

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XIII

CFD 해석을 이용한 롤투롤 슬롯-다이 내부 유동 분석 및 최적화

Analysis and Optimization on Inside Flows of Fluid in Roll-to-Roll Slot-Die Nozzle by CFD Simulation

김성용¹, 이창우²✉
Seongyong Kim¹ and Changwoo Lee²✉

1 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National University)

2 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)

✉ Corresponding author: leecw@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3618

Manuscript received: 2016.5.24. / Revised: 2016.7.6. / Accepted: 2016.7.13.

Computational fluid dynamic simulation based on the ABAQUS software was conducted to observe the inside flow of slot-die nozzle. The slot-die nozzle was modeled as 3-dimensional structure and three significant parameters were determined: inlet velocity of fluid, reservoir angles, number of strips none of which have been mentioned previously in the literature. The design of experiment, full factorial analysis was performed within determined design and process levels. The simulation result shows the inlet fluid velocity is most significant factor for the flows of inside nozzle. As an interaction effect, reservoir angle is closely related with number of strip that should address when the nozzle is designed. Moreover, the optimized values of each determined parameter were obtained as 35 mm/s of inlet velocity, 3 of strip numbers, and 22° of reservoir angles. Based on these parameters, the outlet velocity was obtained as 0.53% of outlet uniformity which is improved from 8.67% of nominal results.

KEYWORDS: Computational fluid dynamics (전산 유체해석), Design of experiments (실험계획법), Roll-to-Roll system (롤-투롤 시스템), Slot-Die coating (슬롯-다이 코팅)

1. 서론

최근 산업 발전을 통한 유연 필름 (Flexible Film) 상의 인쇄공정 및 소자가 많은 이슈가 되고 있으며, 특히 상용화에 가까운 응용 제품 (Application) 개발을 위한 기술로서 박막 코팅 공정이 활발하게 연구되고 있다. 기능성 코팅 필름의 균일한 박막 형성을 위한 코팅 방법에는 그라비아 (Gravure), 블레

이드 (Blade), 스프레이 (Spray), 슬롯-다이 코팅 등의 방법이 있는데, 그 중 슬롯-다이 코팅은 높은 균일도의 박막 형성을 하는데 적합하며 여러 공정 조건을 적절하게 설정함으로 예측 가능한 (Pre-Metered) 박막 두께를 형성할 수 있다는 장점으로 널리 사용되고 있다.¹

슬롯-다이 공정은 L.E. Scriven과 M.S Carvalho등에 의해서 연구되어온 지배 방정식 (Governing

Equation) 개발 기반의 연구² 및 국내에서의 전산 유체해석 (Computational Fluid Dynamics) 연구들이 주를 이루어 왔다.³⁻⁵ 롤투롤 (Roll-to-Roll) 기반의 필름 생산 연구는 무반사 필름 (Anti-Reflection Film),^{6,7} 투명 전도 필름 (Transparent Conducting Film),^{8,9} 감압접착 필름 (Pressure Sensitive Adhesive)^{10,11} 등이 있었으며 응용 제품 개발의 사례는 덴마크의 F.C Krebs 교수 연구팀에서의 유기태양전지 (Organic Photovoltaic) 가 다수 슬롯-다이 공정을 포함하고 있어 대표적이다.^{12,13}

롤투롤 기반의 필름은 Viscopillary Model 기반으로 얻어졌던 공정 가이드라인을 바탕으로 적절한 박막을 얻기 위한 노력¹이 있었으며 또한 대부분이 실험적인 접근으로 박막의 최적화에 집중해왔다.

박막 필름은 한가지 물질로 이루어진 단층 (Single Layer)뿐만 아니라 적층 (Multi-Layer) 구조를 가지는 필름 제품이 많은데 폭 방향의 불균일성이 최종 제품에 영향을 줄 수 있으므로 개선되어야 하는 것이 최근 이슈로 떠오르고 있다. 폭방향 불균일 성은 합지 (Lamination) 공정이나 유기태양전지 인쇄 시 결함을 발생시킬 수 있으므로 심도 있는 연구가 필요하다. 그러나 선행 연구되었던 공정 조건 최적화⁷ 자체로는 한계가 있으므로 본 연구에서는 전산유체해석을 활용하여 슬롯-다이 설계를 다양하게 수행하고 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 최적의 폭 방향 균일 코팅 면을 확보하기 위한 설계 가이드라인을 제시하였다.

2. 슬롯-다이 시뮬레이션

2.1 모델링 및 유의 변수 설정

슬롯-다이 노즐 (Nozzle) 내부의 유동을 전산 유체해석 기반으로 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 3차원 모델링을 수행하였다. 시뮬레이션의 입력 변수를 결정하기 위해 선행논문을 바탕으로 screening을 수행하였다. 최근 고려되지 않았던 공정조건 외의 변수인 reservoir의 형상 및 스트립 (Strip)의 개수 그리고 입력 유체 속도가 Table 1과 같이 실험계획법 (Design Of Experiment: D.O.E)기법 중 하나인 완전요인설계 (Full Factorial)를 위해 3 - 4 수준으로 설정되었다.

A변수인 입력 속도는 실제 공정에서 사용되어 온 입력 속도의 대표적 세 가지 수준을 1 mm/s에서 100 mm/s로 저속부터 고속까지 설정하였으며, B

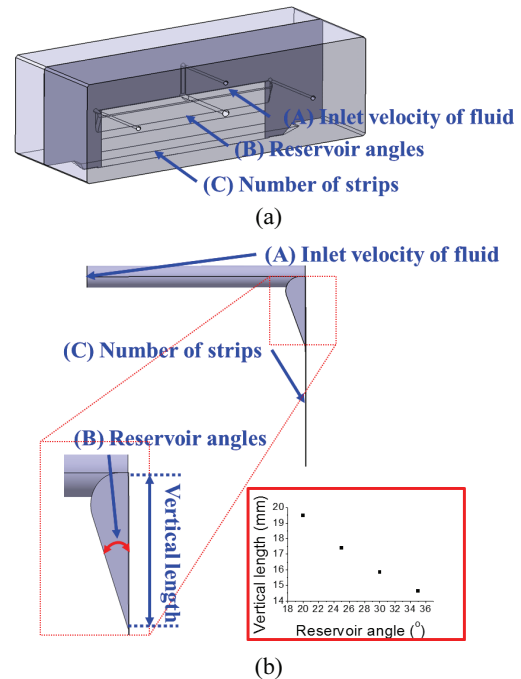


Fig. 1 (a) 3-Dimensional modeling of slot-die and screened simulation parameters, and (b) Side-View of slot-die and the one of screened parameters: reservoir with different angles (Inset: Reservoir Angle Versus Vertical Length)

Table 1 Screened parameters for D.O.E and their levels

Parameters	Unit	Levels
Inlet velocity of fluid	mm/s	1, 10, 100
Reservoir angle	°	20, 25, 30, 35
Number of strip	-	1, 3, 5, 10

수준인 Reservoir의 형상은 슬롯-다이 회사의 주요 기술로서 노즐 내부의 주요 유동을 결정하므로 본 연구에서는 상용 슬롯-다이를 계측하여 유사한 모양으로 Fig. 1(a)와 같이 모델링 한 후 reservoir 내부의 중요 변수인 각도를 Fig. 1(b)와 같이 변화시키면서 수준을 20도에서 35도까지 정하였다. 본 각도는 변화할 때마다 단면적이 바뀌므로 각도의 변화에 따라 Fig. 1(b)의 삽입 그래프와 같이 단면적이 유지되도록 수직 길이 (Vertical Length)를 설정하였다. 마지막으로 스트립 개수는 유기태양전지 공정에서 중요한 파라미터 중 하나이므로 전면코팅을 비롯하여 여러 단계의 스트립 조건을 설정하였다.

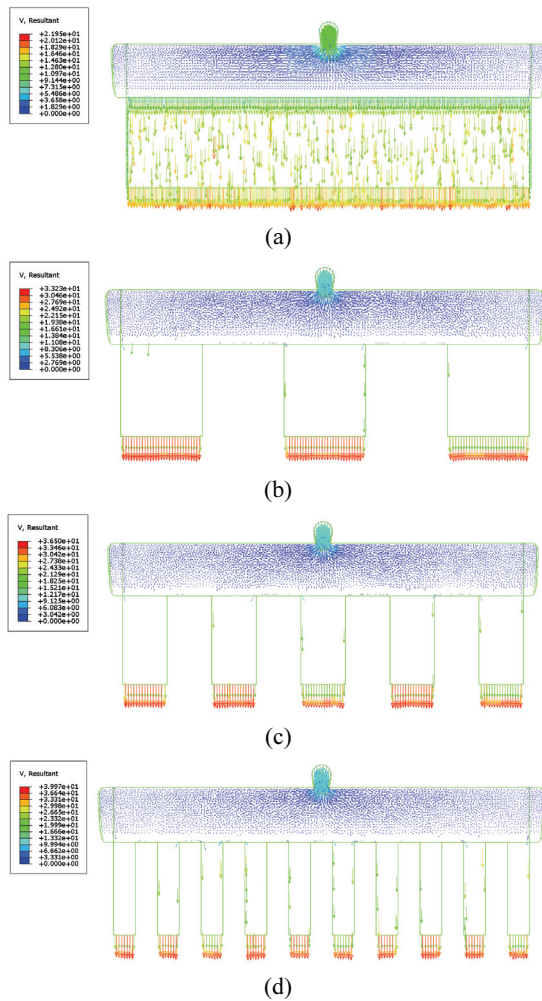


Fig. 2 Outlet velocity of fluid nearby slot-die lip with various number of (a) 1-, (b) 3-, (c) 5-, (d) 10-strips (Fixed Values: Reservoir Angle of 20° and Inlet Velocity of Fluid of 10 mm/s)

Table 2 Simulation conditions for ABAQUS

Parameters	Unit	Value
Fluid type	-	Newtonian
Outlet pressure	Pa	0
Fluid viscosity	mPa·s	1800
Fluid density	g/cm ²	0.96

Table 2는 ABAQUS를 이용한 내부 유동장 시뮬레이션을 위한 경계 조건 및 물성치를 나타낸다. 유체 타입은 뉴턴 (Newtonian) 유체를 사용하였으며, 출측의 압력은 0 Pa, 유체의 점도는 1800 mPa·s

로 유체의 밀도는 0.96 g/cm²으로 설정하였다. 이는 선행 연구에서 진행된 감압 점착 용액을 참고로 하여 채택하였다.⁷ 본 조건을 바탕으로 내부 유동장의 시뮬레이션을 다음과 같이 실시하였다.

2.2 해석 결과

Fig. 2는 ABAQUS를 이용한 시뮬레이션 결과의 예를 나타낸다. 본 그림에서 시뮬레이션은 reservoir의 출측 각도는 20도, 입측의 유속은 10 mm/s로 고정하며, 스트립 개수에 따른 폭 방향 유속 차이를 시각화한 것이다. 이와 같이 완전요인설계 된 변수들의 조합에 따라 시뮬레이션을 48회 수행했으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. 분석 결과 스트립의 개수 증가에 따라 전체적인 출측 속도 프로파일이 증가하는 것을 볼 수 있었으며 이는 스트립의 개수가 증가하면서 출구 면적이 줄어드는 동시에 나타나는 일반적 현상이다. 또한 reservoir의 출측 각도에 따라 출측 속도 프로파일의 미세한 변화가 발생하며, 이는 슬롯-다이 코팅 공정에 큰 영향을 미치게 된다. 입측 속도에 대한 출측 속도의 변화는 각 조건 별로 차이가 있지만 그래프 상으로 기울기가 크게 변하지는 않았다. 본 박스 플롯 (Box Plot)의 값은 출측 프로파일의 폭 방향 변화를 나타내며 이를 더욱 면밀하게 분석하기 위해 다음 절과 같이 완전요인분석을 수행하였다.

3. 실험계획법을 이용한 최적화

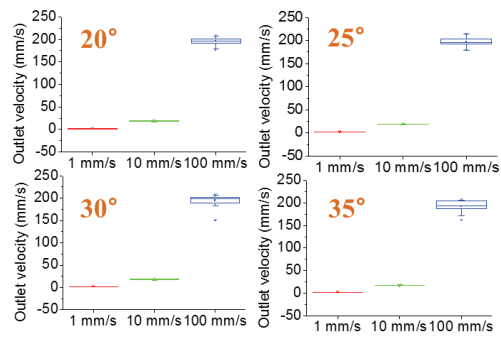
3.1 완전 요인 설계

실험 계획법을 통한 영향을 분석하기 위해 설정된 입력 변수 및 수준을 평가하기 위한 출력 변수 u 를 다음 식 1과 같이 정의하였다.

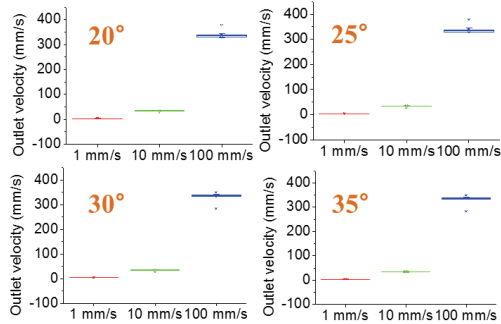
$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \times 100 \tag{1}$$

a_i 는 i 번째 출측 유체속도이며, n 은 폭방향으로의 유체 속도 프로파일 개수 그리고 \bar{a} 는 평균 값을 나타낸다. 평균 값 대비 표준편차 값의 비를 퍼센트로 나타내어 출측 유체 속도 프로파일의 균일도를 평가했다.

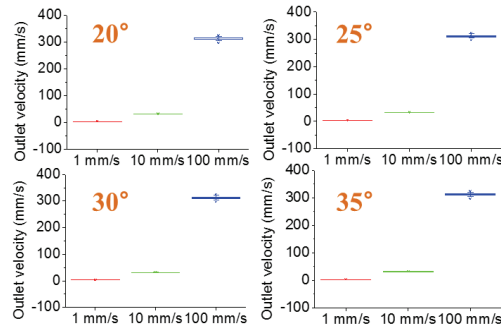
설정된 출력 변수 u 즉 출측의 균일도 (Uniformity of Outlet)을 완전 요인 분석하여 등고선도로 다음 Fig. 4와 같이 나타냈다.¹⁴ 본 등고선도는 각 설정



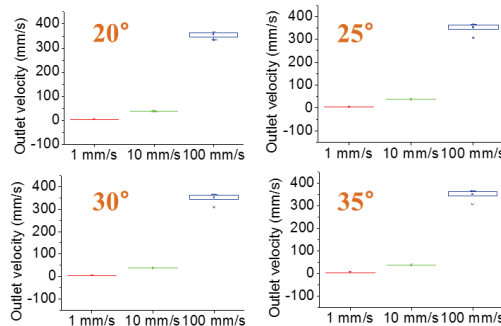
(a)



(b)

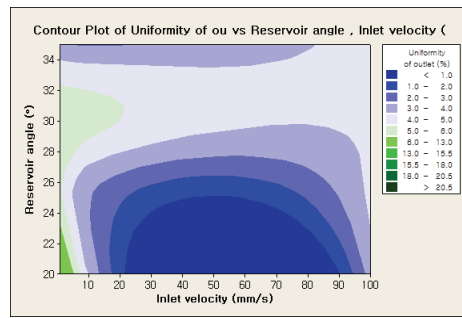


(c)

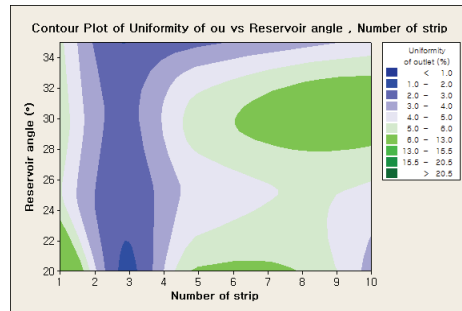


(d)

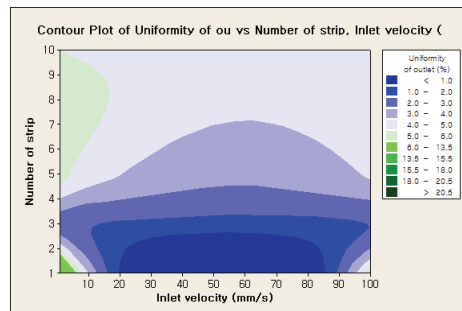
Fig. 3 Summarized simulation results for outlet velocity of fluid (a) 1-, (b) 3-, (c) 5-, (d) 10-Strips



(a) Inlet velocity as reservoir angle



(b) Number of strip as reservoir angle



(c) Inlet velocity as number of strip. Each red box indicate the optimum ranges

Fig. 4 Contour plot of analyzed full factorial design

변수의 결과값에 대한 주효과 및 교호효과를 나타낸다. 결과적으로 F값은 스트립의 개수 (C)가 5.32로 가장 높게 나타났으며 그 다음으로 입측 속도 (A) 변수가 2.49, 그리고 reservoir 각도 (B)는 1.3으로 나타났는데 reservoir 각도가 입측 속도와의 교호작용을 고려했을 때 1.41로 주 효과 보다 높게 나타남으로 슬롯-다이 내부의 형상은 유체 입력 속도에 더 민감하게 변화하는 것을 확인하였다.

등고선도를 살펴보면 Fig. 4(a)의 경우 입측 속도 20 - 90 mm/s에서 reservoir 각도가 약 24° 이하일 경우 1% 이하의 출측 프로파일 균일도를 보여줬으며, Fig. 4(b)에서는 스트립의 개수 및 reservoir

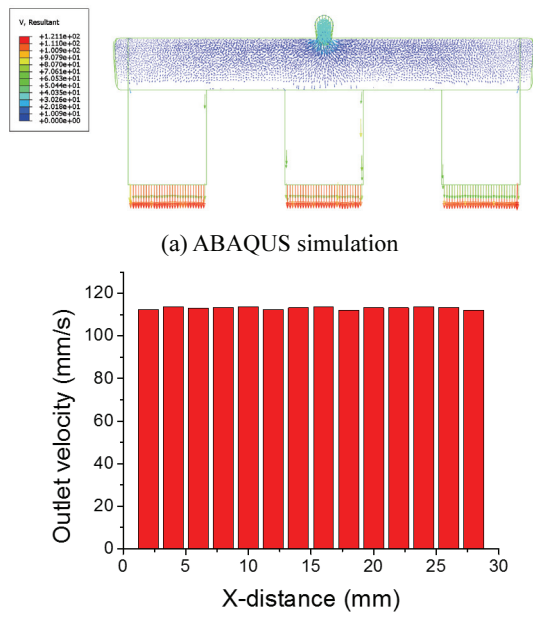


Fig. 5 Optimized design and its simulation

각도가 각각 3 및 22° 이하일 때로 나타났다. 마지막으로 Fig. 4(c)와 같이 입측 속도가 20부터 80 mm/s 그리고 스트립 개수가 3 이하일 때 최소값을 나타냈다.

3.2 최적 시뮬레이션

앞서 얻어진 최적 봉우리 값을 바탕으로 출측의 속도 편차를 줄일 수 있는 다이 형상의 최적화 작업을 진행하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. Reservoir 각도를 22°, 스트립 개수를 3, 입측 속도 입력을 35 mm/s로 설정했다.

최적화된 다이 형상 및 공정 조건에 대한 시뮬레이션을 ABAQUS를 이용하여 Fig. 5(a)와 같이 나타냈으며 폭 방향 속도 프로파일을 얻은 후 Fig. 5(b)로 나타낸 결과 출측의 속도 균일도는 0.53%로 기존 시뮬레이션의 평균 값 8.67%에 비하여 감소된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 슬롯-다이 코팅의 다이 출측 속도 프로파일의 균일성을 높이기 위하여 시뮬레이션을 실시, 그 결과를 바탕으로 다이 구조 및 공정 조건을 최적화 하였다.

(1) 슬롯-다이 코팅 간 출측의 속도 편차는 불균일 코팅면을 형성하는 원인이 되며, 이는 제품에 영향을 미치게 된다.

(2) 다이 출측의 속도 편차의 원인 분석을 위해 입측의 유속, reservoir의 출측 각도, 스트립의 수에 따른 출측의 속도 불균형을 시뮬레이션을 통해 확인을 하였다.

(3) 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험계획법을 통해 다이의 구조 및 공정 조건에 대한 최적화를 진행하였다.

(4) 최적화 결과 기존의 시뮬레이션에서 출측 속도 평균 균일도 8.67%에서 0.53%로 성능이 향상됨을 알 수 있다.

(5) 얻어진 결과는 코팅 최종제품의 기관 상의 증착을 균일하게 하여 폭방향 편차를 줄일 수 있는 설계 변수로 활용 될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 (NRF-2016R1A1A1003477)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Park, J., Shin, K., and Lee, C., "Roll-to-Roll Coating Technology and Its Applications: A Review," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 17, No. 4, pp. 537-550, 2016.
2. Romero, O., Suszynski, W., Scriven, L., and Carvalho, M., "Low-Flow Limit in Slot Coating of Dilute Solutions of High Molecular Weight Polymer," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 118, No. 2, pp. 137-156, 2004.
3. Lee, J. and Nam, J., "A Simple Model for Viscoplastic Thin Film Formation for Coating Flows," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 229, pp. 16-26, 2016.
4. Romero, O., Scriven, L., and Carvalho, M., "Slot-Coating of Mildly Viscoelastic Liquids," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 138, No. 2, pp. 63-75, 2006.
5. Chang, Y.-R., Chang, H.-M., Lin, C.-F., Liu, T.-J., and Wu, P.-Y., "Three Minimum Wet Thickness Regions of Slot Die Coating," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 308, No. 1, pp. 220-230, 2006.

6. 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. 10, pp. 432-441, 2016.
7. 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.
8. Shin, K., Park, J., and Lee, C., "A 250-mm-Width, Flexible, and Continuous Roll-to-Roll Slot-Die Coated Carbon Nanotube/Silver Nanowire Film Fabrication and a Study on the Effect of Anti-Reflective Overcoat," *Thin Solid Films*, Vol. 598, pp. 95-102, 2016.
9. Kim, S., Kim, S. Y., Chung, M. H., Kim, J., and Kim, J. H., "A One-Step Roll-to-Roll Process of Stable AgNW/PEDOT: PSS Solution Using Imidazole as a Mild Base for Highly Conductive and Transparent Films: Optimizations and Mechanisms," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 3, No. 22, pp. 5859-5868, 2015.
10. 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.
11. Krebs, F. C., Fyenbo, J., and Jørgensen, M., "Product Integration of Compact Roll-to-Roll Processed Polymer Solar Cell Modules: Method and Manufacture Using Flexographic Printing, Slot-Die Coating and Rotary Screen Printing," *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 20, No. 41, pp. 8994-9001, 2010.
12. Schmidt, T. M., Larsen-Olsen, T. T., Carlé, J. E., Angmo, D., and Krebs, F. C., "Upscaling of Perovskite Solar Cells: Fully Ambient Roll Processing of Flexible Perovskite Solar Cells with Printed Back Electrodes," *Advanced Energy Materials*, Vol. 5, No. 15, Paper No. 02164, 2015.
13. Lima, F. A. S., Beliatis, M. J., Roth, B., Andersen, T. R., Bortoti, A., et al., "Flexible ITO-Free Organic Solar Cells Applying Aqueous Solution-Processed V₂O₅ Hole Transport Layer: An Outdoor Stability Study," *APL Materials* Vol. 4, No. 2, Paper No. 1500569, 2016.
14. Lee, C., Kang, H., Kim, C., and Shin, K., "A Novel Method to Guarantee the Specified Thickness and Surface Roughness of the Roll-to-Roll Printed Patterns Using the Tension of a Moving Substrate," *Journal of Microelectromechanical*, Vol. 19, No. 5, pp. 1243-1253, 2010.