



컴퓨터 해석을 통한 Slot 코팅공정에서 운전방향의 코팅품질 평가 및 다이 설계

김태훈 · 이두이 · 성달제* · 류민영†

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
*나래나노텍(주)

접수일(2013년 10월 7일), 수정일(2013년 10월 28일), 게재확정일(2013년 10월 29일)

Coater Die Design and Coating Quality Evaluation in the Machine Direction of Slot Coating Through Computer Simulation

T. H. Kim, D. Y. Lee, D. J. Sung* and M.-Y. Lyu†

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

*Narae Nanotech Co., Youngin, Kyunggido, S. Korea

(Received October 7, 2013, Revised October 28, 2013, Accepted October 29, 2013)

요약 : 슬롯코팅은 평판 디스플레이의 부품을 위해 유리에 감광제를 코팅방법으로 많이 쓰이고 있다. 갈수록 고화질의 디스플레이가 요구됨에 따라 코팅의 고품질도 요구되고 있다. 슬롯코팅에서 코팅의 품질은 노즐방향의 코팅 균일성과 운전방향의 코팅 균일성으로 평가된다. 노즐방향의 코팅 균일성은 코터다이 내부의 설계에 의존되며 운전방향의 코팅 균일성은 코터다이 외부의 모양과 운전조건에 의존된다. 본 연구에서는 슬롯코팅에서 운전방향의 코팅 균일성에 대해서 컴퓨터해석을 통하여 조사하였다. 해석에서 다이 외부의 형상으로 다이 립 각도와 길이를 변수로 하였고, 운전조건으로는 코팅속도를 변수로 하여 코팅 현상을 분석하고 코팅의 품질을 평가하였다. 코팅속도가 커질수록 코팅두께가 얇아지며 코팅의 균일성이 증대되었으나 meniscus형성이 불안정하여 코팅의 안정성은 감소되었다. Down stream 다이 립 각도가 커질수록 코팅두께의 편차는 작아졌으며, Down stream 다이 립 길이가 길수록 코팅 두께는 얇아졌고 안정적인 코팅이 이루어지기까지의 시간이 길어졌다.

ABSTRACT : Slot coating has been widely spread in photo resist coating on glass for flat display monitor. High quality of coating is required as high quality of image in display is needed. Coating quality in the slot coating is divided into nozzle direction quality and machine direction quality. Nozzle direction quality is related to flow uniformity inside the die whereas machine direction quality is related to die lip design and operational conditions. In this study coating uniformity in the machine direction of slot coating has been investigated through computer simulation. Die lip angle and die lip length were considered as outside die geometry and coating speed was considered as operational condition. Coating behavior has been analyzed and coating quality has been evaluated through computer simulation. Coating thickness decreased and coating uniformity increased as coating speed increased. However, the stability of meniscus formation was reduced and subsequently coating stability was reduced as coating speed increased. Coating thickness deviation decreased as die lip angle increased in down stream die. Coating thickness decreased and time to reaching steady state increased as increased die lip length in down stream die.

Keywords : slot coating, photo resist, coating speed, die lip angle, die lip length

I. 서론

평판 디스플레이는 전 세계적으로 수요가 증가되고 있으며 대형화, 슬림화 그리고 고화질의 경향을 보이고 있다. 이에 따라 평판 디스플레이의 기술혁신과 성능향상이 중요시되고

있다. 특히, 평판 디스플레이의 품질은 코팅 공정에서 감광액 (PR, photo resist)을 유리기판 위에 얼마나 균일하게 도포하는냐가 큰 변수로 작용된다.¹ 코팅 공정의 종류는 매우 다양하지만, 평판 디스플레이 코팅에는 주로 스핀코터 (spin coater), 슬롯코터 (slot coater)를 사용한다. 기판의 사이즈가 대형화되면서 슬롯 코팅 방식이 많이 사용되고 있다.¹⁻⁵

슬롯코팅은 길고 폭이 좁은 슬릿 형태의 노즐이 유리기

† Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

판 위를 직선으로 이동하여 감광액을 분출하여 막을 형성시키는 방법이다. 슬롯 코팅에서는 PR이 유리기판에 균일하게 도포되어야 하는데 코팅에 영향을 주는 PR의 물성은 점착각, 표면장력 그리고 점도이다.³⁻⁵ 슬롯코팅에 관한 연구는 코팅의 균일성을 유지하기 위한 다이 설계와 슬롯코터 노즐에서 PR의 흐름특성의 연구가 있다.^{6,7} 코팅의 최적 운전조건을 설정하기 위한 연구도 중요시되고 있고, 코팅 초기의 코팅 현상에 대한 연구도 있다.⁸⁻¹⁰ 그리고 코터다이 끝부분의 곡면이 코팅에 주는 영향을 파악하는 연구가 있었으며, 수직과 수평 슬롯코터의 비교에 관한 연구도 있다.^{11,12} 또한 코팅액의 점탄성 특성을 고려한 연구도 있다.¹³ 코팅의 품질은 노즐방향의 균일성과 운전방향의 균일성으로 나뉘는데 이러한 코팅 균일성 평가에 관한 연구는 미약한 현실이다.^{14,15}

본 연구에서는 슬롯코팅 방식을 사용한 PR 코팅 공정에서 코팅 균일성을 평가하고자 하였다. 코팅의 균일성은 슬롯코터 다이의 내부 디자인에 의존되는 노즐방향 균일성과, 코터의 외형과 운전조건에 의존되는 운전방향 균일성이 있는데 본 연구에서는 운전방향의 코팅 균일성에 대한 연구를 진행하였다. 코터의 운전 조건과 다이 외부의 기하학적 형상에 따른 코팅현상 해석을 관찰하기 위해 다양한 변수를 설정하여 해석을 진행하였다. 그리고 해석결과를 바탕으로 균일한 코팅 두께를 얻기 위해 여러 조건의 설정에 대한 결론을 제시하였다.

II. 해석

1. 연구모델 및 코팅액

코터다이의 형상 및 명칭은 Figure 1과 같고, 코팅액의 물성은 Table 1에 나타나 있다. 코팅현상 관찰을 위한 수치 해석 프로그램은 FLOW-3D를 사용하였다. 코터다이의 형상은 Figure 1에서와 같이 X-Z평면 위에 모델링 하였으며, 다이의 너비는 Y 축 방향이다. 모든 해석은 X-Z평면의 2D로 진행하였다. 해석에서 사용한 메쉬는 사각 메쉬였으며, 해석의 정밀도를 높이기 위해 메쉬의 밀도를 조절하였다. 즉, X 축으로는 감광액이 나오는 슬롯의 위치에서 메쉬의 밀도를 높게 하였고, 감광액이 흐르는 Z 축 방향에서는 유리기판에 가까운 부분과 노즐 밑면에 가까운 부분에서 메쉬의 밀도를

Table 1. Material Data for Photo Resist Used in This Study

Density (g/cm ³)	1.003
Viscosity (cp)	3.8
Surface Tension (N/m)	0.025
Contact Angle (°)	18.8

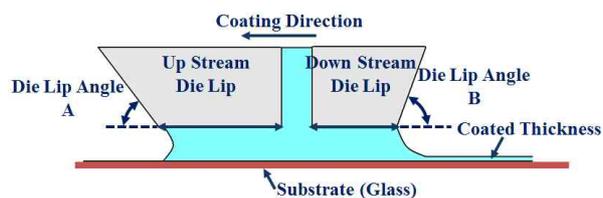


Figure 1. Outside geometry of slot coater die.

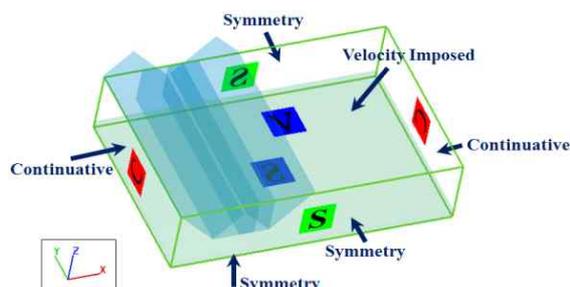


Figure 2. Boundary conditions for coating simulation.

높게 하였다. Figure 2에 모델링한 코터다이의 경계조건을 나타내었다. Y 축 방향의 Ymin, Ymax에 대한 경계조건은 대칭을 의미하는 Symmetry로 설정하였다. 코팅 진행방향인 X 축 방향의 Xmin, Xmax는 연속을 뜻하는 Continuative로 설정하였다. Z 축의 Zmin은 유리기판에 해당하므로 역시 Symmetry 조건을 부여 하였다. Zmax는 PR의 주입이 일어나므로, 특정속도를 갖는 속도 경계조건을 주었다. 노즐의 입구로부터 토출되는 코팅액의 속도는 20.2148 mm/s로 일정하다. 코팅두께의 불균일 여부는 코팅 진행 후 0.1초 내에 결정 되어 지는 것으로 예비해석에서 관찰되었다. 이를 고려하여 총 해석시간을 0.4초로 설정하였다. 공기는 대기압을 적용하였으며 공기의 흐름은 고려하지 않았다.

2. 코팅 해석을 위한 기본 조건

현장에서의 코터 구동방식은 감광액이 노즐로부터 토출되면, 코터가 코팅간격만큼 상승하게 된다. 그리고 그 이후에 코팅이 진행된다. 이를 구현하기 위하여 본 해석에서는 코터는 고정시키고, 유리기판이 하강하여 코팅간격에 도달한 뒤, 코팅이 진행 되도록 설정하였다. 코터다이와 유리기판의 초기 간격은 10 μm 로 하였다. 코팅이 진행되고 0.01 초 이후부터 유리 기판은 2.5 mm/s의 속도로 0.036 초간 하강하여 코팅간격 100 μm 에 도달하게 하였다. 해석을 수행하기 위한 기본 설정 값을 Table 2에 나타내었다.

코팅 균일성에 영향을 미치는 인자들로는 운전 조건과 다이의 기하학적 형상이다. 운전조건에 따른 해석변수로는 코팅속도 (coating speed), 코팅간격 (coating gap)이 있다. 다이의 기하학적 형상에 따른 해석 변수로는 다이 립 각도 (die lip angle), 다이 립 길이 (die lip length) 그리고 노즐간격

Table 2. Basic Conditions for Coater Die Dimension and Coating Speed

Variable		Value
Coating Speed (mm/s)		150
Die Lip Angle	A (°)	45
	B (°)	45
Die Lip Length	Up Stream (μm)	180
	Down Stream (μm)	60

Table 3. Variable for Computer Simulation of Coating

Variable	Value							
Coating Speed (mm/s)	100	150	200	250				
Die Lip Angle(°)	A	30	45	60	30	45	45	60
	B	30	45	60	45	30	60	45
Die Lip Length (μm)	Up Stream	130	180	180	180	230		
	Down Stream	60	40	60	80	60		

(Nozzle Gap)이 있다. 본 연구에서는 코팅간격은 100 μm 그리고 노즐간격은 80 μm로 고정하였으며 Table 3에 해석 변수들의 설정 값이 나타나있다.

3. 코팅 평가방법

감광액이 다이 립을 타고 올라가 다이와 유리기판 사이에서 반달 형상을 이루는 것을 meniscus라고 한다. 코팅 균일성에 가장 큰 요인을 미치는 것은 바로 이 meniscus가 얼마나 안정되고 일정하게 유지되는가 이다. 따라서 먼저 기본 해석 결과를 기준으로, 각각의 해석 범위에 따른 해석결과의 meniscus 형상을 비교하였다. 또한 각각의 해석 결과들에 대하여 코팅 진행 후 meniscus가 안정적이게 유지될 때까지의 소요시간을 측정하였다. 속도벡터가 down stream 다이 립 쪽으로 향할 수록 그리고 조밀할수록 코팅두께는 얇아진다. 이를 통해 PR의 속도벡터를 비교하여 코팅의 두께를 분석하였다. 코팅두께는 일정한 코팅길이를 설정하고, 이 코팅 길이 내의 36개의 점에 대한 높이를 구하여 산출하였고, 이를 이용해 두께의 표준편차를 계산하였다.

III. 결과 및 토론

1. 코팅 속도에 따른 결과

Table 4에 코팅 속도에 따른 두께와 표준편차를 정리하였다. Figure 4는 코팅속도가 100, 150, 200, 그리고 250 mm/s인 경우의 해석 결과이다. 코팅속도가 빠를수록 다이 아랫 부분의 코팅액 분포폭이 좁아지고, 코팅두께는 얇아지는 경

향을 보였다. 또한 코팅속도가 빠를수록 코팅액과 공기가 만나는 경계면이 down stream 다이 립의 shoulder를 타고 올라가는 현상이 두드러지게 나타났다. 코팅속도가 빠를수록 코팅두께 편차가 작아지므로, 코팅 두께가 균일해진다고 할 수 있으나 maniscus가 다이 립의 shoulder를 타고 올라가는 정도가 심해져 불안정한 코팅이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. Figure 5는 코팅액의 흐름을 속도벡터로 나타낸 것이다. 속도벡터가 다이 립 쪽으로 향하는 양상은 모든 코팅 속에서 비슷하였다. 따라서 코팅의 두께가 얇아지는 것은 속도벡터의 영향보다 코팅진행속도의 영향이 더 크게 작용한 것이라 판단된다.

2. 다이 립 각도에 따른 결과

Table 5는 다양한 다이 립 각도 변화에 따른 두께를 보여주고 있다. Figure 6은 Up Stream 다이 립 각도 A가 45°이고,

Table 4. Coating Thickness for Coating Speed (Unit: μm)

Speed (mm/s)	Min	Max	Mean	Standard Deviation
100	15.78	18.53	16.77	7.23E-04
150	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
200	7.76	7.76	7.77	7.72E-08
250	6.22	6.23	6.22	1.75E-09

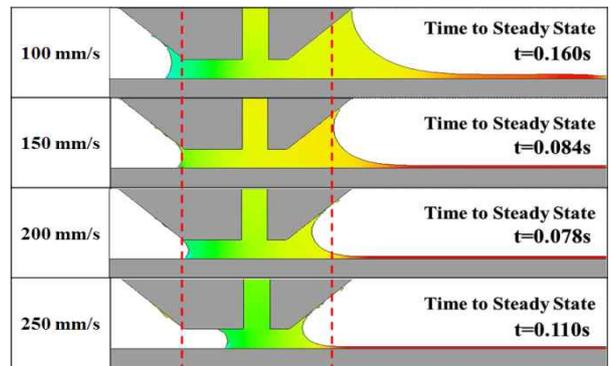


Figure 4. Distributions of photo resist for coating speed.

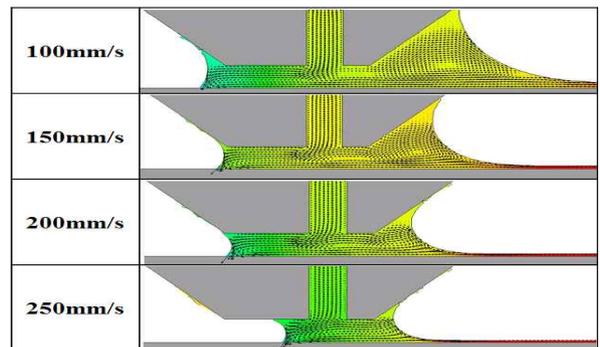


Figure 5. Velocity vector of photo resist for coating speed.

down stream 다이 립 각도 B가 30°, 45°, 그리고 60°일 때의 해석 결과이다. 다이 립 각도 B가 커질수록 다이 아래의 코팅액 분포폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 또한 각도 B가 커질수록 코팅두께의 균일성이 향상되었으나 안정적인 meniscus 형성까지의 시간이 오래 걸렸다. 그리고 각도 B가 클수록 경계면이 down stream 다이 립의 shoulder를 타고 올라가는 현상이 두드러짐을 확인할 수 있었다. 이는 각도 B가 커지면 meniscus가 불안정해져 코팅이 불안정해질 수 있음을 의미한다.

Figure 7은 down stream 다이 립 각도 B가 45°이고 각도 up stream 다이 립 각도 A가 30°, 45°, 그리고 60°일 때의 해석 결과이다. 다이 립 각도 A가 커질수록 다이 아래의 코팅액 분포폭이 좁아지며, 코팅두께가 두꺼워지고 균일해졌다. 다이 립 각도 B를 증가 시켰던 결과와는 반대로 안정적인

Table 5. Coating Thickness for Die Lip Angle (Unit: μm)

Angle[°] (A,B)	Min	Max	Mean	Standard Deviation
45,30	10.26	10.35	10.28	2.02E-05
45,45	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
45,60	10.40	10.44	10.41	8.63E-06
30,45	9.97	10.00	9.99	9.40E-06
45,45	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
60,45	10.16	10.19	10.17	8.15E-06
30,30	10.39	10.47	10.40	2.08E-05
45,45	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
60,60	10.38	10.42	10.39	8.35E-06

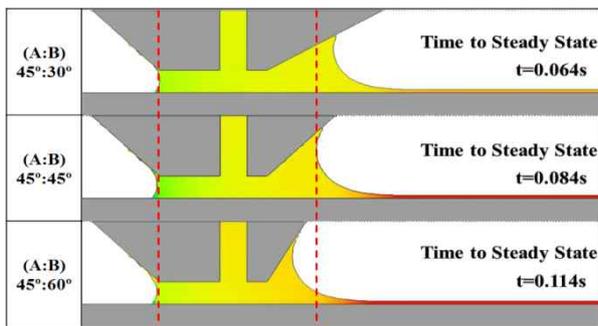


Figure 6. Distribution of photo resist for downstream die lip angle.

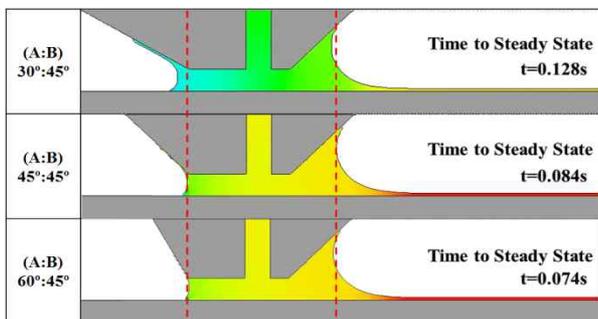


Figure 7. Distribution of photo resist for upstream die lip angle.

meniscus를 형성하기까지의 시간이 짧아 졌다.

Figure 8은 다이 립 각도 A, B를 동시에 30°, 45°, 그리고 60°로 변화시키며 해석을 진행한 결과이다. 다이 립 각도 A, B가 동시에 커질수록 안정적인 meniscus가 형성될 때까지의 시간은 오래 걸리지만, 다이 아래 코팅액의 분포폭이 좁아짐과 동시에 코팅두께가 얇아지고 균일해짐을 알 수 있다.

Figure 9는 코팅액의 흐름을 속도벡터로 나타낸 것이다. 다이 립 각도 A와 B가 30°일 때 속도벡터가 불안정하게 나타났다. A와 B의 각도가 동시에 커질수록 이러한 양상은 완화되었으며, 균일성 또한 향상되었다.

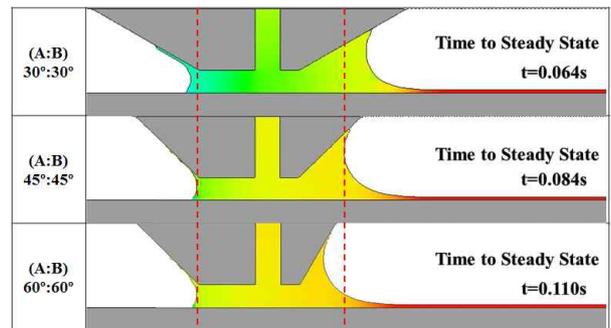


Figure 8. Distribution of photo resist for same die lip angles of downstream and up stream.

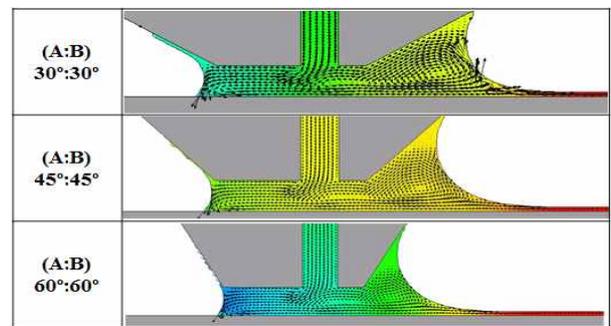


Figure 9. Velocity vector of photo resist for same die lip angle of downstream and up stream.

3. 다이 립 길이에 따른 결과

Table 6은 다양한 다이 립 길이에 따른 코팅 두께의 변화를 보여주고 있다. Figure 10은 up stream 다이 립 길이가 180 μm 이고 down stream 다이 립 길이가 40 μm , 60 μm , 그리고 80 μm 일 때의 해석결과이다. down stream 다이 립 길이가 길어질수록 다이 아래에 분포하는 코팅액 폭이 넓어지고 코팅두께는 얇아졌으며 균일한 코팅두께를 보였다. Figure 11은 PR의 흐름을 속도벡터로 나타낸 것이다. down stream 다이 립 부근의 속도벡터가 다이 립 쪽으로 많이 향했다. 이렇게 PR이 다이 립을 타고 올라가는 현상

때문에 코팅의 두께가 얇아졌을 것으로 판단된다.

Figure 12는 down stream 다이 립 길이가 $60 \mu\text{m}$ 이고, up Stream 다이 립 길이가 $130 \mu\text{m}$, $180 \mu\text{m}$, 그리고 $230 \mu\text{m}$ 일 때의 해석결과이다. up stream 다이 립 길이는 코팅 두께와 균일성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Table 6. Coating Thickness for Die Lip Length (Unit: μm)

Up, Down	Min	Max	Mean	Standard Deviation
180,40	10.49	10.54	10.51	1.16E-05
180,60	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
180,80	10.08	10.11	10.09	6.88E-06
130,60	10.33	10.37	10.34	1.03E-05
180,60	10.47	10.51	10.48	1.21E-05
230,60	10.41	10.45	10.42	1.10E-05

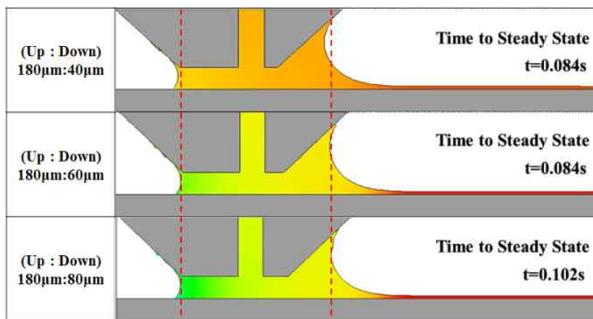


Figure 10. Distribution of photo resist for downstream die lip length.

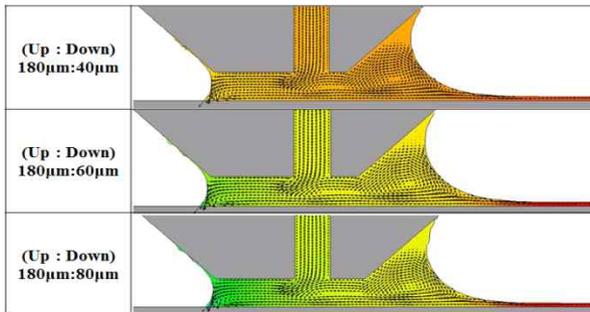


Figure 11. Velocity vector of photo resist for downstream die lip length.

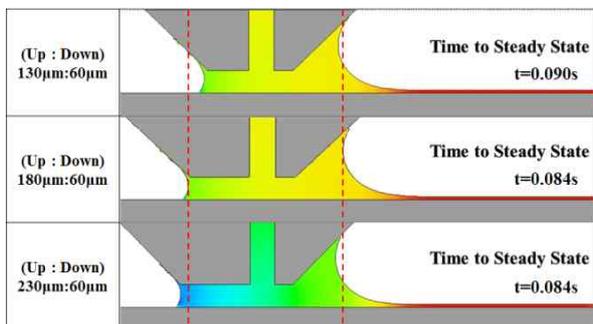


Figure 12. Distribution of photo resist for upstream die lip length.

IV. 결론

코팅 진행 속도가 빠를수록 코팅두께가 얇아졌고 코팅두께도 균일해졌다. 본 연구에서 설정한 코팅액의 공급속도에서 코팅 속도는 $150\text{--}200 \text{ mm/s}$ 에서 가장 이상적인 meniscus 형상을 보였다.

Up stream 다이 립 각도 A는 meniscus 형상에 큰 영향을 미치지 않았다. Down stream 다이 립 각도 B가 커질수록 코팅두께 편차는 작아져 코팅두께가 균일해졌다. 코팅두께는 다이 립 각도 A와 B가 모두 45° 일 때 가장 두꺼웠으며, 각각 30° 와 45° 일 때 두께가 가장 얇았다.

Down stream 다이 립 길이가 길수록 코팅두께는 얇아졌으며, up stream과 down stream 다이 립 길이가 각각 $180 \mu\text{m}$ 와 $80 \mu\text{m}$ 일 때 두께가 가장 얇았다. up stream 길이와 down stream 길이의 비율 차가 작을수록 안정적인 meniscus 형상에 도달하기까지의 시간은 오래 걸리나 균일한 코팅이 이루어졌다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- H. Y. Kim, M.-Y. Lyu, and J. G. Choi, "Computer Simulation of Coating Behavior Including Air for Various Coater Geometries and Operational Conditions", *Trans. Mater. Proc.*, **18**, 156 (2009).
- H. Y. Kim and M.-Y. Lyu, "Introduction to Polymer Shaping Processes and Their Principles", *Polym. Sci. Technol.*, **20**, 157 (2009).
- D. Satas, "Coating Technology Handbook", Marcel Dekker, Inc., New York, 19 (1991).
- S. Paul, J. Wiley & Sons, "Surface Coatings: Science and Technology", 2nd edition, New York, 653 (1996).
- Clive H. Hare, "Protective Coatings: Fundamentals of Chemistry and Composition", Technology Publishing Company, Pittsburgh, 429 (1994).
- S. H. Lee, H. J. Koh, S. H. Shim, H. W. Jung and J. C. Hyun, "An Optimal Die Design for the Coating Uniformity of Non-Newtonian Liquids in Slot Coating Process", *Korea Chem. Eng. Res.*, **49**, 314 (2011).
- J. W. Kim, "Flow Characteristics of Photo Resist in a Slit-Coater Nozzle", *J. Semicon. Disp. Equip. technol.*, **3**, 37 (2004).
- C. P. Chin, H. S. Wu, and S. S. Wang, "Improved Coating Window for Slot Coating", *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 3802 (2010).

9. C. F. Lin, David S. H. Wong, T. J. Liu, "Operating windows of slot die coating : Comparison of theoretical predictions with experimental observations", *Adv. Polym. Technol.*, **29**, 31 (2010).
10. Y. R. Chang, C. F. Lin, T. J. Liu, "Start-up of slot die coating", *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1158 (2009).
11. O. J. Romero, L. E. Scriven, M. da S. Carvalho, "Effect of curvature of coating die edges on the pinning of contact line", *AIChE J.*, **52**, 447 (2006).
12. H. I. Chang, Y. R. Chang, C. F. Lin, T. J. Liu, "Comparison of vertical and horizontal slot die coatings", *Polym. Eng. Sci.*, **47**, 1927 (2007).
13. O. J. Romero, L. E. Scriven, M. S. Carvalho, "Slot coating of mildly viscoelastic liquids", *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **138**, 63 (2006).
14. H. Kim, Y. Park, J. S. Hong, M.-Y. Lyu, S.K. Shin, J. K. Seo, "Computer Simulation of Flow Balance in the Die of Slot Coater: Part 1: Land Geometry", ANTEC 2012, Vol. 2, 1399 (2012).
15. Y. Park, H. Kim, M.-Y. Lyu, K. Namkung, and J. Jeoung, "Computer Simulation of Flow Balance in the Die of Slot Coater: Part 2: Manifold Geometry", ANTEC 2012, Vol. 2, 1404 (2012).