공정 연구에도 적용 가능성을 예상할 수 있는 결과를 보여주었다.

### 3. 응용 분야 적용 연구

최근 몇 년간 마이크로 비드에 대한 다양한 응용 연구가 진행이 되었고 각 분야의 응용 디바이스 연구에 활용되어 왔다. 그 바탕에는 마이크로 비드에 대한 고분자 소재 특성 연구와 이를 기반으로 비드 제조 공정이 중요한 부분으로 연구가 진행되었다. 이외 마이크로 비드를 활용하는 공정 기술은 상대적으로 세부 연구가 진행되지 않아 응용 디바이스 연구에 중요한 요소로 작용하지 않았다. 이러한 마이크로 비드의 활용성을 높이고 응용 분야 적용 연구를 위해서는 비드에 대한 소재 특성뿐만 아니라 공정 기술에 대한 연구가 필요한 시점으로 앞서 진행된 각 공정 기술 연구를 기반으로 비드 활용성을 높이는 추가 응용 연구를 진행하였다. 응용 연구를 위해 앞서 3가지 형태의 마이크로 비드의 정밀 토출 공정 기술에 대한 공정 분석 및 최적화 연구를 진행하였고 각 공정 별 최적화를 위한 공정 변수에 대한 실험을 진행하였다. 이와 관련하여 본 연구에서는 마이크로 비드 및 토출, 배열에 대한 공정 기술 연구를 바탕으로 응용 디바이스 제조 공정으로의 적용 가능성을 평가하기 위해 다음 2가지 형태의 응용 디바이스 제조 공정에 대한 연구를 진행하였다. Table 15는 마이크로 비드에 대한 토출 및 배열 공정을 바탕으로 이를 활용할 수 있는 응용 디바이스 및 공정 기술에 대한 내용을 정리한 자료로 마이크로 비드의 기능성을 활용한 형태의 전자종이 디바이스와 신축성 저항 측정 센서 2가지 응용 디바이스에 대한 적용 및 결과를 본 연구를 통해 정리하였다.

**Table 15. Applications of ejecting and align process for micro bead**

응용 디바이스	공정 적용 부분	기능 및 예상성능
전자종이 디바이스	픽셀 구동 마이크로 비드의 셀 내 주입 공정	마이크로 비드 구동에 의한 픽셀 구성
신축성 저항 측정 센서	전극부 내 마이크로 비드 토출, 배열 공정	신축성 전극부의 전도성 및 복원력 향상

첫 번째 응용 연구는 마이크로 비드를 활용한 마이크로 비드 기반의 전자종이 디스플레이에 대한 연구로 공동 연구가 진행된 전자종이 디스플레이 제조 공정 기술로 활용성 여부를 분석하였다. 그 결과, 기존 공정을 대체하는 마이크로 비드 기반 디스플레이 제조 공정으로서 마이크로 비드 토출 공정이 활용 가능성이 있음을 확인하였다. 한편 두 번째 응용 연구는 센싱 디바이스 내 마이크로 비드에 대한 연구로 패터닝 공정으로 생성된 전도성 패턴에 마이크로 비드를 적용한 형태의 신축성 센서를 제작하였다. 비교 측정을 위해 마이크로 비드를 제외한 센서를 제작하였고 이를 측정장비를 통해 실제 신축길이 대비 저항을 측정하였다. 그 결과, 마이크로 비드 미 적용 센서보다 낮은 저항값을 보였으며 반복 신축 측정 시, 비교적 센서 특성 변화가 적었다. 이를 통해 마이크로 비드가 신축성 센서에 적용이 가능하며 신축 특성 안정화에 도움을 주는 것으로 확인되었다.

#### 1) 마이크로 비드 기반 디스플레이 제조 공정

앞서 마이크로 비드에 대한 소재 특성 및 공정 특성 연구를 통해 마이크로 비드를 활용한 정밀 토출, 배열에 대한 공정 기술 연구를 진행하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서 도출한 마이크로 비드에 대한 정밀 토출, 배열 기술을 전자종이 디스플레이 제조 공정 내 마이크로 비드 주입 공정으로 활용하고자 하는 연구를 진행하였다. Fig 34은 마이크로 비드를 활용한 마이크로 비드 기반 전자종이 디스플레이에 대한 기본 구조[35]와 기본 픽셀을 구성하는 전극 및 내부 마이크로 구동형태를 보여주고 있다. 마이크로 비드를 활용한 전자종이 디스플레이의 형태는 기판 상에 전극과 전극 사이에 마이크로 사이즈 비드가 위치하게 되었고 전극에 인가된 전압에 의해 마이크로 비드의 이동을 유도하게 된다. 마이크로 비드의 전극 간 이동은 하부 기판에 위치한 광원의 선택적인 광 투과를 제어하고 이를 통해 기본적인 디스플레이 패널로써 활용하게 된다.

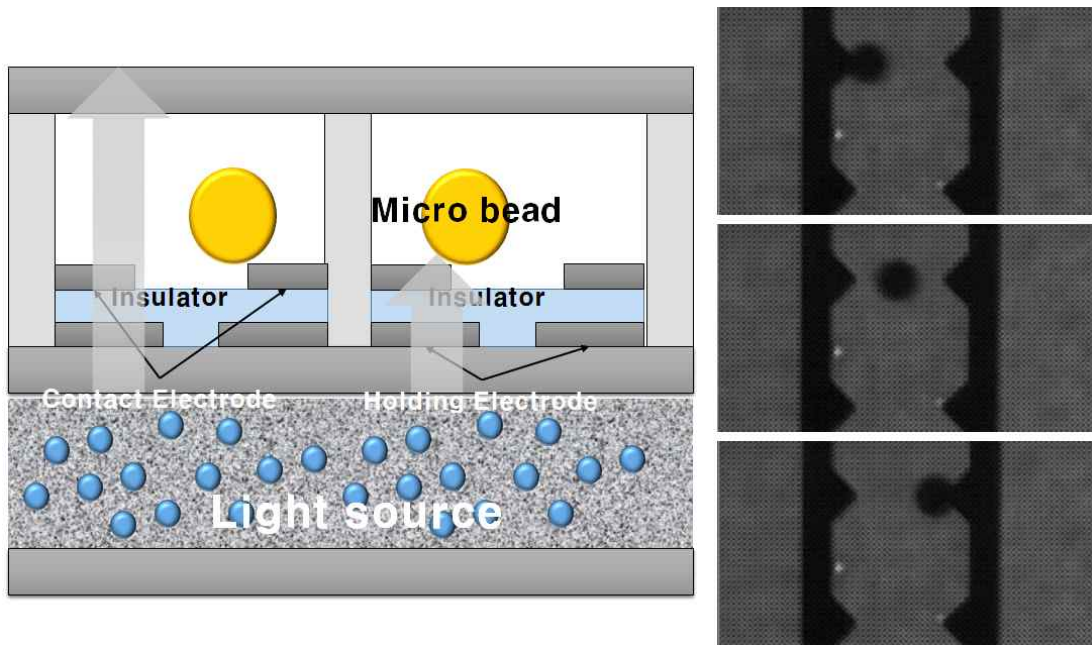


Fig 34. Structure and operation of micro bead based electronics display.

마이크로 비드를 활용한 전자종이 디스플레이 제조 공정은 다음 Table 16과 같은 공정 순서에 따라 제조 공정이 진행된다. 각 부분은 전자종이 디스플레이 패널을 구성하는 기판 상 전극 및 격벽, 마이크로 비드 주입, BM(black matrix) 등과 이를 통합하는 공정으로 구성되어 있으며 각 공정 별 패널 제조 공정으로 가장 적합한 공정으로 구성되었다.

Table 16. Manufacturing process of display device using micro bead

공정	패널 기반 제작	전극 제작	비드 주입 공정	상판 패널 제작	반사판 제작	기판 결합
특징	전극 형성 및 픽셀 격벽 형성	전극 형성	픽셀 내 마이크로 비드 주입	상판 BM 형성	Back light 형성	통합 패널 형성
적용 공정	에칭 공정	에칭 공정	<u>마이크로 비드 토출</u> <u>배열</u> 공정	마이크로 패터닝 공정	박막 증착 공정	통합화 공정

이 중 마이크로 비드를 픽셀 내 주입하는 공정으로 본 연구에서 진행한 마이크로 비드에 대한 토출 및 배열 공정을 적용하는 연구를 진행하였고 앞서 각 연구에 대한 결과를 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 전자종이 디스플레이 제조공정 중 비드 정밀 주입 공정으로 이를 활용할 경우 각 공정 별 특성을 고려하여 Table 17과 같이 마이크로 캐필러리 기반 공정이 가장 적합한 공정으로 적용이 가능함을 예상할 수 있었다.

**Table 17. Comparison with each of micro bead ejecting process**

	홀컵을 이용한 비드 주입 기술	마이크로 팁을 이용한 주입 기술	마이크로 캐필러리 기반 주입 기술
특징	스퀴지를 사용한 대량 주입 형태	마이크로 사이즈 팁을 이용, 개별 주입 형태	마이크로 캐필러리를 이용, 개별 주입 형태
공정 적용성	(홀컵 내부 형태에 따라)	(광학모니터링 기반)	(정밀 스테이지)
비고	물리적 주입공정에 따른 데미지 고려	광학모니터링 장비 최적화 고려	(공정 시간에 따른)균일성 고려

Fig 35는 마이크로 비드 기반 전자종이 디스플레이 내 픽셀을 구성하는 각 셀 내에 마이크로 비드가 정밀 주입된 형상을 보여주고 있다. 본 연구를 통해 각 공정에 대한 마이크로 비드 토출 공정 결과를 비교하였고 각 공정 별 성능 평가를 통해 마이크로 캐필러리 기반 토출 공정 기술이 가장 안정적인 공정 기술로서 적용이 가능함을 확인하였다.

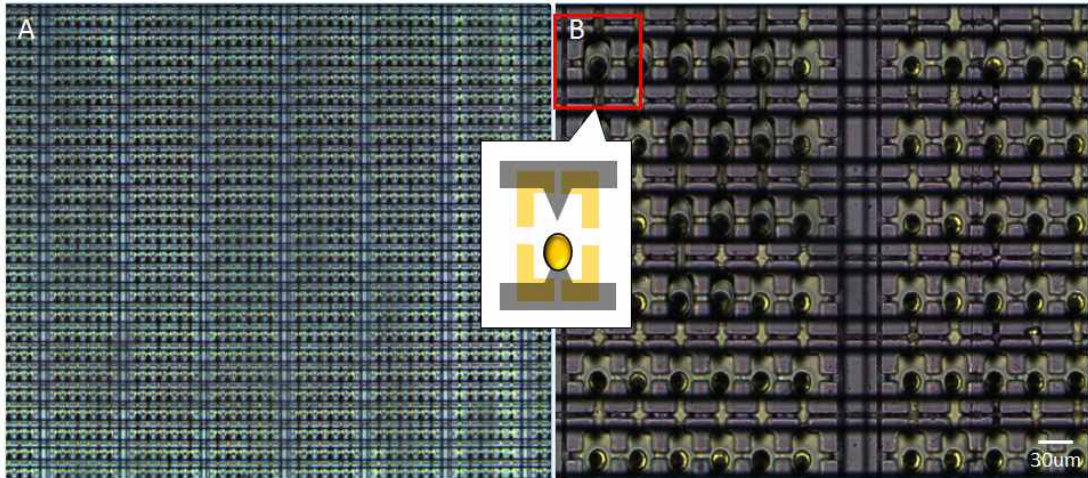


Fig 35. Structure of electronics paper's pixel using micro bead. (a) x40, (b) x600.

Table 18. Property and requirements for manufacturing process of e-paper display using micro bead

	공정/기능 명칭	공정 값	비고
1	전자종이 셀 사이즈(µm)	40 x 40	(비드 구동 범위)
2	픽셀 구성 비드 량(ea)	단위 픽셀 당 5	(컬러 형태 전자종이 픽셀 구성 시)
3	<u>마이크로 캐필러리</u>	<u>(표준오차)</u> W:1/H:0.5	-
4	<u>공정 성능 결과(µm)</u>	<u>(균일성) 50 µm 기준</u> W: 50.1, H: 51.1	-

이와 관련하여 Table 18은 마이크로 비드를 활용한 응용 디바이스인 전자종이 디스플레이 패널 내 사이즈 및 구성과 마이크로 캐필러리 기반 공정상에서 측정된 위치 정밀도와 균일도에 대한 내용이다. 이를 통해서 전자종이 디스플레이 제조 공정상에서 마이크로 비드의 셀 내 정밀 주입을 위한 공정으로 마이크로 캐필러리 기반 토출 공정 기술이 기술적으로 적용이 가능함을 확인할 수 있다.



## 2) 마이크로 비드 기반 신축성 센서

agnw(silver nanowire) 소재는 기존 낮은 전기적 저항을 바탕으로 와이어 간 불규칙적인 연결을 통해 박막 전극으로서 활용성을 갖으며 우수한 광학적 특성, 유연성과 높은 전도성을 가지고 있어 근래 연구 용도뿐만 아니라 다양한 산업에 적용되고 있다[36]. 그러나 신축성을 갖는 디바이스의 소재로서 활용되기 위해서는 agnw만 적용하기에는 기계적 신축성이 부족한 agnw 소재를 보완하는 역할을 하는 소재 및 물리적 구성에 대한 연구가 필요하였다. 이에 agnw기반의 신축성 센서에 대한 국내 연구를 바탕으로 신축성을 갖는 대표적인 소재로 적용되고 있는 PDMS(polydimethylsiloxane) 소재를 신축성 센서에 활용하였다. 또한, PDMS의 소수성 특성으로 인한 agnw의 접착력에 대한 부분은 PDMS 사이에 전극층을 추가하는 방식으로 센서 제작에 활용하였다[37]. 또한 마이크로 비드를 agnw 신축성 센서에 적용하여 불규칙적인 와이어 사이에 메탈 비드가 위치하도록 하여 전기적 특성 보완 및 신축성 변화에 따른 전기적 측정값 안정화에 영향을 미치는 요인으로 작용하도록 하였다.

### (1) 메탈 코팅 마이크로 비드 기반 패턴 형성 제작 공정

**Table 19. Characteristic and structure of strain sensor using micro bead**

	<p>elastomer : PDMS</p> <p>electrode : agnw coating material 0.3 %</p> <p>electrode length : 10 mm</p> <p>(width : 1 mm)</p> <p>stretching length : 8 mm</p> <p>(stretching rate 80 %)</p>
--	--

agnw 소재 기반의 신축성 센서를 제작하기 위해서 Table 19와 같이 PDMS



소재를 몰딩 처리하여 신축성 센서의 형태를 갖추고 PDMS에 전도성 패턴을 형성하기 위해 표면 전처리를 거쳐 agnw 소재를 8 x 1 mm로 패터닝 후 마이크로 비드를 전도성 패턴 상에 토출하고 PDMS 몰딩 처리를 진행하여 기본적인 신축성 센서의 제작이 완료된다.

**Table 20. Image of strain sensor surface based on agnw and micro bead**

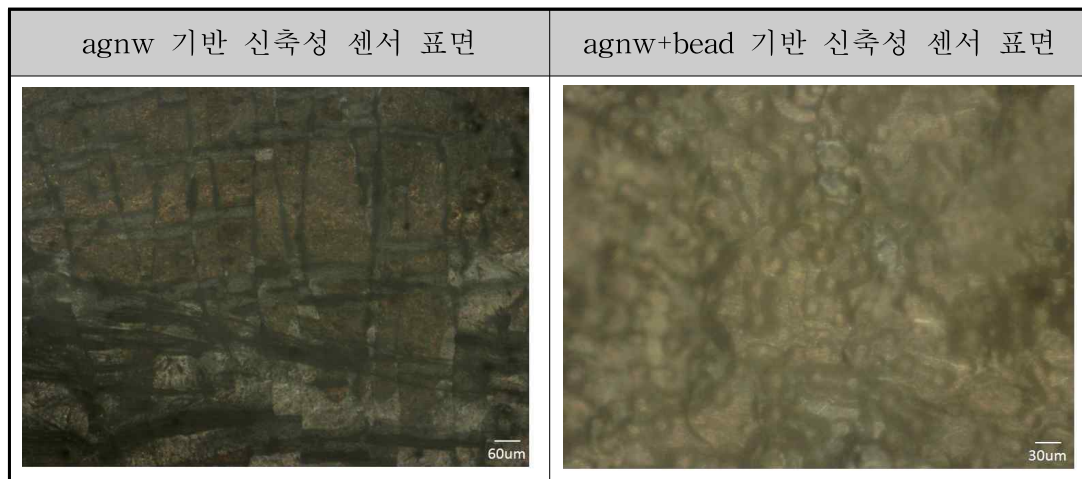


Table 20과 같이 마이크로 비드를 적용한 신축성 센서와 미적용한 신축성 센서 2가지를 제작하여 그 표면을 광학측정장치를 통해 확인한 결과, 마이크로 비드를 적용하지 않은 agnw 기반 신축성 센서의 경우 전극 소재로 사용한 agnw의 증착 형상을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한, 이를 신축성 테스트용 장치에 적용하여 실제 신축 테스트 진행 후 광학장치의 재측정 결과, 신축방향에 수직으로 크랙이 발생하였음을 확인하였다. 이에 반해 마이크로 비드를 적용한 agnw 기반 신축성 센서의 경우 광학측정장치 측정 결과, agnw 전극부 상부에 마이크로 비드의 여부를 확인할 수 있었으며 신축 테스트 후 재측정 시 이전 측정 결과와 육안 상에 차이가 없었다.

(2) 신축성을 갖는 마이크로 비드 기반 저항측정 센서

마이크로 비드를 활용한 agnw 소재 기반의 신축성 센서의 경우, 일반적으로

스트레인 게이지(strain gauge)라고 하여 기계적인 변화를 전기적인 신호로 검출하는 특징을 가지고 있다. 보통의 스트레인 게이지인 경우 저항률이 높은 금속 저항선을 사용하는데 반해, 본 연구에서는 PDMS 소재의 신축특성과 agnw소재의 전기적 특성을 활용하여 agnw 소재와 PDMS를 다층 적층 구조로 제작하였고 이를 신축성 센서로 활용하였다.

일반적인 신축성을 갖는 저항성 센서의 경우, 신축길이에 비례하여 저항의 변화를 측정장비를 통해 측정이 가능하다. 또한 신축특성을 갖는 센서는 반복적인 측정에도 안정적인 측정 데이터 검출이 중요한 기계적, 전기적인 요소이다. agnw를 기반으로 마이크로 비드의 응용 디바이스로써 제작된 신축성 센서는 Fig 36과 같이 센서의 신축성 테스트를 위한 테스트 장비를 사용하여 테스트를 진행하였다. 신축특성 테스트 장비는 신축특성 길이 방향에 대한 정밀 이동이 가능하도록 구성되었으며 실험 진행에서는 1 mm씩 신축방향으로 이동하며 멀티 테스트 장비로 실시간 저항치를 측정하였다. 또한, 실제 신축 길이 대비 저항 데이터를 측정하고 연속 측정을 통해 센서 특성에 대한 변화 및 안정성을 확인하였다.

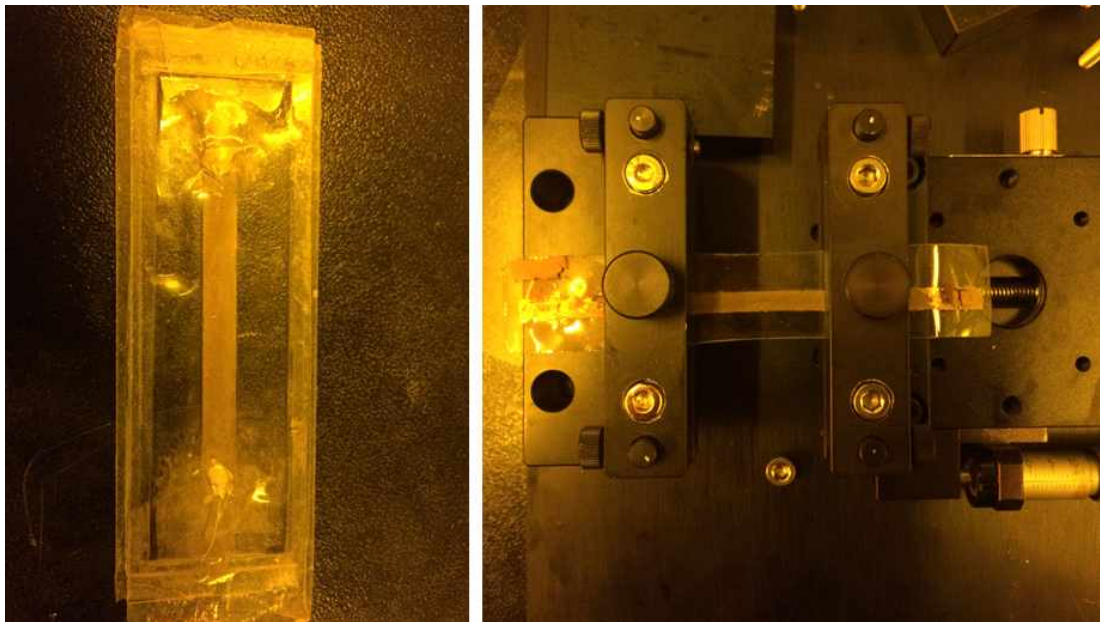


Fig 36. Image of strain sensor and test equipment for micro bead.

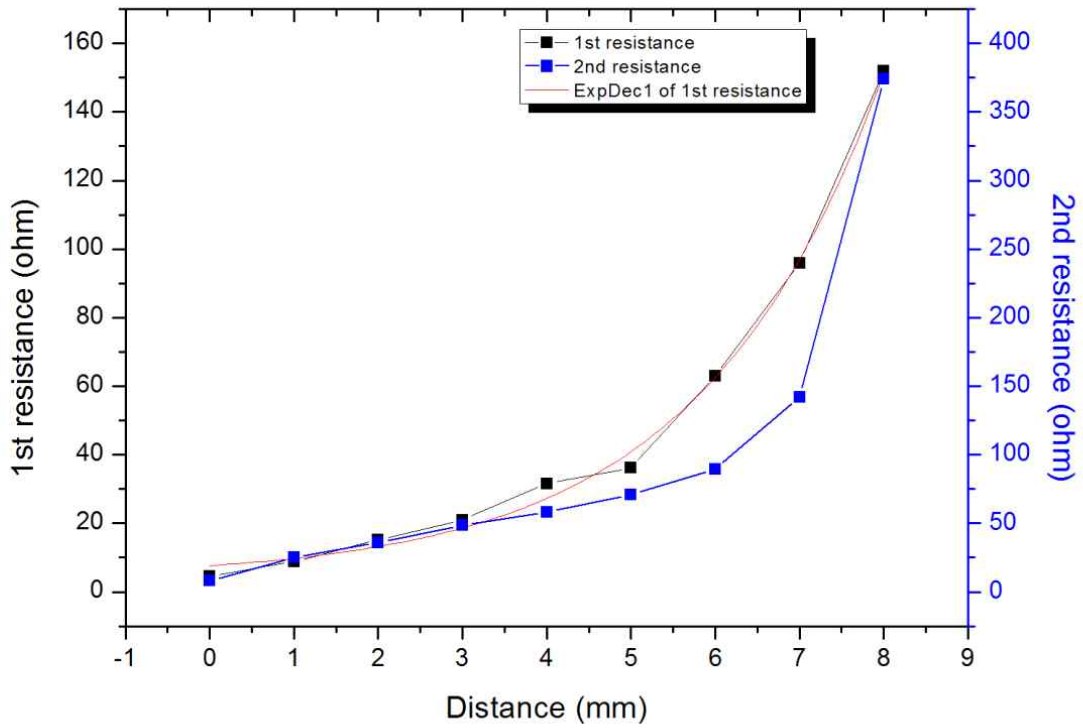


Fig 37. Graph of measurement data for strain sensor.

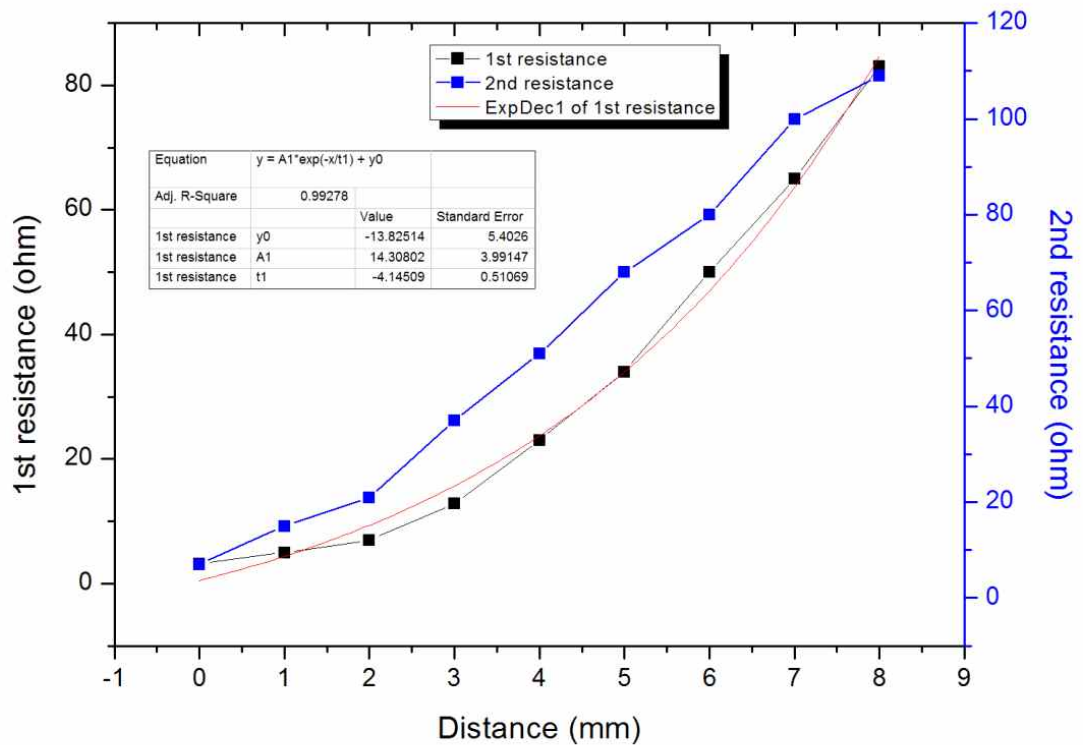


Fig 38. Graph of measurement data for strain sensor using micro bead.

마이크로 비드를 적용한 신축성 센서를 제작하고 신축성 테스트 장비를 구성하여 센서의 신축특성에 따른 저항특성을 측정된 결과, Fig 37의 그래프와 같이 마이크로 비드를 적용하지 않은 agnw 신축성 센서의 경우 신축길이 대비 저항 증가 특성은 기존 신축성을 갖는 저항성 센서 특성과 동일하였다. 저항 측정 결과, 1회 측정 시 최대 신축 길이 8 mm에서의 저항값은 약 150 ohm, 2회 측정 시 동일 최대 신축 길이에서의 저항값은 약 370 ohm으로 차이를 보였다. 또한, 신축길이에 대한 저항값의 변화 형태는 비선형적으로 증가하였다. 이에 반해 Fig 38의 그래프와 같이 마이크로 비드를 적용한 신축성 센서의 경우 센서 특성은 기존 센서와 동일하였으며 신축방향 길이 대비 1회 측정 시 최대 신축 길이 8 mm에서의 저항값은 약 80 ohm, 2회 측정 시 동일 최대 신축 길이에서의 저항값은 약 110 ohm으로 차이를 보였으나 일반 신축성 센서에 비해 차이가 적었다. 또한, 마이크로 비드를 적용하지 않은 신축성 센서와 신축특성에 따른 저항변화를 비교 시, 마이크로 비드를 적용한 센서의 경우 상대적으로 측정 저항값의 비선형성이 줄어들었고 신축특성 테스트를 위해 센서의 최대 길이로 증가한 후 복원 시, 저항값을 기준으로 센서의 복원력이 비드를 적용한 센서에서 상대적으로 높게 확인되었다.

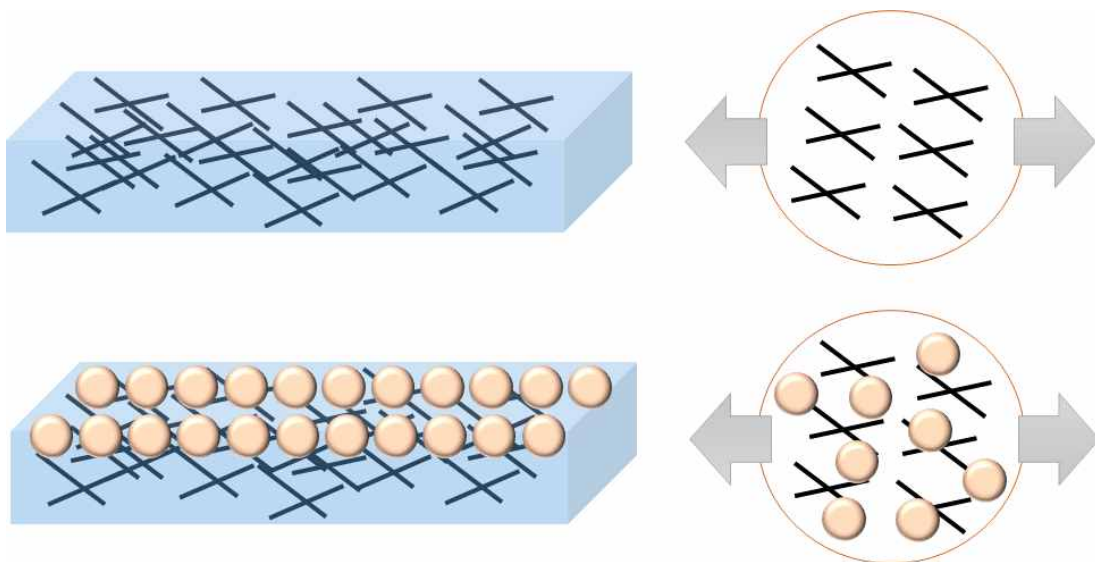


Fig 39. Effect of micro bead in agnw strain sensor device.

agnw기반의 신축성 센서는 신축특성 방향으로 물리적 변화가 발생할 경우, 전극 부분의 나노와이어 간 간격이 증가하여 전기적 저항 특성의 변화가 발생하고 측정장비를 통해 측정 시, 저항값의 증가가 확인된다. 마이크로 비드를 적용한 신축성 센서의 경우 Fig 39와 같이 나노와이어 사이에 비드가 위치해있어 신축 길이에 비례하여 증가하는 전기적 저항특성을 보완하여 낮은 저항값 측정, 반복 측정 변화량에 영향을 미쳤다. 이는 마이크로 비드가 agnw 기반의 신축성 센서의 특성과 신축특성에 대한 측정저항 감소와 측정 데이터 선형성 증가, 연속 측정에 대한 측정 데이터 변화량 최소화에 메탈 코팅 마이크로 비드로 인한 기능 개선 효과를 가져왔음을 확인할 수 있었다.

## V. 결론

마이크로 비드는 고분자 소재를 기반으로 응용 연구 분야에 널리 적용되고 있는 소자로 용도에 따라 다양한 형태로 제작이 용이하며 기능성 부여를 위해 메탈 코팅 등 추가 공정이 가능한 장점을 가지고 있다. 이러한 마이크로 비드가 가지고 있는 입자 특성을 이용하여 기능성을 구현하는 방식 외에 대량 입자의 배열 형상을 제어하여 기능성을 제어하는 방식이 존재하며 이에 대한 공정 기술이 연구가 진행되고 있다. 이와 관련한 마이크로 비드에 대한 정밀 배열 공정 기술은 크게 유체 기반의 비드 제어 기술과 비드 입자 토출 방식이 대표적인 공정 기술로 이와 관련된 연구가 진행되고 있다. 유체 기반의 비드 제어 기술은 microfluidic을 기반으로 유체 내 비드 입자를 외부에서 인가되는 물리적인 힘을 통해 대량 제어하는 방식으로 입자의 개별 제어가 어려우며 응용 디바이스의 범위가 한정되어 있는 단점을 가지고 있다. 반면에 비드 입자의 토출 공정 기술은 비드 입자의 개별 분리 및 토출 공정이 가능하며 다양한 응용 디바이스 제조 공정에 적용이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 현재 연구가 진행된 마이크로 비드 토출 공정 기술은 배열 형상을 제작하기 위해서는 정밀 토출과 위치 제어 성능이 떨어져 응용 디바이스 제조 공정 기술로는 활용성이 낮은 단점을 가지고 있다. 따라서 마이크로 비드의 응용 디바이스로의 적용을 위해서는 마이크로 비드 입자의 개별 토출 공정 기술에 대한 성능 향상, 응용 디바이스 적용성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 마이크로 비드의 기능성 및 응용 연구를 위한 활용 방안 중 마이크로 비드의 개별 제어를 통한 응용 디바이스 제조 공정에 활용될 수 있는 마이크로 비드에 대한 토출 및 배열 공정 기술에 대한 연구를 진행하였다. 이와 관련한 전극에 인가되는 고전압에 의해 형성된 전기장에 의한 정량 미세 토출이 가능한 정전기력 토출 공정 기술과 마이크로 사이즈 니들과 캐필러리를 활용하여 스탬프 공정과 유사한 형태의 토출공정 기술을 마이크로 비드 토출 공정 기술로 활용하기 위한 연구로 각 공정 별 토출 형상과 비드 개별 배열 가능 여부를 공정 테스트를 통해 확인하였다. 마이크로 비드에 대한 정전기력 기반 토출



공정의 경우 전압 인가에 의한 전위차를 이용하여 혼합용액 내 분산되어 있는 비드의 분리 및 토출을 유도하는 방식으로 실험을 통해 전압에 대한 토출 영향과 용액 점도에 따른 토출 공정을 진행하여 최적 전압 범위 및 토출 가능 점도를 확인하였다. 마이크로 니들 기반 토출 공정은 마이크로 사이즈 니들에 전압을 인가하는 방식으로 니들의 끝단에 비드를 흡착하여 이를 기판 상에 토출하는 공정 기술이다. 따라서 니들에 대한 전압 인가 영향과 비드 흡착을 위한 니들 형태에 대한 영향을 실험을 통해 진행하여 최적 전압과 전기장 형성에 최적 형상을 실험을 통해 확인하였다. 마이크로 캐필러리 기반의 토출 공정은 캐필러리의 정밀 공압제어를 바탕으로 비드의 흡착 및 토출이 진행되는 공정 기술로 공압제어 및 토출 헤드에 대한 영향을 실험을 통해 확인하였고 최적 공압범위 및 토출 거리에 대한 결과를 얻었다.

각 비드 토출 공정 기술에 대한 동일 공정에 대한 결과를 비교하였을 때 정전기력 기반 토출 공정 결과는 정전기력에 의한 정밀 용액 토출 공정으로써는 효율성을 갖지만 실제 혼합된 형태로 헤드 내부에 존재하는 마이크로 비드의 경우 다른 결과를 보였다. 이는 용액과 혼합형태의 마이크로 비드에 일정한 정전기력을 유지하기 위해서 용액 내에 비드의 분산상태가 최대한 유지되어야 하나 공정 시간 증가에 따라 용액과 비드의 밀도 차이에 의해 침전 혹은 부유상태가 발생하게 되며 인가되는 전압에 의한 전기장의 균일한 영향을 방해하는 역할을 하게 되었다. 그 결과 연속적인 토출에 의한 형상이 불균일하였으며 토출되는 비드의 양도 불균일하였다. 마이크로 니들 기반 토출 공정 기술은 이러한 토출 균일성을 보완하고자 비드의 직경과 동일한 마이크로 사이즈의 니들에 전압을 인가하여 마이크로 비드의 개별적인 흡착이 이루어지도록 하였고 정밀 스테이지를 적용하여 상하 이동과 비드가 기판 상에 균일하게 토출되도록 하였다. 마이크로 니들의 토출 공정 결과, 정전기력 기반 토출 공정 결과보다 비드 토출에 대한 균일성은 양호하였으나 마이크로 비드의 인가전압에 의한 비드 흡착과정에서 연속적으로 균일한 흡착이 불가능하여 토출 시 비드의 양이 불균일하였다. 마이크로 캐필러리 기반 토출 공정 기술의 경우, 비드보다 직경이 작은 10 ~ 20  $\mu\text{m}$ 급 마이크로 캐필러리 내부의 정밀 공압 제어에 의한 비드의 균일한 흡착 및 토출이 가능하였고 정밀 스테이지에 의한 상하이동과 기판 상에 균일한 토출이 가능하였다. 그



결과, 공정 전체의 토출 형상에서 균일한 비드를 확인할 수 있었으며 앞서 진행한 정전기력 기반 및 마이크로 니들 기반 토출 공정 연구 결과보다 안정된 토출 균일성을 보였으며 정밀 위치에 대한 토출 오차 또한 응용 디바이스에 적용이 가능한 1  $\mu\text{m}$ 급 수준까지 결과를 보여주었다. 이를 바탕으로 전자종이 디스플레이 패널과 agnw 기반 신축성 센서 디바이스 응용 공정에 적용하였다. 전자종이 디스플레이 패널의 경우 마이크로 비드를 구동체로 적용하였고 마이크로 비드 토출, 배열 공정 기술을 픽셀 내 비드 주입 공정으로 활용이 가능함을 확인하였다. PDMS 소재 기반의 agnw 신축성 센서 디바이스에는 마이크로 비드를 전기적 특성을 보완하는 기능으로 사용하였고 실제 제조 공정 시 일반 신축성 센서보다 전기적 안정성 증가 및 신축복원에 대한 기능적 향상을 확인하였다.

본 연구를 위한 마이크로 비드와 응용을 위한 토출 공정 기술은 마이크로 비드 소자특성뿐만 아니라 이를 더욱 효과적으로 응용할 수 있는 새로운 공정 기술에 대한 연구로 기존 응용 연구 외에 마이크로 비드의 기능성을 바탕으로 전기적으로 활용 가능한 전자종이 디스플레이 패널 및 신축성 센서를 앞서 연구된 공정 기술을 바탕으로 적용하였다. 그 결과, 응용 디바이스의 실제 적용이 가능하며 성능 측정을 통해 응용 디바이스로서 정상 동작되었음을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과를 바탕으로 마이크로 비드에 대한 응용 디바이스와 적용 공정 기술에 대한 추가적인 연구가 이루어질 경우 마이크로 비드 활용 기술 발전에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

1. Lyubutin, I. S., S. S. Starchikov, N. E. Gervits, N. Y. Korotkov, T. V. Dmitrieva, C.-R. Lin, Y.-T. Tseng, K.-Y. Shih, J.-S. Lee and C.-C. Wang, "Canted spin structure and the first order magnetic transition in CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles coated by amorphous silica." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016.
2. 김철기, "자기저항을 이용한 바이오칩 및 센서 기술", 한국물리학회 물리학과 첨단기술 제16권 제12호, P.25~27, 2007.
3. K.M. Arif, K. I., I.A. Chaudhry, "Advancements in Nanotechnology: Sensors Influence on Biomolecular Detection." *Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences* 57(2): 109-124, 2015.
4. Edelstein, R. L., C. R. Tamanaha, P. E. Sheehan, M. M. Miller, D. R. Baselt, L. J. Whitman and R. J. Colton, "The BARC biosensor applied to the detection of biological warfare agents." *Biosens Bioelectron* 14(10-11): 805-813, 2000.
5. Choi, S., M. Goryll, L. Y. M. Sin, P. K. Wong and J. Chae, "Microfluidic-based biosensors toward point-of-care detection of nucleic acids and proteins." *Microfluidics and Nanofluidics* 10(2): 231-247, 2010.
6. 심상은, 변재만, 전종원, 차윤종. 최순자, "단분산상으로가교된고분자비드의합성" *폴리머 Polymer (Korea)* 24(3): 287-298, 2000.
7. Lee, J. H, J. S. Oh, P. C. Lee, D. O. Kim, Y. Lee and J.-D. Nam,

- "Fabrication of Nickel/Gold Multilayered Shells on Polystyrene Bead Cores by Sequential Electroless Deposition Processes." *Journal of Electronic Materials* 37(10): 1648-1652, 2008.
8. David R. Baselt, Gil U. Lee, Mohan Natesan, Steven W. Metzger, Paul E. and R. J. C. Sheehan, "A biosensor based on magnetoresistance technology." *Biosensors & Bioelectronics* 13: 731~739, 1998.
9. Jeon, C. S., I. Hwang and T. D. Chung, "Virus-Tethered Magnetic Gold Microspheres with Biomimetic Architectures for Enhanced Immunoassays." *Advanced Functional Materials* 23(12): 1484-1489, 2013.
10. Jones, T. B, "Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation." *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 22(6): 33-42, 2003.
11. 윤호원, "신규전자종이디스플레이인행렬격자구조의부유금속공작동기에대한기본구동원리" 서울 高麗大學校大學院 국내석사학위논문, 2012.
12. 박세진, "순수 금 마이크로비드의 개발 및 화학 분석 소자로의 응용", 산학연협력 기술개발 지원사업, 중소기업청, 2011.
13. Amjadi, M., A. Pichitpajongkit, S. Lee, S. Ryu and I. Park, "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire - Elastomer Nanocomposite." *ACS Nano* 8(5): 5154-5163, 2014.
14. Peng, Z. C., T. Sulchek, W. R. Heineman and P. J. Hesketh, "A bead-based electrochemical biosensor with integrated magnetic manipulation for controllable sample preconcentration", *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*,

2009.

15. Ng, J. K., E. S. Selamat and W. T. Liu, "A spatially addressable bead-based biosensor for simple and rapid DNA detection." *Biosens Bioelectron* 23(6): 803-810, 2009.
16. Suzuki, H., H. Chih-Ming and N. Kasagi, "A chaotic mixer for magnetic bead-based micro cell sorter." *Journal of Microelectromechanical Systems* 13(5): 779-790, 2004.
17. 조은수, "고분자 자성비드 및 자기분리장치를 이용한 응집처리 시스템 개발", 차세대에코이노베이션기술개발사업 최종보고서, 2013.
18. L. Fuquan, "A Magnetic Sensor System for Biological Detection", Thesis of doctor of philosophy, King Abdullah University of Science and Technology, 2015.
19. E. Albisetti, "Magnetic tunneling junctions for biosensing and antiferromagnet-based spintronic devices", Thesis of doctor of philosophy, Politecnico di Milano, 2014.
20. Gaster, R. S., D. A. Hall and S. X. Wang, "Autoassembly protein arrays for analyzing antibody cross-reactivity." *Nano Lett* 11(7): 2579-2583, 2011.
21. Armbrrecht, L., C. Dincer, A. Kling, J. Horak, J. Kieninger and G. Urban, "Self-assembled magnetic bead chains for sensitivity enhancement of microfluidic electrochemical biosensor platforms." *Lab Chip* 15(22): 4314-4321, 2015.

22. E. Iannone, "Labs on chip: Principles, design and technology", CRC Press, 2015.
23. Jiang, D., P. Zhu, H. Jiang, J. Ji, X. Sun, W. Gu and G. Zhang, "Fluorescent magnetic bead-based mast cell biosensor for electrochemical detection of allergens in foodstuffs." *Biosensors and Bioelectronics* 70: 482-490, 2015.
24. Baselt, D. R., G. U. Lee, M. Natesan, S. W. Metzger, P. E. Sheehan and R. J. Colton, "A biosensor based on magnetoresistance technology." *Biosensors and Bioelectronics* 13(7 - 8): 731-739, 1998.
25. Lee, J. H., D. O. Kim, G. S. Song, Y. Lee, S. B. Jung and J. D. Nam, "Direct Metallization of Gold Nanoparticles on a Polystyrene Bead Surface using Cationic Gold Ligands." *Macromolecular Rapid Communications* 28(5): 634-640, 2007.
26. Liu, C., M. G. Schrlau and H. H. Bau, "Single bead-based electrochemical biosensor." *Biosens Bioelectron* 25(4): 809-814, 2009.
27. Wong, C. C., Y. Liu, K. Y. Wang and A. R. A. Rahman, "Size based sorting and patterning of microbeads by evaporation driven flow in a 3D micro-traps array." *Lab on a Chip* 13(18): 3663-3667, 2013.
28. Collins, D. J., B. Morahan, J. Garcia-Bustos, C. Doerig, M. Plebanski and A. Neild, "Two-dimensional single-cell patterning with one cell per well driven by surface acoustic waves." *Nat Commun* 6: 8686, 2015.
29. Louis Musinski , T. L., Brian Gilchrist, Alec Gallimore and Michael

- Keidar, "Experimental Results and Modeling Advances in the Study of the Nanoparticle Field Extraction Thruster", 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.
30. B. S. Yang, J. B. Ko, H. C. Kim, Y. H. Doh and K. H. Choi, "정전기력 패터닝 공정을 이용한 변형률 센서 개발", Korean Society Of Precision Engineering, 2013.
31. B. S. Yang, Y. J. Yang, H. W. Dang, S. W. Kim, H. B. Kim, K. H. Choi and Y. H. Doh, "정전기력 기반의 마이크로 비드 주입공정 최적화", Korean Society Of Precision Engineering, 2014.
32. L. D . Musinski, "Investigation of a Micro- and Nano-Particle In-Space Electrostatic Propulsion Concept.", Thesis of doctor of philosophy, University of Michigan, 2009.
33. P.A. Kralchevsky, "Particles at Fluid Interfaces and Membranes", Elsevier, Amsterdam; pp. 469-502, 2001.
34. Cai, S. and B. Bhushan, "Meniscus and viscous forces during normal separation of liquid-mediated contacts." *Nanotechnology* 18(46): 465704, 2007.
35. B. S. Yang, S. W. Yang, J. B. Ko, K. H. Choi and Y. H. Doh, "A research about micro size polymer bead injecting process based on electrostatic force." *Journal of the Korea Society For Power System Engineering* 20(2): 43-50, 2016.
36. Chung, M. H., S. Kim, D. Yoo and J. H. Kim, "Materials and

Characteristics of Emerging Transparent Electrodes." *Applied Chemistry for Engineering* 25(3): 242-248, 2014.

37. Amjadi, M., A. Pichitpajongkit, S. Lee, S. Ryu and I. Park, "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire - Elastomer Nanocomposite." *ACS Nano* 8(5): 5154-5163, 2014.



## 감사의 글

지난 2010년 석사를 마치고 나서 약 2년간의 회사생활 끝에 다시 학업을 시작하기로 한 2013년 이후 지금까지 많은 우여곡절이 있었고 힘들날도 좋은날도 있었지만 그동안 내가 해왔던 모든 학업과 연구과정에서 나 혼자서 잘해낸 일은 없었던 것 같다. 다만 옆에서 많은 분들이 도움이 있었기에 이렇게 마지막까지 크진 않지만 성과와 함께 졸업할 수 있었고 큰 탈없이 모든 학업을 마칠 수 있었다. 가장 먼저 지금은 함께 하지는 못하지만 어디에서든 보고 계실 아버지와 항상 저를 위해 사시는 어머니께 감사를 드리고 싶다. 제가 가지고 있는 능력보다 더 저를 위해서 많은 도움주시고 조언을 해주신 도양회 교수님과 최경현 교수님, 제가 드릴수 있는 것보다 더 많은 것을 주신 교수님께 감사의 말씀을 진심으로 드리고 싶다. 이렇게 감사의 말씀을 드리는 것조차 참 많이 부족하다는 게 감사의 글을 쓰면서 새삼 느끼게 된다. 그리고 박사과정 동안 나를 위해 많은 도움을 주었던 연구실의 형찬이형, 정범 그리고 현우, 영진, 고범, 현범, 수완, 효태, 영수, 경환, 지은씨까지.. 지금까지 내가 여기서 한 모든 일은 다 함께 해주었기에 할 수 있었다고 전하고 싶다. 그리고 저의 많은 부분에서 부족하였던 박사학위 심사에 있어 기꺼이 맡아서 해주신 고성택 교수님과 이광만 교수님 그리고 ETRI의 양용석 박사님께도 부족하게나마 감사의 말씀을 드리고 싶다. 마지막으로 이 글을 통해 나중의 제 자신에게도 당부의 말을 전하고 싶다.

“나중에 내가 어디서든 항상 노력하는 자세를 잃지 않았으면 좋겠다. 내가 가고자 하는 길이 멀고 힘들겠지만 조금은 쉬면서 꾸준히 걸어서 간다면 좋은 결과가 있을꺼다.”