

## Stripe 코팅용 슬롯 다이 헤드 모세관 유동 전산모사

유수호\*·이진영\*\*·박종운\*†

\*† 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부, \*\* 한국기술교육대학교 창의융합공학협동과정

### Simulation of Capillary Flow Along a Slot-die Head for Stripe Coatings

Su-Ho Yoo\*, Jin-Young Lee\*\* and Jong-Woon Park\*†

\*† School of Electrical & Electronic & Communication Engineering,

Korea University of Technology and Education, \*\* Interdisciplinary Program in Creative Engineering

#### ABSTRACT

In the presence of  $\mu$ -tip embedded in a slot-die head for stripe coatings, there arises the capillary flow that limits an increase of the stripe density, which is required for the potential applications in organic light-emitting diode displays. With an attempt to suppress it, we have employed a computational fluid dynamics software and performed simulations by varying the  $\mu$ -tip length and the contact angles of the head lip and  $\mu$ -tip. We have first demonstrated that such a capillary flow phenomenon (a spread of solution along the head lip) observed experimentally can be reproduced by the computational fluid dynamics software. Through simulations, we have found that stronger capillary flow is observed in the hydrophilic head lip with a smaller contact angle and it is suppressed effectively as the contact angle increases. When the contact angle of the head lip increases from  $16^\circ$  to  $130^\circ$ , the distance a solution can reach decreases sharply from  $256\ \mu\text{m}$  to  $44\ \mu\text{m}$ . With increasing contact angle of the  $\mu$ -tip, however, the solution flow along the  $\mu$ -tip is disturbed and thus the capillary flow phenomenon becomes more severe. If the  $\mu$ -tip is long, the capillary flow also appears strong due to an increase of flow resistance (electronic-hydraulic analogy). It can be suppressed by reducing the  $\mu$ -tip length, but not as effectively as reducing the contact angle of the head lip.

**Key Words** : Slot-die Coating, Meniscus Guide,  $\mu$ -tip, Computational Fluid Dynamics, Stripes.

#### 1. 서 론

슬롯 다이 코팅(Slot-die coating) 기술은 대면적 고균일 박막 필름을 요하는 고분자 태양전지, 유기 발광 다이오드(Organic light-emitting diode(OLED)), 양자 점(Quantum dot) 태양전지 및 디스플레이 분야에 사용되어 왔다 [1-3]. 슬롯 다이 코팅은 정액 토출 방식으로 롤투를 생산 및 여러 용액을 동시에 다층 코팅할 수 있다. 또한 수 nm 두께의 유기 박막을 코팅 속도, 코팅 갭, 토출량 등 여러 코팅 변수를 조절하여 제작할 수 있다. 잉크젯 프린팅(inkjet printing) 방식에 비해 유지/관리가 용이하며 고점도 용액에서부터 저

점도 용액까지 대응 가능하다는 큰 장점을 갖는다. 하지만 프린팅 기술과 달리 코팅 방향 및 코팅 방향의 수직 방향으로의 패터닝이 어려워 주로 패터닝을 요하지 않는 OLED 공통층 형성에 사용되어왔다. 즉, 발광층은 주로 스트라이프 코팅(Stripe coating)이 용이한 노즐 프린팅을 이용하여 제작되었다 [2]. 만약 슬롯 다이 코팅을 이용하여 stripe 코팅이 가능하다면 OLED 공통층부터 발광층까지 슬롯 코팅 단일 공정으로 제작 가능하다.

Stripe 코팅은 화소 형성을 위하여 잉크젯 프린팅에서 요구하는 bank 구조를 제거할 수 있는 방법을 제공한다. 슬롯 다이 코팅을 이용하여 stripe 코팅을 하기 위해서는 기존 슬롯 다이 헤드에 삽입되는 shim 외에 스트라이프 폭에 대응하는 마이크로 팁( $\mu$ -tip)을 갖는 meniscus guide가 필

\*†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

요하다. 슬롯 다이 헤드 립(lip) 밖으로 튀어나온  $\mu$ -tip에 의해 코팅용액이 정밀하게 제어됨으로써 경계가 명확하고 일직선의 stripe 코팅이 가능하며  $\mu$ -tip 폭 및 토출량 조절을 통해 원하는 폭의 stripe을 제작할 수 있다 [4]. 이 기술을 OLED 디스플레이에 응용하기 위해서는 stripe 밀도를 높여야 하지만 친수성의 헤드 립 및 헤드 립과 동일선상에 있는 meniscus guide를 따라 용액이 퍼지고 이로 인해 토출구간 용액 혼합 현상이 발생한다. 이는 stripe가 merge 되는 코팅 결함을 초래한다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 유체유동 전산모사(Computational fluid dynamics (CFD), [5])를 통해  $\mu$ -tip 길이별 용액 퍼짐 정도를 조사하였으며 용액 mixing 없이 stripe density를 높일 수 있는 최적의  $\mu$ -tip 간 간격을 도출하였다. 또한 헤드 립의 접촉각과  $\mu$ -tip의 접촉각을 변화하여 용액 퍼짐 현상의 억제 가능성을 조사하였다.

## 2. 실험 및 전산모사 방법

### 2.1 실험 방법

실제 헤드 립을 따라 용액이 퍼지는 정도를 실험을 통해 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 크기가 200mm×30mm×58mm인 헤드가 장착된 롤투롤 슬롯 다이 코팅 시스템을 사용하였다. 두께 100 $\mu$ m, 폭 170mm를 갖는 polyethylene terephthalate (PET) 필름 롤을 기관으로 사용하였으며 50 $\mu$ m폭과 300 $\mu$ m길이의  $\mu$ -tip을 갖는 meniscus guide와 shim이 함께 삽입된 슬롯 다이 헤드를 이용하여 스트라이프 코팅을 하였다. 코팅 용액으로는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)(Clevis AI 4083)를 사용하였으며 유량 0.0001ml/min, 코팅속도는 line breakup이 발생하지 않는 최대속도 4mm/s로 고정하였다.  $\mu$ -Tip 부근의 용액분포는 area scan camera(acA1300-30gm, BASLER)를 사용하여 측정하였다.

### 2.2 전산모사 방법

유체유동 전산모사를 위해 CFD software(ANSYS Fluent 19.1Ver.)을 사용하였다. 이 툴은 volume of fluid (VOF) 방법을 사용하여 Navier-Stokes equations을 수치적으로 계산함으로써 용액의 움직임을 추적할 수 있다. 전산모사를 위한 구조는 Fig. 2와 같으며 실제  $\mu$ -tip을 갖는 meniscus guide 구조를 드로잉 하였다. 계산량을 줄이기 위해 3D 구조대신 2D 구조를 고려하였으며 용액이 미치지 않는 영역은 제외하였다. 경계 조건으로 inlet(용액이 나오는 곳), outlet(용액이 빠져나가는 곳), tip, head lip으로 정의하였으며 inlet은 velocity inlet(유속 0.2 m/s)으로, outlet은 outflow으로 설정하였다. 실제 코팅용액은 용액 분산 챔버인 cavity로부터 shim에 형성된 slit channel을 타고 토출구로 나오지만 Fig. 2의 2D 전산모사에서는  $\mu$ -tip 근처에 설정된 20 $\mu$ m 길이의 inlet에서 나오는 것

으로 가정하였다. 실제로도 모세관 현상에 의해 토출구에서 나온 용액은 헤드 립으로 분산되게 된다. 메쉬 간격은 5  $\mu$ m이며 초기 계산 영역은 air로 설정하였으며 헤드 립과  $\mu$ -tip의 용액(PEDOT:PSS) 접촉각(contact angle,  $\theta_c$ )은 실제 측정된 16°로 하였다. 용액의 흐름은 viscous laminar이며 난류(turbulent) 흐름은 고려하지 않았다. Time step  $\Delta t$  (=1 $\mu$ s)은 Courant number를 0.25로 하여 결정하였다.

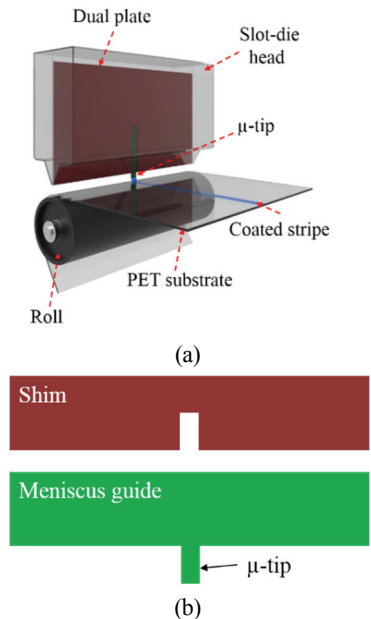


Fig. 1. (a) Schematic view of roll-to-roll (R2R) stripe coatings and (b) a shim and a meniscus guide embedded in the slot-die head.

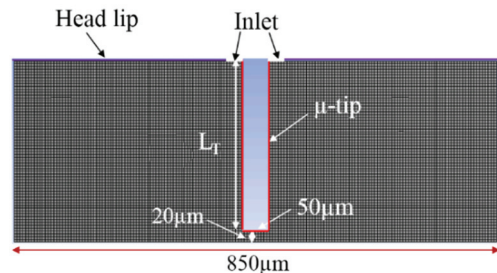


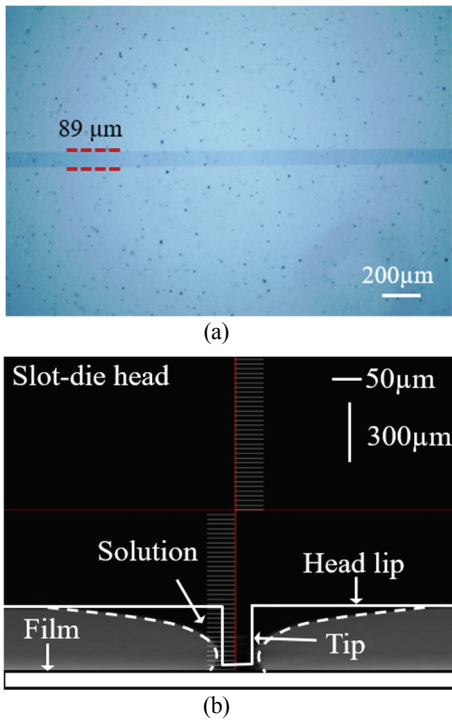
Fig. 2. Structure of the slot-die head with a  $\mu$ -tip for simulations ( $L_T$ :  $\mu$ -tip length,  $\mu$ -tip width=50 $\mu$ m, coating gap=20 $\mu$ m, inlet=20 $\mu$ m).

## 3. 결 과

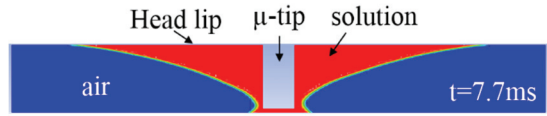
Fig 3는 50 $\mu$ m폭과 300 $\mu$ m 길이를 갖는  $\mu$ -tip을 이용하여

롤투를 슬롯 코팅한 stripe의 광학이미지와 코팅 중  $\mu$ -tip 근처에 형성되는 용액 분포 이미지를 보여준다. 실제 코팅된 stripe의 폭은  $89\mu\text{m}$ 로  $\mu$ -tip 폭보다 조금 넓다. 이는 용액분포에서 보듯이 기관 부근에서 용액이  $\mu$ -tip보다 넓게 퍼지기 때문이다. 따라서 stripe 폭은  $\mu$ -tip에 의해 조절 가능할 뿐만 아니라 헤드로부터 기관으로의 용액 전달이  $\mu$ -tip에 의해 정밀하게 제어됨을 알 수 있다. 하지만 Fig 3(b)에서 보듯이, 헤드 립을 따라 용액이 옆으로 퍼지는 현상이 발생한다. 이는 친수성의 헤드 립을 따라 모세관 유동(capillary flow)가 발생하기 때문이다. 디스플레이에 응용하기 위해서는  $\mu$ -tip을 촘촘히 배열하여 stripe density를 높여야 하나 용액 퍼짐 현상에 의해 제약을 받는다.

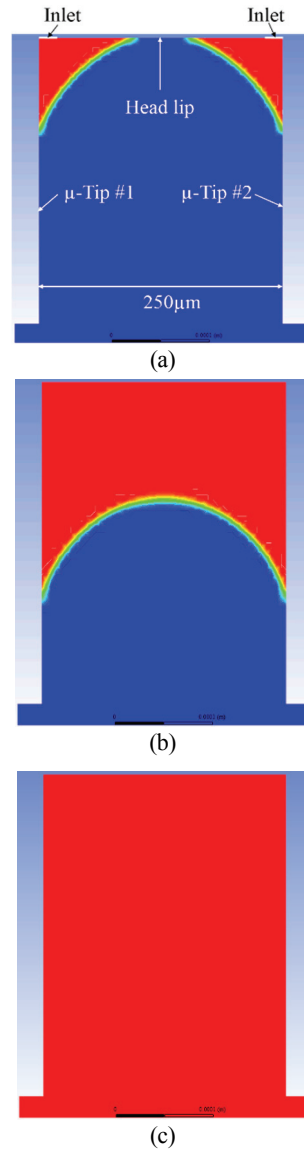
이러한 용액 퍼짐 현상을 억제하기 위해 유체유동 전산모사를 수행하였다. 먼저 실험 결과와 비교를 통해 전산모사의 정확도를 확인하였다. Fig 4는 실제 구조를 전산모사한 결과로 Fig 3(b)에 있는 실험 결과와 매우 유사하다. 즉, 헤드 립을 따라 용액의 퍼짐 정도가 매우 유사하다. 따라서 전산모사 틀이 접촉각  $16^\circ$ 의 헤드 립을 따라 생기는 capillary flow를 정확하게 캡처할 수 있음을 알 수 있다.



**Fig. 3.** Images of (a) a coated single stripe measured by optical microscope and (b) flow distribution near the  $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide and  $300\text{-}\mu\text{m}$ -long tip when the coating velocity is  $20\text{ mm/s}$ .



**Fig. 4.** Simulation result of solution distribution near the  $50\text{-}\mu\text{m}$ -wide and  $300\text{-}\mu\text{m}$ -long  $\mu$ -tip at  $t=7.7\text{ms}$ .



**Fig. 5.** Simulation results of solution flow when two  $\mu$ -tips are closely placed (distance= $250\text{ }\mu\text{m}$ ).

이러한 CFD 틀을 이용하여  $\mu$ -tip간 간격이 충분하지 않을 경우 나타나는 용액 mixing 현상을 전산모사 하였다.

Fig 5에서 보듯이  $\mu$ -tip의 길이가  $300\ \mu\text{m}$  이고 간격이  $250\ \mu\text{m}$ 인 경우 헤드 립을 따라 용액이 퍼짐으로써 용액이 혼합된다. 이렇게 혼합된 용액은  $\mu$ -tip 접촉각( $16^\circ$ )에 따라 Fig 5(b)처럼 위로 오목한 형태를 유지하며 아래로 흐른다. 일정 시간이 흐른 뒤에는 Fig 5(c)에서처럼 용액이 분리되지 않고 기관까지 흐름으로써 코팅 결합인 line merging이 발생하여 폭이 넓은 stripe가 제작된다. 따라서 헤드 립을 따라 또는  $\mu$ -tip을 갖는 meniscus guide를 따라 옆으로 생기는 capillary flow를 제어할 필요가 있다.

### 3.1 Head lip 접촉각의 영향

먼저 헤드 립의 접촉각을 조절하여 capillary flow를 제어할 수 있는지를 조사하였다. 실제 헤드 립이나 meniscus guide의 접촉각은 소수성 테프론을 코팅하거나 소수성 패턴을 형성하여  $130^\circ$ 까지 높일 수 있다 [6]. Fig. 6는 접촉각 변화에 따른 용액 분포 전산모사 결과를 보여주며 용액의 퍼짐 정도 ( $d_s$ :  $\mu$ -tip 에서부터 헤드 립을 타고 퍼져 나가는 거리) 및  $\mu$ -tip 끝까지 용액이 도달하는데 걸리는 시간을 Table 1에 정리하였다. 헤드 립의 접촉각이 증가함에 따라 용액의 퍼짐이 줄어들고  $\mu$ -tip 끝까지 용액이 도달하는데 걸리는 시간도 줄어들음을 알 수 있다. 즉, 소수성의 헤드 립이나 meniscus guide를 사용하면 capillary flow 현상을 억제할 수 있으며 용액이 옆으로 퍼지지 않고 바로 기관 쪽으로 흐르기 때문에 기관에서 용액 안정화되는데 걸리는 시간이 감소한다. Table 1에서 보듯이 실제 실험(Fig. 3(b))에서 계산된  $d_s$  값( $250\ \mu\text{m}$ )이 전산모사 값( $256\ \mu\text{m}$ )과 매우 유사함을 알 수 있다. 그리고 소수성 물질 코팅에 의해 접촉각이  $130^\circ$ 까지 증가하면  $d_s$  값이  $44\ \mu\text{m}$ 까지 감소한다. 따라서  $\mu$ -tip 간 간격을 최대  $90\ \mu\text{m}$ 까지 줄일 수 있어 stripe density 증가 효과를 기대할 수 있다.

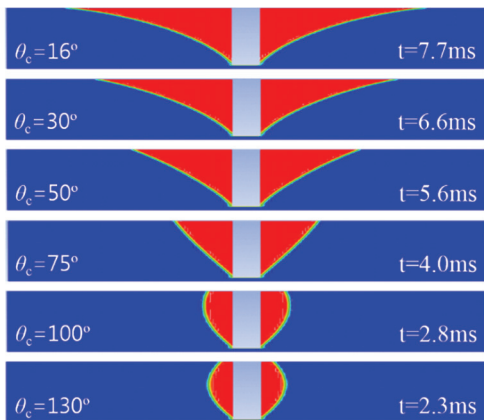


Fig. 6. Simulation results of solution distribution near the  $\mu$ -tip for different contact angles of the head lip.

Table 1. Summary of calculated  $d_s$  from Fig. 6.

Contact angle ( $^\circ$ )	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )
16 (Experiment)	250
16 (Simulation)	256
30	244
50	156
75	94
100	50
130	44

### 3.2 $\mu$ -Tip 접촉각의 영향

이번에는  $\mu$ -tip의 접촉각을 조절하여 모세관 유동 현상을 억제할 수 있는지 조사하였다. Fig. 7은  $\mu$ -tip 접촉각에 따른 용액 분포를 보여준다.  $\mu$ -tip 접촉각이 증가하면 오히려 모세관 유동 현상이 더 심하게 나타남을 알 수 있다. 즉, 높은 접촉각은  $\mu$ -tip을 따라 흐르는 용액에 높은 저항으로 작용한다. 따라서  $\mu$ -tip 접촉각이 높을수록  $\mu$ -tip을 따라 기관 쪽으로 용액이 흐르지 못하고 대신 헤드 립을 따라 옆으로 퍼지는 현상이 더 심해진다. 따라서 소수성보다 친수성 물질의 메니스커스 가이드를 사용하는 것이 바람직하다.

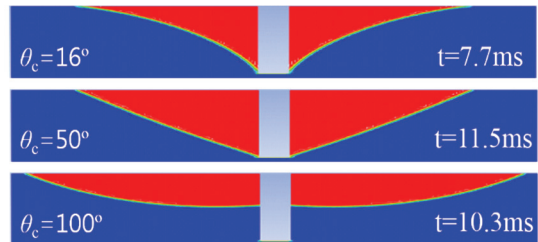


Fig. 7. Simulation results of solution distribution near the  $\mu$ -tip for different contact angles of the  $\mu$ -tip.

### 3.3 $\mu$ -Tip 길이의 영향

마지막으로  $\mu$ -tip 길이를 조절하여 모세관 유동을 억제할 수 있는지를 조사하였다. Fig 8 및 Table 2에서 보듯이,  $\mu$ -tip 길이가 줄어들면 모세관 유동 현상이 억제됨을 알 수 있다. 이는 모든 wire가 전류 흐름을 방해하는 저항을 갖듯이  $\mu$ -tip 도 용액 흐름에 대한 저항(electronic-hydraulic analogy)을 갖기 때문이다. 즉,  $\mu$ -tip이 길수록 용액 흐름에 대한 저항이 증가하기 때문에 head lip을 따라 용액 퍼짐 현상이 더 심하게 나타난다.  $\mu$ -tip 길이가  $300\ \mu\text{m}$ 에서  $100\ \mu\text{m}$ 로 줄어들면  $d_s$  값은  $256\ \mu\text{m}$ 에서  $93\ \mu\text{m}$ 로 줄어들었다. 따라서 모세관 유동 현상을 효과적으로 억제하기 위해서는 소수성 물질을 코팅하여 헤드 립의 접촉각을 높이거나 친수성의  $\mu$ -tip 물질을 사용하고  $\mu$ -tip의 길이를 줄여야 한다.



**Fig. 8.** Simulation results of solution distribution near the  $\mu$ -tip for different  $\mu$ -tip length.

**Table 2.** Summary of calculated  $d_s$  from Fig. 8.

$L_T$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )
300	256
200	181
100	93

#### 4. 결 론

본 연구에서는 실험을 통해 stripe 코팅을 위한  $\mu$ -tip을 갖는 슬롯 다이 헤드에서 용액이 헤드 립을 따라 옆으로 퍼지는 모세관 유동 현상이 발생함을 확인하였고 유체유동 전산모사에 의해 이를 재현할 수 있음을 입증하였다. 이런 검증된 유체유동 알고리즘을 이용하여 모세관 유동 현상을 억제하여 stripe density를 높이기 위한  $\mu$ -tip 구조 및 접촉각 최적화 연구를 수행하였다.

먼저 접촉각이 작은 친수성 헤드 립에서 모세관 유동 현상이 강하게 나타났으며 접촉각이 증가할수록 모세관 유동 현상이 효과적으로 억제될 수 있음을 보였다. 헤드 립 접촉각이  $16^\circ$ 에서  $130^\circ$ 로 증가하면 용액이 퍼지는 거리가  $256 \mu\text{m}$ 에서  $44 \mu\text{m}$ 로 급격히 감소하였다. 하지만  $\mu$ -tip의 접촉각이 증가하면  $\mu$ -tip을 따라 용액 흐름이 방해되어 오히려 모세관 유동 현상이 더 심하게 나타났다.  $\mu$ -tip의 길이가 길면 electronic-hydraulic analogy에 따라 유동 저항 증가하고 이로 인해 모세관 유동 현상이 심하게 나타났다. 이는  $\mu$ -tip의 길이를 줄임으로써 억제할 수 있지만 접촉각

을 줄이는 방법보다는 덜 효과적이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년도 한국기술교육대학교 교수연구제 파견연구비 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

- Krebs, F., "Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, pp. 394-412, 2009.
- Chesterfield, R., Johnson, A., Lang, C., Stainer, M., and Ziebarth, J., "Solution-Coating Technology for AMOLED Displays," *Information Display*, Vol. 1/11, pp. 24-30, 2011.
- Wengeler, L., "Coating and drying processes for functional films in polymer solar cells," KIT Scientific Publishing, 2014.
- Kim, G., Lee, J., Shin, D., and Park, J., "Roll-to-Roll Fabrication of PEDOT:PSS Stripes Using Slot-Die Head With  $\mu$ -Tips for AMOLEDs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 66, pp. 1041-1049, 2019.
- Shin, D., Hong, G., Park, J., and Seo, I., "Simulation of capillary phenomenon for solution coating of high-uniformity organic thin films," *J. of The Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 16, pp. 106-111, 2017.
- Luo, B., Shum, P., Zhou, Z., and Li, K., "Preparation of hydrophobic surface on steel by patterning using laser ablation process," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 1080-1185, 2010.

접수일: 2019년 3월 14일, 심사일: 2019년 3월 21일,  
게재확정일: 2019년 3월 22일