

슬릿 노즐 내부 압력 분포와 코팅 박막 두께 균일도 간의 상관관계 연구

김기은*·나정필*·정모세*·박종운**

**한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부

Study on Correlation Between the Internal Pressure Distribution of Slit Nozzle and Thickness Uniformity of Slit-coated Thin Films

Gieun Kim*, Jeongpil Na*, Mose Jung* and Jongwoon Park**

**School of Electrical, Electronic & Communication Engineering,
Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

With an attempt to investigate the correlation between the internal pressure distribution of slit nozzle and the thickness uniformity of slot-coated thin films, we have performed computational fluid dynamics (CFD) simulations of slit nozzles and slot coating of high-viscosity (4,800 cPs) polydimethylsiloxane (PDMS) using a gantry slot-die coater. We have calculated the coefficient of variation (CV) to quantify the pressure and velocity distributions inside the slit nozzle and the thickness non-uniformity of slot-coated PDMS films. The pressure distribution inside the cavity and the velocity distribution at the outlet are analyzed by varying the shim thickness and flow rate. We have shown that the cavity pressure uniformity and film thickness uniformity are enhanced by reducing the shim thickness. It is addressed that the CV value of the cavity pressure that can ensure the thickness non-uniformity of less than 5% is equal to and less than 1%, which is achievable with the shim thickness of 150 μm . It is also found that as the flow rate increases, the average cavity pressure is increased with the CV value of the pressure unchanged and the maximum coating speed is increased. As the shim thickness is reduced, however, the maximum coating speed and flow rate decrease. The highly uniform PDMS films shows the tensile strain as high as 180%, which can be used as a stretchable substrate.

Key Words : Slit nozzle, CFD simulation, internal pressure distribution, slot-die coating, thin-film uniformity

1. 서 론

슬롯 다이 코팅(slot-die coating) 공정은 넓은 면적에 걸쳐 균일한 박막을 형성할 수 있는 용액 기반의 코팅 기술 중 하나이며 코팅 속도와 공급 유량에 따라 코팅 박막의 두께를 예측하고 정밀한 두께를 형성할 수 있는 전계량(premetered) 코팅 방식이라는 특성과 롤투롤(roll-to-roll) 기술과

접목하여 빠른 코팅 생산 속도를 구현할 수 있다는 장점이 있다[1-3]. 슬롯 다이를 이용한 코팅 공정에서 가장 중요한 기술은 코팅 전 영역에 걸쳐 두께가 일정한 균일한 박막을 형성하는 것이다. 균일한 박막을 형성하기 위해서는 슬릿 노즐 또는 슬롯 다이 헤드 전체 코팅 폭에 걸쳐 균일한 압력과 균일한 용액 토출 속도를 형성하는 것이 가장 중요하며, 이를 위해서는 슬롯 다이 헤드 내부의 용액 분산 챔버인 cavity 또는 manifold 구조와 헤드에 삽입되는 shim의 형태를 최적화하는 것이 필수적이다.

†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

최근에는 슬롯 다이 헤드 설계에 소모되는 시간과 비용을 절감하기 위해 CFD (computational fluid dynamics) simulation을 활용한 헤드 구조 설계 및 최적화 연구가 활발히 이루어지고 있다[4]. 슬롯 다이 헤드를 최적화하기 위한 내부의 구성 요소는 주입구의 직경, 유량, manifold 및 shim의 형태, 립 각도 등이 있으며, manifold의 형태에 따라 크게 T-die와 coat-hanger die로 구분된다[5,6]. T-die는 manifold 내의 용액이 주입구에서 멀어질수록 압력 강하에 의해 유량이 적어져 용액 토출의 균일도가 저하된다는 단점이 있지만 내부 구조가 가장 단순하여 제작이 용이하며 제작 비용을 절감할 수 있다는 장점이 있다[7]. Coat-hanger die의 경우 T-die에 비해 슬롯 다이 헤드의 전체 폭에 걸쳐 균일한 용액 토출이 가능하다는 장점으로 인해 슬롯 다이를 이용한 공정에서 많이 쓰이고 있지만, 곡선 형태의 manifold와 헤드 폭을 따라 다양하게 변하는 manifold의 직경으로 인해 그 구조가 복잡하며 용액의 유량, 점도 등의 공정 조건에 따라 헤드를 다시 최적화 해야한다는 단점을 가지고 있다[8,9]. T-die의 단점을 보완하기 위해 CFD를 이용하여 manifold의 각도, shim plate의 두께, 주입 유량에 따른 토출구에서의 용액 토출 속도 균일도를 분석하고 헤드 설계를 최적화하는 동시에 실험을 통해 이를 증명하는 연구가 진행되었으며 shim 두께를 줄임으로써 속도 분포 균일도를 크게 향상시켰다[10,11]. Coat-hanger의 경우 CFD 분석만을 이용해 곡선 형태의 manifold를 3개의 영역으로 세분화하여 각각의 영역을 최적화하거나 manifold 내부에 용액 분배 역할을 하는 다수의 구멍을 형성하여 슬롯 다이 헤드 내부의 압력 분포와 토출구에서의 용액 속도 분포를 향상시키는 연구가 진행되었다[12,13].

하지만 이러한 연구들은 슬롯 다이 헤드 내부의 압력 분포 또는 outlet에서의 용액 토출 속도의 균일도 자체에만 초점을 두어 용액 공급 펌프 및 코팅 시스템에 걸리는 부하를 고려하지 않거나, 실제 코팅으로 이어지지 않고 CFD에 대한 분석으로 그치는 경우가 대부분이다. 특히 고점도 용액을 이용하여 코팅을 진행할 경우 용액의 점도에 따라 헤드의 내부 및 코팅 시스템에 걸리는 압력 또한 증가하게 되며 이는 용액 공급 시스템의 부하로 작용하여 정확한 용액 공급을 어렵게 할 수 있으므로 헤드 내부 용액의 고른 분배뿐만 아니라 헤드 및 코팅 시스템의 압력을 제어하는 것 또한 매우 중요한 고려사항이다.

본 연구에서는 CFD를 이용하여 유체 유동 해석을 진행한 후 그 결과를 코팅 실험과 비교 분석하였다. 슬롯 다이 헤드의 shim 두께와 flow rate에 따른 cavity 내부의 평균 압력 및 압력 분포를 분석하였으며 실제 코팅에서 박막의 두께 균일도를 측정하여 그 상관관계를 분석하였다.

특히 슬롯 다이 헤드 설계 가이드라인을 제공하기 위하여 코팅 박막 두께 5% 이내를 달성할 수 있는 헤드 내부 압력 균일도를 도출하였다.

2. 실험 방법

CFD simulation을 위한 tool로 ANSYS Fluent를 사용하였다. 유체 유동 해석과 박막 코팅을 위한 슬롯 다이 헤드는 Fig. 1(a)와 같으며 rear head, front head 그리고 shim으로 구성된다. Shim은 rear head와 front head 사이에 삽입되며 shim의 두께는 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 channel gap을 결정하는 역할을 한다. Front head는 용액이 주입되는 inlet과 주입된 용액을 고르게 분배시키는 역할을 하는 cavity(또는 manifold)를 가지고 있으며 분배된 용액은 land를 거친 후 outlet을 통해 외부로 토출된다. 연구에 활용된 슬롯 다이 헤드의 규격은 다음과 같다; inlet diameter=2 mm, cavity height=5 mm, cavity depth=2mm, cavity width=150 mm, land length=9.2 mm. 경계 조건의 경우 inlet은 velocity-inlet, outlet은 pressure-outlet으로 설정했으며 컴퓨터의 연산 비용을 줄이기 위해 슬롯 다이 헤드를 symmetry 구조로 설계하여 분석을 진행하였다.

코팅 용액으로 polydimethylsiloxane (PDMS) (Sylgard 184, Dow)를 사용하였으며 물성을 분석하기 위해 viscometer (DV-2T, Brookfield)를 이용한 점도, sessile-drop method (Model 90, Ramé-hart)를 이용한 접촉각, tensiometer (Surface Tensiomat 21, Fisher Scientific)을 이용한 표면 장력을 측정하였으며 각각 점도 4,800 cPs, 접촉각 40°, 표면 장력 0.02 N/m의 값을 보였다. PDMS에 경화제를 10:1 비율로 배합한 후 코팅된 투명 필름의 가시성 확보를 위해 검은색 염료를 첨가하였다.

Fig. 2는 코팅에 사용된 gantry slot-die coater (YJCOATERS)를 보여준다. Gantry slot-die coater의 경우 기판이 움직이는 방식이 아닌 gantry 구조물에 거치된 슬롯 다이 헤드가 기판 (substrate)이 놓인 정반(400mm×500mm) 위를 직접 움직이는 방식이며 코팅 공정에서의 정확한 coating gap을 형성하기 위해 변위 센서(displacement sensor)를 활용하였다. 용액의 토출은 built-in 시린지 펌프(0.1 μ l/min ~ 150 ml/min)를 이용하였으며 실험에서 coating gap은 200 μ m로 고정하였다.

CFD를 이용한 유체 유동 해석과 실제 실험과의 상관관계를 알아보기 위하여 shim의 두께와 공급 유량을 변경해가며 슬롯 다이 헤드 cavity내부에 형성되는 압력의 분포와 outlet에서의 용액 토출 속도를 분석하였으며 이를 실험으로 제작한 PDMS 코팅 박막의 두께 non-uniformity와 비교하여 그 결과를 분석하였다.

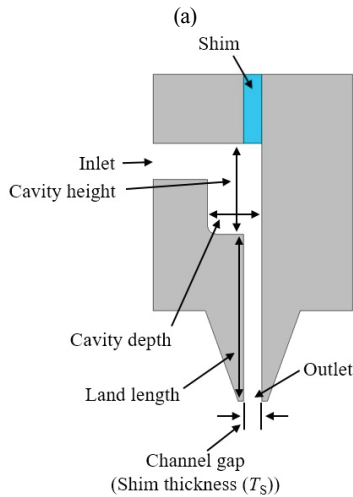
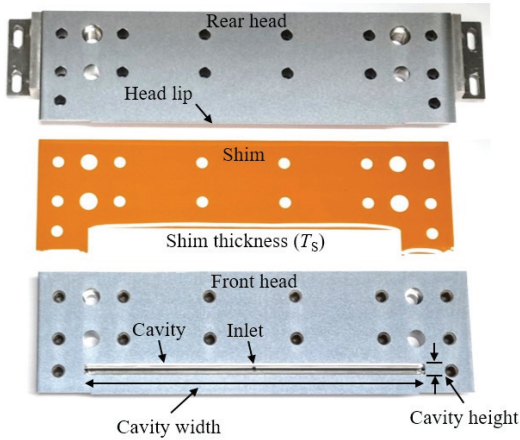


Fig. 1. (a) Components of the slot-die head and (b) the cross-sectional view of the slot-die assembly.

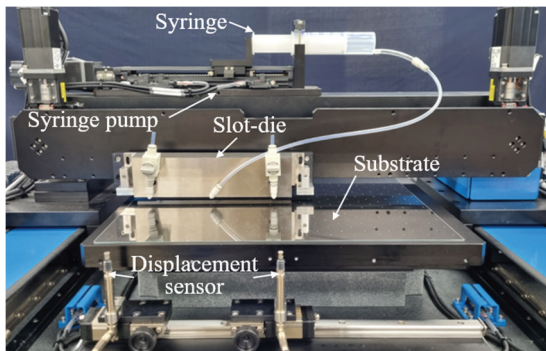


Fig. 2. Image of gantry slot-die coater used for experiments.

3. 결과 및 고찰

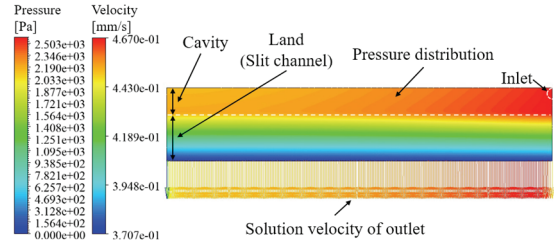


Fig. 3. CFD simulation result of pressure and velocity distributions inside the slot-die head.

먼저 shim 두께(T_s)에 따른 유체의 거동 및 헤드 내부 압력 변화를 분석하기 위해 유체의 주입 유량을 1 ml/min 로 고정하고 shim 두께를 250 μm 부터 50 μm 까지 감소시키며 simulation을 진행하였다. Fig 3은 shim 두께가 250 μm 일 때, 헤드 내부에 형성되는 압력 분포와 outlet에서 토출되는 용액의 속도 분포를 보여주는 CFD 이미지이다. 슬릿 다이 헤드 내부 및 cavity의 압력은 용액이 주입되는 우측 inlet 부분에서 높게 형성되며 왼쪽의 헤드 가장자리로 갈수록 압력이 점차 감소하는 모습을 보인다. Outlet에서의 용액 토출 속도의 경우 cavity 내부 압력 분포와 유사한 양상을 보이며 inlet 부분의 용액 토출 속도가 헤드 가장자리의 용액 토출 속도보다 큰 값을 가진다. Shim 두께에 따른 유체의 압력 및 토출 속도에 대한 균일도를 분석하기 위해 Eq. 1을 이용하여 변동 계수(coefficient of variation, CV)를 계산하였다.

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서 x_i 는 측정 지점에서의 압력 또는 속도, n 은 측정 데이터의 수, \bar{x} 는 압력 또는 속도의 평균값을 의미하며 CV 값이 작을수록 압력 또는 속도 분포가 더 균일함을 의미한다. Table 1에서 볼 수 있듯이 shim 두께가 250 μm 에서 50 μm 로 감소함에 따라 outlet의 단면적이 감소하기 때문에 cavity 내부에 형성되는 평균 압력(P_{avg}) 또한 2,290 Pa에서 298,838 Pa로 대폭 증가한다. 반면, 압력에 대한 CV 값(PCV)과 토출 속도에 대한 CV값(UCV)은 각각 4.38 %, 4.04 %에서 0.05 %, 0.46 %로 감소하는데 이는 전자유압 비유법(electronic-hydraulic analogy)을 통해 설명이 가능하다. Shim 두께가 감소함에 따라 slit channel의 단면적은 감소하게 되며 결과적으로 slit channel을 따라 흐르는 유체에 대한 저항이

증가하게 된다. 즉, inlet을 통해 주입된 용액은 slit channel의 비교적 큰 저항으로 인해 outlet이 아닌 cavity를 먼저 채우게 되며 cavity 내에서 균일한 압력 분포가 형성하게 된다.

Table 1. Summary of simulated average pressure (P_{avg}), CV value of cavity pressure (P_{cv}), average outlet velocity (U_{avg}), and CV value of outlet velocity (U_{cv}) for different T_s .

T_s (μm)	P_{avg} (Pa)	P_{cv} (%)	U_{avg} (mm/s)	U_{cv} (%)
250	2,290	4.38	0.42	4.04
200	4,582	2.40	0.53	1.80
150	10,957	1.09	0.71	0.78
100	37,163	0.34	1.06	0.55
50	298,838	0.05	2.13	0.46

Shim 두께에 따른 CFD simulation 결과(헤드 내부 압력 균일도)와 실제 실험으로 코팅된 박막의 두께 균일도와 상관관계를 확인하기 PDMS를 슬롯 다이 코팅하였다. Fig. 4는 유량 1 ml/min, 코팅 속도(V) 1 mm/s에서 코팅된 PDMS 박막 이미지를 보여준다. 코팅된 박막의 두께 프로파일은 Fig. 5(a)에 나타냈으며 평균 두께와 두께 불균일도(thickness non-uniformity, T_{NU})를 계산하여 Table 2에 정리하였다. 각각의 박막 두께는 레이저 현미경 (VK-9710, KEYENCE)를 이용하여 15 mm 간격으로 3회 측정하였으며 두께 불균일도는 Eq. 2의 식을 이용하여 계산하였다.

$$T_{NU} (\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{Avg}} \times 100 \quad (2)$$



Fig. 4. Image of PDMS film coated using slot-die head with 100- μm -thick shim at the flow rate of 1 ml/min and the coating velocity of 1 mm/s.

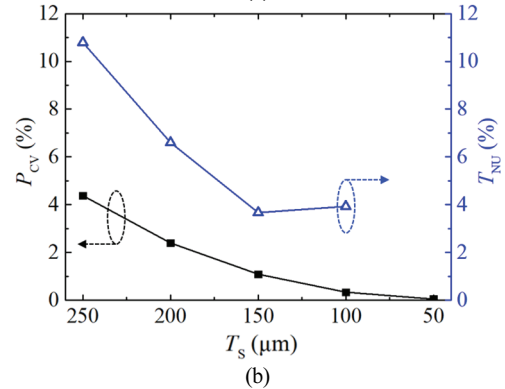
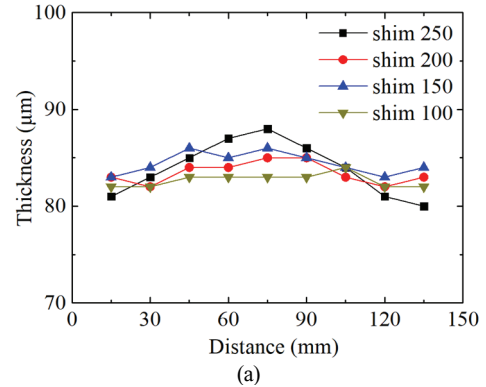


Fig. 5. (a) Thickness profile of the coated PDMS film for different T_s , and (b) simulated P_{cv} value and measured T_{NU} value of the coated PDMS film as a function of T_s .

Table 2. Summary of measured average thickness (T_{avg}) and thickness non-uniformity (T_{NU}) of PDMS films coated at the velocity of 1 mm/s for different T_s .

T_s (μm)	T_{avg} (μm)	T_{NU} (%)
250	83.44	10.79
200	83.39	6.60
150	83.37	3.67
100	82.67	3.93
50	Not available	

PDMS 박막의 평균 두께는 shim 두께와 상관없이 약 80 μm 의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 두께 불균일도는 shim 두께가 250 μm 에서 10.79%의 값을 가지며 shim 두께가 100 μm 로 감소함에 따라 3.93%까지 낮아졌다. Shim 두께 50 μm 의 경우 용액을 토출하는 주사기가 변형되어 코팅이 불가능하였다. 이는 Table 1의 CFD simulation 결과에서 알 수 있듯이 슬롯 다이 헤드 내부에 걸리는 과도한 압력(298,838 Pa)으로 인해 나타나는 현상이다. 헤드 내부 압력

균일도와 코팅된 박막의 두께 균일도간의 상관관계를 보기 위하여 CFD의 P_{CV} 결과와 코팅 박막의 T_{NU} 결과를 Fig. 5(b)에 나타냈다. Shim 두께가 감소함에 따라 P_{CV} 값이 감소하며 이로 인해 T_{NU} 값 또한 감소함을 알 수 있다. Shim 두께가 150 μm 에서 100 μm 로 감소할 경우 CFD 결과의 P_{CV} 값은 1.09 %에서 0.34 %로 감소하는 반면, T_{NU} 값은 3.67 %에서 3.93 %로 큰 변동없이 수렴되는 모습을 보였다. 이 결과를 통해 PDMS 박막 균일도 5% 이내를 보장하는 헤드의 내부 압력 균일도 P_{CV} 값은 1% 이내여야 하며 이는 shim 두께가 150 μm 이하에서 가능함을 알 수 있었다.

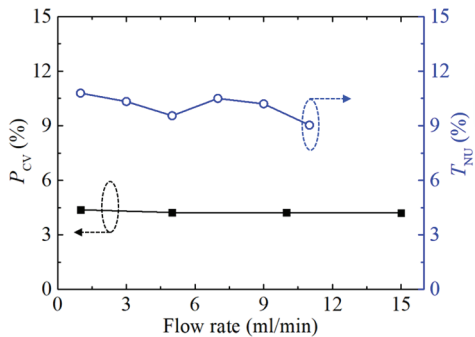


Fig. 6. Simulated P_{CV} value and measured T_{NU} value of coated PDMS films using 250- μm -thick shim as a function of the flow rate.

실제 코팅 공정에서 생산성 향상을 위해서는 코팅 속도를 향상시켜야 하며 코팅 속도를 향상시키기 위해서는 유량을 증가시켜야 한다. 따라서 유량 변화에 따른 헤드 내부 압력 균일도를 시뮬레이션 하였으며 주어진 유량의 최대 코팅속도(V_{max})에서 PDMS 필름을 제작하고 두께 균일도를 측정하여 Fig. 6와 Table 3에 정리하였다. CFD simulation결과를 보면, 유량이 증가함에 따라 P_{avg} 값이 비례하여 증가하지만 P_{CV} 값은 유량에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 이러한 경향은 shim 두께가 250 μm 일 때와 100 μm 일 때 모두 동일하게 나타난다. 실험에서도 shim 두께가 250 μm 일 때 유량이 1 ml/min에서 11 ml/min로 증가함에 따라 V_{max} 는 1 mm/s에서 10 mm/s 증가하였다. 각 유량의 최대 코팅 속도에서 제작된 박막의 평균 두께는 80~90 μm 수준으로 비슷한 값을 가지며 T_{NU} 값은 10 % 내외의 값을 유지한다. Shim 두께 100 μm 에서 코팅을 진행했을 경우에도 각 유량의 최대 코팅 속도에서 T_{avg} 값이 90 μm 내외의 값을 가지며 T_{NU} 값은 4 % 내외의 값을 유지하였다. Shim 두께가 250 μm 와 100 μm 일 때 최대 코팅 가능 유량 (F/R_{max})은 각각 11 ml/min, 3 ml/min로 shim 두께가 감소함에 따라 cavity 내부의 압력 증가로 인해 최대 코팅 가능 유량이 감소함을 알 수 있다.

Table 3. Simulated P_{CV} values and measured T_{NU} values of PDMS films coated for different flow rates.

CFD simulation				
T_s (μm)	F/R (ml/min)	P_{avg} (Pa)	P_{CV} (%)	
250	1	2,290	4.38	
	5	11,850	4.23	
	10	23,833	4.22	
	15	35,793	4.21	
100	20	47,738	4.21	
	1	37,163	0.34	
	5	186,182	0.34	
	10	373,146	0.34	
100	15	559,213	0.34	
	20	745,718	0.34	
	Coating			
	T_s (μm)	F/R (ml/min)	V_{max} (mm/s)	T_{avg} (μm)
250	1	1	83.44	10.79
	3	2.5	96.78	10.33
	5	4.5	91.78	9.81
	7	6	95.22	10.50
	9	7.5	93.17	10.20
100	11	10	91.83	9.26
	1	1	82.67	3.93
100	3	2.5	99.72	4.14

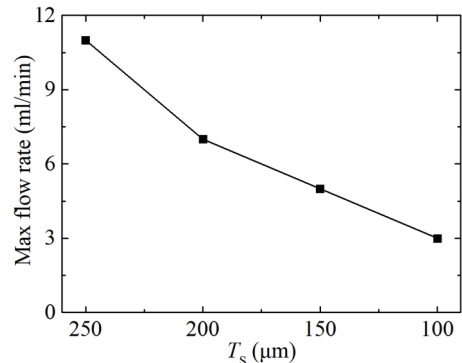


Fig. 7. Maximum flow rate as a function of the shim thickness.

Table 4. Summary of maximum flow rate(F/R_{max}), maximum coating velocity(V_{max}), T_{avg} , and T_{NU} for different T_s .

T_s (μm)	F/R_{max} (ml/min)	V_{max} (mm/s)	T_{avg} (μm)	T_{NU} (%)
250	11	10	91.83	9.26
200	7	6	96.50	6.74
150	5	4.5	93.33	4.82
100	3	2.5	99.72	4.14

실험을 통해 각 shim 두께에 대한 최대 코팅 유량과 최대 코팅 속도를 분석하여 Fig. 7과 Table 4에 정리하였다. Shim 두께가 250 μm 에서 100 μm 로 감소함에 따라 최대 토출 유량은 11 ml/min에서 3 ml/min으로 감소하며 최대 코팅 속도는 10 mm/s에서 2.5 mm/s로 감소하였다. T_{avg} 의 경우 shim 두께와 상관없이 최대 유량과 최대 코팅 속도에서 90 μm 대의 항상 비슷한 값을 가지며 이는 곧 coating gap이 일정할 때 형성할 수 있는 코팅 박막의 최소 두께가 정해져 있음을 알 수 있다.

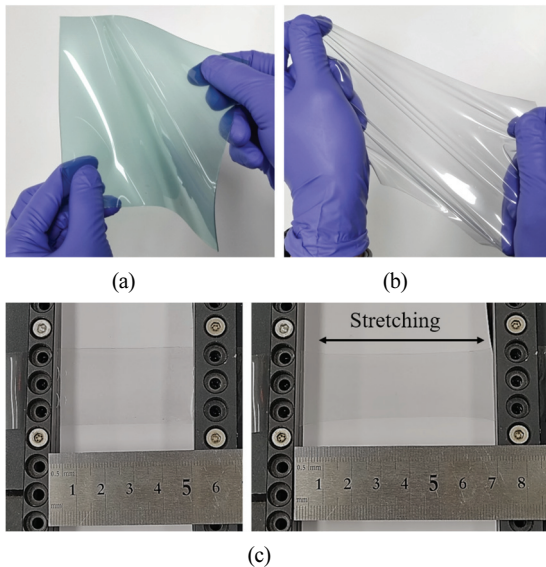


Fig. 8. (a) PDMS film coated on PES film, (b) detached PDMS film, and (c) tensile strain test of 110- μm -thick PDMS film.

마지막으로 PDMS 박막의 flexible 또는 stretchable 기관으로의 적용 가능성을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 flexible PES (Polyether-sulfone) (두께 250 μm , 비에스티엔시) 기관 위에 PDMS 박막을 형성/분리한 후 박막의 두께 (Digimatic thickness gauge 547 series, Mitutoyo)와 인장 변형률을 측정하였다. 고균일 PDMS 박막을 형성하기 위하여 shim 두께 150 μm ($P_{\text{CV}}=1\%$)를 갖는 슬롯 다이 헤드로 제작하였다. 코팅 갭과 코팅 속도를 달리하여 두께가 서로 다른 3개(110 μm , 220 μm , 330 μm)의 PDMS 박막을 제작하였으며 각 샘플을 세로 30 mm, 가로 70 mm로 자른 후 Fig. 8(c)와 같이 초기 길이가 50 mm가 되도록 장착하였다. 박막 두께 110 μm , 220 μm , 330 μm 일 때의 인장 변형률은 각각 172 %, 188 %, 182 % 로 높은 인장 변형률을 보였으며 stretchable 소자의 기관으로 적용 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 슬롯 노즐 내부의 압력 분포가 슬롯 코팅된 박막의 균일도와 매우 밀접한 상관관계가 있음을 유체유동 전산모사와 슬롯 코팅 실험을 통해 보였다. 특히 박막 균일도 95% 이상을 얻기 위해서는 헤드 내부 압력 변동 계수가 1% 이내여야 함을 발견하였으며 이는 두께 150 μm 이하의 shim을 사용하면 가능함을 보였다. 이는 5,000 cPs 정도의 고점도 헤드를 설계하는데 매우 유용한 정보를 제공한다. shim 두께가 감소함으로써 헤드 내부 압력 균일도와 코팅 박막 두께 균일도가 향상하지만 최대 코팅 속도와 최대 유량은 오히려 감소하게 된다. 헤드 내부 압력 분포가 균일한 헤드($P_{\text{CV}} 1\%$ 이내)로 코팅된 PDMS 필름은 180% 정도의 높은 인장 변형율을 보였다.

감사의 글

This research was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2021RIS-004)

참고문헌

1. C.-F. Lin, D.S. Hill Wong, T.-J. Liu, P.-Y. Wu, Operating windows of slot die coating: Comparison of theoretical predictions with experimental observations, *Advances in Polymer Technology*. 29 (2010) 31–44. <https://doi.org/10.1002/adv.20173>.
2. C.-P. Chin, H.-S. Wu, S.S. Wang, Improved Coating Window for Slot Coating, *Ind. Eng. Chem. Res.* 49 (2010) 3802–3809. <https://doi.org/10.1021/ie801900t>.
3. J. Alstrup, M. Jørgensen, A.J. Medford, F.C. Krebs, Ultra Fast and Parsimonious Materials Screening for Polymer Solar Cells Using Differentially Pumped Slot-Die Coating, *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2 (2010) 2819–2827. <https://doi.org/10.1021/am100505e>.
4. I. Lun, R.K. Calay, A.E. Holdo, Modelling two-phase flows using CFD, *Applied Energy*. 53 (1996) 299–314. [https://doi.org/10.1016/0306-2619\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0306-2619(95)00024-0).
5. A.B. Metzner, Non-Newtonian technology: fluid mechanics, mixing, and heat transfer, in: *Advances in Chemical Engineering*, Elsevier, 1956: pp. 77–153.
6. Y. Matsubara, Geometry design of a coat-hanger die with uniform flow rate and residence time across the die width, *Polym. Eng. Sci.* 19 (1979) 169–172. <https://doi.org/10.1002/pen.760190302>.
7. L. Sartor, Slot coating: fluid mechanics and die design, University of Minnesota, 1990.

8. Y. Matsubara, Residence time distribution of polymer melt in the T-die, *Polymer Engineering & Science*. 20 (1980) 212–214. <https://doi.org/10.1002/pen.760200308>.
 9. W.K. Leonard, Effects of secondary cavities, inertia and gravity on extrusion dies, in: 43 Rd Annual Technical Conference, Society of Plastics Engineers, Inc, 1985: pp. 144–149.
 10. J.P. Velásquez, E.A. Ramírez, A. Flórez, J.F. Montoya, R. Betancur, D. Ramírez, M. da S. Carvalho, F. Jaramillo, Reaching Highly Uniform Perovskite Ink Flow from a Slot-Die Head Toward Printed Solar Cells, *Advanced Engineering Materials*. (2023). <https://doi.org/10.1002/adem.202201561>.
 11. S. Kim, J. Lee, C. Lee, Computational fluid dynamics model for thickness and uniformity prediction of coating layer in slot-die process, *Int J Adv Manuf Technol*. 104 (2019) 2991–2997. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04093-3>.
 12. A. Razeghiyadaki, D. Zhang, D. Wei, A. Perveen, Optimization of polymer extrusion die based on response surface method, *Processes*. 8 (2020). <https://doi.org/10.3390/pr8091043>.
 13. B.C. Lee, B.M. Park, K.Y. Han, Optimal Slit Nozzle Design for Uniformity Coating in Display Module Lamination, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 677 (2018) 42–53. <https://doi.org/10.1080/15421406.2019.1597510>.
-
- 접수일: 2023년 10월 26일, 심사일: 2023년 12월 5일,
게재확정일: 2023년 12월 12일