한국정밀공학회지 제 32 권 제 8 호 pp. 673-680 August 2015 / 673
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 8, pp. 673-680 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.8.673
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 X

대면적 탄소나노튜브 / 은나노와이어 투명전극필름 롤투롤 연속생산시스템

Roll-to-roll Continuous Manufacturing System for Carbon-Nanotube- / Silver-Nanowire-Based Large-Area Transparent Conductive Film

박장훈 [1], 이창우 [2,✉]
Janghoon Park[1] and Changwoo Lee[2,✉]

1 건국대학교 기계설계학과 (Department of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk University)
2 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: leecw@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3618

Manuscript received: 2015.6.15. / Revised: 2015.7.22. / Accepted: 2015.7.23.

A roll-to-roll (R2R) continuous manufacturing system for a carbon-nanotube (CNT)-/silver-nanowire (AgNW)- based large-area transparent conductive film was introduced in this study. The systemic guidelines of the R2R slot-die coating process including roll eccentricity, wrap angle, pump accuracy, and blower influence were discussed. To simulate the coating phenomenon, we investigated the governing parameters of the coating process by incorporating the estimated relative thickness that was defined by combining the viscocapillary model and volume model. By using experimental and mathematical approaches, an excellent transparent conductive layer with a 40 Ω/□ sheet resistance and 88 % transmittance was obtained; moreover, a dimensionless number identifies the correlation between the transparent conductive film and the anti-reflection film.

KEYWORDS: Large area (대면적), Carbon nanotube (탄소나노튜브), Silver nanowire (은나노와이어), Roll-to-roll (롤투롤), Slot-Die (슬롯-다이)

기호설명

v_f = reference velocity of master speed drive roller
u = input to master speed drive roller
h_0 = coating gap (slot-die to film surface)
H = distance between the slot-die and axis of backup roll
t_w = thickness of web
R_{mean} = distance between the web and centroid of geometric shape
a = centroid of geometric shape
b = axis of rotation
e = distance between a and b
$\theta+\Phi$ = angle between a and b
μ_E = effective coefficient of web/roller friction

Copyright ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

β = wrap angle
T_1 = upstream tension
T_2 = downstream tension
f_r = flow rate
s = drying time
L = length of dryer section
V = coating velocity
I_0 = intensity of light striking a layer
I = intensity of light transmitted through the layer
α = absorbance coefficient of the layer
th = layer thickness
r = solid content ratio, weight percentage/100
Ca = capillary number (μV/σ)
μ = viscosity of solution
σ = surface tension of solution
n = number of strip
w = width of coated layer
t_e = estimated relative thickness
λ = weighting factor on viscocapillary model
ν = weighting factor on volume model
t_{e_tcf} = estimated relative thickness of transparent conductive film
t_{e_ar} = estimated relative thickness of anti-reflection coating layer
N = dimensionless number

1. 서론

투명전극필름(transparent conductive film: TCF)은 투명하고 전도 특성을 지니고 있는 제품을 말하며 주로 터치스크린, 디스플레이 및 태양전지 등의 생산에 사용되어 왔다.[1] 산업계에서 주로 사용되어 온 투명전극필름은 대표적으로 인듐 주석 산화물(indium tin oxide: ITO)로 30에서 80 Ω/□의 면저항(sheet resistance), 90%의 투과율(transmittance)을 가지고 있다.[2] 우수한 성능을 가진다는 장점에도 불구하고 ITO는 플라스틱 기판 위에 코팅되어 필름으로 사용될 경우 취성(brittleness)으로 인해 충분한 굽힘 성형성(bendability)를 가지지 못하고 파손된다는 단점이 있다. 또한 ITO는 일반적으로 진공 증착(vacuum deposition) 공정을 기반으로 하여 높은 균일도를 얻는 반면 생산 단가의 상승을 유발하였다.

최근, 저가(low cost) 및 고 수율(high throughput)의 요구에 따라 차세대 물질로서 poly(3,4-ethylene-dioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS)와 같은 전도성 고분자(conducting polymer), 탄소나노튜브(carbon nanotube: CNT) 및 그래핀(graphene)과 같은 탄소 기반 물질, 은나노와이어(silver nanowire: AgNW) 및 은-구리 메쉬(mesh)와 같은 메탈(metal) 기반 물질 등이 각광받고 있다.[3] 이 물질들은 습식 공정(solution process)이 가능하여 다양한 코팅 기법을 적용한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

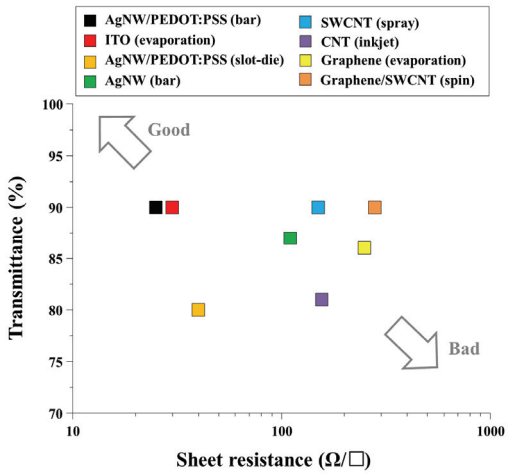


Fig. 1 The performances of recent research about transparent conductive film with various materials and methods

투명 전극 필름은 낮은 면저항과 높은 투과율을 가지는 것을 생산 목표로 한다. Fig. 1은 최근 연구된 투명 전극 물질들의 각 공정에 따른 성능을 보여준다. 주목할 것은 두 가지 물질을 혼합하거나 다층으로 코팅한 하이브리드(hybrid) 공정이 한 물질을 사용한 것보다 더욱 좋은 성능을 보여주었다. 대표적으로 AgNW/PEDOT:PSS를 바(bar) 코팅한 것이 면저항 25 Ω/□, 투과율 90%의 성능을 가져[4] 전자빔(e-beam) 증착을 수행한 ITO 필름 성능 (30 Ω/□, 90%)[2] 과 유사한 결과를 나타냈다.

그 외에 슬롯-다이(slot-die) 공정 이용 AgNW/PEDOT:PSS코팅 (40 Ω/□, 80%),[5] 바 이용 AgNW 코팅(110 Ω/□, 87%),[6] 스프레이(spray) 공정 이용 SWCNT (single wall carbon nanotube) 코팅(150 Ω/□, 90%),[7] 잉크젯(inkjet) 이용 CNT 코팅(156 Ω/□, 81%),[8] 그리고 증착 기반 그래핀[250 Ω/□, 86%][9] 및 스핀(spin) 코팅 기반의 graphene/SWCNT (280 Ω/□, 90%)[10] 필름 제작 사례가 있다.

투명전극필름 생산에는 다양한 공정 방법이 적용될 수 있다. 적절한 공정의 선택은 물질의 특성

을 더욱 극대화 시킴으로써 생산 속도, 생산량 그리고 경제적 효과를 도모할 수 있다. 앞서 언급한 투명전극필름에 사용되어온 물질 도포 방식을 보면 다양한 방법들이 투명전극필름 생산에 이용된 것을 알 수 있다.

증착 기술의 대표적인 전자총(e-beam) 증착 방식은 전자 빔에서 증착하고자 하는 타겟 물질에 전자가 부딪히면 진공 분위기에서 타겟 물질의 기화가 일어나 소재로 증착되는 방식이다. 이는 ITO 필름 생산에 주로 사용되는 방법으로 많은 물질에 쉽게 적용할 수 있으며 균일한 박막을 만들 수 있다는 장점이 있다. 그러나 높은 설치 비용 및 느린 증착 속도의 단점이 존재한다.

실험실 규모(lab scale)에서 주로 사용되는 바 코팅은 감겨진 와이어와 소재 사이의 간격에 의해 두께를 제어할 수 있다. 쉽게 모든 물질에 적용이 가능하지만 반복성이 떨어지고 코팅 면에 결함이 발생할 가능성이 높다는 단점이 있다. 스핀 코팅 또한 실험실 규모에서 많이 사용되는 방법으로, 스테이지의 고속 회전에 따른 원심력을 이용해 도포된 용액의 우수한 균일도를 가지는 박막 형성이 가능하다. 그러나 기판의 크기에 제약이 있어 초기 시험용으로 적절한 방법이다 할 수 있다.

대면적 박막 형성이 가능한 용액 기반 기술로는 첫 번째로 잉크젯 공정을 들 수 있다. 일정 크기(1~10 pl)의 액적(droplet)이 기판 상에 자유롭게 패터닝(patterning)이 가능하다는 장점이 있지만 코팅 면이 좁고 대면적 코팅 시에 수 개의 노즐이 필요할 뿐만 아니라 coffee ring 효과가 수반되므로 박막 공정 시에 많은 고려 점이 존재한다. 스프레이 코팅은 본 연구에서 사용된 슬롯-다이 코팅과 유사하게 균일한 박막 형성이 가능하고 롤투롤 공정에도 적용이 가능하지만 강한 압력의 가스 분무를 이용한 나노와이어 도포 시에 결함을 발생시킬 수 있으며, 소재로의 낮은 도착 효율의 문제점이 있을 수 있다.

본 연구에서는 슬롯-다이 코팅 방식을 사용하였다. 슬롯-다이 공정은 노즐로부터 토출되는 용액이 소재와 메니스커스(meniscus)를 형성하면서 대면적의 코팅 면 형성이 가능하며 공정 조건에 따른 박막 두께 예측이 용이하여 양산 공정에 적합한 방법이다. 앞서 언급한 코팅 방법과 비교해서 롤투롤(roll-to-roll: R2R) 연속 생산 시스템에 적용하기 가장 적절한 기술이라 할 수 있다. 다만 우수한 메니스커스 형성을 위해 소재 이송, 용액 토출, 다이 구조 등의 공정 최적화가 요구된다.[11]

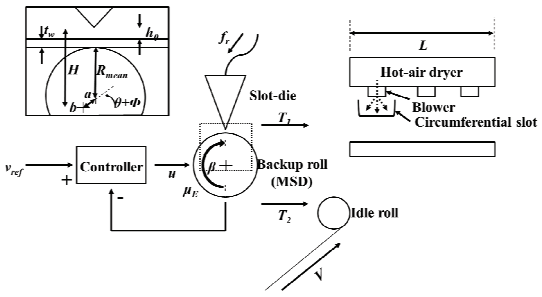


Fig. 2 Disturbance factors to consider in coating process

본 연구에서는 롤투롤 슬롯-다이 시스템에서의 투명전극필름 생산을 위한 공정에서 고려되어야 할 여러가지 설계 파라미터들을 제시하였다. 시스템적 관점에서 외란을 최소화하기 위한 관점들을 제시하였으며, 기존의 슬롯-다이 코팅 공정 모델을 발전시켜 새롭게 제안하였다. AgNW/CNT 하이브리드 용액을 이용하여 대면적 슬롯-다이 코팅을 수행하였으며 예측된 공정 모델을 활용하여 실험 결과를 분석하였다. 최종적으로 우수한 투명전극필름 생산을 위한 공정조건에 따른 메타 모델 및 가이드라인을 제시하였다.

2. 투명전극필름 생산 과정

2.1 롤투롤 슬롯-다이 코팅 시스템

Fig. 2는 본 롤투롤 슬롯-다이 코팅 공정 시에 고려된 다양한 요소를 나타낸 것이다. 롤투롤 시스템에서 웹은 일정한 장력을 유지하며 일정한 속도로 이송되는 것이 중요하다. 코팅 구간에서의 속도, 장력 동기화는 제품의 품질과 직접적으로 연관되기 때문에 실험을 수행하기 전에 선행적으로 점검되어야 한다. 정확한 웹 이송을 위해 백업 롤은 마스터 속도 드라이브(master speed drive: MSD)로 설정되어 그림과 같이 기준 속도 v_{ref} 를 유지하는 입력 u를 위한 PI 제어를 수행하였다.

슬롯-다이 노즐과 가깝게 붙어있는 백업 롤은 정밀한 진직도(straightness) 및 진원도(roundness)를 가지지 못할 시 코팅 간극(gap)의 변화로 인해 웹의 진행 방향 또는 폭 방향으로의 코팅 면 불 균일성을 유발할 수 있다. 롤 편심(roll eccentricity) 모델로부터[12] 코팅 간극은 다음 식(1)과 같이 정의될 수 있다.

$$h_0 = H - [t_w + R_{mean} + e\sin(\theta + \phi)] \quad (1)$$

필름의 이송에 따라 편심(사인항)이 주기적으로 변할 경우 코팅 간극 또한 주기적으로 변화하여 메니스커스 형성에 영향을 줄 수 있다. 본 백업 롤은 연마를 통해 3/1000 mm의 진원도로 가공되었다.

롤의 감김 각(β)은 최대 견인력(traction force)를 보장하는 마찰 효과 계수 μ_E로 결정이 가능하며 이는 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.[13]

$$\mu_E = \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (2)$$

코팅 롤에서 감김 각을 높게 설정할 경우 마찰 효과가 상승하여 이송 시에 견인력이 상승하며 또한, 웹과 롤 사이의 공기유입(air entrainment)을 최소화 할 수 있어 코팅 품질의 이송에 의한 외란을 방지 할 수 있다.

웹 이송과 동일하게 슬롯-다이에서 토출되는 용액의 유량, f_r의 제어 또한 코팅 품질에 영향을 주는 변수이다. 맥동(surging) 현상이 코팅 조건 설정에 많은 장애가 될 수 있기 때문에, 적절한 펌프를 설정하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 단일 편심 스크류(eccentric screw)를 가지는 로터리 용적 펌프(rotary positive-displacement)를 사용하였다. 펌프 사용 시 용액은 저 유량부터 고 유량으로 서서히 증가시키면서 기포의 발생을 최소화하고 사전 보정(calibration)을 통해 설정 유량과 실제 유량의 차이를 확인해야 한다.[14]

슬롯-다이 코팅 노즐로부터 용액이 토출되어 필름을 형성한 후 건조 공정을 지나게 된다. 건조 시간은 이송 속도와 건조 구간의 길이로 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{L}{V} \quad (3)$$

따라서 사용 물질의 특성 및 젖음 코팅 두께(wet thickness)에 따라 최소 이송 속도가 결정되어야 한다. 건조 열원은 근적외선(near infrared), 원적외선(far infrared), 열풍(hot-air), 자외선(ultra violet) 방식 등이 사용될 수 있으나 본 연구와 같이 열풍 방식이 사용될 경우 송풍기(blower)의 유동이 코팅면에 물리적으로 타격을 줄 수 있으므로 circumferential slot을 설치하여 유동을 억제할 수 있다. 추가적으로 코팅 공정에서 영향을 주는 외란으로는 먼지 및 이물 등이 있으므로 나노급(nano level) 박막을 코팅 시에는 코팅 구간의 청정도(cleanliness)를 일정하게 유지시켜 주어야 한다.

Table 1 Material properties

Material	Parameter	Unit	Value
Polyethylene terephthalate (PET) film	Width	mm	300
	Thickness	μm	187
	Transmittance	%	90.32
CNT/AgNW hybrid solution	Base solvent	-	Water
	Solid contents	wt%	1.8-1.9
	Viscosity	cP	8.68-9.61
	Surface tension (approx.)	dyn/cm	71.97
AR solution	Base solvent	-	Alcohol
	Solid contents	wt%	1.5-1.7
	Viscosity	cP	2.12-2.46
	Surface tension (approx.)	dyn/cm	22.27

Table 2 Process conditions

Process	Parameter	Unit	Setting
Roll-to-roll processing	Tension	kgf	2
	Drying temp.	°C	110
	Flow rate	cc/min	3-9
TCF coating	Coating gap	μm	50
	Velocity	m/min	2
Washing	Washing time	min	1
	Washing temp.	°C	80
AR coating	Coating gap	μm	30
	Velocity	m/min	1-2

2.2 물질 및 실험 조건

투명전극필름을 구성하는 물질은 AgNW와 CNT로 선정하였다. 전 공정은 총 세 가지 스텝으로 이루어져 있다. 첫 번째 코팅에서는 AgNW/CNT 하이브리드 물질을 슬롯-다이 공정을 이용하여 필름 상에 코팅하였다. 둘째로 CNT 네트워크의 금속 촉매(catalyst) 및 불순물 제거를 위해 증류수를 이용한 세척을 수행하였으며, 마지막으로 투과율 향상을 위해 무반사(anti-reflection: AR) 코팅을 수행하였다. 사용된 물질 및 공정의 상세한 조건은 Table 1 및 Table 2와 같다.

선택된 물질 및 공정 조건을 바탕으로 실험을 수행 후 제작된 투명전극필름의 성능을 평가하였다. 면 저항 성능은 4-point 프로브(digital multimeter 2001,

Keithley)를 사용하였으며, 투과율은 spectrometer (Lambda 15 UV/Vis, Perkin Elmer)를 사용하였다. 그리고 주사전사현미경(scanning electron microscope, S-4800, Hitachi)를 이용하여 투명전극 물질의 분산 정도를 확인하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 코팅 두께의 수학적 모델

슬롯-다이 코팅은 공정 조건에 따라 박막 두께 제어가 가능하다. 박막 두께는 투명전극필름에서 면저항과 투과율의 성능을 결정한다. 식(4)의 Beer-Lambert 법칙에 의하면 박막 두께의 증가에 따라 투과율은 감소한다.[15]

$$\frac{I}{I_0} = 10^{-\alpha \cdot th} \tag{4}$$

또한 투명전극물질이 두껍게 필름을 형성하게 되면 전자의 이동이 활발해져 면저항이 향상될 수 있다. 이와 같이 투명전극필름 생산 시 면저항 및 투과율 성능은 상충되기 때문에 생산품의 목표에 맞는 최적의 두께 및 이를 위한 공정 조건을 확보하는 것이 중요하다.

코팅 두께를 정의하는 수학적 모델은 대표적으로 Calvarho[16] 에 의해 개발된 viscocapillary 모델이 있다. 본 모델은 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 모관값(capillary number)와 코팅 간극의 관계로 두께 환산이 가능하다는 장점이 있다. 본 모델은 젖음 두께를 나타내기 때문에 고형분 계산을 통해 건조 후 두께를 계산하였다.[14]

$$t = \frac{h_0 r}{1+1.49Ca^{-2/3}} \tag{5}$$

다만 본 모델은 저 유량 한계(low-flow limit)에서 적용이 가능하며 메니스커스 형상을 원통형(cylindrical shape)으로 가정했을 때, 즉, 속도에 따라 유량 조건이 최적화된 상태에서 적용이 가능하기 때문에 코팅 변수 중의 하나인 유량 조건의 변화에 대응하기 어렵다.

속도에 따른 유량 조건 변화에 따른 두께 특성 변화를 확인하기 위해서는 Kang[17] 에 의해 제안된 부피 모델 사용이 가능하다. 본 모델은 노즐에서 토출되는 용액의 부피와 유량 조건이 검사체적 내에서 정상 상태일 경우를 수식으로 나타낸 것으로 다음 식(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{f_r r}{nwV} \tag{6}$$

본 모델의 경우 고 점도의 용액에서는 뛰어난 예측성을 보이지만,[11] 저 점도 용액을 사용한 공정에서는 계산 값과 실험 값의 차이가 있으며 중요한 공정 변수인 코팅 간극 조건이 포함되지 않아 코팅 간극 변화에 따른 두께 변화를 예측하기 어렵다는 단점이 있다.

본 실험에서는 5 cP 이하의 저 점도 용액이 코팅 공정에 사용되었으며, 속도, 코팅 간극, 유량 등의 조건이 다양하게 변화하여 기존 모델로는 그 변화를 예측하기 어렵다. 따라서 식(5)와 식(6)를 결합하여 식(7)과 같이 예측 상대 두께(estimated relative thickness)를 정의하였다.

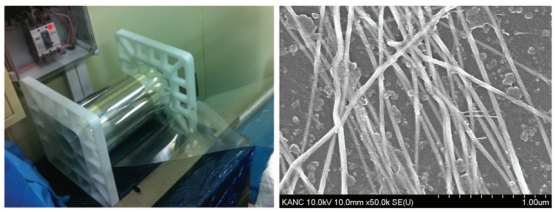
$$t_e = r\left[\lambda\left(\frac{h_0}{1+1.49Ca^{-2/3}}\right)+\nu\left(\frac{f_r}{nwV}\right)\right] \tag{7}$$

Viscocapillary 및 부피 모델의 항 앞에 가중치(weighting factor)를 부여하였다. 본 실험은 저 점도 용액을 사용하였기 때문에 유량 조건을 제외한 공정 조건의 변화에 따른 두께 값이 viscocapillary 모델에 의해 예측 되어 약 10-20 nm의 두께 분포를 나타냈다. 부피 모델의 경우 정해진 조건을 바탕으로 두께 값을 예측했을 때 400-500 nm의 범위를 나타내어 viscocapillary 모델 대비 1/100의 가중치를 부여하였다(λ=1, ν=0.01). 가중치 설정 시 고 점도 용액의 사례(1,800 cP 점도)[11]를 식(7)에 적용 시 부피모델의 영향이 매우 지배적이므로 가중치를 1/1 또는 10/1로 설정하는 것이 측정 결과와 비교했을 경우 약 76%의 정확도를 나타냈다. 사용되는 용액에 따라서 가중치는 적절히 선택되어야 한다.

본 연구에서 사용된 투명전극 물질의 경우 와이어 네트워크를 이루고 있기 때문에 두께를 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 정의된 예측 상대 두께는 공정 조건의 변화에 따른 두께 값의 상대적인 변화에 따른 면저항 및 투과율 변화를 관찰하는데 초점을 두었다.

3.2 코팅 결과 및 측정

Fig. 3(a)는 코팅된 투명전극필름의 사진이다. 코팅된 필름은 수백미터 코팅 후 건조기를 거쳐 리와인더에서 롤 형태로 제작이 완료되었으며, 샘



(a) (b)

Fig. 3 (a) Wound AgNW/CNT film (b) Scanning electron microscope image of AgNW/CNT network

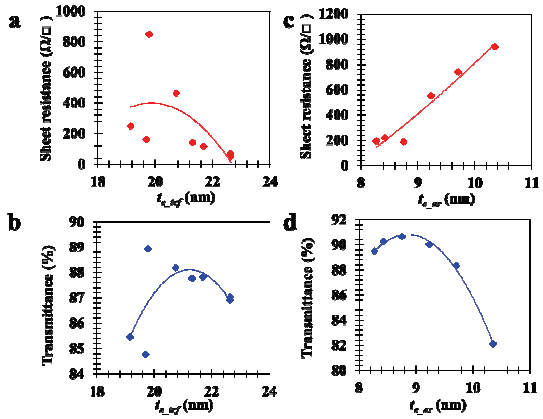


Fig. 4 (a) Sheet resistance and (b) Transmittance value according to the estimated relative thickness of transparent conductive film, (c) Sheet resistance and (d) Transmittance value according to the estimated relative thickness of anti-reflection film

플링(sampling)된 필름의 면저항, 투과율 및 표면 측정을 수행하였다. Fig. 3(b)는 코팅된 AgNW/CNT 필름을 보여준다. AgNW가 네트워크를 이루고 있는 것을 확인할 수 있으며 CNT의 경우 선행논문과 같이[3] 상대적으로 작은 직경으로 분사되어 있는 것을 확인할 수 있다. CNT는 AgNW에 비해 직경이 작기 때문에 고 배율의 측정이 필요하다.

롤투롤 슬롯-다이 코팅 조건으로 계산된 투명 전극필름의 예측 상대 두께 t_{e_tcf}에 따른 면저항 및 투과율 값은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a)와 같이 두께의 증가는 면저항의 감소를 보여주며 최소 53.2 Ω/□의 면저항을 나타냈다. 투과율은 Fig. 4(b)와 같이 두께 값 증가 따라 상승하다가 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 투과율 범위가 84.5%에서 최대 89%로 분포해 큰 경향성을 보여주지 않았다.

생산된 필름의 투과율을 향상 시키기 위해 투명전극필름 위에 무반사 코팅을 수행하였다. Figs. 4(c)-4(d)는 동일 투명전극필름 상에 수행된 무반사 코팅 두께 t_{e_ar}에 따른 면저항 및 투과율 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4(c)를 보면 무반사 코팅의 두께 증가에 따라 면저항도 증가하는 것을 알 수 있다. 무반사 용액의 용질(solute)이 전극필름을 덮으면서 전자의 이동을 방해하기 때문이라 예상된다. 투과율의 경우 Fig. 4(d)와 같이 무반사 두께의 증가에 따라 소폭 증가하다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 선행논문에 보고되었듯이 최적 무반사 두께가 존재하며, 무반사 코팅 두께가 증가하면서 식(4)와 같이 흡광도(absorbance)가 함께 증가하기 때문이다.[14]

3.3 투명전극 및 무반사 코팅 최적화

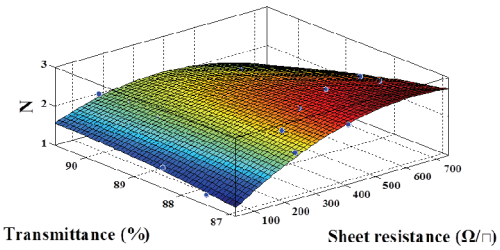
앞 절에서 언급한 것 같이 무반사 코팅의 두께 변화는 투과율 향상에 도움을 주지만 면저항 성능에도 영향을 끼치기 때문에 최종 제품의 목표에 맞추어 조율이 필요하다. 본 절에서는 투명전극필름의 성능과 무반사 코팅에 따른 성능을 고려하여 평가하기 위해 무차원수(dimensionless number) N을 아래 식(8)과 같이 제안하였다.

$$N = \frac{t_{e_ar}}{t_{e_tcf}} \tag{8}$$

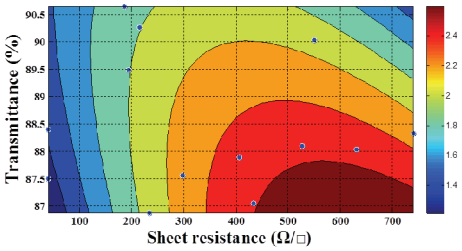
코팅 공정 조건으로부터 도출된 무차원수와 각 조건에 따른 투과율 및 면저항 값을 기반하여 3차원 다항식 메타모델(meta model)을 아래 식(9)과 Fig. 5과 같이 나타낼 수 있다.[18]

$$\begin{aligned} f(x,y) &= p_1 + p_2x + p_3y + p_4x^2 + p_5xy + p_6y^2 \\ p_1 &= -176.5(-876.8, 523.7) \\ p_2 &= 0.05709(0.01089, 0.1033) \\ p_3 &= 3.89(-11.89, 19.67) \\ p_4 &= -4.473\times10^{-6}(-6.838\times10^{-8}, -2.108\times10^{-6}) \\ p_5 &= -0.0005923(-0.001118, -6.635\times10^{-5}) \\ p_6 &= -0.02125(-0.1101, 0.06759) \end{aligned} \tag{9}$$

구해진 모델을 통해 무차원수에 따른 박막 특성 평가가 가능하다. Fig. 5(b)의 등고선도를 보면 작은 무차원수에서 면저항 값이 낮고 투과율이 다양하게 분포하는 것을 알 수 있다. 무차원수의 증가는 무반사 코팅층의 증가 또는 투명전극 물질



(a)



(b)

Fig. 5 (a) 3D plot and (b) Contour plot of meta model which calculated by dimensionless numbers and coated layer performances (transmittance and sheet resistance)

두께의 감소를 의미하기 때문에 면저항이 높게 분포한다. 투과율은 면저항 값이 낮을수록 급격하게 변화한다. 최적 무차원수는 1.4에서 1.6으로 분포하며 투명전극필름 두께가 가장 높고 무반사 코팅 두께는 낮은 공정 조건이 면저항 40 Ω/□, 투과율 88%의 우수한 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 롤투롤 슬롯-다이 코팅 공정을 통해 AgNW 및 CNT 용액을 이용한 대면적 투명 전극필름을 생산하였다. 추가적으로 투과율 향상을 위해 무반사 코팅을 전극필름 상에 코팅하였으며, 300 mm폭의 소재 위에 면저항 40 Ω/□ 및 투과율 88%의 투명전극필름을 얻었다. 서론에서는 최근 투명전극필름의 성능 및 공정 기술 동향을 소개하였으며 본론에서는 롤투롤 슬롯-다이 코팅 시스템에서 고려되어야 할 설계 파라미터를 언급하고 최적화하였으며, 공정 조건 변화에 따른 박막 두께를 예측하고 실험 결과와 함께 분석하였다. 본 이론 및 실험적 접근은 롤투롤 연속생산시스템에서 슬롯-다이를 이용한 코팅 공정 시에 생산 가이드라인으로서 활발히 활용이 가능하다 사료된다.

후 기

본 논문은 2014 년도 한국연구재단 (NRF-2014R1A1A1003477)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Bae, S., Kim, H., Lee, Y., Xu, X., Park, J.-S., et al., “Roll-to-Roll Production of 30-Inch Graphene Films for Transparent Electrodes,” Nature Nanotechnology, Vol. 5, No. 8, pp. 574-578, 2010.
2. Zhu, Y., Sun, Z., Yan, Z., Jin, Z., and Tour, J. M., “Rational Design of Hybrid Graphene Films for High-Performance Transparent Electrodes,” ACS Nano, Vol. 5, No. 8, pp. 6472-6479, 2011.
3. Hecht, D. S., Hu, L., and Irvin, G., “Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures,” Advanced Materials, Vol. 23, No. 13, pp. 1482-1513, 2011.
4. Lee, J., Lee, P., Lee, H. B., Hong, S., Lee, I., et al., “Room-Temperature Nanosoldering of a Very Long Metal Nanowire Network by Conducting-Polymer-Assisted Joining for a Flexible Touch-Panel Application,” Advanced Functional Materials, Vol. 23, No. 34, pp. 4171-4176, 2013.
5. Wu, L. Y., Kerk, W., and Wong, C., “Transparent Conductive Film by Large Area Roll-to-Roll Processing,” Thin Solid Films, Vol. 544, pp. 427-432, 2013.
6. Hu, L., Kim, H. S., Lee, J.-Y., Peumans, P., and Cui, Y., “Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes,” ACS Nano, Vol. 4, No. 5, pp. 2955-2963, 2010.
7. Geng, H.-Z., Kim, K. K., So, K. P., Lee, Y. S., Chang, Y., et al., “Effect of Acid Treatment on Carbon Nanotube-Based Flexible Transparent Conducting Films,” Journal of the American Chemical Society, Vol. 129, No. 25, pp. 7758-7759, 2007.
8. Shimoni, A., Azoubel, S., and Magdassi, S., “Inkjet Printing of Flexible High-Performance Carbon Nanotube Transparent Conductive Films by ‘Coffee Ring Effect’,” Nanoscale, Vol. 6, No. 19, pp. 11084-11089, 2014.
9. Li, X., Zhu, Y., Cai, W., Borysiak, M., Han, B., et al., “Transfer of Large-Area Graphene Films for High-Performance Transparent Conductive Electrodes,” Nano Letters, Vol. 9, No. 12, pp. 4359-4363, 2009.

10. Tung, V. C., Chen, L.-M., Allen, M. J., Wassei, J. K., Nelson, K., et al., “Low-Temperature Solution Processing of Graphene-Carbon Nanotube Hybrid Materials for High-Performance Transparent Conductors,” Nano Letters, Vol. 9, No. 5, pp. 1949-1955, 2009.
11. Park, J., Shin, K., and Lee, C., “Improvement of Cross-Machine Directional Thickness Deviation for Uniform Pressure-Sensitive Adhesive Layer in Roll-to-Roll Slot-Die Coating Process,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 16, No. 5, pp. 937-943, 2015.
12. Shin, K.-H., Jang, J.-I., Kang, H.-K., and Song, S.-H., “Compensation Method for Tension Disturbance Due to an Unknown Roll Shape in a Web Transport System,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 5, pp. 1422-1428, 2003.
13. Roisum, D. R., “The Mechanics of Rollers,” Tappi Press, 1996.
14. Park, J., Shin, K., and Lee, C., “Optimized Design for Anti-Reflection Coating Process in Roll-to-Roll Slot-Die Coating System,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 30, No. 5, pp. 432-441, 2014.
15. Zaccanti, G. and Bruscaglioni, P., “Deviation from the Lambert-Beer Law in the Transmittance of a Light Beam through Diffusing Media: Experimental Results,” Journal of Modern Optics, Vol. 35, No. 2, pp. 229-242, 1988.
16. Carvalho, M. S. and Kheshgi, H. S., “Low-Flow Limit in Slot Coating: Theory and Experiments,” AIChE Journal, Vol. 46, No. 10, pp. 1907-1917, 2000.
17. Kang, H., Park, J., and Shin, K., “Statistical Analysis for the Manufacturing of Multi-Strip Patterns by Roll-to-Roll Single Slot-Die Systems,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 30, No. 4, pp. 363-368, 2014.
18. Park, J. and Lee, C., “Parameter Analysis for the Lateral Thickness of the Coated Layer to Improve Product Quality in Large Area Roll-to-Roll Slot-Die Coating Process,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 159-166, 2014.