

ESD 전극을 이용한 분무코팅 균일도 개선에 관한 연구

당현우*, 양성욱*, 도양희*, 최경현**,#

* 제주대학교 전자공학과, ** 제주대학교 메카트로닉스공학과

Improvement of Spray Coating Uniformity using ESD Electrodes

Hyun-Woo Dang*, Seong-Wook Yang*, Yang-Hoi Doh*, Kyung-Hyun Choi**,#

*Department of Electronic Engineering, Jeju National University,

**Department of Mechatronics Engineering, Jeju National University

(Received 14 January 2016; received in revised form 24 March 2016; accepted 28 March 2016)

ABSTRACT

In this study, experiments are conducted to improve spray coating uniformity by using second and third electrodes based on the electrospray atomization mechanism. The uniformity of fabricated thin films can be improved by adjusting the design of the second electrode. The implementation of the second electrode with an elongated hole and a bending angle of 90° results in highly uniform films. In addition, induced area to substrate is increased by lowering the applied voltage using the third electrode with a round rod shape. A linear correlation between applied voltage and induced area is confirmed. Thin film thickness and surface roughness are measured after the fabrication of thin films through the electrospray process. It is confirmed that a thin film is formed having an average thickness of 273.44 nm, a thickness uniformity of less than 10%, and a surface roughness of 3 nm.

Key Words : Electrospray Deposition(정전분무), Multi Nozzle(멀티 노즐), Thin Film Coating(박막 코팅), Atomization(미립화), Coating Uniformity(코팅 균일도)

1. 서 론

산업용 인쇄기술이 날이 발전하는 가운데 디스플레이분야, 마이크로 센서, 바이오칩, 드러그 딜리버리 등 다양한 분야에서 비접촉식 코팅 기술의 요구가 끊이지 않고 있는 실정이다^[1-3]. 특히 국내 대표산업이라 할 수 있는 디스플레이 분야의 경우 2000년대 4세대((680×880 mm) 마더글라스를 시작으

로 최근 10세대(2880×3130 mm)를 넘어 11세대 디스플레이 생산이 검토되고 있으며, 대면적화에 따른 생산효율 상승 및 제조원가를 절감하고 있다. 이에 정전분무(electrospray deposition) 공정기반의 코팅 기술이 디스플레이분야에 진입하기 위해서는 박막 코팅 특성 외에도 대면적화를 위한 연구의 필요성이 절실하다^[4]. Nauman 등^[5]은 단일노즐을 이용한 정전분무 공정을 기반으로 메니스커스(meniscus)의 안정화를 통한 코팅 막의 두께 감소와 거칠기 개선을 보고하였고, Navaneethan 등^[6]은 정전분무 공정 통해 투명전극의 투광성과 전기전도효율 개선

Corresponding Author : khchoi@jeju.ac.kr

Tel: +82-64-754-3713, Fax: +82-64-752-3174

에 대하여 보고했다. 이처럼 정전분무 공정을 기반으로 하는 코팅 막의 우수성이 주목받고 있는데 단일노즐이 아닌 대면적화를 위한 정전분무 코팅기술분야의 다양한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 ESD 전극을 이용한 분무코팅 균일도 개선에 관하여 복수의 토출구를 갖는 멀티노즐과 ESD 전극 모듈을 개발하고 코팅 막의 균일도를 개선하기 위한 실험적 연구를 수행하고자 한다.

2. 정전분무 기반의 노즐 시스템

2.1 정전분무 개요

정전분무는 액상의 잉크를 전기적인 힘으로 미립화(atomization)하여 분무시키는 기술이다. 노즐에 인가된 양의 전압(positive voltage)에 의해 노즐이 양극으로 작용하고 용액 상에 존재하는 음의 이온(negative ion)들은 양극화된 노즐과의 인력(attractive force)으로 인해 노즐 안쪽으로 이동하게 된다. 그에 반해 용액에 존재하는 양이온들은 양극화된 노즐과의 반발력에 의해 노즐의 토출구로 이동하게 되고, 토출구에는 기판(substrate)방향으로 테일러콘(Taylor cone) 형태의 메니스커스를 형성하게 된다⁷⁾. Fig. 1은 정전분무의 메커니즘으로 부터 용액이 미립화되고 기판 상에 코팅되는 과정을 도식화 하였다. 용액의 미립화를 위한 전기장 에너지의 세기에 대하여 식 1과 같이 나타낼 수 있으며, 고전압이 노즐에 인가되면 전기장 집중효과에 의해 노즐 토출구 끝에 극도로 큰 전기장이 발생하게 된다.

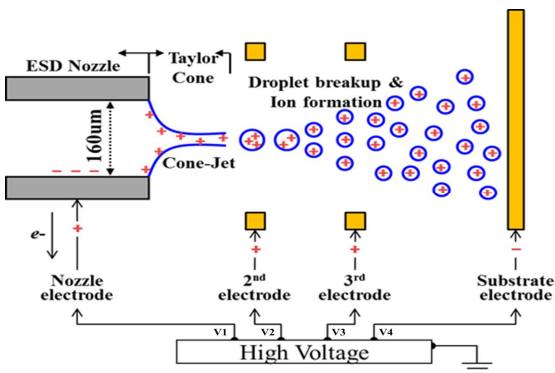


Fig. 1 Mechanism of electro spray deposition system

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

E_c 는 전기장의 세기이며, V_c 는 노즐의 인가전압, r_c 와 d 는 각각 토출구의 외경과 토출구와 전극 사이의 거리이다. 토출구의 전기장은 인가전압이 증가할수록 커지고, 노즐 직경에 반비례 한다⁸⁻⁹⁾. 전기장의 세기는 토출형상을 결정하며, 메니스커스의 각에 따른 미립화된 분무입자의 분포에 영향을 미친다¹⁰⁾. 본 연구에서는 인가전압에 따른 멀티노즐의 분무입자 분포와 ESD전극을 이용한 코팅 균일도 안정화에 대하여 논하고자 한다.

2.2 분무노즐 시스템 구성

Fig. 2는 정전분무 시스템의 구성을 보여주고 있다. 토출구 직경 160µm(외경 290µm)의 분무노즐을 중심으로 주사기 펌프를 이용한 잉크 공급 모듈(ink supply module)과 기판 이송 모듈(Substrate transportation module)을 담당하는 X축 스테이지, 분무되는 미립자의 분포를 촬영하기 위해 2개의 CCD 카메라로 구성된 비전 모듈(Vision module)과 라이트 소스(Light source), 마지막으로 ESD전극에 독립 전압 인가를 담당하는 DC전압 공급 모듈(DC-Voltage supply module)로 구성하였다.

분무노즐은 4개로 분할 구성된 ESD전극(노즐전극, 2차전극, 3차전극, 기판전극)을 이용하여 분무코

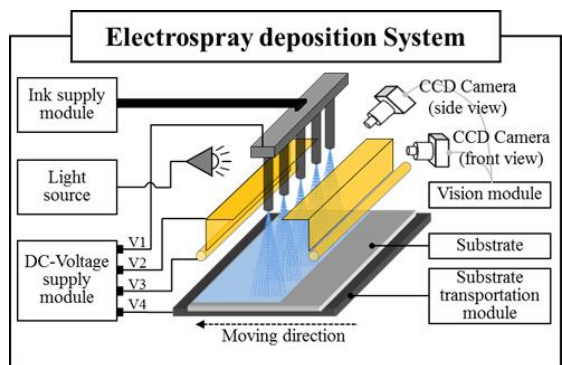


Fig. 2 Structure of electro spray deposition system

팅공정을 실시하며 인가되는 DC전압의 연결 구조를 Fig. 2에서 보여주고 있다. ESD전극은 DC전압 공급 모듈로부터 인가되는 4개의 독립전압(V1, V2, V3, V4)을 공급받아 용액을 분무 시킨다. V1은 노즐전극에 인가되는 전압으로써 0kV부터 (+)10kV까지 30채널로 구성된 토출구 전체에 공급된다. V2는 토출구 배열방향 앞, 뒤로 배치되는 2차전극에 인가되는 전압으로써 0kV부터 (+)10kV까지 공급된다. V3는 2차전극 하단에 배치되는 둥근 금속막대형상의 전극으로써 2차전극과 같이 2개의 전극이 한 쌍으로 구성된다. 0kV부터 (+)4kV까지 공급가능하다. 마지막으로 V4는 기판(substrate)하단에 배치되는 평판(Plate)형상의 기판전극에 인가되는 전압으로써 (-)4kV부터 0kV까지 음의 전압(Negative Voltage)을 공급한다. 전기적으로 양의 전압(Positive Voltage)에 대전되어 분무되는 용액 미립자들을 극성 인력으로 기판 상에 유도될 수 있도록 한다.

3. 분무노즐의 코팅 균일도 제어

3.1 2차전극에 대한 분무노즐의 균일도

노즐 토출구에서 분무되는 미립자들의 코팅 균일도 확보를 위해 노즐부에 인가되는 전압과 독립된 전압을 수용할 수 있는 2차전극(2nd electrode)을 배치하였으며, 2차전극의 형상에 대한 코팅 균

일도를 평가했다. 노즐 토출구에 공급되는 용액은 정전분무 메커니즘으로 액적의 미립화과정을 통해 분무되는데, 노즐과 기판간의 간격이 증가할수록 비례적으로 높은 인가전압이 요구되며 그 범위가 클수록 인가전압에 따른 베니스커스의 변위가 유동적이고 코팅 균일도를 저하시키는 문제가 있다. 이를 해결하고자 노즐과 기판사이에 독립된 전압을 수용할 수 있는 2차전극을 배치하고 노즐과 기판이 아닌 노즐과 2차전극 그리고 기판전극으로 이어지는 기전력을 형성하여 2전극의 형상에 대한 분무입자의 분포가 달라진다.

본 논문에서는 2차전극의 형상에 대한 분무입자의 분포와 분무노즐의 코팅 균일도를 분석했다. 2차전극의 형상은 3가지로 분류되는데 첫 번째는 구리(copper)소재의 두께 0.5mm, 평판형구조이며 노즐 채널수에 1:1매칭 되도록 70의 개별 홀(hole)을 구비하는 형상이다. 두 번째는 배열(array)된 홀상·하로 구리판을 90°씩 굽힘 가공(bending)하여 배열된 토출구들을 감싸는 형상이다. 세 번째는 90° 굽힘 가공된 형상에서 배열되었던 개별 홀을 장공홀(long hole)로 처리하였다. Fig. 3에서는 2차전극의 상세한 형상과 분무시스템상의 배치를 보여주고 있다.

전극 형상에 대한 분무입자의 분포를 확인할 결과 첫 번째(case 1) 형상의 2차전극의 경우 코팅 면이 노즐의 토출구 채널마다의 원형 영역으로 구

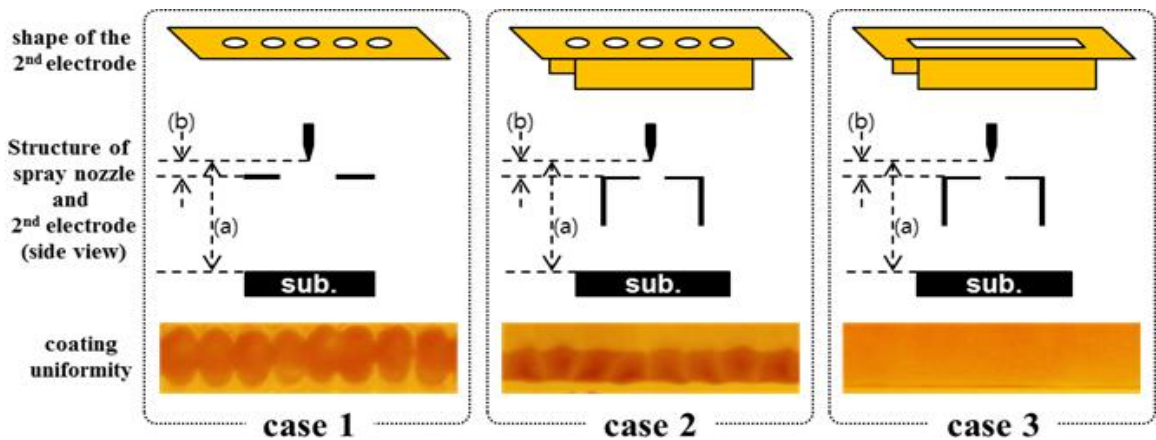


Fig. 3 Coating uniformity according to 2nd electrode shape

분되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 코팅 균일도는 토출구 채널간 중첩영역의 리플(ripple)형상으로 인하여 균일도가 저하됨을 확인할 수 있다. 코팅면의 리플형상으로 인한 균일도 저하를 보완하고자 두 번째(case 2) 2차전극을 적용했다. 분무입자가 토출구에서 원형 홀을 통과하는 지점으로부터 굽힘 가공 면이 기관방향으로 감싸는 구조를 이용하여 전기장 분포의 공백을 보상하고, 원형의 토출영역으로부터 발생하는 코팅면의 리플형상을 개선하였다. Fig. 3에서 보여주듯이 토출 채널마다 개별적으로 코팅영역을 형성하던 분무입자의 분포는 토출채널간의 중첩영역을 형성하였다. 또한 기관 이송방향 앞·뒤로 토출 채널간의 코팅영역을 상호 보상하는 형상을 확인할 수 있으며 토출 채널간의 리플형상으로 인한 코팅 균일도 저하를 개선하였다. 하지만 여전히 토출구 채널사이의 중첩구간에서 경계면이 확인되고 있으며 코팅 균일도 개선을 위해 중첩 구간을 해소하고자 세 번째(case 3) 형상의 2차전극을 이용한 균일도 제어를 실시했다. 개별홀 구조의 전극형상으로부터 형성되는 전기장의 분포가 코팅면의 중첩영역을 해소하지 못하는 요인을 개선하고자 전극의 개별홀을 장공홀 구조로 수정하여 분무공정에 적용하였다. 그 결과 Fig. 3에서 보여주듯이 코팅면의 중첩구간에서 토출채널의 경계면이 개선된 것을 확인할 수 있다.

2차전극은 노즐과 기관간의 전위차를 보상하여 노즐과 기관전극만 사용하는 경우보다 상대적으로

낮은 인가전압으로도 분무노즐을 구동할 수 있었으며, 2차전극의 형상에 따른 토출 채널의 중첩구간에서 발생하는 경계면을 해소하여 코팅 균일도를 제어할 수 있었다.

3.2 3차전극에 대한 분무입자 분포

3차전극은 등근 막대 형상으로 구비되며 Fig. 4와 같이 2차전극 하단에서 1mm의 간격으로 배치하였다. 2차전극의 형상은 앞선 2전극에 대한 분무노즐의 균일도 실험에서 코팅 균일도가 안정적으로 나타난 세 번째(case 3: 90° 굽힘가공+장공홀 구조) 형상의 2차전극을 적용하였다. 3차전극은 2차전극과 기관전극사이에 배치되어 2차전극에 인가되는 전압보다 낮고 기관전극보다 높은 전압을 인가한다. 기관전극에 인가되는 전압보다 낮은 전압을 인가할 경우 분무 입자는 전위차의 이끌림에 따라 기관으로 유도되지 못하고 3차전극에 집중되는 현상이 발생될 수 있으므로 유의하여야 한다. 또한 2차전극에 인가된 전압의 3배 이상의 값이 설정 될 경우 양극(+)화된 입자들과 3차 전극간의 극심한 극성반발력으로 인하여 분무입자들은 기관 방향 외에 불규칙한 방향으로 산란되어 분무되고, 코팅 균일도를 저하시킨다. 3차 전극은 분무 입자들이 기관상에 유도되는 면적을 제어하는 장치로서 기관의 국소면적만을 코팅해야 하는 경우 분무입자의 분포를 제한하여 코팅영역을 선택하는 데에 적용될 수 있다.

Fig. 5는 분무노즐의 토출채널이 배열된 방향으

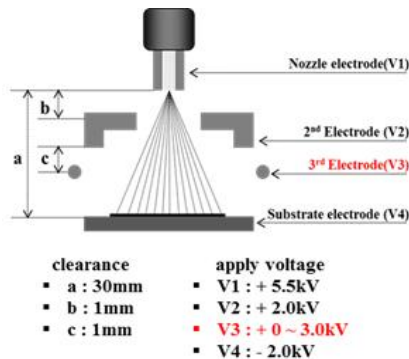


Fig. 4 Configuration of spray nozzle

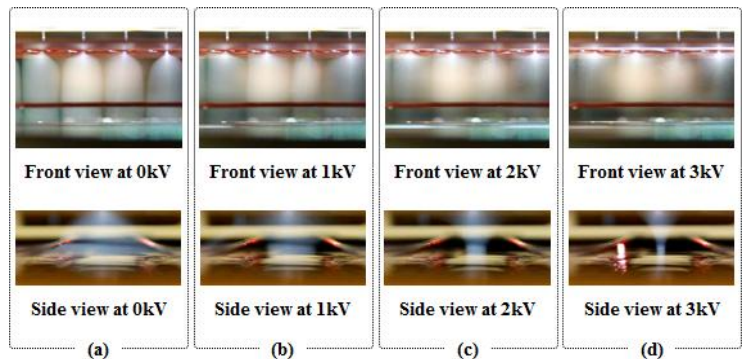


Fig. 5 Distribution of spray particles by 3rd electrode

을 바라본 카메라의 촬영 이미지로서 3차전극의 인가전압에 대한 전기장의 분포와 동시에 분무입자의 분포를 보여주고 있다. Fig. 5의 (a)는 3차전극에 0kV를 인가하였을 때 이미지이며, 측면 이미지를 보면 분무입자는 가장 넓은 각으로 분포되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 5의 (b), (c), (d)는 각각 1kV, 2kV, 3kV의 전압을 3차전극에 인가하였을 때 이미지이며 3차전극의 전압이 높을수록 분무입자의 분포가 감소함을 확인할 수 있다. 마찬가지로 3차전극에 인가된 전압으로부터 노즐의 토출채널 사이에 분포된 분무입자의 분포를 확인할 수 있는데 2kV와 3kV에서 토출채널 사이의 경계면이 사라지고 배열된 방향으로 균일하게 분무입자가 분포되는 것을 확인할 수 있다. 분무입자는 2차전극을 통과하면서 굽힘 가공 면 안쪽으로 전기장이 집중되어 토출 채널사이의 중첩경계면을 해소할 수 있으나, 2차전극을 지나 기관으로 유도되는 과정에서 입자는 확산되어 기관상에 코팅된다. 이때 독립된 전압을 3차 전극에 인가함으로써 2차전극 하부로 분무되는 미립자들의 방향성 제어를 통해 Fig. 5와 같이 분무되는 미립자의 분포를 결정할 수 있다.

4. 박막코팅 및 성능평가

Table 1 Process parameters of electrospray coating

apply voltage	V1	+5.5 kV	
	V2	+2.0 kV	
	V3	+2.0 kV	
	V4	-2.0 kV	
clearance	d1	30 mm	
	d2	1 mm	
	d3	1 mm	
flow rate	3 ml/hr		
coating speed	2 mm/s		
ink properties	model (company)	TFR-3813 CT (cotem co., LTD.)	
	viscosity	4.1 cP	
	solid contents	16.2 wt%	
	curing	1min at 100°C	
substrate	soda lime glass		

2차전극 형상에 대한 토출채널간의 코팅 균일도와 3차전극의 인가전압에 대한 분무입자의 분포 연구결과를 바탕으로 박막코팅을 실시했다. 샘플링을 통해 박막의 두께 균일도와 표면 거칠기 (surface roughness)를 측정하여 ESD 전극을 이용한 분무코팅 막의 성능을 평가하였다.

Table 1은 분무노즐을 이용한 박막코팅 공정의 셋팅 파라미터(setting parameter)를 보여주고 있다. 파라미터의 구성은 인가전압(apply voltage), 전극간 간격(clearance), 용액 공급 유량(flow rate), 코팅 속도(coating speed), 용액 물성치(ink properties), 기관(substrate)으로 되어있다. 인가전압은 2차전극에 대한 분무노즐의 균일도 실험에서 토출 메니스커스의 콘젯(cone-jet) 모드를 기반으로 적용했던 인가전압 조건(V1: 5.5kV, V2: 2.0kV, V4: -2.0kV)을 설정하였고, V3전압은 3차전극에 대한 분무입자 분포 실험에서 분무입자의 분포가 토출채널 사이의 경계면이 배열된 방향으로 균일하게 나타났던 Fig. 5의 (C)와 같이 2.0kV를 설정하였다.

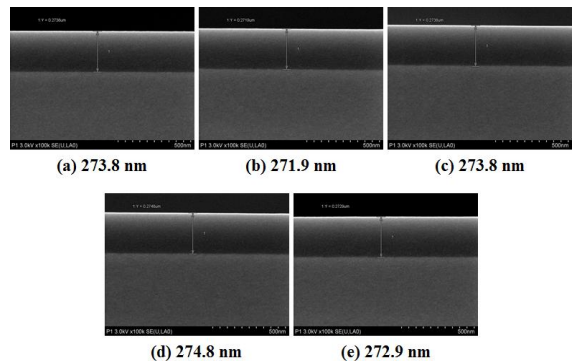


Fig. 6 SEM analysis of fabricated thin film

Table 2 Thin film thickness and surface roughness of fabricated thin film

measure point	thin-film thickness	surface roughness
(a): 30mm	273.8 nm	2.87 nm
(b): 60mm	271.9 nm	3.13 nm
(c): 90mm	273.8 nm	2.97 nm
(d): 120mm	274.8 nm	3.22 nm
(e): 150mm	272.9 nm	3.29 nm

코팅용 잉크는 cotem社의 포토레지스트 잉크 (model: TFR-3813 CT)를 적용하였다. 분무노즐에 공급되는 잉크의 유량은 3ml/hr이며, 소다라임 유리(soda lime glass)기판 상에 2mm/s의 이송속도로 코팅하였다. 분무공정 후 박막샘플은 잉크의 경화 조건에 맞추어 100℃에서 1분간 열 경화를 하였고 분무 코팅된 박막의 두께와 표면 거칠기를 측정하여 ESD 전극을 이용한 분무코팅 막의 성능을 평가하였다. Fig. 6에서는 박막두께 측정이미지를 보여주고 있으며 Table 2를 통해 측정값을 확인할 수 있다. 박막두께는 주사전자현미경(SEM: sanning electron microscope, model:SU-70, Hitachi co.,Ltd.)을 이용하여 코팅 막의 두께 확인을 위한 측면촬영을 실시하였다. 측정지점은 분무노즐의 코팅 균일도 검증을 위해 토출구 채널이 배열된 방향과 동일한 기판 폭 방향을 기준으로 하였다. 폭 180mm의 기판에서 가장자리로부터 30mm 안쪽을 기준으로 30mm씩 간격을 두고 5지점을 측정하였다. Fig. 7은 두께측정과 같이 5지점에 대한 표면 거칠기를 측정하였다. 측정은 원자간력현미경(AFM:atomic force microscopy, model:D-V, Veeco co., Lthd)을 이용하여 표면 거칠기를 측정하였다. Table 2는 두께측정과 표면 거칠기 측정결과를 나타내고 있으며, Fig. 6에서 보여주듯이 평균 273.44nm의 균일한 박막두께를 확인할 수 있었고,

두께 균일도를 10%이내의 안정된 박막을 형성되었음을 확인 하였다. 또한 Fig. 7와 같이 평균 3.096nm의 표면 거칠기 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 정전분무 메커니즘을 기반으로 2차전극과 3차전극을 활용하여 코팅 균일도 개선에 관한 연구를 수행하였다. 2차전극의 형상에 따라 토출구 채널간의 경계면을 공백 없이 코팅하여 균일도를 향상시킬 수 있었고, 장공홀과 90°의 굽힘 가공 면을 구비하는 2차전극에서 가장 균일한 경계면을 형성할 수 있었다. 또한 둥근 막대형상의 3차전극을 이용하여 인가전압이 낮을수록 기판에 유도되는 면적은 늘어나고, 인가전압이 높을수록 면적이 줄어드는 선형적인 상관관계를 확인했다. 제작된 분무노즐을 이용하여 박막코팅 공정을 수행하였고, 성능평가를 위한 박막두께와 표면 거칠기 측정의 결과 박막두께 273.44nm(avg.)에 10% 이하의 균일도를 확인했다. 또한 3nm급의 매끄러운 표면 거칠기 갖는 박막이 형성되었음을 확인했다. 실험결과로부터 전극간의 전위차와 전극의 형상을 통해 분무코팅 균일도와 분무입자가 기판으로 유도되는 면적을 제어할 수 있음을 확인했다. 현재 분무코팅 기술의 토출채널 확장에 대한 가능성이 입증되어가고 있는 가운데 분무코팅 기술의 대면적화를 위한 활용 가능성은 매우 높다고 판단된다. 더불어 경쟁력 있는 공정으로 진보하기 위한 유량계수의 향상과 분무입자의 산란현상을 통제하기 위한 후속연구가 진행되어 기술 경쟁력의 확고한 위치가 구축되길 기대한다.

후 기

“이 논문은 2015년도 제주대학교 학술연구지원 사업에 의하여 연구되었습니다.”

REFERENCES

1. Yun, H. Y., Ko, T. J. and Kim, H. C., “Development of Stereolithography Apparatus by

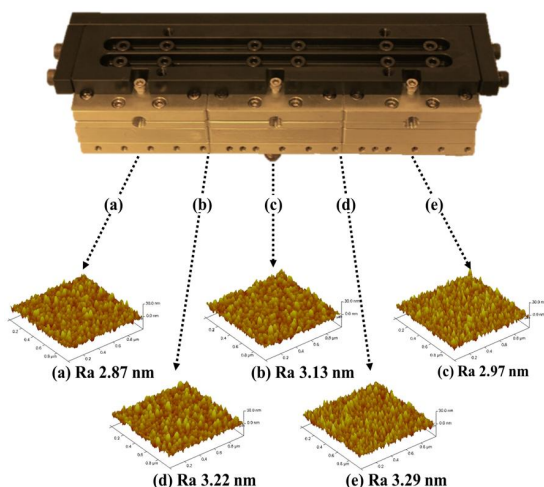


Fig. 7 AFM analysis of fabricated thin film

- using UV-LED,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 15-20, 2014.
2. Kim, D. K. and Kim, S. K., “A Study on Design of Nozzle Tip for Airless Spray Coating,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 183-188, 2012.
 3. Kim, H. C., Lee, I. H. and Ko, T. J., “Tool Path Generation for Micro-Abrasive Jet Machining Process with Micro-Mask,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 6, pp. 95-101, 2011.
 4. Kim, J. N., Yim, H. J. and Jee, H. S., "Analysis of Material Flow System in LCD production Line Using Digital Manufacturing," Society of CAD/CAM Engineering 2008 Conference Book, pp. 733-740, 2008.
 5. Muhammad, N. M., Sundharam, S., Dang, H. W., Lee, A. Y., Ryu, B. H. and Choi, K. H., "CIS Layer Deposition through Electrospray Process for Solar Cell Fabrication," Current Applied Physics, Vol. 11, No. 1, pp. S68-S75, 2011.
 6. Duraisamy, N., Hong, S. J. and Choi, K. H., "Deposition and Characterization of Silver Nanowires embedded PEDOT:PSS Thin Films via Electrohydrodynamic Atomization," Chemical Engineering Journal, Vol. 225, No. 1, pp. 887-894, 2013.
 7. Zeng, J., Sobek, D. and Korsmeyer, T., "Electro-Hydrodynamic Modeling of Electrospray Ionization: CAD for A μ Fluidic Device-Mass Spectrometer Interface,” 12th International Conference on Transducer, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Vol. 2, pp. 1275-1278, 2003.
 8. Seto, T., Okuyama, K., De Juan, L. and De la Mora, J. F., "Condensation of Supersaturated Vapors on Monovalent and Divalent Ions of Varying Size", The Journal of Chemical Physics, Vol. 107, No. 5, pp. 1576-1585, 1997.
 9. Gamero Castano, M., Aguirre de Carcer, I., De Juan, L. and De la Mora, J. F., "On the Current Emitted by Taylor Cone-jets of Electrolytes in Vacuo: Implications for Liquid Metal Ion Sources", Journal of Applied Physics, Vol. 83, No. 5, pp. 2428-2434, 1998.
 10. Dang, H. W., Kim, H. C., Ko, J. B., Yang, Y. J., Yang, B. S., Choi, K. H. and Doh, Y. H., “A Study of Micro Stencil Printing based on Solution Atomization Process”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 6, pp. 483-489, 2014.