



가변형 슬롯 다이 코팅의 균일도 확보를 위한 토출 유량 정밀 측정 및 제어

배예은^a, 윤경택^a, 이현호^a, 이문구^a, 김현정^a, 최영만^{a,*}Precision Measurement and Control of Flow Rate for Coating
Uniformity in Variable Slot Die CoatingYeeun Bae^a, Kyung-Taek Yoon^a, Hyun-Ho Lee^a, Moongu Lee^a, Hyun-Jung Kim^a, Young-Man Choi^{a,*}^a Department of Mechanical Engineering, Ajou University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 September 2023
Revised 26 September 2023
Accepted 5 October 2023

Keywords:

Slot die coating
Coating uniformity
Variable width
Gravimetric method
Flow meter

ABSTRACT

Slot die coating is a pre-metered coating process commonly used for manufacturing thin and wide films with high production speed and good uniformity. Recently, there has been an increasing demand for variable-width coating by changing the slot width. In this case, the discharged flow rate per unit width must be continuous for optimal uniformity thickness. This study assesses the flow rate from the variable width slot die nozzle by adapting a gravimetric method using a precision weighing balance. Changing slot width alters internal flow dynamics. Therefore, through the fluid simulation, we gauged any flow rate change caused by the hydrodynamic force from the width change. For uniform coating thickness, we controlled the pump with the feedforward method from the baseline obtained by the simulation. Experimental results demonstrate that the flow rate error was enhanced by 81% and 14% for opening and closing slot cases, respectively.

1. 서론

일반적인 슬롯 다이 코팅은 평판이나 롤 기관 위에 박막을 얇고 균일하게 코팅할 수 있는 비접촉식 공정이다^[1]. 해당 공정은 펌프 등을 통해 유량을 제어하는 전계량(pre-metered) 방식으로, 평판 디스플레이, 배터리, 광학 코팅, 박막 전자공학 등의 정밀 코팅이 필요한 응용 분야에서 활용되고 있다^[1-5]. Fig. 1과 같이 슬롯 다이는 금속으로 된 노즐에 슬릿과 내부에 리저버를 포함한다. 리저버는 도관을 통해 펌프와 연결되어 있다. 모든 노즐의 내부 공간은 코팅액으로 채워지며 펌프의 구동을 통해 코팅액이 슬롯 갭을 지나 기관으로 토출됨과 동시에 기관 또는 다이가 이동하면서 코팅된다^[4]. 여기서 슬롯의 갭은 다이 사이의 거리를 말하고, 슬롯의

두께 즉, 논문에서 언급하는 노즐 폭은 Fig. 1의 coating width를 말한다. 코팅 품질을 결정하는 중요한 파라미터 중 하나인 코팅 두께는 토출 유량, 코팅 폭, 코팅 속도 등에 의해 결정된다^[6,7].

최근에, 자동차의 센터페시아 등에 고곡률/비정형 디스플레이 공정의 수요가 증가하고 있다. 고곡률/비정형 디스플레이 생산 공정에서 자유 형상과 곡면을 가지는 cover glass 기관과 LCD 패널의 접착에 접착제(OCR, optical clear resin)를 도포하는 과정에 슬롯 다이 코팅이 사용된다. 슬롯 다이의 노즐 폭이 변화하는 비정형 코팅의 경우, 내부 코팅액의 유동 및 토출 유속이 변화하면서 균일한 코팅 두께를 유지하기 어렵다. 산업현장에서는 trial and error 방식으로 균일 두께를 위한 코팅 공정 조건을 찾고 있으나 이는 시간과 노력이 매우 많이 드는 작업이다.

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-2342

E-mail address: ymanchoi@ajou.ac.kr (Young-Man Choi).

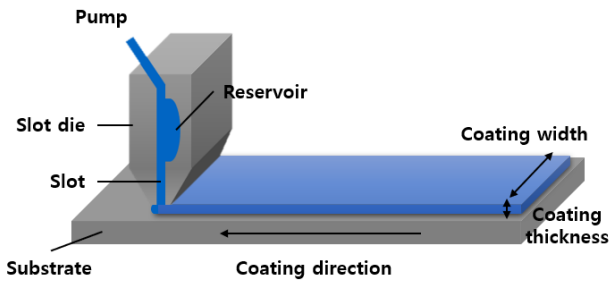


Fig. 1 Schematic of slot-die coating

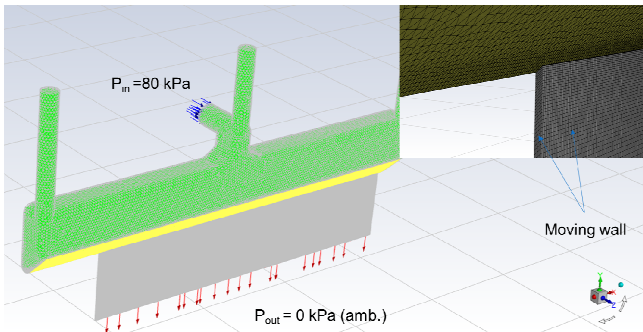
본 논문에서는 비정형 슬롯 다이 코팅에서 단위 미터당 일정한 유속으로 토출하기 위한 유량 평가 및 펌프 제어 기술을 소개한다. 중량 계측법을 이용한 슬롯 다이 노즐의 토출 유량 측정 방식을 이용하여, 펌프의 특성과 가변형 슬롯 다이의 유량 특성을 파악하였다. 또한, 유체 해석을 통해 토출구의 폭이 변화할 때 유동 특성을 분석하고, 이를 기반으로 펌프 명령 프로파일을 결정하였다^[2]. 마지막으로, 가변형 슬롯 다이 코팅 시스템의 프로토타입을 제작하고 유량을 평가하는 실험을 수행하였다.

2. 유량 측정 시스템

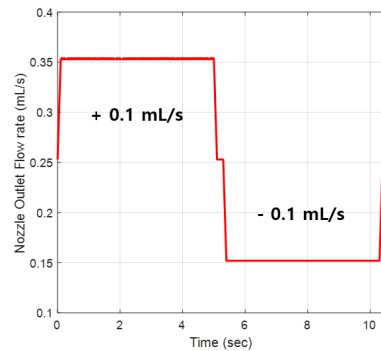
2.1 동적 특성 해석

슬롯 다이 공정에서 코팅 품질을 결정하는 데 영향을 끼치는 요소에는 코팅 속도, 유속, 코팅 간격, 내부 압력, 사용 유체의 점도, 표면 장력, 관성력, 모세관 현상 등이 있다^[2,7]. 특히, 코팅 폭이 변화하는 비정형 코팅의 경우, 토출 유량의 유동 특성이 기존의 슬롯 다이 코팅과는 다르다. 따라서, 본 연구에서는 가변 폭 슬롯 다이에 의한 토출 특성 변화를 CFD(computational fluid dynamics) 해석 소프트웨어(ANSYS Fluent 2022)를 통해 유체의 거동을 분석하고, 이를 기반으로 일정한 코팅 두께를 갖기 위한 펌프 프로파일을 결정하였다.

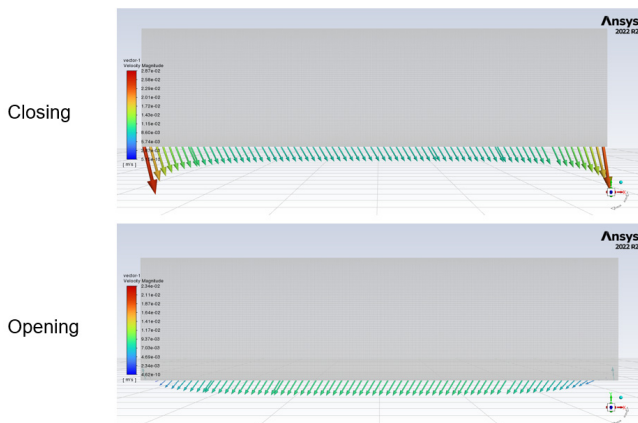
Fig. 2(a)처럼 슬롯 다이 코터의 내부 유동 모델의 형상과 mesh를 구성하였다. 실제로는 Fig. 3에 도시되어 있는 것처럼 내부 shim을 밀거나 당겨 슬롯의 너비를 변화시키는데, 시뮬레이션에서는 슬롯의 앞면과 옆면을 moving wall로 설정하여 코팅 폭을 가변시켰다. 유체의 입구는 일정한 압력 혹은 유량을 부가하였고, 슬롯 다이 노즐의 출구 쪽은 0 Pa로 가정하였다. 노즐 폭은 10



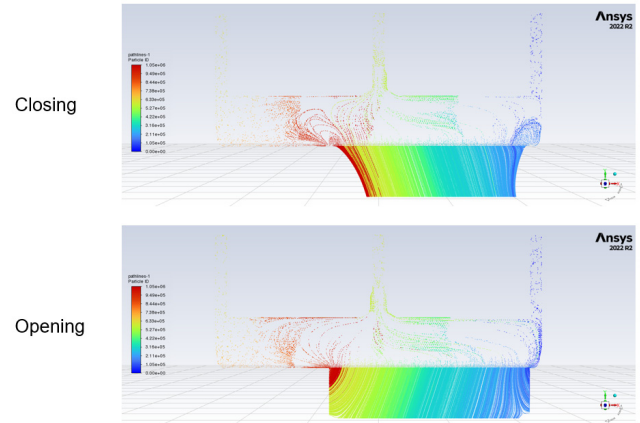
(a) Geometry of the CFD model



(b) Flow rate change when the slot width is varied



(c) Flow velocity distribution at the nozzle



(d) Flow velocity at the entire slot die

Fig. 2 CFD model and results of slot-die nozzle

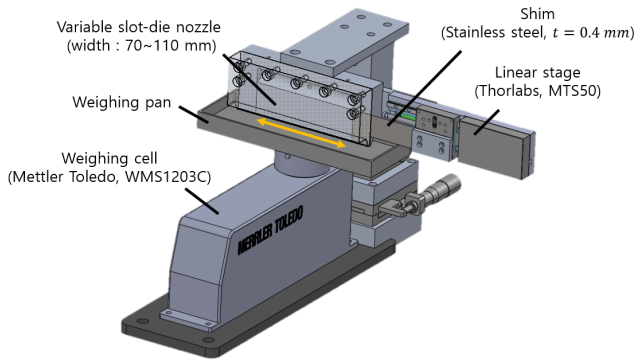


Fig. 3 Gravimetric measurement setup for variable width slot-die nozzle

mm/s의 속도로 125 mm에서 75 mm로 줄어들었다가 다시 늘어난다. 유체의 절대점도는 코팅액과 유사하게 5000 cPs로 가정하였다. Fig. 2(b)와 (c)는 코팅 폭 변화에 따라 노즐 토출구에서 유동 특성 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 초반 부(약 0~5초)는 노즐 폭이 감소하는 closing 상태로, 본 시스템은 시뮬레이션 설정과 같이 정유량 펌프이기 때문에, 슬롯이 좁아지면서 다이 내부의 부피가 감소함에 따라 노즐에서의 전체적인 토출 유량이 증가한다. 또한, 토출구가 좁아지면서 노즐의 양 끝단에 발생하는 내부 압력이 증가하고 이에 따라 양 끝단이 두껍게 코팅된다. 반면, 토출구가 넓어지는 opening의 경우(약 5~10초), 노즐 내부 부피가 증가하면서 토출 유량이 감소하고, closing과는 반대로 노즐의 양단에 발생하는 음압으로 인해 양단 부분이 얇게 코팅될 가능성이 있다. Fig. 2(d)에 도시된 streamline을 보면 closing 시에는 리저버 내부 유동에 급격한 변화가 생기면서 슬롯 중앙과 양단 속도의 편차가 발생하며, opening 시에는 내부 유동은 상대적으로 안정하나 양단에 걸리는 음압으로 인해 역시 속도의 편차가 발생한다. 이와 같이 가변 중 노즐의 양 끝에서 유량이 증가 혹은 감소하여 균일도가 저하될 수 있으므로, 가변 시 속도 조절에 주의해야 하고, 가변 속도에 의한 유량 방향 변화의 영향을 검토하는 것이 필요하다.

2.2 중량 계측법

펌프 제어 명령 및 토출 폭 변화에 따른 유량의 동적 특성을 평가하기 위해 본 논문은 정밀한 웨이셀(weighing cell)을 사용하여 중량 계측법의 유량 평가 방식을 사용한다^[2]. 중량 계측법은 슬롯 다이 노즐에서 토출되는 유량의 질량을 측정함으로써 빠르고 정밀하게 유속의 변화를 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. Fig. 3에 도시된 가변형 슬롯 다이 노즐의 유량 평가 시스템은 노즐로부터 웨이징팬(weighing pan)으로 유체가 토출되고, 정밀한 웨이셀로부터 질량 데이터를 시간에 따라 측정한다. 식 (1)은 측정된 질량으로부터 토출되는 유량을 계산하는 단순한 수식이다.

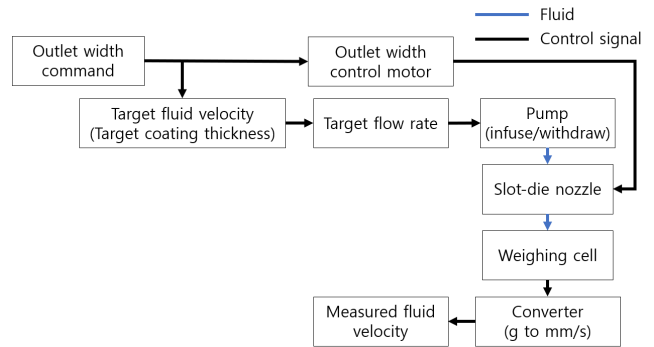
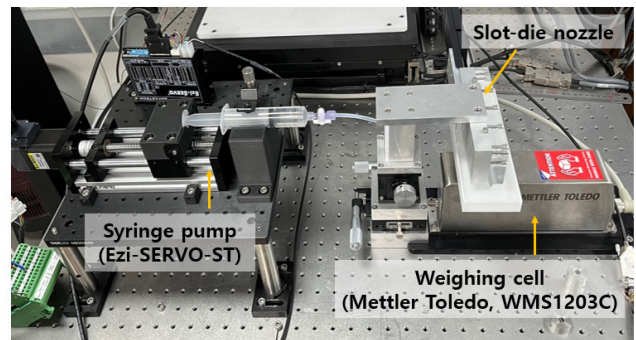


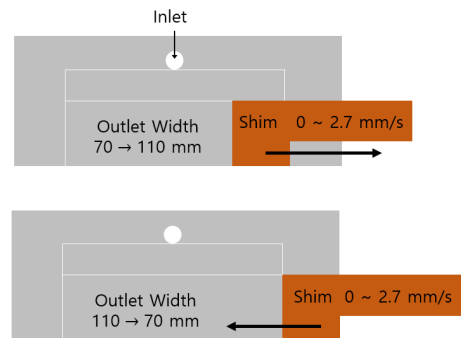
Fig. 4 Flow rate measurement and control block diagram

$$Q(\text{flow rate}) [ml/s] = \frac{d}{dt} \left(\frac{\text{mass (g)}}{\text{density (g/ml)}} \right) \quad (1)$$

Fig. 4는 제안된 시스템의 블록 다이어그램이다. 원하는 코팅 두께와 토출 폭 프로파일 명령으로부터 기준 목표 유량을 계산한다. 다음으로 노즐 폭에 따른 유량 변화와 펌프의 응답을 고려하여 시간에 따른 유량 제어의 정밀도를 높이기 위한 펌프 프로파일 명령을 결정한다. 최종적으로 펌프와 노즐 폭을 제어하면서 웨이셀로부터 받는 질량 데이터로 실제 토출 유량을 측정한다.



(a) Photograph of the system setup



(b) Schematic of variable width slot-die

Fig. 5 Prototype of variable slot die coating system

3. 유량 토출 실험

3.1 시스템 구성

Fig. 5처럼 유량 토출 실험을 위해 축소된 가변형 슬롯 다이 시스템을 구성하였다. 실험실에서 제작된 시린지 펌프는 리니어 스테이지(Ezi-SERVO-ST, FASTECH)가 시린지(30 mL)로부터 유체를 공급하면, 슬롯 다이를 거쳐 슬롯 노즐에서 유체가 토출 되고, 토출된 유체는 웨이팬에 토출되어 웨이셀(WMS1203C, Mettler Toledo)에서 무게를 측정한다. 가변 슬릿 토출 실험을 위해, 리니어 스테이지(MTS50, Thorlabs)로 슬롯 다이 내부의 심을 밀어 토출구의 너비를 가변시킨다. 심의 이동거리(토출 폭 변화)는 40 mm(최대 50 mm)이고, 최대 이동 속도는 2.7 mm/s이다.

3.2 균일 토출 실험

중량 계측법 및 시스템의 검증을 위해, 슬릿 이동 없이 펌프 명령을 50 $\mu\text{L/s}$ 로 25초 동안 토출한 결과가 Fig. 6이다. 사용한 유체는 실리콘 엘라스토머($\mu = 5100 \text{ cPs}$)이고, 같은 실험을 5번 반복 후 평균 결과가 Table 1에 있다. 반복도는 0.86 $\mu\text{L/s}$ 를 가지며, 평균 유량은 53.5 $\mu\text{L/s}$ 로 오차가 존재한다. 펌프 명령과 펌프의 실제 토출 유량에는 오차가 존재하며, 시린지 펌프의 자체 오차를 비롯하여 슬롯 다이 가변을 위한 심의 공차 및 슬롯 다이 내부 기포로 인한 측정오차가 있을 수 있다. 펌프 명령이 끝난 이후에도 잔여 토출이 존재하는데, 이는 유체의 관성으로 인한 것으로, 추후 펌프의 역회전(suck back) 명령을 통해 제어할 수 있다.

Fig. 7(a)는 펌프 균일 토출 시 토출 폭을 70 mm에서 110 mm로

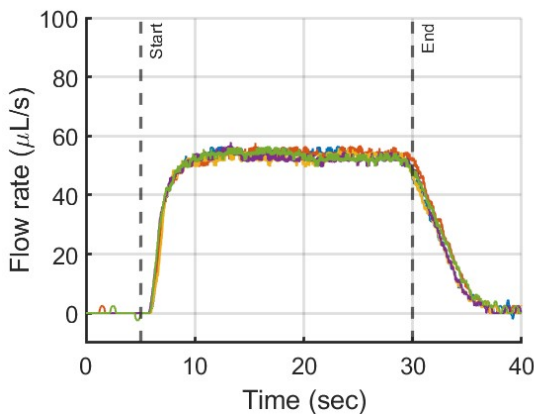
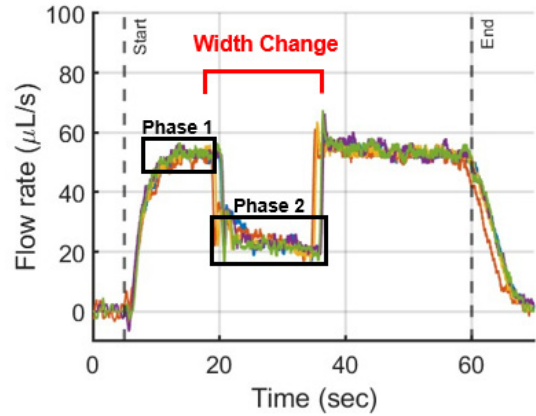


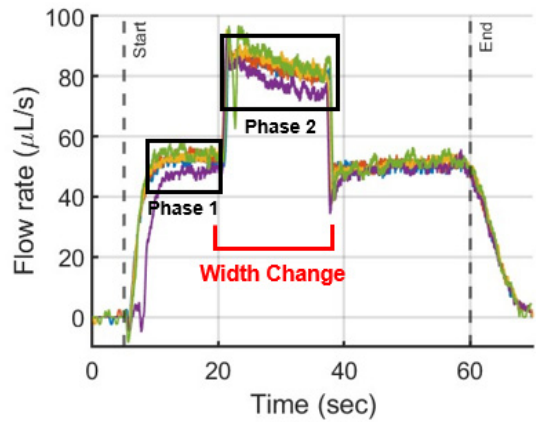
Fig. 6 Gravimetric flow rate measurement result : fixed coating width for 50 $\mu\text{L/s}$ pump command

Table 1 Experimental results in case of fixed coating width

Time constant (s)	Mean ($\mu\text{L/s}$)	Repeatability (1σ)($\mu\text{L/s}$)	Noise level (3σ)($\mu\text{L/s}$)
3.4	53.5	0.86	3.1



(a) Varing coating width when opening



(b) Varing coating width when closing

Fig. 7 Gravimetric flow rate measurement results

40 mm를 가변시켰을 때의 토출 유량 측정 결과이고, Fig. 7(b)는 반대로 110 mm에서 70 mm로 가변시켰을 때의 결과이다. 이 때 가변 속도는 2.7 mm/s이다. Table 2는 폭 고정 구간(phase 1)과 폭 가변 구간(phase 2)에 대한 유량 특성을 보여주며 5번 반복한 결과의 평균값이다. 토출구 폭 가변 시, 유동 변화에 따른 유동 저항성이 증가함으로 인해 반복도나 노이즈 레벨 성능이 떨어졌다. 앞 장의 2.1절의 시뮬레이션과 유사하게, 슬릿 가변 구간(phase 2)의 유동 특성을 보면, 노즐 폭이 모두 펌프의 응답보다 매우 빠른 속도로 변화하였다. 넓어지는 동안에는 (opening) 내부 부피 증가에 따라서 유량이 30 $\mu\text{L/s}$ 정도 줄어든다. 반대로 노즐 폭이 좁아졌을 때는(closing) 내부 부피 감소로 인해 유량이 동일한 크기로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 슬릿의 가변에 의한 응답은 약 1초 이내인 반면, 펌프의 응답은 약 3.4 초로 슬릿에 비해 느린 응답을 갖는다. 폭 가변 시에는 펌프 모터의 맥동으로 인하여 반복도나 노이즈 레벨 성능이 폭 고정의 경우에 비해 다소 저하되었다.

3.3 슬릿/펌프 연동 제어

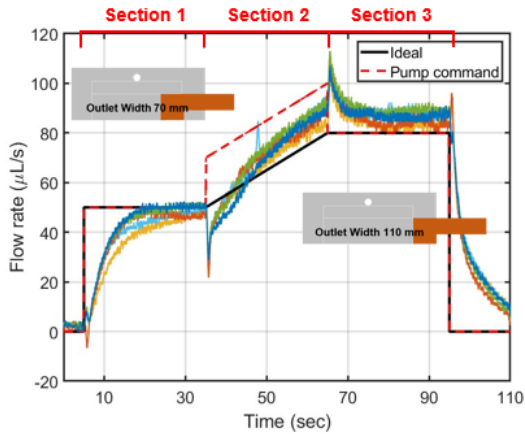
가변형 슬롯 다이 코팅에서 일정한 두께 코팅을 위해서는 폭에

Table 2 Experimental results in case of variable coating width

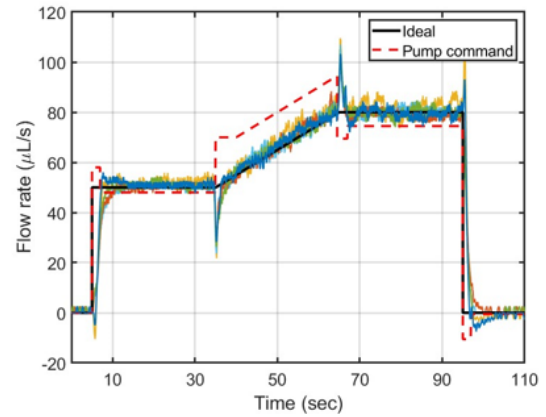
		Mean ($\mu\text{L/s}$)	Repeatability (1σ)($\mu\text{L/s}$)	Noise level (3σ)($\mu\text{L/s}$)
Opening	Fixed width	52.6	0.66	3.5
	Varying width	22.3	0.71	6.8
Closing	Fixed width	52.4	2.3	3.3
	Varying width	82.6	3.0	5.6

Table 3 Experimental results with flow-rate control

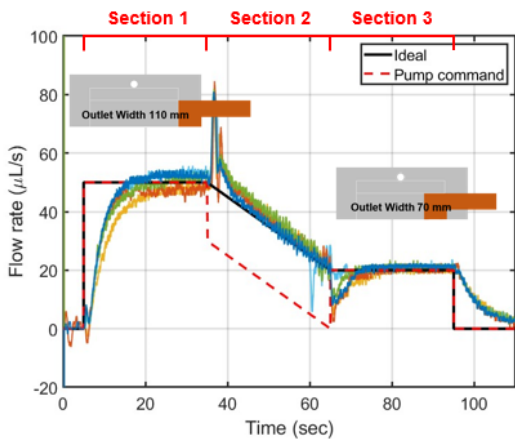
		Time constant (s)	RMS error (%)				Repeatability (1σ)($\mu\text{L/s}$)	Noise level (3σ)($\mu\text{L/s}$)
			Section 1	Section 2	Section 3	Total		
Opening	Original	5.0	15.7	9.4	8.2	11.1	1.2	5.1
	Feedforward	1.7	2.2	3.0	1.0	2.1		
	Improvement	66 %	86 %	67 %	89 %	81.3 %		
Closing	Original	4.4	10.1	9.0	5.2	8.1	1.0	2.8
	Feedforward	1.6	4.0	9.0	7.9	6.9		
	Improvement	64 %	61 %	0 %	-51 %	14.2 %		



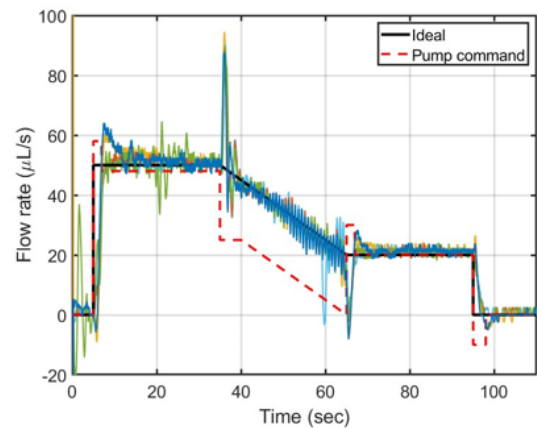
(a) Opening



(b) Opening with feedforward control



(c) Closing



(d) Closing with feedforward control

Fig. 8 Gravimetric flow rate measurement result

비례하여 유량이 증가 혹은 감소하여야 한다. 실제 코팅에서는 펌프의 유량과 슬롯 다이의 이송 속도를 조절하여 두께를 균일하게 조정하게 된다. 본 절에서는 펌프의 유량 제어를 통하여 균일 두께

를 코팅하기 위한 펌프 제어 방법을 다루고자 한다.

Fig. 8(a)와, (c)의 검은색 실선이 이상적인 유량 곡선이고, 빨간색 점선이 펌프 유량 명령 프로파일이다. 이상적인 유량을 만족하

기 위해서는 노즐의 폭이 변경되는 순간 3.2 절의 실험 결과에 나타난 유량의 급격한 변화량을 보상해야 한다. 따라서, 펌프 유량 명령은 70 mm에서 110 mm로 토출 폭이 넓어지면, 단위 미터당 일정한 유량을 토출하기 위해 50 $\mu\text{L/s}$ 에서 80 $\mu\text{L/s}$ 로 더 많은 유량을 토출하게끔 그려진다. 펌프 제어는 토출 폭이 변할 때, 줄어들거나 늘어나는 유량만큼 보상하도록 구성하였다. 이러한 프로파일 을 이용하면, 특정 시간 이후에는 이상적인 유량을 따라가지만, 3.2절의 실험과 동일하게 심이 이동 시작/정지하는 순간, 유량이 급격하게 변동한 후 펌프 명령을 따라가지 못하는 현상이 있다. 이는 펌프의 응답이 노즐 폭 변화에 의한 유량 증가보다 상대적으로 느리기 때문이다. 또한 펌프의 느린 응답은 코팅의 시작과 끝 부분에서도 느린 유량 응답을 야기한다.

코팅 품질 향상을 위해 펌프 성능과 유체의 유동 저항에 의한 느린 응답을 앞먹임 제어를 통해 보상하였다. 앞먹임 제어에 의한 결과는 Fig. 8(b), (d)와 Table 3에 나와 있다. Fig. 8(b)를 보면, 첫 번째 구간(section 1)에서, 펌프의 응답을 개선하기 위해 제어 초반 2초 동안 이상적인 펌프 프로파일보다 30 $\mu\text{L/s}$ 과다하게 토출하는 계단 명령을 통해 초반 응답 시간을 66% 향상시켰다. 마찬가지로, 가변 구간(section 2)에서 초기 펌프의 계단 명령을 통해 가변에 의한 유량 감소를 극복하고 유량 증가 명령을 더 잘 추종하도록 제어함으로써 이 구간의 RMS error를 67% 저감시켰다. 세 번째 구간(section 3)에서는 입구가 넓어지면서 유체의 유동 저항이 감소하여 유체가 더 많이 흐르므로, 이를 펌프 명령을 통해 유량을 감소시켜 RMS error를 89% 줄일 수 있었다. 마지막으로, 토출 종료 지점에서, 유체의 관성으로 인한 잔여 토출을 펌프의 suck back을 통해 감소시켰다. 전체 구간의 유량 제어 오차는 81% 감소하였다. Fig. 8(d)의 노즐 폭이 closing의 경우에도, 피드포워드 제어를 통하여 응답속도 및 유량 제어 성능이 64%와 14%로 향상되었다. Closing의 경우, 이상적인 유량 곡선을 더 잘 추종하나, 두 번째 구간에서 펌프 모터의 급격한 제어로 인한 진동이 발생하여 이 부분에서의 유동 제어 성능이 다소 나빠졌다. Opening과는 달리, closing의 경우 슬롯 갭 사이에 채워져 있는 유체를 밀고 심이 이동해야 하므로, 유체 저항이 커지면서 심을 미는 리니어 스테이지에 부하가 커지는 것이 원인으로 생각된다.

4. 결론

본 논문은 비정형 슬롯 다이 코팅의 유량 제어 평가를 위한 중량 측정 방식의 새로운 유량 평가 시스템을 이용하여, 코팅 폭 가변 시 일정한 코팅 두께를 가지도록 슬릿/펌프 연동 제어 방법을 제시했다. 가변 폭 슬롯 다이에 의한 토출 특성 변화를 알기 위해 CFD 해석과 유량 측정 시험을 진행하여, 두 결과의 경향이 일치함을

확인하였다. 최종적으로 펌프 유량의 앞먹임 제어를 통해 코팅 폭이 변하는 비정형 코팅에서 슬롯 다이 코팅의 유량 제어가 가능함을 보여주었다. 실제 코팅 공정에서는 기판과 토출 유체 간의 상호 작용에 의해 유량 및 코팅 두께가 동적으로 변화하나 본 시스템은 이를 고려할 수 없는 단점이 있다.

코팅 공정은 번잡하고 시간과 인력이 많이 드는 작업으로, 제안된 유량 평가 및 제어 시스템을 이용하면 펌프 제어의 기준을 정할 수 있다. 또, 사용 유체가 변경될 경우, 기준 유체의 특성과 비교 분석이 쉽게 가능하기에 코팅 공정의 최적화 과정을 간소화하는데 큰 도움이 될 수 있는 기술이 될 것으로 기대한다.

후 기




This work was supported by Technology Innovation Program, (No. 20014812), funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Republic of Korea).




References

- [1] Ding, X., Liu, J., Harris, T. A. L., 2016, A Review of the Operating Limits in Slot Die Coating Processes, *AIChE J.*, 62:7 2508-2524, <https://doi.org/10.1002/aic.15268>.
- [2] Yoon, K. T., Bae, J. H., Choi, Y. M., 2023, Practical Gravimetric Flow Rate Measurement Method for Slot-Die Coating Uniformity Evaluation, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 40:2 105-111, <https://doi.org/10.7736/JKSPE.022.117>.
- [3] Schmitt, M., Scharfer, P., Schabel, W., 2014, Slot Die Coating of Lithium-ion Battery Electrodes: Investigations on Edge Effect Issues for Stripe and Pattern Coatings, *J. Coat. Technol. Res.*, 11:1 57-63, <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9498-y>.
- [4] Rong, Y., Ming, Y., Ji, W., Li, D., Mei, A., Hu, Y., Han, H., 2018, Toward Industrial-Scale Production of Perovskite Solar Cells: Screen Printing, Slot-Die Coating, and Emerging Techniques, *J. Phys. Chem. Lett.*, 9:10 2707-2713, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b00912>.
- [5] Park, J., Jeon S., Nam, K., Kim, C., 2013, Variable PID Gain Control of Winder Tension of Roll-to-Roll Printing System using Estimation of Winder-Roll Radius, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 22:4 755-760, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.4.755>.
- [6] Park, J., Shin, K., Lee, C., 2015, 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., 16 937-943, <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0122-1>.

- [7] Schmitt, M., Baunach, M., Wengeler, L., Peters, K., Junges, P., Scharfer, P., Schabel, W., 2013, Slot-Die Processing of Lithium-ion Battery Electrodes - Coating Window Characterization, Chem. Eng. Process., 68 32-37, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.10.011>.

	<p>Yeeun Bae M.S. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. Her research interest is High-precision Machine and Force Sensors. E-mail: bae625276@ajou.ac.kr</p>
	<p>Kyung-Taek Yoon Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Novel Instrumentation Systems, Actuator Design, and Biomechanical Wearable Devices. E-mail: majesty17@ajou.ac.kr</p>
	<p>Hyun-Ho Lee Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is High-precision Mechatronics Systems, Actuator Design, and Biomechanical Devices. E-mail: lho3692@ajou.ac.kr</p>

	<p>Moongu Lee Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Design and Control of Precision System Control. E-mail: moongulee@ajou.ac.kr</p>
	<p>Hyun-Jung Kim Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is Photothermal Imaging, Thermal Property Measurement, Heat Transfer, Visualization of Heat, Mass Transfer, Photothermal Therapy and Secondary Battery. E-mail: hyunkim@ajou.ac.kr</p>
	<p>Young-Man Choi Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interest is High-precision Machines, Mass Metrology and Wearable Mechatronics. E-mail: ymanchoi@ajou.ac.kr</p>