



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

대면적 코팅을 위한 정전기력 기반의  
멀티노즐 헤드 시스템에 관한 연구

濟州大學校 大學院

메카트로닉스工學科

鄭 佐 鎮

2014 年 8 月

# 대면적 코팅을 위한 정전기력 기반의 멀티노즐 헤드 시스템에 관한 연구

指導教授 崔 勁 賢

鄭 佐 鎮

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 8 月

鄭佐鎮의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2014 年 8 月

# Study on Multi-Nozzle System of Electrostatic Force Base for Large-Area Coating

Jwa-Jin Jeong

(Supervised by professor Kyung-Hyun Choi)

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

2014 . 8 .

This thesis has been examined and approved.

---

Thesis committee chair, Ki-Rin Kwon, Prof. of Mechanical Eng.

---

Thesis committee member, Chul-Ung Kang, Prof. of Mechatronics Eng.

---

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

August 2014

Date

Department of Mechatronics Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	1
LIST OF TABLES .....	3
ABSTRACT .....	4
I. 서 론 .....	5
II. 이론적 배경 .....	7
1. 습식 코팅의 종류 .....	7
1) 스�핀 코팅 .....	7
2) 블레이드 코팅(나이프 코팅) .....	8
3) 딥 코팅 .....	8
4) 롤 코팅 .....	9
5) 그라비아 코팅 .....	9
6) 슬릿 다이 코팅 .....	10
7) 슬라이드 코팅 및 커튼 코팅 .....	11
8) 스프레이 코팅 .....	12
9) 잉크젯 .....	13
10) 에어로졸 증착 .....	16
11) 정전기력 분무 증착 .....	16
2. 대면적 코팅용 ESD 공법 연구의 필요성 .....	19
3. ESD(Electrostatic Spray Deposition) 공정 .....	19
1) ESD 소개 .....	19
2) ESD 공정 원리 .....	20

3) 정전기력 분무 형상 .....	23
III. 연구 방법 .....	25
1. 연구계획 및 측정방법 .....	25
2. 정전기력 분무 공정 시스템 .....	27
1) 고전압 방생 Unit .....	29
2) 마이크로 용액 공급 Unit .....	29
3) 분무 공정 모니터링 Unit .....	29
4) 3축 정밀 이송 Unit .....	30
5) 마스크 및 홀딩 Unit .....	30
3. 200mm 영역의 코팅을 위한 ESD 멀티노즐 헤드 개발 .....	32
1) 허브 삽입형 멀티노즐 헤드 개발 .....	32
2) 메탈 캐필러리 삽입/일체형 멀티노즐 헤드 개발 .....	33
IV. 연구 결과 및 고찰 .....	34
1. 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성 .....	34
2. 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 특성 .....	37
1) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 길이차이에 의한 분무 특성 비교 .....	37
2) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 수직정렬차이에 의한 분무 특성 비교 .....	40
3) 멀티노즐 헤드와 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성 비교 .....	41
4) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 거리에 의한 분무 특성 비교 .....	41
V. 결    론 .....	48
참 고 문 헌 .....	51

## LIST OF FIGURES

그림 1. 진공 증착 .....	5
그림 2. 스핀 코팅 .....	7
그림 3. 각종 블레이드 코터와 나이프 코터 .....	8
그림 4. 자유끌어올림 코팅의 베리에이션 .....	8
그림 5. 리버스 롤 코터와 포워드 롤 코터 .....	9
그림 6. 롤 코팅의 계량 원리 .....	9
그림 7. 그라비아 코팅 .....	10
그림 8. 슬릿 다이 코팅 .....	10
그림 9. 슬라이드 코팅 .....	11
그림 10. 커튼 코팅 .....	12
그림 11. 스프레이 코팅 .....	13
그림 12. 압전 잉크젯의 작동원리 .....	14
그림 13. 잉크젯의 종류 .....	15
그림 14. 에어로졸 데포지션의 원리 .....	16
그림 15. ESD 공정 .....	20
그림 16. ESD 공정의 원리 .....	20
그림 17. 정전기력 분무의 여러 현상 .....	23
그림 18. 정전기력 분무의 형상에 미치는 유량과 정전기력 영향 .....	24
그림 19. 금속현미경과 3차원 단차 측정기 .....	24
그림 20. 정전기력 분무기반의 코팅 시스템 .....	27
그림 21. 정전기력 분무 코팅공정 시스템 .....	28
그림 22. 메탈마스크(Invar36)와 마스크 홀더 및 홀딩Unit .....	31
그림 23. 메탈 캐필러리를 구비한 허브와 허브 삽입형 멀티노즐 헤드 .....	32
그림 24. 메탈 캐필러리가 삽입된 아답터 및 멀티노즐 헤드 .....	33
그림 25. 노즐과 2차전극의 전위차 및 거리에 따른 분무영역 제어 .....	35
그림 26. 단일노즐 헤드의 분무영역 확장시 코팅직경 및 높이 .....	36

그림 27. 단일노즐 헤드의 분무영역 축소시 코팅직경 및 높이 .....	36
그림 28. 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무시 2차전극의 삽입/구성 .....	37
그림 29. 노즐과 2차전극 거리에 따른 분무 특성 .....	38
그림 30. 길이편차가 $24.44\text{mm}\pm 0.02$ 인 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 .....	39
그림 31. 캐필러리 수직정렬 미확보와 캐필러리 수직정렬 확보 .....	40
그림 32. 캐필러리 거리 15mm 멀티노즐 및 분무결과물 .....	41
그림 33. 캐필러리(3개) 거리 7.4mm의 코팅영역 12mm 중첩 시뮬레이션 .....	42
그림 34. 2차 멀티노즐 및 분무결과물 .....	43
그림 35. 캐필러리 거리 축소시 타원형의 상태로 분무영역 확장 .....	44
그림 36. 분무상승현상 및 2차전극 하부 분무용액 적체현상 .....	44
그림 37. 멀티노즐의 노즐간 거리축소에 따른 정전기력 분무간 반발력 .....	45
그림 38. 캐필러리 거리 5mm 분무시 메탈 마스크와 코팅결과 .....	46
그림 39. 3차 멀티노즐 헤드 및 코팅 결과물 .....	47



## LIST OF TABLES

표 1. 다양한 습식코팅의 공법의 특징 .....	17
표 2. 감광성 용액의 특성 .....	25
표 3. 정전기력 분무 시스템 사양 .....	28
표 4. 선별한 허브의 메탈 캐필러리 길이 .....	39

## ABSTRACT

A state of the art Electrostatic Spray Deposition (ESD) technology has been invested to develop high quality thin films for various electronic devices. In order to ensure the mass production, a multi nozzle array has been used to fabricate high uniform large area thin films.

First the ESD process was thoroughly studied using single nozzle setup and then the process characteristics were used to design and execute the ESD process with multi nozzle array. The most important factors to make ESD multi nozzle were; difference of nozzle length, angle of nozzle and second electrode. To achieve a uniform spray, the difference of nozzle length must be under  $\pm 20 \mu\text{m}$  and angle has to be perpendicular for second electrode. In order to achieve uniformed thin film at large area, the space length between of unit ESD Nozzles is strictly controlled. The space length was adapted shorter than sprayed cone-jet angle of unit ESD nozzle, because of electrical repulsive force between cation in cone-jet. Under the present research, arrayed ESD multi nozzle which has a length 200 mm and a nozzle space 2 mm, was produced and 465 nm film was developed under 14.1% of uniformity.

# I. 서 론

국내 제조 산업을 이끌고 있는 주요 산업은 반도체, 디스플레이, 태양전지 산업이다. 이들 산업 분야의 가장 핵심이 되는 공정은 박막 형성 공정이라 할 수 있는데, 자세히 언급하자면 반도체 제조 공정 중 반도체층, 절연층, 전극층 형성, 디스플레이에서는 Thin Film Transistor 제조 공정 중 반도체층, 절연층, 전극층 형성, 박막태양전지에서는 투명전극층과 활성층 형성 등을 들 수 있다.[1-4] 이러한 박막 형성은 기계 가공으로 만들 수 없는 두께가  $1\mu\text{m}$  이하인 얇은 막을 형성하게 된다.

박막형성 공정은 주로 PVD(Physical Vapor Deposition), CVD(Chemical Vapor Deposition) 등의 진공 상태에서 Dry Coating 방식으로 주로 진행되어진다. 이러한 Dry Coating 방식은 진공 상태에서 진행되므로, 불순물을 최소화할 수 있고, 우수한 박막을 형성할 수 있는 공법이라고 할 수 있다.[5]

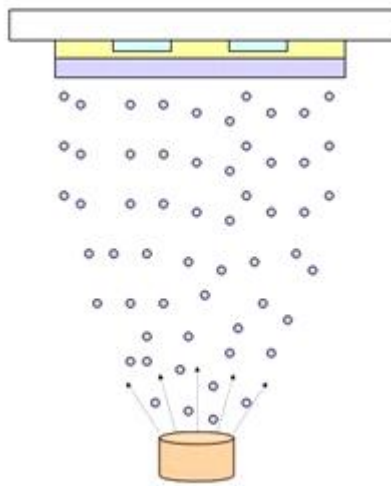


그림 1. 진공 증착

(출처. 물리학과 첨단기술 April 2005, “OLED 증착장비 기초기술”)

하지만, 이러한 진공 분위기의 조성과 진공 상태를 유지하기 위한 시스템 구축

및 유지 비용이 매우 크다. 따라서 비용을 절약하기 위하여 소재를 용제 등에 용해시켜 코팅하는 습식 코팅에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 차세대 기술로 활발히 연구되고 있는 OLED 및 박막태양전지 분야에서 이러한 재료의 용액화 기술을 다양하게 연구 중에 있다.[6-7] 이러한 용액화 기술로 개발된 재료는 용액상태로 공정을 진행할 수 있게 되므로, 습식코팅의 필요성이 더욱 커지고 있다.

습식 코팅은 공정 중에 불순물의 혼입, 기포, 건조 과정 중에 표면이 고르지 못하게 되는 등의 단점이 있지만, 초기투자비용 절감, Running Cost의 비용절감과 같은 장점으로 인해, 상기 단점을 극복하기 위하여 다 방면으로 연구하고 있다.

습식 코팅의 종류에는 스프인, 닥터블레이드, 캐스팅, Slit Die, Spray 등의 다양한 공법이 있다. 하지만 이들 공법은 그 공법자체의 특징으로 인하여  $1\mu\text{m}$ 이하의 박막을 형성하기에는 공정적인 제약이 많아 구현하기 매우 어렵다. 하지만 ESD(Electrostatic Spray Deposition)은 정전기력을 제어하여 미세직경 노즐을 통해 용액을 나노/마이크로 급의 미립자 상태로 분무하는 기술이므로, 나노 박막을 형성하는 것이 가능하다.[8]

하지만, 기존에 개발된 하나의 노즐을 이용한 ESD 공법은 생산성이 매우 낮은 단점이 있다. 이러한 ESD 공법의 단점을 극복하기 위해 본 연구에서는 대면적을 동시에 코팅할 수 있는 ESD Nozzle의 Array System을 연구하였다.

특히 본 연구의 핵심 기술인 ESD Nozzle의 Array System을 연구하기 위한 멀티노즐 헤드를 직접 설계하여 제작하였으며, 이를 제어하는 System을 구성하여 실험을 진행하였다. 또한 단일노즐 헤드와 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 특성의 비교 실험을 진행하여 ESD Nozzle을 정렬할 때 발생하는 다양한 공정 기술 및 설계 인자를 도출하였으며, 이를 바탕으로 코팅영역 200mm의 ESD 멀티노즐 헤드의 박막 코팅 균일도를 평가하여 정전기력 분무기반의 코팅 공정 특징과 보완점을 확인하였다.

## II. 이론적 배경

### 1. 습식 코팅의 종류

습식코팅은 소재를 용제 등에 용해시켜 용액화된 코팅액을 붓기, 바르기, 뿌리기, 스며들기 등으로 기판에 직접 코팅층을 형성시키는 방법이다. 작은 기판 위에 배치(Batch)형으로 코팅을 할 수도 있고, Film 등의 기재에 연속적으로 Roll to Roll 방식으로 코팅을 할 수도 있다. 본 장에서는 이러한 습식코팅의 종류 및 설명, 장단점 등에 대하여 간략히 논의하도록 하겠다.[9-14]

#### 1) 스핀 코팅(Spin Coating)

스핀코팅은 용액을 사용한 박막형성법 중에 가장 널리 쓰이는 방식으로 그림 2와 같이 코팅액을 기판 위에 미리 떨어뜨린 후, 기판을 매우 빠른 속도로 회전시키면서 원심력에 의해 유체를 펼쳐 코팅하는 방식이다. 코팅 두께는 코팅액의 점도 및 회전속도로 제어한다. 장비나 공법은 단순하지만, 연속성 생산에 부적합하고, 대면적 구현이 불가능한 단점이 있다.

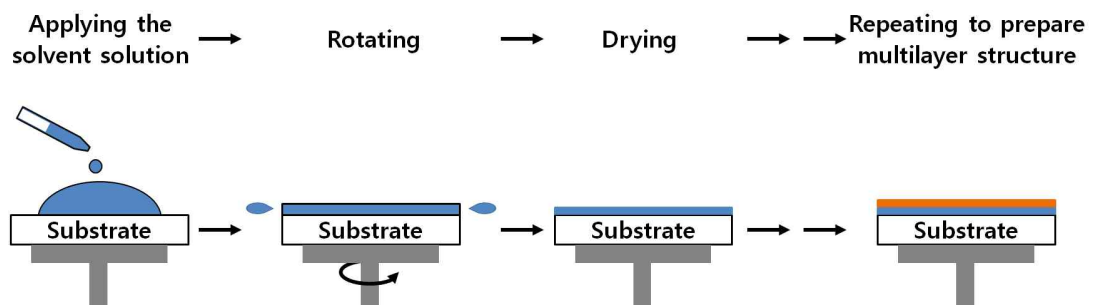


그림 2. Spin Coating(출처. solarenergy.com)

## 2) 블레이드 코팅(나이프 코팅)

블레이드 코팅(Blade Coating)은 기재에 코팅액을 부어놓고 기재와 일정한 간격을 유지하도록 제작된 블레이드를 지나가게 하여 그 간격을 이용하여 과도하게 공급된 코팅액을 긁어내는 코팅방식이다. 두께는 기재와 블레이드와의 간격, 이동속도, 코팅액의 점도 등으로 제어한다. 블레이드와 기재와의 물리적 간격으로 코팅두께를 결정하게 되므로 박막형성에는 한계가 있다. 그림 3에는 여러종류의 블레이드 코팅을 나타내었다.[12-14]

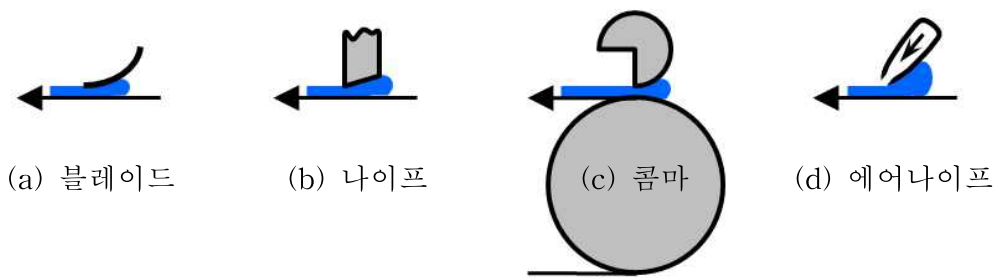


그림 3. 각종 블레이드 코터와 나이프 코터

## 3) 딥 코팅(Dip Coating)

이 코팅법은 코팅액으로 채워진 탱크나, 수조에 기재를 직접 통과 시켜 코팅을 하는 방법으로, 코팅 두께의 정확한 조절이 필요하지 않은 경우나, 불규칙한 표면을 갖는 기재를 코팅 시에 주로 사용하는 공정이며 박막형성에는 부적합한 코팅방식이라 할 수 있다. 두께의 조절은 기재의 이동속도 및 코팅액의 점도, 수조를 통과하는 기재 길이 등으로 이루어진다. 그림 4는 이러한 자유끌어올림 코팅의 베리에이션을 나타낸다.[12-14]

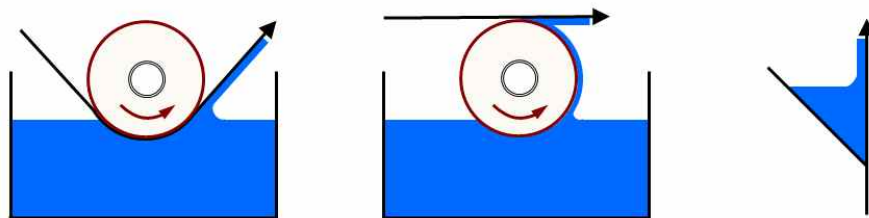


그림 4. 자유끌어올림 코팅의 베리에이션

#### 4) 롤 코팅(Roll Coating)

롤 코팅 방식은 주로 Roll to Roll 방식에 적용되는 공법으로 그림 5와 같이 리버스 롤 코팅과 포워드 롤 코팅 2가지 방식이 있다. 리버스 롤 코팅에서는, 롤 간의 갭 부에서 공급 코팅액이 역방향으로 회전하는 롤에서 일부 긁어내고, 남은 액이 코팅이 된다. 포워드 롤 코팅에서는 롤 간의 갭 부분에서 공급 도포액이 같은 방향으로 회전하는 롤에서 상하로 분할되고, 분할 후의 일정량의 액이 코팅되게 된다. 롤 코팅방식에서 코팅 두께는 롤 간의 압력과 롤 표면의 이동으로 인한 코팅용액에의 추진력으로 결정되며 리버스 롤 코팅과 포워드 롤 코팅의 계량 원리는 그림 6과 같다.[12-14]

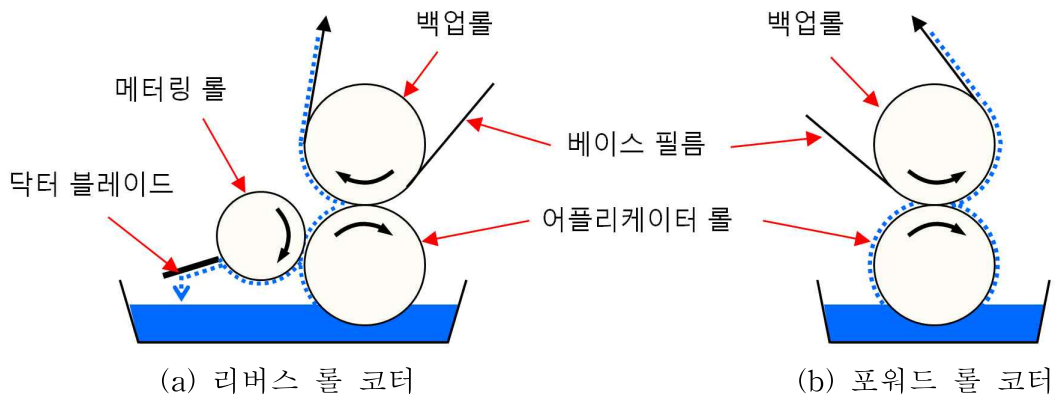


그림 5. 리버스 롤 코터와 포워드 롤 코터

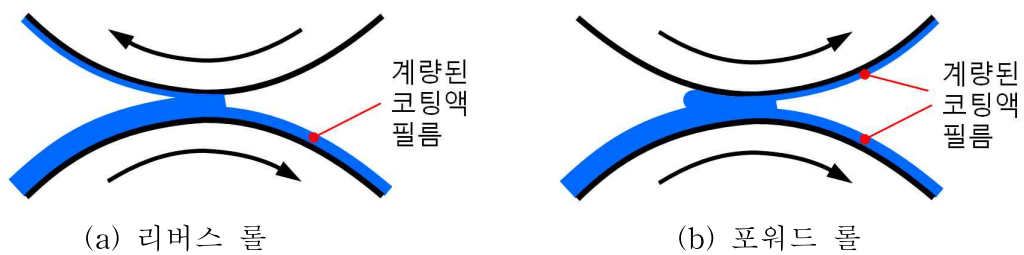


그림 6. 롤 코팅의 계량 원리

#### 5) 그라이바 코팅(Gravure Coating)

그라이바 코팅은 그림 7과 같이 Gravure Roll(미세패턴이 각인 된 롤) 상의 과도한 액을 긁어낸 후, 남은 액을 전사함으로써 소정의 막두께와 균일성을 얻기

위한 코팅방식이다. 그라비아 코팅에서 Gravure Roll은 표면에 각인된 오목한 형태(음각)의 셀을 가지는 원통형의 조각물로 코팅액을 끌어올리는 중요한 역할을 한다. 이 표면에 각인된 셀의 치수와 크기가 도막의 두께를 결정하게 된다.[12]

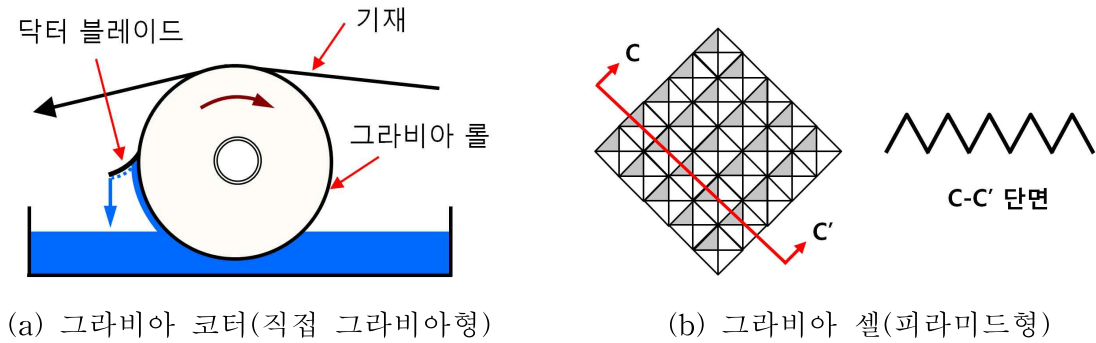


그림 7. 그라비아 코팅

#### 6) 슬릿 다이 코팅(Slit Die Coating)

슬릿 다이 코팅은 미리 계산된 코팅액을 폭방향으로 균일하게 분배하기 위한 슬릿 다이 노즐에 경유시켜 기재상에 균일하게 도포하는 방식으로 그림 8과 같으며 계량 펌프에서 코팅액을 미리 결정하여 코팅을 진행하므로 액 소모가 적은 정량 코팅 방식이다. 또한 노즐의 크기가 코팅 폭을 결정하므로, 노즐의 가공이 가능한 3000mm의 대면적 코팅에도 적용이 가능하다. 코팅의 두께는 액의 점도, 토출량, 노즐 이동 속도, 노즐과 기재와의 간격, 노즐심의 두께 등으로 조절이 가능하고, Roll to Roll 방식의 연속 생산 방식의 적용이 가능하다. 하지만, 노즐과 기재와의 간격 제한으로 인하여 박막 코팅의 구현이 어렵다.

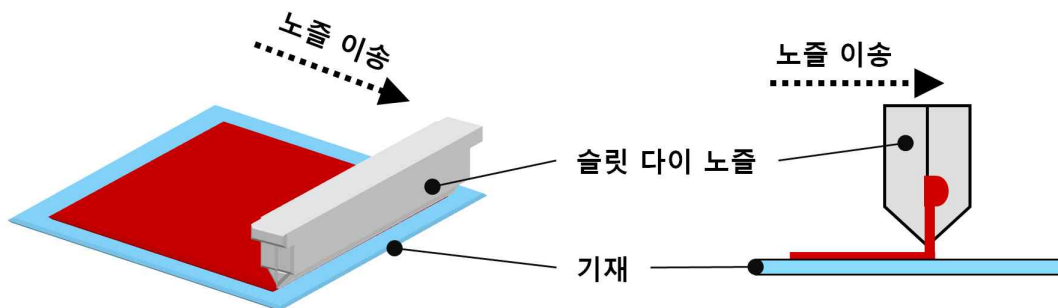


그림 8. 슬릿 다이 코팅



### 7) 슬라이드 코팅(Slide Coating) 및 커튼 코팅(Curtain Coating)

슬라이드 코팅은 사진용 필름 제조를 위해서 개발된 것이므로, 다층 코팅에 적용되는 코팅법이다. 이 방법은 독립적으로 계량된 복수의 코팅액이 각각 독립한 채널(Cavity)에 공급되어, 슬릿부를 경유하여 경사부에 토출, 공급된다. 이 경사부에서 복수층이 경사부를 흘러내려가면서 일체화된 후, 기재에 도막을 형성한다. 그림 9는 슬라이드 코팅의 코팅부를 나타낸다.[12-14]

본 방식은 슬릿 코팅과 같이, 계량공급된 코팅액은 전량 도막으로서 기재에 코팅된다.

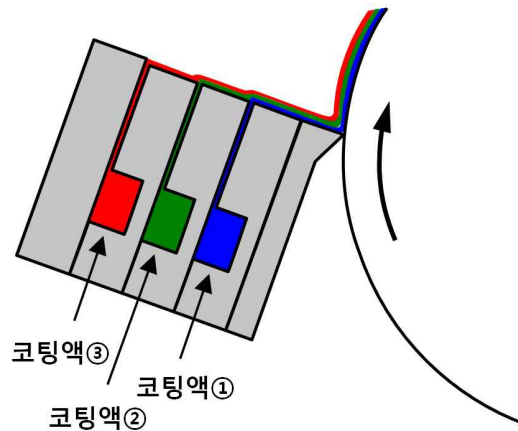


그림 9. 슬라이드 코팅

다이를 이용한 다층 코팅을 실시하는 슬라이드 코팅과 유사한 커튼 코팅이라고 불리는 방식이 있다. 이 방식은 경사부를 흘러내리는 복수층으로 된 코팅액을 경사부의 끝에서 커튼형으로 공기중을 낙하시켜, 기재에 코팅하는 것으로 커튼 코팅의 코팅 프로세스는 그림 10과 같다.[12-14]

슬라이드 코팅과 비교하여 고속 코팅이 가능하며, 커튼부가 있으므로, 기재 교환 시의 조작성이 좋은 이점이 있다. 하지만 이러한 다층 코팅이 가능한 두 공법 모두 공정이 복잡하고, 적절한 코팅액의 조합이 필요한 코팅기술이다. 또한, 얇은 박막을 구현하기 위해 상당한 속도로 기재의 이동이 이루어져야 하고, 그에 따라 적절한 잉크의 흐름성이 확보되어야 한다.

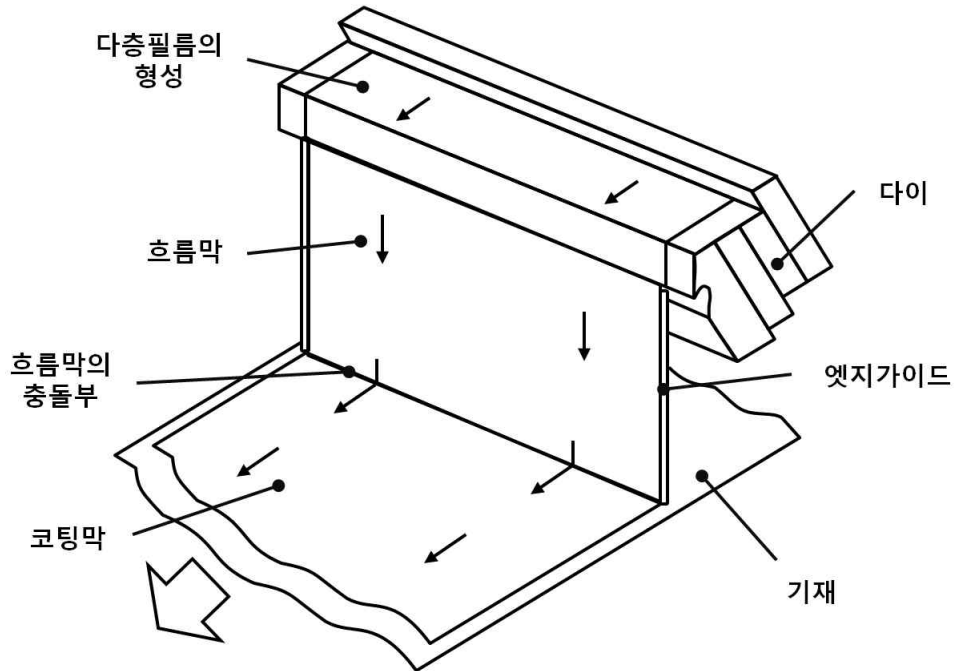


그림 10. 커튼 코팅

#### 8) 스프레이 코팅(Spray Coating)

노즐을 이용하여 미세한 에어졸을 형성하고 이를 기판에 분사하여 코팅하는 방식으로 그림 11과 같다.

기재의 표면이 불규칙하거나 패턴이 형성되어 있는 경우도 균일하게 코팅할 수 있는 공법이다. 분사 노즐의 장치 및 형태에 따라, 압력, 공기, 혼합 등으로 구분되어 진다. 압력분사는 코팅액이 매우 높은 압력에 의해 노즐로 공급되며 노즐에서 분사시 공기의 분산에 의해 필름에 코팅되는 것이며, 공기분사의 노즐은 코팅액을 공기 압력으로 충돌시켜 코팅액을 작은 방울의 형태로 퍼뜨려 필름에 적용하는 것이다. 또한 코팅물질이 두종류 이상인 경우는 내부 또는 외부 혼합에 의한 혼합분사 방식을 사용한다. 스프레이 코팅은 주로 기재의 단면 코팅에 주로 사용되고, R2R 공정이 가능하다. 하지만, 에어졸 형성방법과 용매의 증발제어가 어려워 박막형성에는 한계가 있으며, 분사 방식으로 인해 작업공간의 오염도 고려되어야 한다.



그림 11. 스프레이 코팅(출처. nordson.com)

#### 9) 잉크젯(Inkjet)

잉크젯 프린팅 기법은 헤드로부터 미세한 잉크방울을 토출시켜 원하는 위치에 인쇄를 하는 공정기술이다. 노즐을 통해 토출된 미세한 액적이 공중을 날아 기체에 부착되고, 용매가 건조되어 고형분이 고착되는 것에 의해 인쇄가 되는 기술로 압전 잉크젯의 작동원리는 그림 12와 같다.[15]

잉크젯 방식은 그림 13과 같이 액적을 토출시키는 특성에 따라 Continuous 방식과 On demand 방식으로 나눈다. 연속방식은 액적을 연속적으로 토출시키는 방법으로 장치가 대형이고, 품질이 낮아 컬러화에 적절하지 않기 때문에 저해상도 제품생산에 활용되고 있으며, On demand 방식은 액적을 원하는 때, 선택적으로 토출시키는 방법으로 고해상도의 패터닝에 주로 활용된다.

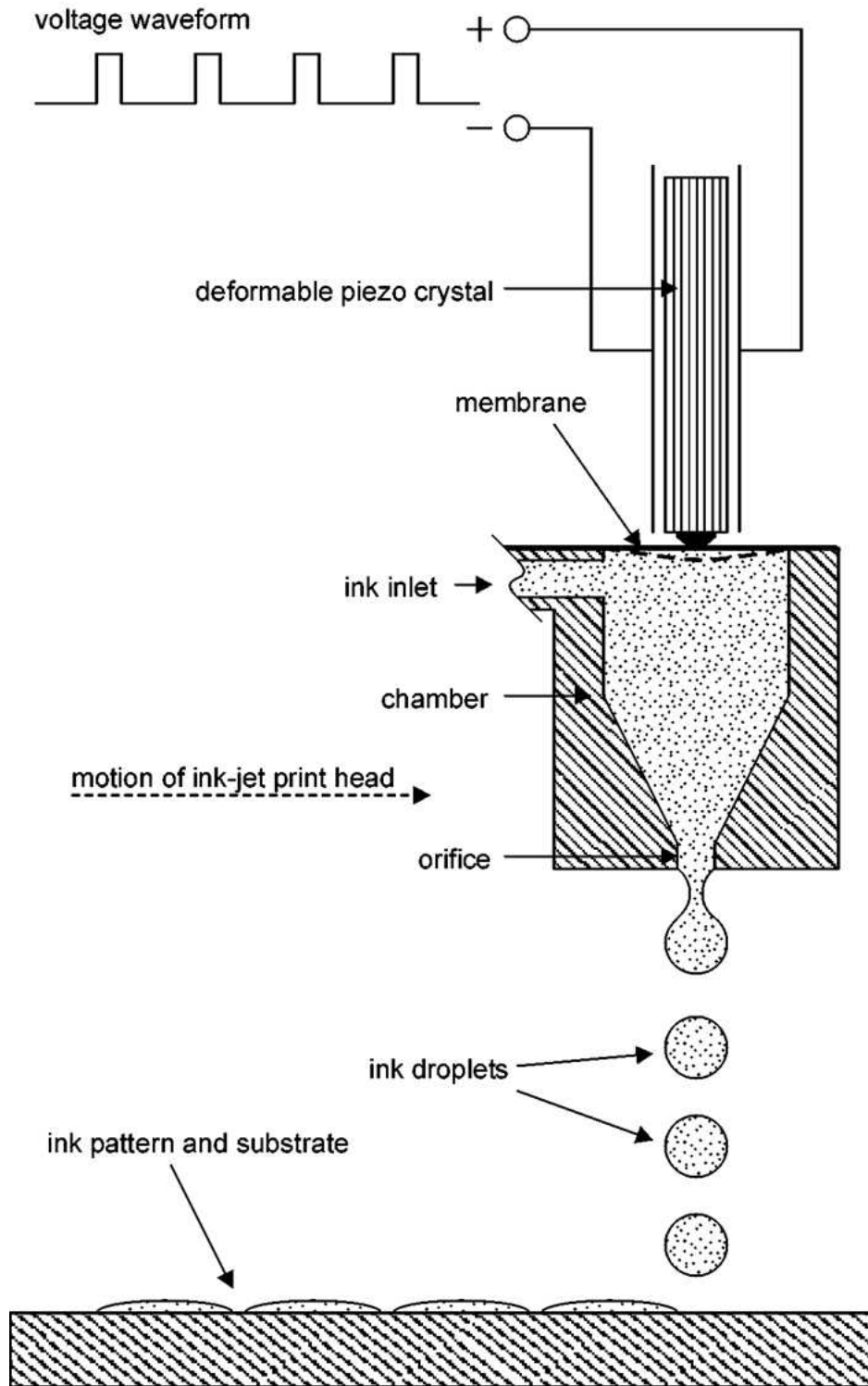
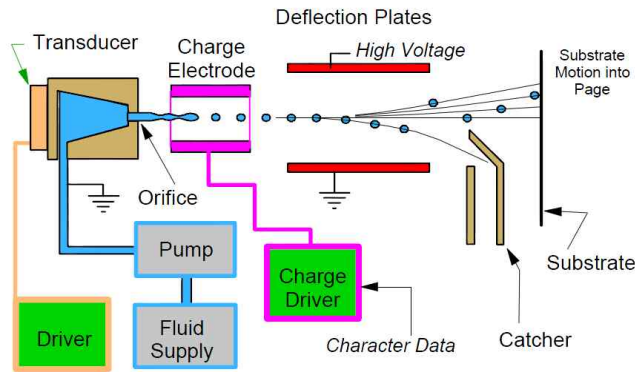
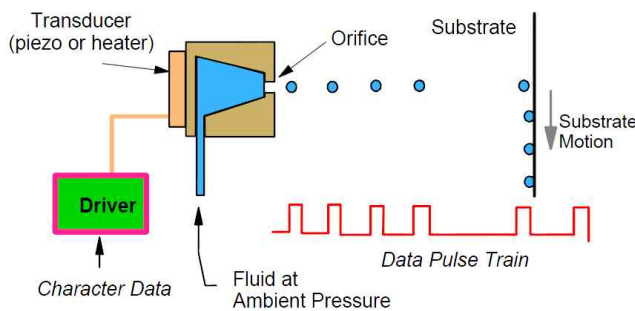


그림 12. 압전 잉크젯의 작동원리



(a) 연속젯팅(Continuous Jet, CJ)



(b) 드롭 온 디맨드(Drop-on-Demand, DOD)

그림 13. 잉크젯의 종류 (출처. microfab.com)

On demand 방식은 Piezo 방식과 Thermal Bubble 방식이 있으며, Piezo 방식은 잉크실을 압전소자로 바꿔 체적을 변화시켜, 잉크실 안의 잉크에 압력을 주면 노즐을 통해 잉크가 토출되는 형태이며, Thermal Bubble 방식은 잉크에 열을 가해 순간적으로 기포를 발생시켜 압력으로 잉크가 토출되는 형태로, Thermal Bubble은 소형화, 고밀도화가 쉽고 헤드의 비용도 저렴하다. 그러나 열이 가해지기 때문에 헤드의 내구성이 짧고, 용매의 비등점의 영향이나 잉크 재료로의 열손실을 피할 수 없기 때문에 사용할 수 있는 잉크가 한정된다는 단점이 있다.

잉크젯은 공정이 간단하고 설비비용/제조비용을 낮출수 있으며, 재료를 원하는 위치에 인쇄를 하므로 재료의 손실이 없어 원료의 낭비가 없고, 친환경적이며, 또한, 현상, 에칭과 같은 공정이 없기 때문에 화학적 영향으로 기관이나, 재료의 특성이 열화될 우려가 없다. 또한, 비접촉식 인쇄방식이므로, 접촉에 의한 디바이스 손상이 없고, 표면이 매끄럽지 않은 기관에서도 패턴이 가능하다. 이러한 장점에도 불구하고, 공정속도가 느려 최근에는 다노즐화, 노즐 고밀도화, 구동 주파

수의 고주파화 등 다양한 방법으로 인쇄속도 향상을 위한 기술을 개발하고 있다. 하지만, 잉크젯은 패턴을 인쇄하는 공정에는 유리하지만, 전체 면적을 코팅하기에는 부적합한 공정이라고 할 수 있다.

#### 10) 에어로졸 증착(Aerosol Deposition)

에어로졸 방식은 잉크젯 공정과는 다르게 액체와 나노물질의 합성물을 정확하게 전달하기 위한 공기역학적인 집중방식을 이용한다. 이 공정은 그림 14와 같이 도포하려는 물질을 Atomize하여 미스트를 형성함으로써 시작한다. 미스트화된 잉크는 Carrier Gas를 이용하여 노즐까지 이송하여 토출을 한다. 노즐 토출 시에는 Sheath Gas를 이용하여 도포 폭을 조절가능하다. 이러한 특징으로, Aerosol Deposition은 마스크나 패턴을 이용하지 않고 미세한 구조 회로와 부품을 만들어 내기 위해 나노물질을 사용하여 전체 전자시스템의 크기를 줄이는데 사용된다. 10 $\mu$ m 정도의 패턴 형성 및 100nm 이상의 박막 형성이 가능하고, 잉크젯과 마찬가지로 비접촉 방식이므로 다양한 기판에 적용이 가능하다. 하지만 미스트화 할 수 있는 잉크의 한정으로 활용이 제한적이다.

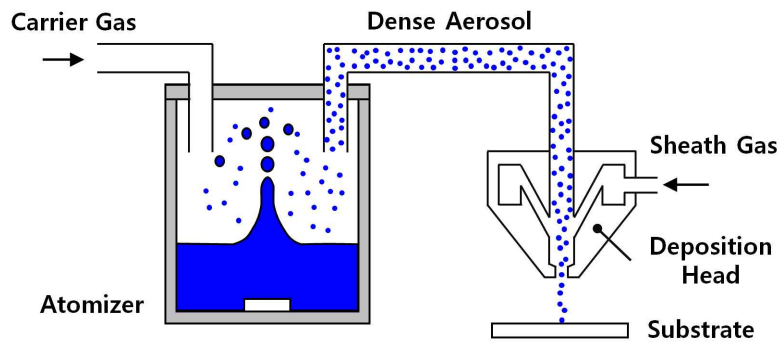


그림 14. 에어로졸 데포지션의 원리(출처. optomec.com)

#### 11) 정전기력 분무 증착(Electrostatic Spray Deposition)

정전기력 분무 증착(ESD)은 액체를 정전기적인 힘으로 미세화하여 분사시키는 기술이다. 이러한 정전기력 분무는 타겟과 노즐 사이의 전압에 의하여 발생된 정전기력에 다양한 원료의 유체를 나노/마이크로 급의 미립자의 상태로 타겟 상에 코팅을 하게 되므로, 최근 각광받고 있는 인쇄전자분야에서 필요로 하는 나노급

의 박막을 구현할 수 있는 코팅 기술이라고 할 수 있다. 또한 잉크젯과 마찬가지로 비접촉식 공법이므로, 접촉에 의한 기관의 손상이 없다. ESD 공법의 원리는 다음 장에서 상세히 논하도록 하겠다.

본 장에서는 다양한 습식 코팅 공법에 관하여 설명하였으며, 이들 공법의 특징은 표 1에 간략히 정리하여 나타내었다.

표 1. 다양한 습식코팅의 공법의 특징

방 식	개 요	적용범위		비 고	
		점도 (cPs)	막두께 (μ)(wet)		
스핀	원심력을 이용한 코팅	10이하	0-100	대면적화 불리	
롤	포워드	롤 극간에서 같은 방향 회전	2-100	10-200	물리적 잽으로 인한 박막 코팅 한계
	리버스	롤 극간에서 다른 방향 회전	10-100	5-400	
그라비아	롤 표면의 오목한 부분에 코팅액 유지	0.1-500	1-25	코팅 두께 조절 어려움	
나이프	평면	평면단부판을 웹에 직각배치	10-5000	25-750	물리적 잽으로 인한 박막 코팅 한계
	콤팩트	잘라낸 원형봉을 웹에 직각배치	10-5000	25-750	
에어나이프	공기를 내뿜어 과도한 코팅액을 제거	0.5-50	2-40	물리적 잽으로 인한 박막 코팅 한계	
블레이드	평판을 웹에 경사로 배치	50-4000	1-30		
슬릿 다이	좁은 간극의 다이에 코팅액을 공급, 도포	0.5-10,000	15-250		
슬라이드	코팅액을 경사면에 공급하여 흘림, 도포	0.5-50	15-250	박막코팅, 균일두께 한계	
커튼	커튼형으로 도포액을 흘림, 도포	0.5-50	2-500		
스프레이	노즐에 압력, 공기압을 이용하여 미세 에어졸 도포	10-1000	1-500	불균일한 미세에어졸 형성으로 인한 박막코팅 한계	
잉크젯	헤드에 Piezo와 열을 이용하여 액적을 발생 도포	10이하	1-500	패턴형성에 유리하나 전면 코팅에 불리	
에어로졸	초음파를 이용하여 미스트 발생, 유도가스에 의한 도포	1-1000	1이하	노즐의 제약으로 대면적화 불리	
ESD	액체를 정전기적 힘으로 미세화하여 도포	10-300	1이하	재료의 제한	

## 2. 대면적 코팅용 ESD 공법 연구의 필요성

인쇄전자(printed electronics) 기술이란 전자잉크 소재를 이용하여 프린팅(Printing) 공정이나 기법으로 만들어진 전자소자 혹은 전자 제품을 인쇄 전자라 하며 차세대 공정 기술로 각광받고 있다. 다양한 전도성 용액이나 유기 용액 같은 용액 소재 개발 및 인쇄 기술 고도화가 진행됨에 전자소자를 제작하는 것이 가능하게 되었고 폭 넓은 분야에의 적용이 기대된다. 특히 인쇄 전자 공학 분야에서 박막 코팅을 위한 고성능 코팅 기술 개발은 반도체, 디스플레이, 태양전지 등의 산업 분야에서 낮은 생산비용, 고성능, 소형화, 대량생산 등의 시장 요구에 따라 중요한 기술로 인식되고 있다.

ESD 공법의 경우 많은 습식 코팅 공법 중에서 나노 및 마이크로 스케일의 미세 액적을 손쉽게 발생시킬 수 있으며, 충전된 액적이 전기장을 따라 이동을 하므로 기관으로의 액적 타겟팅이 매우 우수하다. 그리고 미세 액적으로 인한 박막 형성 및 두께조절이 용이하며 형성된 박막은 치밀한 재료특성을 가지게 된다. 또한 기존의 박막제조 공정인 R.F. Magnetron Sputtering[8], Chemical Vapor Deposition(CVD)[9], Laser Ablation Deposition[10], Metalorganic Deposition (MOD)[11]에 비하여 저가의 비용으로 간단한 장치의 설계 및 구성이 가능하고 운용시 재료소모율도 적으며 유독물질 발생 없이 친환경적인 공법이다. 이러한 이유로 나노 박막의 고품위 인쇄전자 소자를 형성하기 위한 코팅 방식으로는 ESD 공법이 매우 우수한 방식으로 여겨지고 있다.

인쇄전자 기술의 박막코팅분야에서 우수한 코팅공법으로 각광받고 있는 ESD 공법을 통한 코팅 기술의 디스플레이 산업 진입을 위해서는 박막 코팅 특성 외에도 8세대 유리기관의 대면적 코팅까지 적용이 가능해야한다. 이는 2000년도 4세대(680x880mm) 유리기관의 생산을 시작으로 매년 성장하여 현재 8세대(2200x2500mm) 유리기관을 사용하고, 대면적화에 따른 생산효율 상승 및 제조원가를 절감시켜 왔기 때문이다. 이에 단일노즐을 통한 ESD 공법은 코팅영역의 한계 및 이로 인한 공정속도가 느리다는 단점을 가지고 있다.

그러므로 단일노즐을 Array한 멀티노즐 헤드 개발이 필요하며 본 논문에서는



ESD 공법을 기반으로 가장 큰 장점인 박막코팅의 특징을 구현하면서 최대 단점인 공정속도를 극복하기 위하여 대면적 코팅에 적용이 가능한 ESD 멀티노즐 헤드에 관하여 연구하였다.

### 3. ESD(Electrostatic Spray Deposition) 공정

#### 1) ESD 소개

ESD(Electrostatic Spray Deposition) 공법은 앞서 설명하였듯이 액체를 정전기적인 힘으로 미세화하여 분사시키는 기술이다. 이러한 정전기력 분무는 타겟과 노즐 사이의 전압에 의하여 발생된 정전기력에 다양한 원료의 유체를 나노/마이크로 급의 미립자의 상태로 타겟 상에 박막코팅 및 패터닝 할 수 있는 기술이라고 설명할 수 있다. ESD 공법으로 증착된 박막은 일련의 동시에 일어나는 몇 가지의 물리적, 화학적인 과정을 수반한다. 연속적으로 발생하는 단계들은 다음과 같으며, 이를 그림 15에 나타내었다.[20]

#### ① Spray Formation

나노 초미립자가 포함된 잉크로부터 정전기력 분무형상이 이루지는 과정

#### ② Droplet Transport, Evaporation, Disruption

액적을 노즐에서 기관상으로 이동하면서 용매가 증발하고 액적이 분해되는 과정

#### ③ Preferential Landing

기관의 표면에 분해된 액적이 떨어지는 과정

#### ④ Discharge, Droplet Spreading, Penetration, Drying

기관에 대전된 액적이 방전하고, 액적의 용매가 기관상에 퍼지면서 형성된 레이어 안으로 용매가 증착되는 과정

#### ⑤ Surface Diffusion, Reaction

고형 입자의 표면확산과 입자간의 화학반응

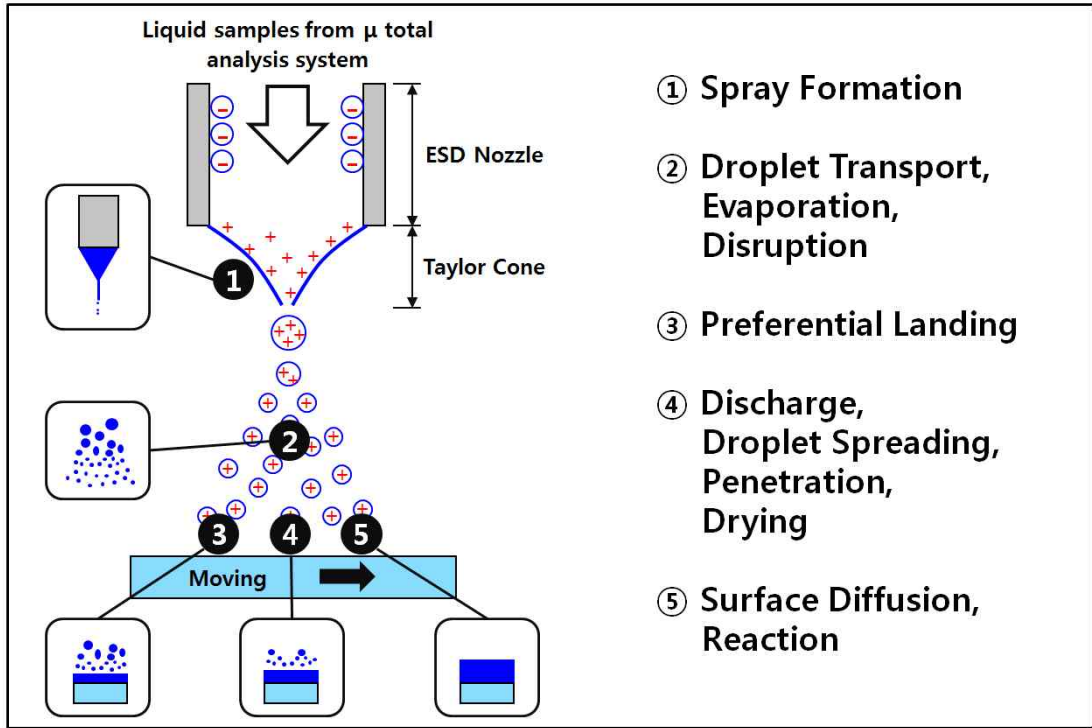


그림 15. ESD 공정

## 2) ESD 공정 원리

ESD 분무 공정은 정전기력을 제어하여 미세 직경의 노즐을 통해 타겟 상에 나노급의 미립자 상태로 분무하는 기술이다. 그림 16은 ESD 공정원리를 나타낸 것이다.[21]

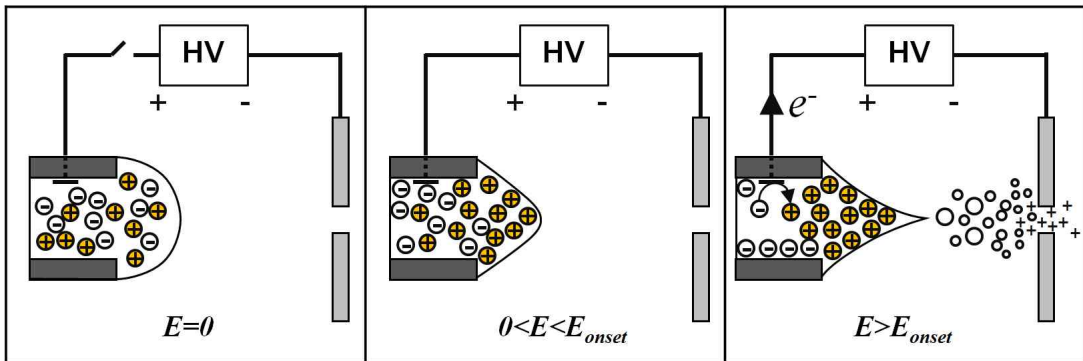


그림 16. ESD 공정의 원리

마이크로 잉크공급장치를 통하여 초미세 직경의 노즐의 내부에 유체를 흘려주고, 노즐과 타겟 사이에 고전압 발생제어장치를 통하여 수~수십 kV의 고전압을 인가해주면 노즐에 인가된 양전압에 의해 노즐이 양극으로 작용하게 되고, 유체에 존재하는 음이온들은 양극화된 노즐과의 인력으로 인해 노즐 안쪽으로 이동하게 된다. 그에 반해 유체에 존재하는 양이온들은 양극화된 노즐과의 반발력에 의해 노즐 Tip으로 이동하게 되고, 노즐 Tip에 Meniscus를 형성하며 모이게 된다. 이와 같이 유체에 용해되어 있던 전기 전도성을 지니는 이온들은 노즐과 타겟에 인가해준 고전압에 의해 각각 양이온과 음이온으로 분리되는 전하 분리현상을 일으키는데, 이러한 현상이 발생하는 과정을 전기영동 메커니즘이라고 한다.[22] 노즐 Tip에 맺힌 Meniscus는 유체가 갖는 고유의 표면장력 값을 갖는데, 노즐에 인가된 전압이 작을 경우 유체의 양이온들에 반발력은 Meniscus의 표면장력을 이기지 못해 분무되지 않지만, 인가된 전압이 일정범위를 넘어서면 양이온들의 반발력은 Meniscus의 표면장력보다 커지게 되고 유체는 Meniscus상태에서 분무하게 된다. 유체의 양이온들의 반발력이 표면장력보다 커지고 분무되는 과정에서 Meniscus의 모양은 첨예한 각을 이루며 콘 모양을 이루게 되는데, 이것을 테일러 콘(Taylor-cone) 이라고 한다.[23] 이렇게 노즐과 타겟, 그리고 고전압으로 구성된 정전기력 분무는 노즐의 팁에 극도로 큰 전기장을 발생하게 되는데 전가장의 세기 E는 식(1)과 같이 액체의 표면 반경 R과 콘의 각도  $\theta_c$ , 유체의 표면장력 $\gamma$ 와 진공에서의 유전상수  $\epsilon_0$ 에 의해 주어진다.

$$E = \left( \frac{2\gamma \cos \theta_c}{\epsilon_0 R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

수식을 통하여 전기장의 세기는 콘모양이 첨예한 각을 이루어 꼭지점이 예리해질수록 증가하고, 유체는 꼭지점에서 정전기력에 의해 Jet 형태로 변형되어 분무된다. 또한 유체의 콘에 작용하는 정전기력의 세기는 표면장력 계수의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 즉, 표면장력이 클수록 액체의 콘을 형성하는데 필요한

정전기력의 세기는 커진다. 식(2)~(4)는 유체의 유량 $Q$ , 유체의 유전상수  $\epsilon_r$ , 진공의 유전상수  $\epsilon_0$ , 유체의 밀도  $\rho$ 을 이용하여 젯의 직경, 액적의 직경, 전류에 대하여 나타낸다.[24-25]

$$Jet\ diameter \approx 0.4 \left( \frac{Q \epsilon_0 \epsilon_r}{K} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$Droplet\ diameter = d_0 \left( 1.6 (\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{6}} \left( \frac{Q}{Q_0} \right) - (\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{3}} \right) \quad (3)$$

$$where, d_0 = \left( \frac{\gamma \epsilon_0^2}{\rho K^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$Current = I_0 \left( (6.2 (\epsilon_r - 1)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{Q}{Q_0} \right)^{\frac{1}{2}} - 2.0) \right) \quad (4)$$

$$where, I_0 = \left( \frac{\epsilon_0 \gamma^2}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

이렇게 형성된 전기장을 통해 분무되는 유체의 미립자들은 노즐에서 타겟 상으로 이동하면서 유체의 용매가 증발하고 유체는 아주 미세한 초미립자 형태로 타겟에 분무되는데, 이때 액적의 특성은 Ganan-Calvo 측량법칙의 해석을 통해 식(5)와 같이 형성된다.[26]

$$d_0 = 3.78 \pi^{-\frac{2}{3}} 0.6 Q^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho \epsilon_0}{\gamma K} \right) \quad (5)$$

### 3) 정전기력 분무 현상

정전기력 분무 기반의 코팅 공정은 복잡한 공정요소 간 파라미터의 상호관계로 이루어진다. 정전기력 분무 공정은 잉크, 공급유량, 정전기력 종류 및 방향, 노즐 타입, 인가 전압 등의 공정 파라미터의 조정을 통하여 그림 17과 같이 다양한 분무 모드를 갖게 된다.[27]

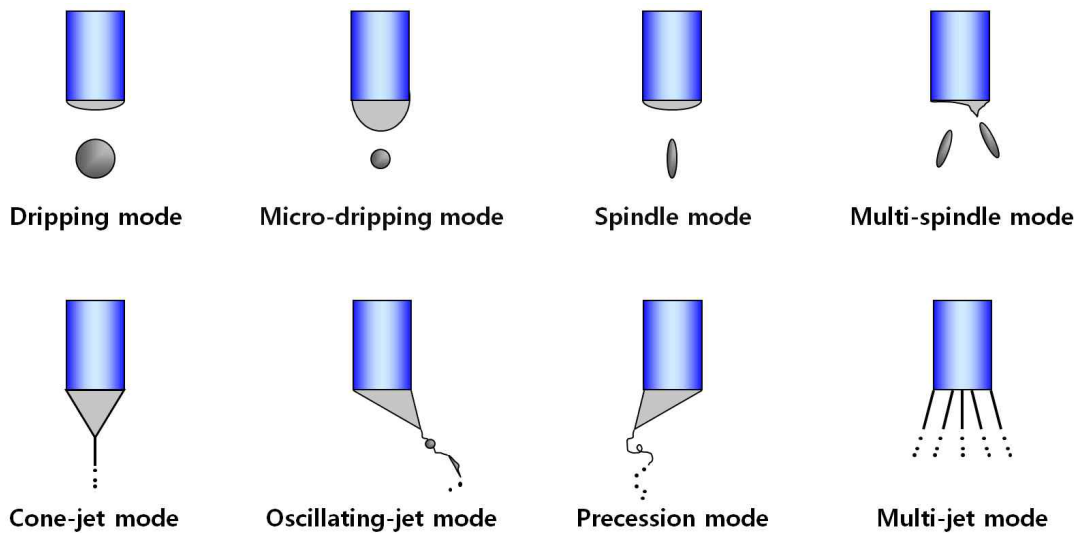


그림 17. 정전기력 분무의 여러 현상

Dipping Mode는 정전기력의 인가없이 액적의 무게와 노즐의 오리피스 상의 표면장력 차이에 의해 토출되는 현상이다. 이 Dipping Mode에 잉크유량을 줄이고 정전기력을 인가하면 Micro Dipping Mode의 형태로 분무되게 된다. 또한 이러한 Micro Dipping Mode에 더 강한 정전기력을 인가하게 되면, 분리된 액적이 전기장 방향으로 늘어지면서 Spindle Mode의 형태로 분무되게 된다.[28] 이 Spindle Mode 조건에서 더 고점도의 액적이 토출될 때, Multi-Spindle 형태로 분무되게 된다. 적합한 유량과 정전기력 조건에서 가장 안정적인 분무 형태인 Con-jet Mode로 분무가 가능하다.

특히 여기서 원추모양의 토출형태의 메니스커스를 테일러 콘이라고 한다.[26] 그리고, 이러한 메니스커스가 더 강한 정전기력에 의해 보다 작은 미세 액적들로 분사하게 되는데. 이를 Multi-jet Mode로 일컫는다.[29-31] 이러한 잉크의 유량

및 정전기력이 분무형태에 미치는 영향을 그림 18에 도시하였다.

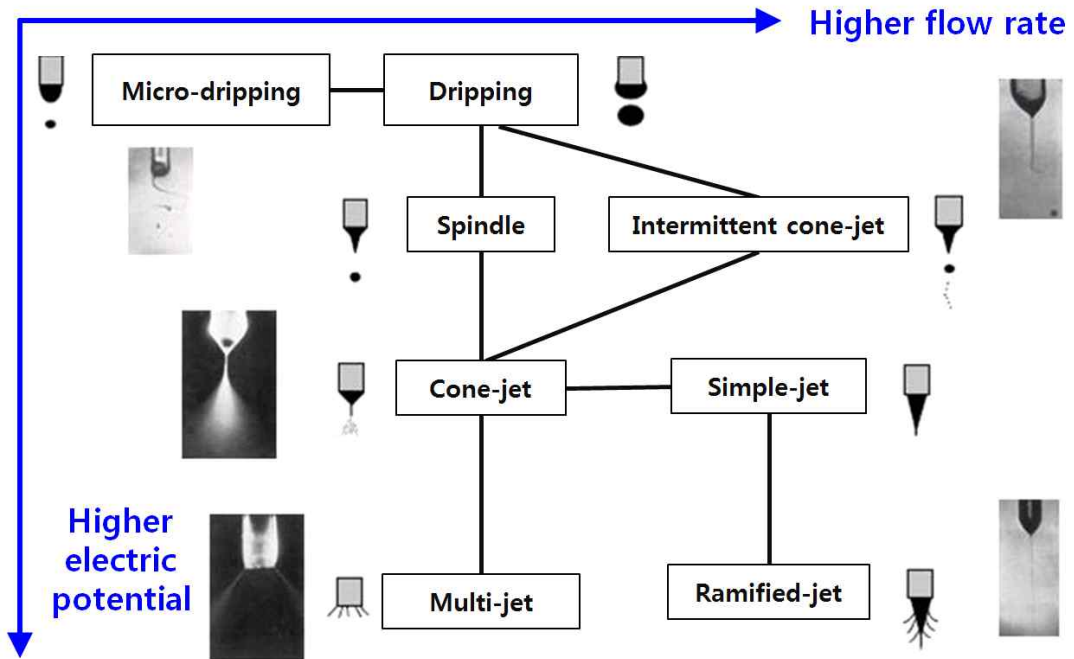


그림 18. 정전기력 분무의 형상에 미치는 유량과 정전기력 영향

### Ⅲ. 연구 방법

본 장에서는 대면적 박막 코팅용 ESD 멀티노즐 헤드 개발을 위해 ESD 노즐을 평가하기 위한 정전기력 분무 공정 시스템을 제작하고 노즐 끝에 형성되는 매니스커스를 관찰할 수 있는 모니터링 시스템을 구성하였다.

ESD 멀티노즐 헤드 설계를 위한 기초 데이터 확보를 위해 단일 ESD 노즐의 정전기력 분무 평가를 통한 공정인자 도출, 그리고 이를 바탕으로 설계된 ESD 멀티노즐 헤드의 제작 및 평가 방법에 대하여 기술하였다.

#### 1. 연구계획 및 측정방법

대면적 박막 코팅용 ESD 멀티노즐 헤드의 설계 및 제작, 성능 평가를 위해서 다음과 같은 방식으로 연구를 진행하였다.

ESD 노즐 헤드를 평가하기 위한 코팅 용액은 다양한 분야의 포토리소그래피용 감광성 용액으로 사용중인 Photo Resin(PR)으로 COTEM社의 TFR-3813CT를 사용하였으며 용액의 특성은 표 2에 나타내었다.

표 2. 감광성 용액의 특성

Product Name	TFR-3813 CT
Color	Red
Viscosity (cP)	4.10 ±0.15
Surface tension (mN/m)	25.5 ± 1.0
Conductivity(uS/cm)	0.20 ± 0.05 (21℃)
Permittivity(F/m)	9.2 ± 0.1
Solid contents (wt%)	16.3 ±0.3
Water contents (wt%)	<0.30
UV Absorbance Ratio	3.96 ±0.20
Particle (ea/ml)	≤50 (size >0.3um), ≤20 (size >0.5um)

또한, 정전기력 분무 공정 시스템은 노즐과 2차전극에 전위차를 발생시키며 제어하기 위한 고전압 발생 장치, 그리고 정전기력 분무시 노즐 헤드의 캐필러리 토출구 끝에 형성되는 매니스커스의 미세거동을 관찰하기 위한 초고속 CCD 카메라로 구성되었다.

ESD 멀티노즐 헤드의 설계 및 성능 평가의 기준 Data 확보를 위하여 PR용액으로 단일노즐 헤드의 정전기력 분무를 진행하여 분무 조건 및 형상 등의 기초 자료를 확보하고자 한다. 이때 매니스커스 형상은 시스템에 구성된 초고속 CCD 카메라를 통해 관찰하며, 분무조건은 노즐과 2차전극의 전압차, 거리 등의 인자를 통해 특성 평가를 진행하려 한다.

이를 바탕으로 ESD 멀티노즐 헤드의 구조 설계를 진행하여 제작하며, 각 단위 Unit 특성을 평가하기 위하여 캐필러리 간격을 정전기력 분무 범위보다 넓게 구성한다. 이렇게 ESD 멀티노즐 헤드를 제작하여 Array된 멀티노즐 헤드에서의 특성과 단일노즐 헤드의 정전기력 분무시 특성을 비교하고 제작된 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무시 발생하는 분무특성 및 공정조건의 차이점을 확인한다.

마지막으로 대면적에서 균일한 코팅을 하기 위해 단일노즐 헤드의 정전기력 분무를 통한 코팅 범위 등의 확보된 기초자료를 이용하여 박막 균일도가  $\pm 15\%$  이하가 되는 노즐 간격을 simulation을 통해 예측한다. 이를 근거로 ESD 멀티노즐 헤드를 설계 및 제작하며, PR 용액을 사용하여 정전기력 분무 공정을 통해 코팅 결과를 확인하려 한다. 박막의 균일도를 측정하기 위해서는 박막의 패턴 형성이 필요하므로 금속 마스크를 적용하여 코팅 결과가 패터닝되는 방식으로 중간 부분의 박막 두께를 측정하려 한다.

측정방법으로 ESD 멀티노즐 헤드에 구성되는 메탈 캐필러리의 크기 및 형상과 단일노즐 헤드 및 멀티노즐 헤드로 정전기력 분무 공정을 통하여 형성된 코팅결과물의 형상측정은 OLYMPUS社의 금속 정립 현미경인 BX51M 모델(그림 19(a))을 사용하며, 코팅된 박막의 두께는 3차원 단차 측정기기인 K-MAC社의 OV-SPI 500 모델(그림 19(b))을 사용하여 두께 및 profile 등을 측정한다.





(a) 금속현미경(BX51M)



(b) 3차원 단차 측정기(OV-SPI 500)

그림 19. 금속현미경과 3차원 단차 측정기

## 2. 정전기력 분무 공정 시스템

대면적 박막 코팅을 위한 정전기력 분무기반의 코팅 시스템은 그림 20과 같이 구성된다. 정전기력의 정밀제어를 위하여 0~20kV까지 전압 공급이 가능한 고전압 발생 Unit, Nozzle에 용액을 공급하는 마이크로 용액 공급 Unit, Nozzle 토출구의 분무 현상을 관찰하고 분석할 수 있는 분무 공정 모니터링 Unit, X/Y/Z축을 정밀하게 이동할 수 있는 3축 정밀 이송 Unit과 패턴제작을 위한 마스크 및 홀딩 Unit으로 구성되며, 전체 시스템을 제어하는 정밀제어 소프트웨어가 구비된다.

이러한 코팅 시스템은 각 Unit에 따른 공정변수를 제어하여 대면적 박막 코팅이 가능한 Multi-array된 ESD Nozzle System 개발을 위한 공정 변수 실험이 가능하게 구성되었다. 표 3은 구성된 시스템의 전체적인 사양에 대한 설명을 나타내고 그림 21은 코팅공정 시스템의 3D 도면과 실제 구성도를 나타내고 있다.

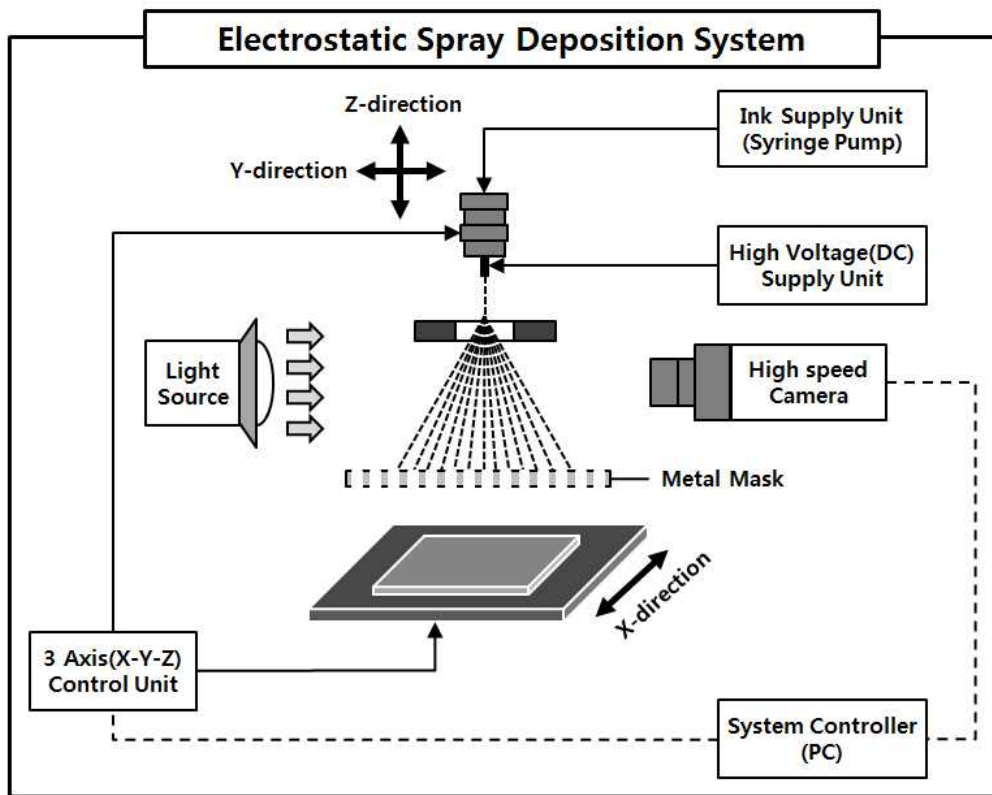


그림 20. 정전기력 분무기반의 코팅 시스템



그림 21. 정전기력 분무 코팅공정 시스템

표 3. 정전기력 분무 시스템 사양

구 분	시스템 사양
고전압 발생 Unit	전압 : 0~20kV 전류 : 0~3mA Over-current protection
마이크로 용액 공급 Unit	90ml/hr이하의 유량제어(Min. 0.001 $\mu$ l/hr) 싱글/멀티 채널 용액 공급
분무 공정 모니터링 Unit	1024 x 1024 pixels 13.7 $\mu$ m x 13.7 $\mu$ m pixel size x1.85~x11.83 광학 렌즈
3축 정밀 이송 Unit	절대 위치 정밀도 $\leq \pm 100\mu$ m 반복 위치 정밀도 $\leq \pm 100\mu$ m 상위 컨트롤러를 통한 모션 제어
마스크 및 홀딩 Unit	Work area 250L x 150W (mm)

1) 고전압 발생 Unit

고전압 발생 Unit은 ULTRAVOLT社의 HV RACK-4-250을 사용하였으며 노즐 토출구에 멧힌 메니스커스(meniscus)의 테일러 콘(Taylor-cone) 형성과 cone-jet mode(분무모드)가 유도되도록 고전압을 주입하여 정전기력을 발생시키는 장치이다.

일반적으로 토출 전압은 3~10kV에서 형성이 가능하며 본 시스템의 고전압 발생 Unit은 다양한 분무 모드의 유도와 최적 공정변수 도출을 위하여 노즐 전압 인가용(0~20kV), 2차전극 전압인가용(0~20kV), Ground 전압인가용(-4~0kV) 등 0.01kV 단위로 인가전압이 조절되도록 설계되었다.

또한 공정 중 단락 등으로 인한 시스템의 손상 예방 및 사용자의 안전을 고려하여 과전류 보호 장치(Over-current protection)가 탑재되었고, 설정 전류 이상의 동작시에는 Unit이 완전 정지되도록 구성되었다.

#### 2) 마이크로 용액 공급 Unit

마이크로 용액 공급 Unit은 용액을 노즐 Unit으로 공급하는 장치이며 정전기력 분무에서 공급되는 유체의 유량은 유도되는 분무 모드 및 분무된 입자의 크기에 영향을 미치므로 마이크로 리터 범위의 유량 제어가 가능한 정밀 용액 공급 장치인 CHEMYX社의 Fusion100 모델로 구성하였다.

또한 정밀도  $\pm 1\%$  미만, 반복정밀도  $\pm 0.1\%$  범위에서 최소  $0.001\mu\text{l/hr}$ 의 유량 제어가 가능하며, 대면적 멀티 노즐과의 대응을 위하여 최대  $90\text{ml/min}$ 의 유량 공급이 가능하다.

#### 3) 분무 공정 모니터링 Unit

분무 공정 모니터링 Unit은 시스템 Unit별 공정인자 조정에 따라 노즐 토출구에 맺힌 메니스커스(meniscus)의 테일러 콘(Taylor-cone) 형성과 유도된 분무 모드를 고해상도, 고분해능의 초고속 카메라를 통해 실시간 모니터링하고, 데이터 분석을 통한 피드백 기능을 한다.

초고속 카메라는 IDT社의 NX4-S2 모델로 구성하였으며 최대  $1024 \times 1024$ 의 해상도를 통한 이미지 표현이 가능하고, 픽셀(pixels) 사이즈  $13.7 \mu\text{m} \times 13.7 \mu\text{m}$ 에서 광학 렌즈를 이용하여  $\times 1.85 \sim \times 11.83$ 까지 세밀한 분무공정 모니터링이 가능하다.

#### 4) 3축 정밀 이송 Unit

3축(x/y/z) 정밀 이송 Unit은 기재(substrate)가 장착된 스테이지(Stage)의 정밀이송이 가능한 1축(x-direction)과 노즐의 좌/우 이송을 위한 1축(y-direction)과 노즐 헤드의 수직 이송을 통해 기재와의 이격 거리의 정밀제어를 위한 1축(z-direction)으로 구성하였다. 각 축 스테이지의 절대 위치 정밀도와 반복 위치 정밀도는 각각  $\pm 100\mu\text{m}$  이하로 설계하였으며, 이는 일반적으로 박막 코팅 공정 시

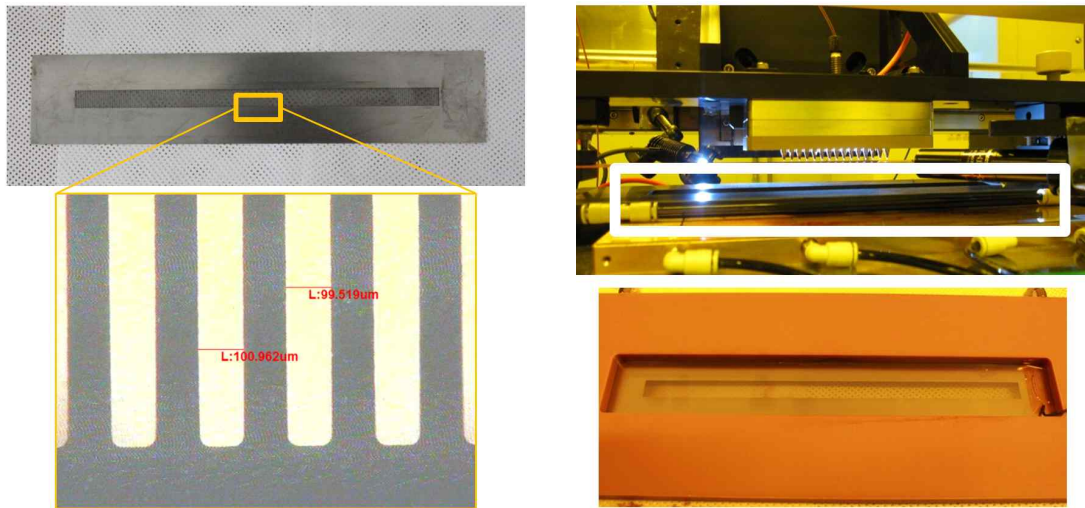
시스템의 경우 미세패턴을 구현하는 정밀 인쇄 장비와는 달리 이송 장치의 주행 정밀도는 큰 제약을 갖지 않는다는 점을 감안하였다.

각 축 스테이지의 모션 제어(motion control)는 C언어 기반의 제어 소프트웨어로 구축하였으며 원점 찾기, 임의 좌표값에 의한 피치 운전, 임의 입력값에 의한 조그 운전, 가감속 제어, 속도 제어 등이 가능하도록 나래나노텍에서 제작하였다.

#### 5) 마스크 및 홀딩 Unit

선택적 박막 코팅 및 미세 패턴 형성을 위해 노즐과 기재(substrate) 사이에 메탈마스크(Metal-mask) 삽입이 가능하도록 구성하였다. 메탈마스크는 대면적 제작이 용이한 Laser 가공기를 사용하여 예성社에서 제작하였으며 금속 재질은 온도 팽창계수가 낮은 Invar36을 사용하였다.

기재와 마스크의 이격거리를 정밀 제어하기 위하여 최소 1 $\mu$ m범위 까지 이격거리 제어가 가능하도록 마스크 홀딩 Unit을 설계하였다. 홀더의 재질은 절연특성이 뛰어나고 형상변형이 적은 Peek로 제작하였다. 그림 22는 제작된 메탈마스크와 마스크 홀딩 Unit을 나타낸다.



(a) 메탈마스크

(b) 마스크 홀더 및 홀딩Unit

그림 22. 메탈마스크(Invar36)와 마스크 홀더 및 홀딩Unit

### 3. 200mm 영역의 코팅을 위한 ESD 멀티노즐 헤드 개발

정전기력 분무 공정 중 노즐 헤드는 가장 핵심적인 장치로 고전압 인가를 위한 전극(electrode) 및 잉크 주입구(inlet), 미세 토출구 형성을 위한 모세관(capillary) 으로 구성된다. 본 논문에서는 대면적 박막 코팅의 최소단위로 200mm 영역을 설정하였고 캐필러리간 거리가 균일한 노즐 헤드를 개발하여 멀티 노즐의 정전기력 분무 공정의 연구와 실험에 적용하였다.

#### 1) 허브 삽입형 멀티노즐 헤드 개발

정전기력 기반의 분무 공정 기술은 외부에서 인가된 정전기력을 이용하여 노즐 토출구에 형성된 메니스커스 끝단에서 용액의 미세토출을 유도하는 방식이다.

허브 삽입형 멀티노즐 헤드는 메탈 캐필러리를 구비한 허브를 절연과피를 예방하기 위한 비전도성 재질인 peek를 사용한 아답터(adapter)에 삽입하여 쉽게 제작 구성할 수 있는 장점이 있으나, 각각 허브에 구비된 메탈 캐필러리 길이 편차가 존재할 때 메탈 캐필러리의 직경이 210um~410um으로 미소하여 길이 편차를 줄이기 위한 2차가공이 어렵다. 또한 허브의 존재로 인하여 캐필러리간 거리를 최소 7.4mm 미만으로 구성 할 수 없다는 단점이 있다. 그림 23은 메탈 캐필러리를 구비한 허브와 이를 삽입하여 제작된 멀티노즐 헤드의 도면 및 실물사진이다.

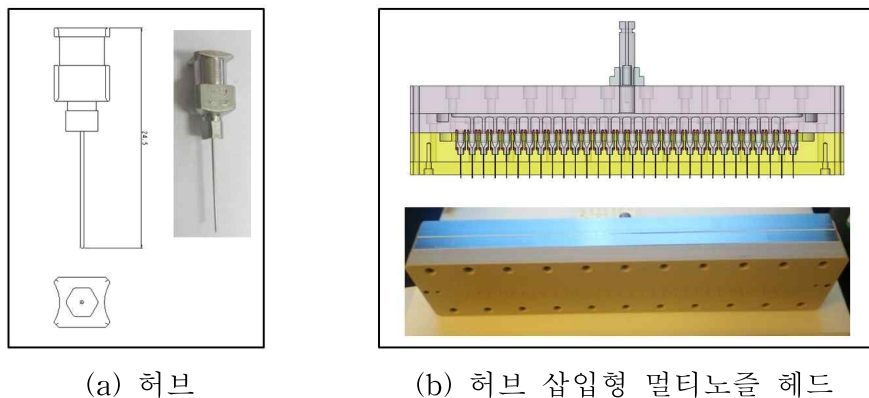


그림 23. 메탈 캐필러리를 구비한 허브와 허브 삽입형 멀티노즐 헤드

## 2) 메탈 캐필러리 삽입/일체형 멀티노즐 헤드 개발

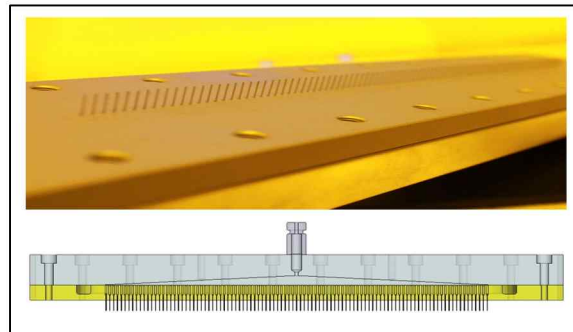
허브 삽입형 멀티노즐 헤드의 경우 앞서 언급한바와 같이 캐필러리간 거리를 최소 7.4mm 미만으로 구성하기 어려워 이를 극복하기 위해서 그림 24와 같이 단일 캐필러리를 가공하여 아답터에 삽입한 일체형 멀티노즐 헤드를 제작하였다.

메탈 캐필러리를 직접 삽입함으로써 캐필러리간 거리를 최소 0.8mm의 구성이 가능하며 거리 축소에 따른 캐필러리의 수량이 늘어남에 따라 각 캐필러리의 정전기력 분무시 중첩영역을 최소화함으로써 단위면적당 토출 입자의 양의 증가가 가능하게 한다.

또한, 허브 삽입형 멀티노즐 헤드의 4개로 구성된 파트를 2개의 파트로 축소하여 멀티노즐 헤드의 조립과 분해, 세척에 용이한 이점을 가지고 있다. 하지만 제작난이도 및 제작시간이 허브 삽입형 대비 2배이상 증가하며, 캐필러리 교체 필요시 허브 삽입형 멀티노즐 헤드의 경우 메탈 캐필러리가 구비된 허브만을 손쉽게 교체가 가능하지만 메탈 캐필러리 삽입/일체형 멀티노즐 헤드의 경우 제작 특성상 삽입된 메탈 캐필러리의 교체가 어려운 단점이 있다.



(a) 메탈캐필러리



(b) 아답터 및 멀티노즐 헤드

그림 24. 메탈 캐필러리가 삽입된 아답터 및 멀티노즐 헤드

## IV. 연구 결과 및 고찰

일반적인 정전기력 분무 공정에 사용된 노즐 헤드는 단일노즐 헤드로써 공정 변수의 최적화를 위한 공정의 연구와 실험 결과가 존재한다. 이장에서는 대면적 박막 코팅을 위한 200mm 코팅영역의 ESD 멀티노즐 헤드의 최적화를 위하여 앞서 제작된 정전기력 분무 시스템을 이용하여 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성과 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 공정을 통한 박막 코팅 연구 및 실험의 진행과 결과를 고찰하였다.

### 1. 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성

정전기력 분무는 노즐과 Ground사이에 발생된 정전기력에 의해 용액(Ink)의 토출을 유도하는 기술로써 보조전극이 없이 노즐과 Ground사이의 전압 인가만으로도 분무 생성이 가능하나, 일반적으로 노즐과 Ground사이의 수십 mm의 간격을 형성하게 되고, 간격의 증가는 전위차를 감소시키는 요인으로 보다 높은 인가 전압을 요구하게 된다.

이때 노즐과 Ground사이에 2차 전극을 삽입함으로써 노즐과 Ground의 간격이 아닌 노즐과 2차전극 간격 사이에서 형성되는 전기장에 의해 토출구 상에 맺힌 용액(Ink)의 형상을 cone-jet mode로 유도함으로써 미세한 분무입자의 생성이 가능하게 된다.[16]

2차전극의 위치는 노즐의 토출구를 기준하여 Ground방향으로  $0 \sim \pm 2\text{mm}$ 의 위치에 삽입/구성되는데, 이와 같이 수십 mm의 간격을 유지하는 노즐과 Ground의 간격보다 가까운 위치에 존재함으로써 보다 적은 인가전압으로도 Ink를 토출/분무할 수 있는 전위차 형성이 가능하다.

따라서 노즐과 2차전극의 인가전압과 노즐과 2차전극의 거리(위치값)에 의해



전기장의 분포 범위를 제어할 수 있으며, 이는 분무 입자의 증착 영역을 가변 할 수 있는 변수로 사용된다.

노즐의 인가전압이 2차전극보다 3kV이내의 높은 전위차에서 노즐 토출구에 맺힌 메니스커스(meniscus)의 테일러 콘(Taylor-cone) 형성과 초기 분무 모드를 형성할 수 있으며 분무 영역을 확장하기 위해서는 2차전극의 인가전압의 상승을 통해 노즐과 2차전극간의 전위차를 감소시키거나 노즐과 2차전극의 간격을 줄여 주고, 반대로 분무영역을 축소하기 위해서는 2차전극의 인가전압의 하강을 통해 노즐과 2차전극간의 전위차를 증가시키거나 노즐과 2차 전극의 간격을 늘려주어 분무 영역을 제어할 수 있다. 이는 선행 연구를 통하여 입증된 것으로 본 연구에서도 동일한 결과를 확인하였다.[32]

그림 25는 정전기력 분무시 노즐과 2차전극의 전위차 및 거리에 의한 분무영역의 제어를 나타내고 있다.

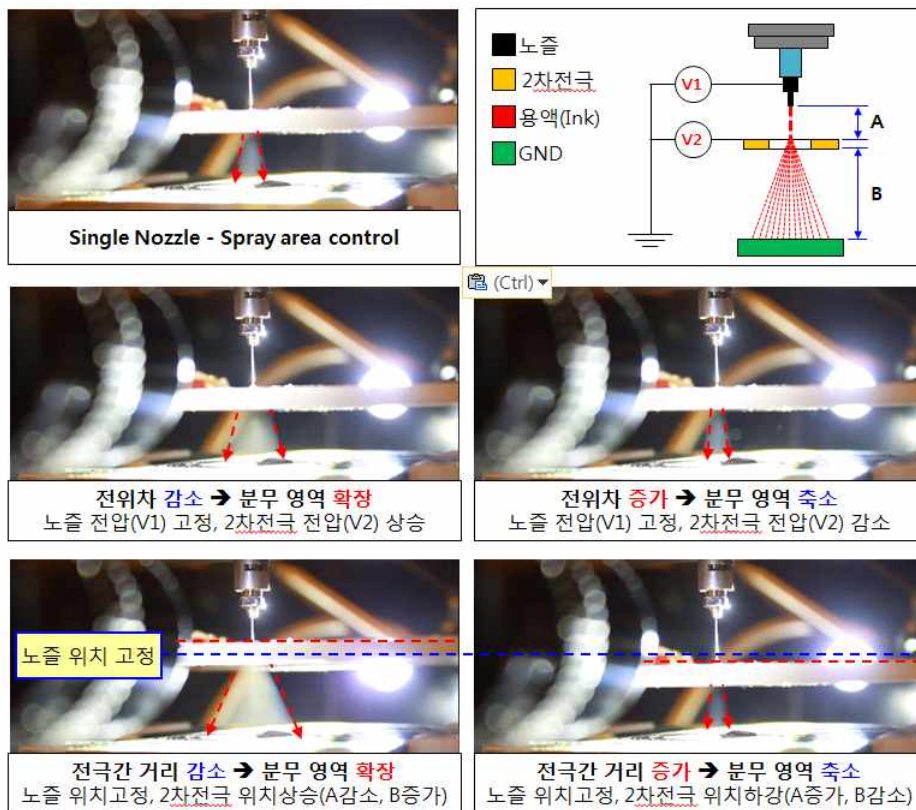


그림 25. 노즐과 2차전극의 전위차 및 거리에 따른 분무영역 제어

단일노즐 헤드의 정전기력 분무시 cone-jet mode를 유지하는 상태에서 확장된 분무영역과 축소된 분무영역의 코팅직경과 높이를 측정하였으며, 그림 26과 그림 27은 측정결과로 산출된 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 나타낸다.

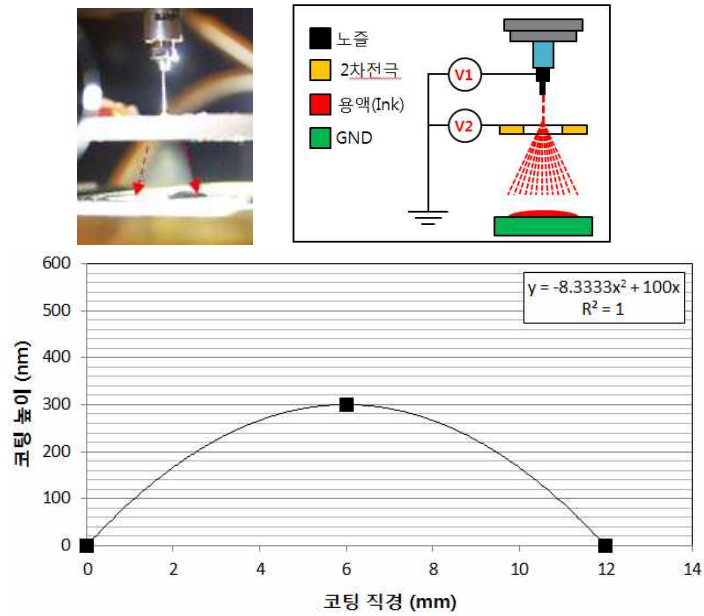


그림 26. 단일노즐 헤드의 분무영역 확장시 코팅직경 및 높이

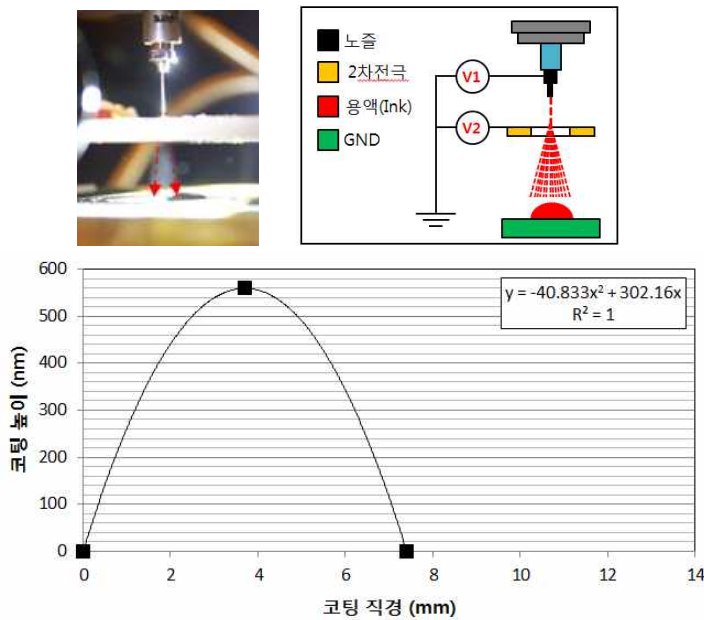


그림 27. 단일노즐 헤드의 분무영역 축소시 코팅직경 및 높이

## 2. 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 특성

### 1) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 길이차이에 의한 분무 특성 비교

멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 공정에서 2차전극은 단일 가공품으로 헤드와 거리가 균일하게 삽입/구성되며 그림 28과 같다.

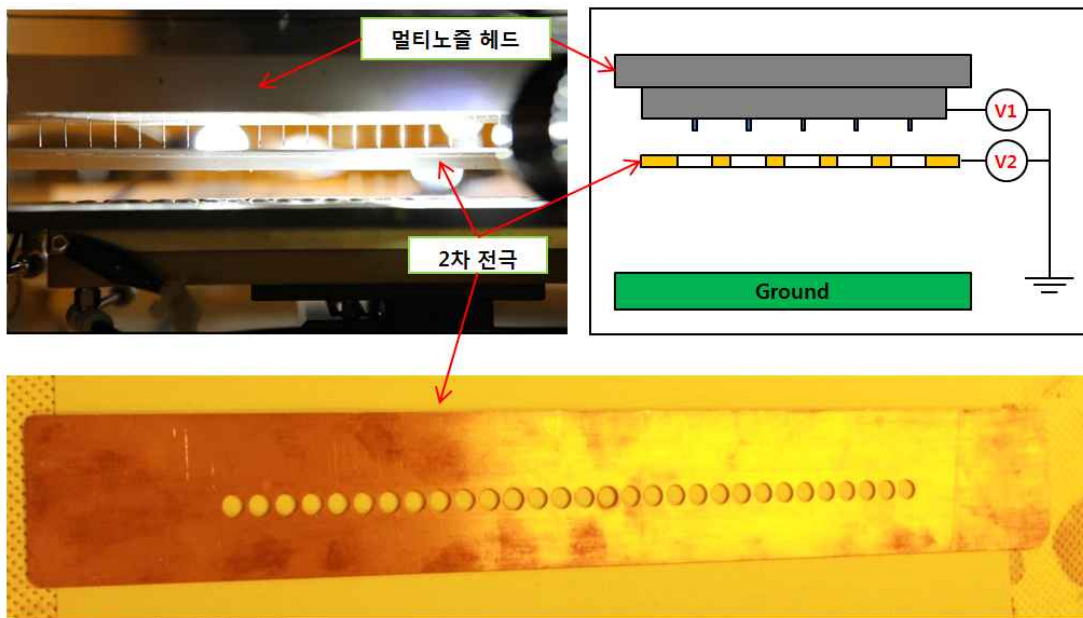
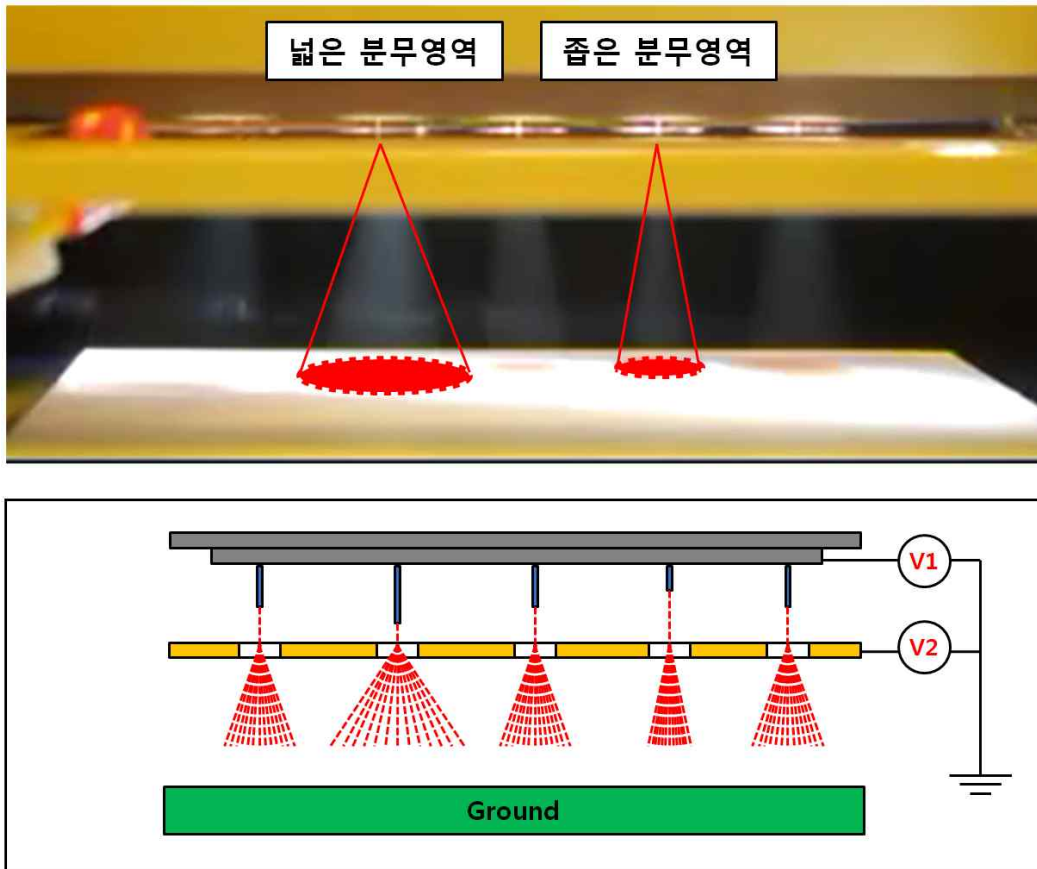
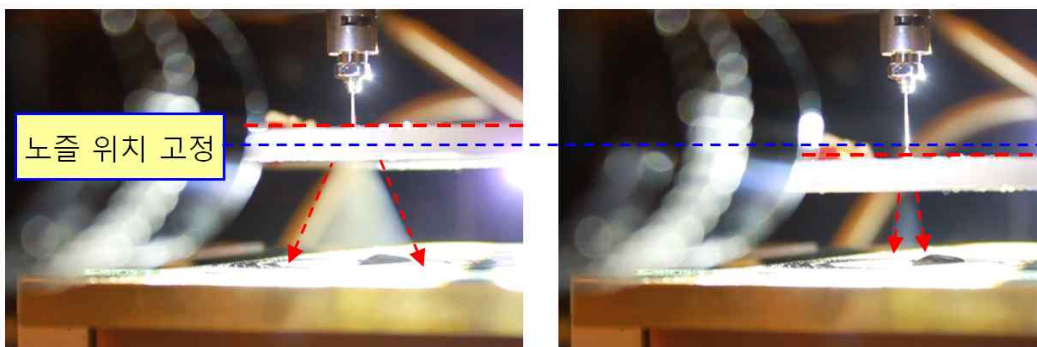


그림 28. 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무시 2차전극의 삽입/구성

허브 삽입형 멀티노즐 헤드의 경우 각각 허브에 구비된 메탈 캐필러리 길이 편차가 존재할 때 메탈 캐필러리의 직경이  $210\mu\text{m} \sim 410\mu\text{m}$ 으로 미소하여 길이 편차를 줄이기 위한 2차가공이 어렵다. 이때 메탈 캐필러리의 길이 편차가 존재하는 멀티노즐 헤드로 정전기력 분무 공정시 노즐 토출구와 2차전극의 거리 균일도 미확보로 그림 29에서 보여지듯이 분무영역의 차이와 코팅 균일도 저하가 발생한다. 이는 단일노즐 헤드의 정전기력 분무시 노즐과 2차전극과의 거리가 짧은 경우 분무영역이 확장되며 반대로 노즐과 2차전극과의 거리가 길어질 때 분무영역이 축소되어 발생하는 분무영역 차이와 동일한 현상이다.



(a) 멀티노즐 헤드 - 길이 불균일에 의한 분무 불균일 발생



(b) 단일노즐 헤드 - 노즐과 2차전극 거리에 따른 분무영역 차이

그림 29. 노즐과 2차전극 거리에 따른 분무 특성

이를 해결하기 위하여 허브 삽입형 멀티노즐 헤드 구성시 삽입할 허브의 메탈 캐필러리의 길이를 현미경으로 측정하여 메탈 캐필러리의 길이편차가 24.44mm ±0.02인 허브를 선별하였으며 길이 측정값은 표 4에 나타내었다.

표 4. 선별한 허브의 메탈 캐필러리 길이

단위 (mm)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
길이	24.42	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.44	24.45	24.45	24.45
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
길이	24.45	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46
No.	21	22	23	24	25	26	27	28		
길이	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46	24.46		

캐필러리 편차가 최소화되도록 선별된 허브를 사용하여 멀티노즐 헤드를 제작하였으며, 정전기력 분무 공정을 진행한 결과 그림 30과 같이 균일한 분무영역이 확보됨을 확인하였다.

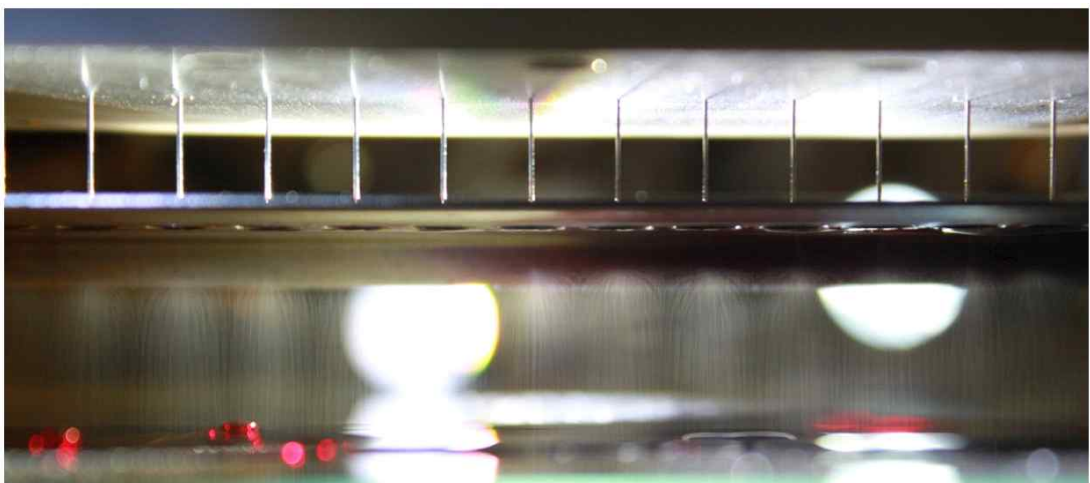
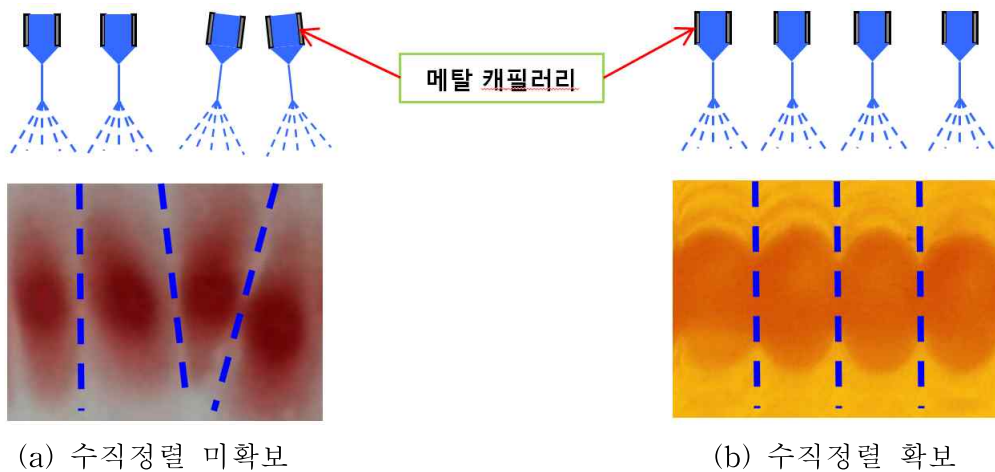


그림 30. 길이편차가 24.44mm±0.02인 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무

2) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 수직정렬차이에 의한 분무 특성 비교

허브에 구비된 메탈 캐필러리의 길이가 평균 24.4mm이며, 이때 캐필러리의 직경은 210 $\mu$ m으로 멀티노즐 헤드에 허브 삽입시, 멀티노즐 헤드의 세척을 위한 분해시 발생할 수 있는 외력에 의해 휘어지는 형상변형이 발생되기 쉽다. 그림 31은 메탈 캐필러리의 형상변형에 의하여 수직정렬이 확보되지 못하였을때 정전기력 분무가 편향되어 코팅영역에서 캐필러리가 정렬된 방향으로 균일도가 확보되지 못함을 보여주며, 반대로 캐필러리의 형상변형이 없이 정상적으로 수직정렬이 확보되었을때 코팅영역에서 캐필러리가 정렬된 방향으로 균일도를 확보할 수 있음을 나타내고 있다.



(c) 멀티노즐 헤드의 캐필러리 수직정렬 미확보시 코팅균일도 미확보



(d) 멀티노즐 헤드의 캐필러리 수직정렬 확보시 코팅균일도 확보

그림 31. 캐필러리 수직정렬 미확보와 캐필러리 수직정렬 확보

### 3) 멀티노즐 헤드와 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성 비교

단일노즐 분무시 특성이 멀티노즐 분무시에 동일하게 나타나는지를 확인하기 위하여 단일노즐 헤드의 분무영역 확장시 코팅직경인 12mm 보다 길도록 메탈 캐필러리 거리가 15mm인 허브 삽입형 멀티노즐 헤드를 제작하였으며 그림 32는 1차로 제작된 멀티헤드의 정전기력 분무 결과물과 모식도이다.

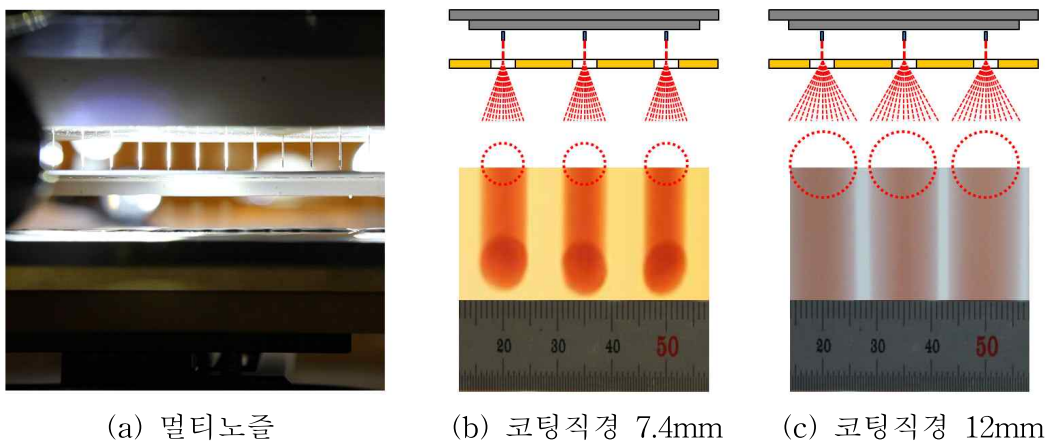


그림 32. 캐필러리 거리 15mm 멀티노즐 및 분무결과물

분무된 형상이 원형이며 cone-jet mode를 유지하는 상태에서 노즐과 2차전극 간의 전위차 조절을 통한 분무영역을 조절하였을 때 단일노즐 헤드의 정전기력 분무와 같은 코팅직경 7.4mm(그림 32(b))와 12mm(그림 32(c))의 결과물을 확인할 수 있었다.

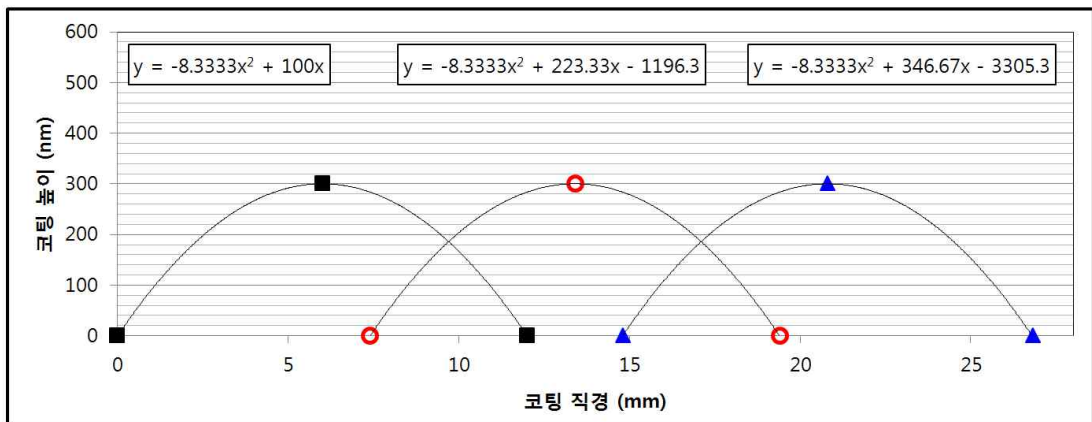
또한, 12mm 이상 분무 영역의 확장을 통한 중첩 영역을 확보하기 위해 정전기력 분무시 노즐과 2차전극의 전위차 및 거리를 조절하였으나 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성과 같이 분무모드가 cone-jet mode에서 Oscillating-jet 또는 Multi-jet으로 변경되어 안정적인 공정조건을 유지하지 못하였다.

### 4) 멀티노즐 헤드에서 캐필러리 거리에 의한 분무 특성 비교

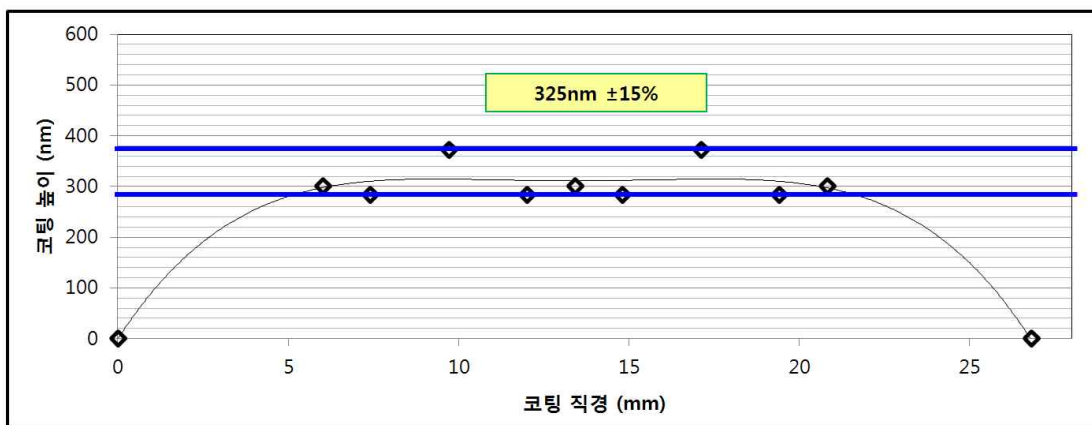
코팅 공정에서 코팅 결과물의 균일도가 매우 중요한 기준으로 ESD 멀티노즐 헤드를 이용한 정전기력 분무공정을 사용하여 대면적 박막 코팅에 적용하기 위해서는 분무영역의 중첩을 통한 코팅 균일도 확보가 필요하다.

앞에서 확인한 단일노즐 헤드와 캐필러리 거리가 15mm인 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무시 cone-jet mode를 유지하는 상태에서 축소된 분무영역의 코팅직경인 7.4mm로 캐필러리 거리를 설정 후 코팅직경 12mm의 공정조건을 적용하면 그림 33과 같이 산출된 가우시안 분포(Gaussian distribution)로 분무영역의 시뮬레이션 결과 중첩된 분무영역의 생성으로 코팅두께 325nm ±15%의 코팅 균일도를 확보할 수 있다.

또한, 200mm의 균일한 코팅영역의 확보를 위해서는 최외곽에 위치한 캐필러리의 거리가 200mm로 같아야 하며 이때 코팅영역은 캐필러리 거리가 7.4mm일 때 207.4mm가 되고 양쪽 끝단의 3.7mm 코팅영역은 불균일한 영역이 발생됨을 예상할 수 있다.



(a) 캐필러리 3개의 코팅영역

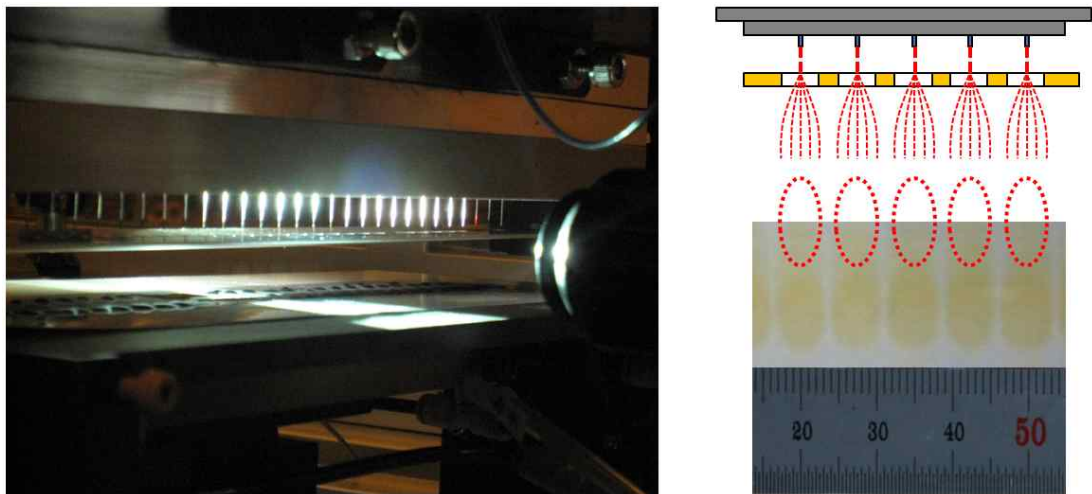


(b) 캐필러리 3개의 코팅영역 중첩 시뮬레이션 결과

그림 33. 캐필러리(3개) 거리 7.4mm의 코팅영역 12mm 중첩 시뮬레이션



이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 캐필러리 거리가 7.4mm인 멀티노즐 헤드를 제작하였으며 정전기력 분무공정 실험을 통한 코팅결과 검증을 진행하였다. 그림 34는 제작된 멀티노즐 헤드 및 코팅 결과물과 모식도이다. 분무된 형상이 단일노즐 헤드 및 캐필러리 거리가 15mm인 멀티노즐 헤드과 같은 원형이 아닌 타원형을 나타낸다.



(a) 멀티노즐(캐필러리 거리 7.4mm)

(b) 분무결과물

그림 34. 2차 멀티노즐 및 분무결과물

분무 영역의 확장을 통한 중첩 영역을 확보하기 위해 노즐과 2차전극의 전위차 및 거리를 조절하여도 그림 35와 같이 타원형의 상태로 기재 진행방향(scan 방향)으로 영역이 확장되어 원형 분무영역의 중첩현상을 예상한 시뮬레이션 결과와는 다른 현상이 확인되었으며, 분무된 용액의 입자가 Ground 방향이 아닌 2차전극 하부방향으로 상승하여 그림 36에서 보여지듯이 2차전극 하부에 분무용액이 적체되어 분무공정 후 2차전극 하부를 세척해야하는 현상도 발생되었다.

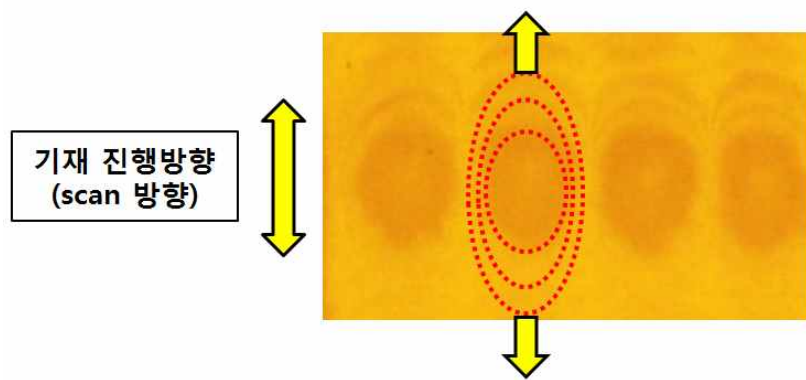
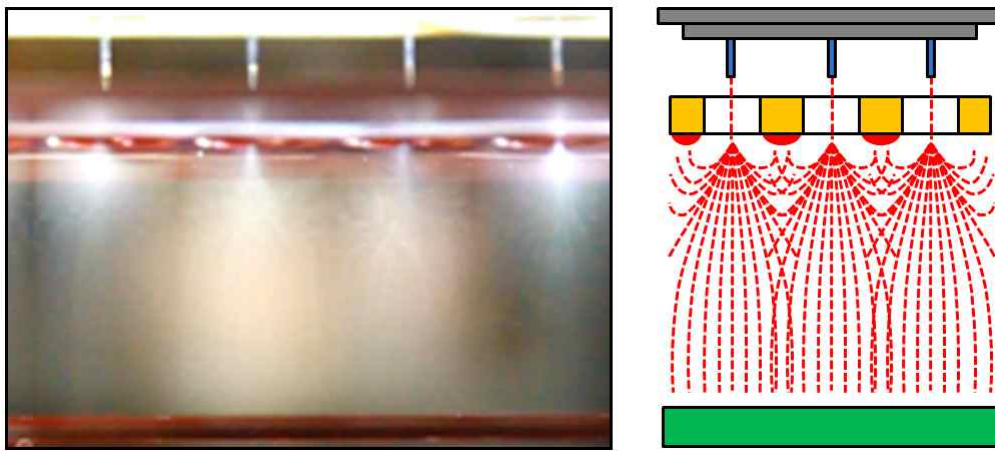
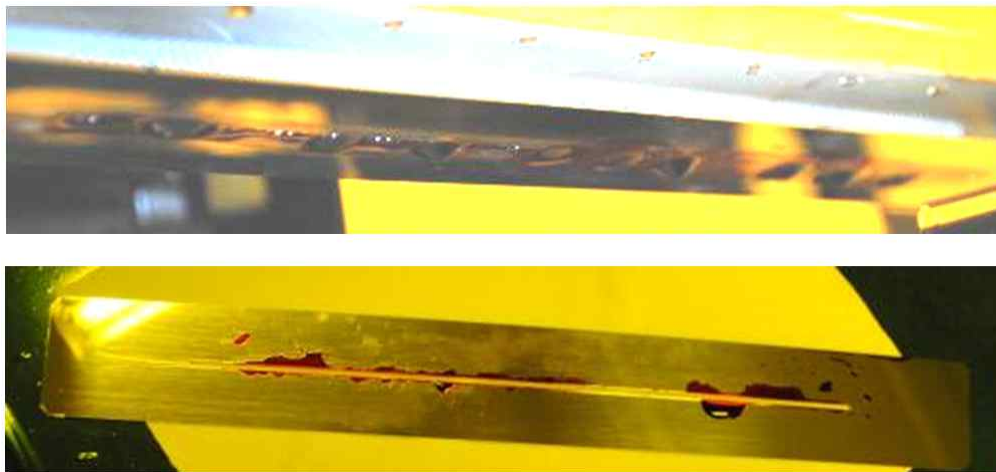


그림 35. 캐필러리 거리 축소시 타원형의 상태로 분무영역 확장



(a) 분무상승현상



(b) 2차전극 하부의 분무용액 적체현상

그림 36. 분무상승현상 및 2차전극 하부 분무용액 적체현상

캐필러리 거리의 축소에 따라 시뮬레이션 예측결과와 다른 코팅 결과는 그림 37에서 알 수 있듯이 정전기력 분무를 위해 노즐에 인가된 전압으로 용액(Ink)이 양전하(+)의 특성을 유지한채 토출/분무되어 캐필러리에서 분무된 용액입자의 동일극성으로 인한 반발력(repulsive force)이 발생되어 캐필러리 사이의 분무영역은 축소, 기재 진행방향(scan 방향)으로는 일반대기조건 상태로 반발력을 일으키는 요소가 없으므로 분무영역이 확대되어 코팅 결과물이 타원형의 형상을 가지게 된 것이다.

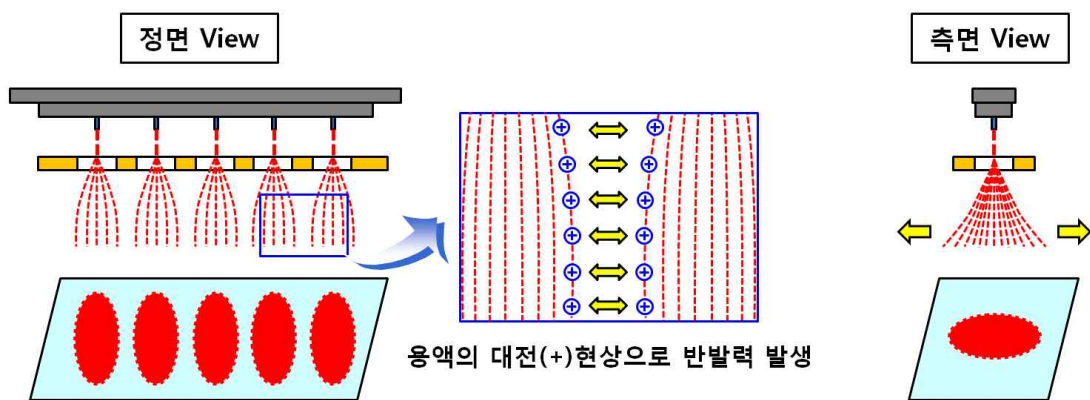
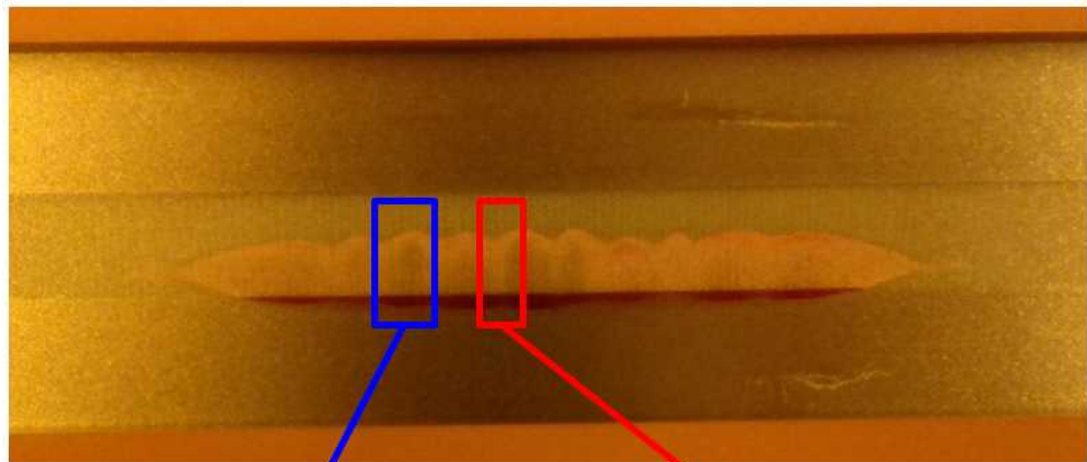


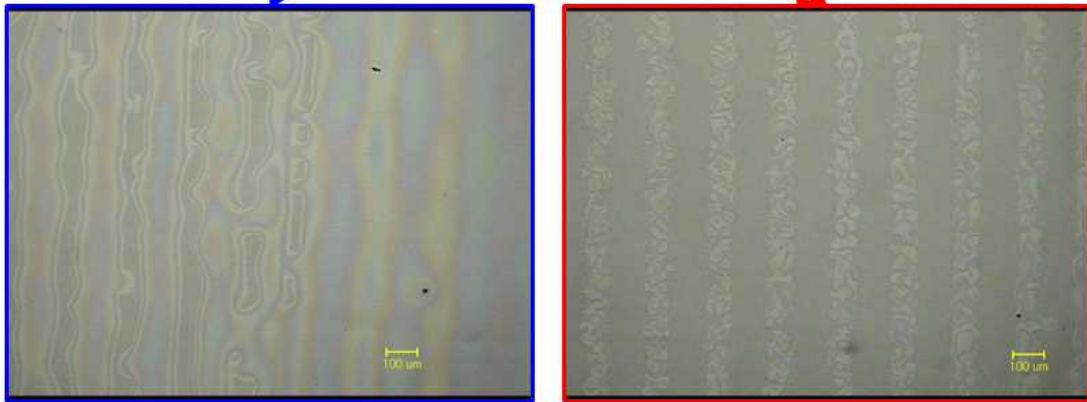
그림 37. 멀티노즐의 노즐간 거리축소에 따른 정전기력 분무간 반발력

동일극성으로 인한 반발력을 상쇄시키고 분무영역의 중첩을 통한 코팅 균일도 확보를 위해 캐필러리 거리의 7.4mm 미만으로 축소가 필요하며 앞서 개발한 메탈 캐필러리 삽입/일체형으로 캐필러리 거리가 5mm, 2mm인 멀티노즐 헤드를 제작하여 캐필러리 거리 축소에 따른 분무 형상 및 코팅 균일도를 확인하였다.

그림 38은 캐필러리 거리가 5mm 일때의 코팅결과물로 7.4mm보다 분무영역의 중첩성이 향상되었음을 확인할 수 있으나 코팅 결과물의 불균일성으로 인하여 대면적 박막 코팅용 ESD 멀티노즐 헤드로 사용할 수 없다.



(a) 메탈마스크



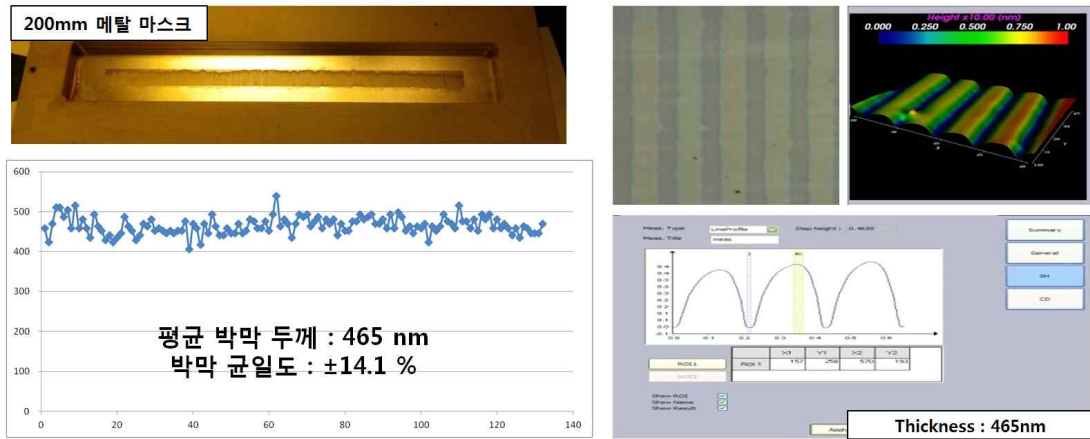
(b) 코팅결과

그림 38. 캐필러리 거리 5mm 분무시 메탈 마스크와 코팅결과

캐필러리 거리가 2mm인 멀티노즐 헤드 및 코팅결과물은 그림 39에 나타내었으며 캐필러리 거리 축소에 따른 분무입자 사이의 반발력으로 타원형 분무현상이 발생하여도 2mm 거리 축소에 따라 이를 상쇄하여 분무 중첩영역의 확보가 가능하였으며 코팅을 진행하여 평균 박막두께 465nm, 균일도 14.1%의 박막을 제작하였다.



(a) 멀티노즐 헤드(캐필러리 거리 2mm)



(b) 코팅 결과물 및 측정Data

그림 39. 3차 멀티노즐 헤드 및 코팅 결과물

## V. 결 론

본 논문에서는 대면적 박막 코팅공정에 정전기력 분무 증착 기술을 도입하기 위하여 정전기력 분무 공정의 핵심적인 구성요소인 정전기력 분무 노즐을 개발·제작 하였다. 또한 정전기력 분무 시스템의 설계를 위해 공정 매커니즘을 분석하고 변수 조건을 설정하였다.

1. 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 공정의 연구와 실험을 통하여 노즐과 Ground사이에 2차 전극을 삽입함으로써 노즐과 Ground의 간격이 아닌 노즐과 2차전극 간격 사이에서 형성되는 전기장에 의해 토출구 상에 맺힌 용액(Ink)의 형상을 cone-jet mode로 유도함으로써 미세한 분무입자의 생성이 가능하게 된다. 또한, 노즐과 2차전극의 인가전압과 노즐과 2차전극의 거리(위치값)에 의해 전기장의 분포 범위를 제어할 수 있으며, 이는 분무 입자의 증착 영역을 가변 할 수 있는 변수로 사용된다. 이는 선행 연구를 통하여 입증된 것으로 본 연구에서도 동일한 결과를 확인하였으며 단일노즐 헤드의 정전기력 분무시 cone-jet mode를 유지하는 상태에서 확장된 분무영역과 축소된 분무영역의 코팅직경과 높이를 측정하여 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 산출하였다.

2. 메탈 캐필러리의 길이 편차가 존재하는 멀티노즐 헤드로 정전기력 분무 공정시 노즐 토출구와 2차전극의 거리 균일도 미확보로 분무영역의 차이와 코팅 균일도 저하가 발생한다. 이는 단일노즐 헤드의 정전기력 분무시 노즐과 2차전극과의 거리가 짧을 경우 분무영역이 확장되며 반대로 노즐과 2차전극과의 거리가 길어질 때 분무영역이 축소되어 발생하는 분무영역 차이와 동일한 현상으로 메탈 캐필러리의 길이를 현미경으로 측정하여 메탈 캐필러리의 길이편차가  $24.44\text{mm} \pm 0.02$ 인 허브를 선별한 멀티노즐 헤드로 정전기력 분무 공정시 균일한 분무영역을 확보하였다.

3. 메탈 캐필러리는 외력에 의해 휘어지는 형상변형이 발생되기 쉽다. 메탈 캐필러리의 형상변형에 의하여 수직정렬이 확보되지 못하였을때 정전기력 분무가 편향되어 코팅영역에서 캐필러리가 정렬된 방향으로 균일도가 확보되지 못함을 확인하였으며, 반대로 캐필러리의 형상변형이 없이 정상적으로 수직정렬이 확보되었을때 코팅영역에서 캐필러리가 정렬된 방향으로 균일도를 확보할 수 있었다.

4. 멀티노즐 헤드의 정전기력 분무 공정의 연구와 실험을 통하여 멀티노즐 헤드와 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 특성을 비교하였다. 단일노즐 헤드의 분무영역 확장시 코팅직경인 12mm 보다 길도록 메탈 캐필러리 거리가 15mm인 허브 삽입형 멀티노즐 헤드로 정전기력 분무 공정시 분무된 형상이 원형이며 cone-jet mode를 유지하는 상태에서 노즐과 2차전극간의 전위차 조절을 통한 분무영역을 조절하였을 때 단일노즐 헤드의 정전기력 분무와 같은 코팅직경 7.4mm와 12mm의 결과물을 확인할 수 있었다.

5. 대면적 박막 코팅에 적용하기 위해서는 분무영역의 중첩을 통한 코팅 균일도 확보가 필요하며 단일노즐 헤드의 정전기력 분무 공정 결과물에서 산출된 가우시안 분포(Gaussian distribution)로 분무영역의 시뮬레이션을 진행하였으며 캐필러리 거리 7.4mm 에서 중첩된 분무영역의 생성으로 코팅두께  $325\text{nm} \pm 15\%$ 의 코팅 균일도를 확보와 유효한 코팅영역을 확인할 수 있었다. 그러나 코팅결과물이 타원형의 형상으로 원형 분무영역의 중첩현상을 예상한 시뮬레이션 결과와는 다른 현상이 확인되었으며, 이는 정전기력 분무를 위해 노즐에 인가된 전압으로 용액(Ink)이 양전하(+)의 특성을 유지한채 토출/분무되어 캐필러리에서 분무된 용액입자의 동일극성으로 인한 반발력(repulsive force)이 발생되어 나타난 현상이다. 이를 해결하기위해 캐필러리 거리가 5mm, 2mm인 멀티노즐 헤드를 제작하여 캐필러리 거리 축소에 따른 분무 형상 및 코팅 균일도를 확인하였다. 캐필러리 거리가 5mm 일때 7.4mm보다 분무영역의 중첩성이 향상되었음을 확인할 수 있었으나 코팅 결과물의 불균일성이 존재하였다. 캐필러리 거리를 2mm로 축소함에 따라 용액입자의 동일극성으로 인한 반발력을 상쇄하여 분무 중첩영역의 확보가 가능하였으며 평균 박막두께 465nm, 균일도 14.1%의 박막을 제작하였다.

메탈 캐필러리 삽입/일체형 멀티노즐 헤드의 캐필러리 거리가 0.8mm까지 제작 가능하여 캐필러리 거리 축소에 관한 추가적인 연구를 통해 단위면적당 토출 입자의 증가와 이를 통한 공정속도의 향상으로 기존 공정을 충분히 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

향후, 다양한 ESD 멀티노즐 헤드의 개발과 보다 정밀한 정전기력 분무 공정 시스템 개발에 관한 연구가 지속된다면 본 논문에서 보인 멀티노즐 헤드를 적용한 정전기력 분무 공정이 발전하여 대면적 박막 코팅용 공정기술로 기존 코팅 공정과 다른 또 다른 기술로써 적용이 가능할 것으로 예상된다.



## 참고 문헌

- [1] 조경선, 윤성호, 정훈, 채수호, 임광영, 김영옥, 박상환, 2009, “반도체 제조공정용 SiC 소재 기술”, 세라미스트 제12권 제1호, pp.33~48
- [2] 정재경, 원주연, 2014, “액정 디스플레이용 산화물 반도체 기술 연구 동향”, 세라미스트 제17권 제1호, pp.15~25
- [3] 김제하, 2010, “화합물 반도체 CIGS 박막태양전지”, 세라미스트 제13권 제3호, pp.13~22
- [4] 윤선진, 정용덕, 임정옥, 박현균, 김제하, 2012, “박막 태양전지의 기술개발 동향”, 전자통신동향분석 제27권 제1호, pp.38~50
- [5] 노준서, 배경빈, 유운중, 2005, “OLED 증착장비의 기초 기술”, 물리학과 첨단기술, pp.34~38
- [6] 김형선, 김윤희, 권순기, 2005, “고분자 OLED 재료의 개발현황”, 물리학과 첨단기술, pp.12~17
- [7] 이재민, 2013, “용액공정용 OLED 재료의 최근 현황”, Polymer Science and Technology Vol. 24, No. 2, pp.135~142
- [8] A. Jaworek, A.T. Sobczyk, A. Krupa, M. Lackowski, T. Czech, 2009, “Electrostatic Deposition of Nanothin Films on Metal Substrate”, Bull. Pol. Ac., Vol. 57, pp.63~70
- [9] Displaybank, 2011, “인쇄전자 기술동향 및 시장전망 (2011-2020)”

- [10] 김주선, 2009, “유기태양전지 : 인쇄 및 코팅공정”, KOSEN Reports, pp.80~97
- [11] Frederik C. Krebs, 2009. 4., “Fabrication and Processing of Polymer Solar Cells: A Review of Printing and Coating Techniques”, Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009), pp.394~412
- [12] 白井達郎(Shiroi Tatsuo), “코팅의 입문(각종 코팅 방식의 개요와 프로세스 해석 및 안정코팅 Part 1”
- [13] E. D. Cohen and E. B. utoff, 1992, “Modern Coating and Drying Technology”, Wiley-VCH
- [14] E. B. Gutoff and E. D. Cohen, 2006, “Coating and Drying Defects: Troubleshooting Operating Problems 2nd ed.”, Wiley
- [15] S. B. Fuller, E. J. Wilhelm and J. M. Jacobson, 2002, “Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems”, J. Microelectromech. Syst., Vol. 11, pp.54~60
- [16] T. Minami, T. Kakumu, S. Takata, 1996, “Preparation of Transparent and Conductive  $\text{In}_2\text{O}_3$  -  $\text{ZnO}$  Films by Radio Frequency Magnetron Sputtering”, J. Vac. Sci. Technol. A14(3), pp.1704~1708.
- [17] J. Schoonman, E. M. Kelder, 1997, “Thin Film Solid Electrolytes and Electrodes for Rechargeable Lithium-ion Batteries”, J. Power sources 68, pp.65~68

- [18] M. Antaya, J. R. Dahn, J. S. Preston, E. Rossen, and J. N. Reimers, 1993, "Preparation and Characterization of LiCoO<sub>2</sub> Thin Films by Laser Ablation Deposition", *J. Electrochem. Soc.* Vol.140, pp.575~578
- [19] A. B. Catalan, J. V. Mantese, A. L. Micheli, N. W. Schubring, R. J. Poisson, 1994, "Preparation of Barium Strontium-Titanate Thin-Film Capacitors in Silicon by Metallurgical Decomposition", *J. Appl. Phys.* 76(4), pp.2541~2543
- [20] C. H. Chen, E. M. Kelder, P. J. J. M. van der Put, and J. Schoonman, 1996, "Morphology Control of Thin Films Fabricated by Electrostatic Spray Deposition(ESD) Technique", *J. Mater. Chem.*, Vol. 6, pp.765~771
- [21] R. Juraschek, F. W. Rollgen, 1998, "Pulsation Phenomena During Electrospray Ionization", *Inter. J. of Mass Spec.*, 177, pp.1~15
- [22] J. Zeng, D. Sobek, T. Korsmeyer, 2003, "Electro-Hydrodynamic Modeling of Electrospray Ionization: CAD for A  $\mu$ Fluidic Device-Mass Spectrometer Interface", *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on*, Vol. 2. pp.1275~1278
- [23] G. I. Taylor, 1964, "Disintegration of water drops in an electric field", *Proc. R. Soc.*, Vol. A208, pp.383~397
- [24] A. M. Ganan-Calvo, J. Dacila, A. Barrero, 1997, "Current and Droplet Size in the Electrospraying of Liquids. Scaling Laws", *J. Aerosol Sci.* Vol. 28, pp.249~275
- [25] T. Ciach, 2007, "Application of Electro Hydro Dynamic Atomization in

Drug Delivery”, Journal of Drug Delivery Science and Technology, Vol. 17(6), pp.367~375

[26] A. M. Ganan-Calvo, 1997, “Cone-Jet Analytical Extension of Taylor’s Electrostatic Solution and the Asymptotic Universal Scaling Laws in Electro spraying”, Phys. Rev. Lett. 79, pp.217~220

[27] B. G. Prajapati, M. Patel, 2010, “A Technology Update: Electro Spray Technology”, Int. J. Pharm. Sci. Rev. Res., Vol. 1, pp.11~13

[28] Smith, 1986, “The Electrohydrodynamic Atomization of Liquids”, D.P, IEEE Trans. Ind. Applics., Vol. IA-22, pp.527~535

[29] A. Jaworek, A. Krupa, 1996, “Generation and Characteristics of the Precession Mode EHD Spraying”, J. Aerosol Sci. Vol. 27, pp.75~77

[30] A. Jaworek, A. Krupa, 1999, “Classification of the Modes of EHD Spraying”, J. Aerosol. Sci. Vol. 30, pp.873~893

[31] A. Jaworek, A. Krupa, 1999, “Jet and Drops Formation in Electro hydrodynamic Spraying of Liquids”, A systematic approach. Experiment in Fluids. Vol. 27, pp.43~52

[32] A. Jaworek, 2007, “Electrospray droplet sources for thin film deposition.”, Journal of materials science 42.1, pp.266~297