

슬롯코팅에서 정상 및 비정상상태 컴퓨터해석을 통한 코팅의 균일성 분석

우정우 · 성달제* · 류민영**†

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과, *나래나노텍(주), **서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
(2014년 2월 20일 접수, 2014년 4월 5일 수정, 2014년 4월 8일 채택)

Analysis of Coating Uniformity through Unsteady and Steady State Computer Simulation in Slot Coating

Jeong-Woo Woo, Dal-Je Sung*, and Min-Young Lyu**†

Department of Product Design Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

*Narae Nanotech, Hwasan-ri, Idong-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 449-832, Korea

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

(Received February 20, 2014; Revised April 5, 2014; Accepted April 8, 2014)

초록: 평판 디스플레이 제조공정 중의 하나인 유리기관 위에 감광액을 도포하는 과정에 슬롯코팅 방법이 많이 쓰이고 있다. 도포공정에서는 균일한 코팅 두께를 얻는 것이 중요하며, 코팅의 균일성은 노즐방향과 운전방향의 균일성으로 나뉜다. 운전방향의 코팅 균일성은 코터의 운전조건에 영향을 받고, 노즐방향의 균일성은 다이 내부의 흐름의 균일성에 영향을 받게 된다. 이러한 영향 인자들로 인해 코팅두께가 불균일한 현상이 발생하는데, 코터 진행의 초기 구간에는 비정상상태 구간으로 운전방향과 노즐방향으로 코팅두께가 균일하지 않다. 본 연구에서는 이러한 현상이 나타나는 원인을 파악하기 위해 비정상상태와 정상상태를 구별하여 해석하고 이를 실험과 비교하였다. 그 결과 감광액이 다이 내부에서 균일한 압력분포에 도달하기까지 시간이 필요하고 이로 인해 코팅 초기구간에서 다이의 양 가장자리 영역의 속도가 중앙 영역에 비해 속도가 낮게 나타났으며 코팅 두께도 얇게 나타났다. 그러나 정상상태에 도달한 후에는 가장자리 영역의 속도가 중앙 영역보다 높게 나타났고 코팅 두께 역시 두껍게 나타났다.

Abstract: As a process of plat panel display production, slot coating is widely used for the coating of photoresist on a wide glass substrate. A uniform coating thickness is important, and the coating uniformity is divided into nozzle and machine directions. The machine and nozzle directions coating uniformities are influenced by the operation condition of coater and flow uniformity inside the die, respectively. Non-uniform coating during steady coating process occurs according to those factors, however, non-uniform coating along the machine and nozzle directions has been observed at the beginning of coating by unsteady flow. In this study, steady and unsteady state flow simulations have been performed and compared with experiment to examine the causes of non-uniform coating. Computational results exhibited that it took a time to get a uniform pressure distribution at whole inside the die, and during this period of time edge regions showed lower exit velocity compared with center region. Subsequently edge regions had thinner coated layers than center region. However edge regions showed higher exit velocity than center region after steady state, and this made edge regions had thicker coated layer than center region.

Keywords: slot coating, photo resist, wide glass substrate, coating quality, unsteady state simulation.

서 론

대형 TV를 비롯한 컴퓨터 모니터, 각종 휴대기기 및 각종 의료기기를 비롯한 전자산업 내의 디스플레이 시장은 날이

수요가 증대되고 있다. 평판 디스플레이 제조 공정 중의 하나인 감광제(photo resist, PR)의 도포 공정은 유리 기관 위에 감광액을 도포하는 공정으로 균일한 코팅두께를 얻는 것이 디스플레이의 품질에 매우 중요하다.¹

PR을 코팅하는 공정은 코팅액을 계량하는 방법에 따라서 스핀코팅(spin coating)과 커튼코팅(curtain coating), 슬라이드 코팅(slide coating), 슬롯코팅(slot coating) 등으로 나뉜다.^{2,3}

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

이들 중 슬롯코팅은 노즐이 기판 위를 직선으로 이동하여 PR을 분출하여 막을 형성시키는 방식으로, 스핀코팅 방식에 비해 PR의 사용량을 감소시키고 대형 기판의 코팅에 이용된다. 따라서 디스플레이가 대형화되어 가는 추세에 따라 슬롯코팅 방식이 가장 많이 활용되고 있다.³⁻⁶

슬롯코팅의 품질은 코팅된 두께의 균일성으로 결정하는데 노즐방향의 균일성과 운전방향의 균일성으로 나뉜다. 노즐 방향의 균일성은 다이 내부 디자인의 영향을 받는 반면 운전방향(노즐 진행 방향)의 균일성은 다이 외부의 형상, 즉 다이 립 디자인과 운전조건에 영향을 받는다.^{2,7,8} 두 방향의 코팅균일성은 정상적인 운전 중에 나타나는데 코팅초기에는 다이 진행방향으로 코팅이 시작되면서 노즐방향과 운전방향에서 초기부분과 끝부분에 코팅이 균일하지 않다. 슬롯코팅에 관한 연구는 뉴튼유체와 비뉴튼유체 모델에 따른 흐름균형의 분석과 비뉴튼유체 모델에서 점도에 따른 영향에 관한 연구가 있다. 그리고 다이의 형태에 따른 다이 내 균일유동해석과 매니폴드 형상이나 랜드부의 길이에 따른 연구, 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 다이의 외관에 관한 연구가 있다.⁸⁻¹¹ 코팅초기에는 흐름이 비정상상태이기 때문에 코팅이 균일하지 않아 이의 원인 분석이 요구되고 있다.

본 연구에서는 코팅 초기의 코팅균일성을 파악하기 위해 코팅 초기의 비정상상태 해석을 통해 다이 내부의 흐름현상을 관찰하고 코팅두께에 미치는 영향을 분석하였다. 뿐만 아니라 초기구간을 지난 정상구간을 구별하고 정상상태로 해석을 하여 해석에서 나타난 코팅현상을 실험과 비교하였다.

해석 및 실험

해석 모델 및 경계조건. 코팅에 사용되는 슬롯 코터의 다이와 코팅되는 모양을 도식적으로 Figure 1에 나타냈다. Figure 2는 Figure 1에 의한 코팅으로 유리기판에 코팅된 모양을 보여주고 있는데 코팅초기와 끝부분에 코팅이 불균일한 모습을 도식적으로 보여주고 있다. 코팅초기와 끝부분은 코터의 이동이 안정적이지 못하는 것도 있지만 코팅액의 공급이 시작되면서 그리고 공급이 정지되면서 나타나는 코팅액의 불안정 공급에 의한 영향이 크다.

해석모델의 다이 형상은 Figure 3과 같다. 다이 중앙으로 펌프에 의해 유입되는 감광액은 매니폴드의 설계로 양 사이드로 흐름이 이루어지게 되어있다. 매니폴드를 지나고 랜드를 지나면서 다이출구 방향으로 균일한 흐름성을 갖는다. 본 연구에서 사용한 매니폴드 각도는 178.75° 이고 단면은 Figure 3(b)에 나타나 있다. 랜드의 길이는 49.51 mm, 폭은 2496 mm이다.

해석에서는 CFD(computational fluid dynamics) 상용프로그램인 Fluent를 사용하였으며 다이의 경우 중앙을 기준으로 좌우 대칭이기 때문에 대칭조건으로 반 쪽을 해석하였다. 경

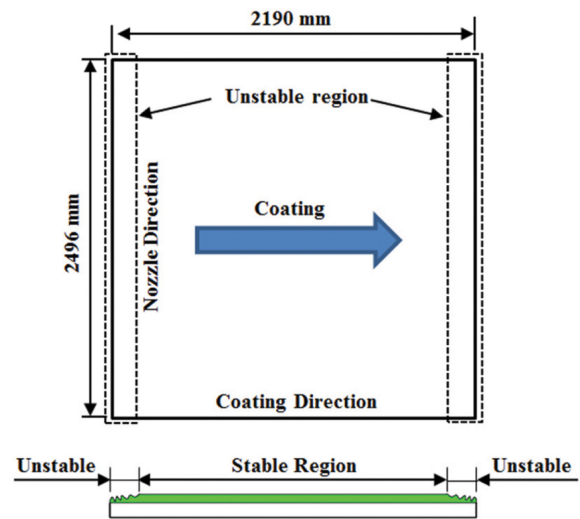


Figure 1. Unstable and stable coating regions in a coated substrate.

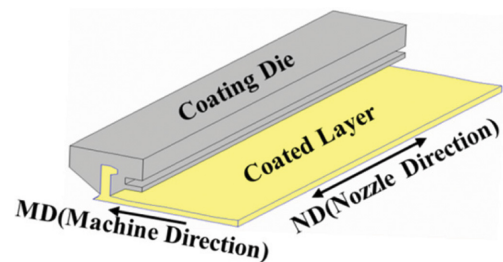
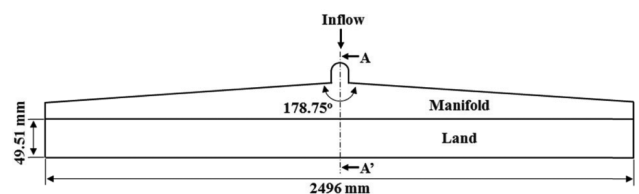
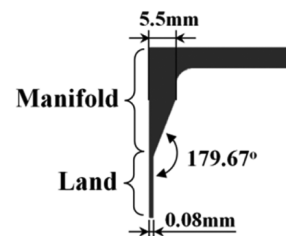


Figure 2. Schematic drawings of slot coater and coated layer on the substrate.



(a) Front view



(b) Cross section of A-A'

Figure 3. Dimensions of die in slot coater.

계조건으로는 벽면의 경우 no slip 조건을 적용하였고, 감광액이 유입되는 입구는 감광액이 유입되는 압력인 0.0138 MPa를 적용하였다. 해석형상과 경계조건이 Figure 4에 나타내었

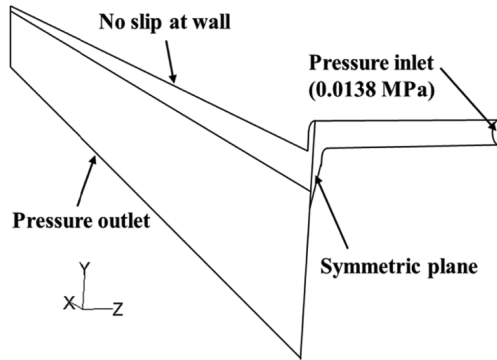


Figure 4. Simulation model and boundary conditions.

Table 1. Material Properties of Photoresist

Density	1.003 g/cm ³
Viscosity	0.038 poise

다. 감광액의 물성은 Table 1에 나타내었다. 해석을 위한 메시는 3차원 메시로 사면체와 육면체를 혼합하여 형성하였고 총 메시 수는 629558개이다.

비정상상태와 정상상태 해석. 코팅 초기의 불균일한 코팅 두께를 가지는 구간의 코팅현상을 관찰하기 위해 시간에 따라 다이내의 압력과 흐름이 변하는 비정상상태 해석을 진행

하였다. 초기에 다이내에 코팅액이 채워져 있는 상태에서 코팅을 하기 위해 입구에서 코팅액이 유입되는 것을 시간에 따라 해석하였다. 이러한 상황은 현장에서 코팅이 시작되는 초기 상태와 같다.

흐름이 안정화 되는 코팅 중간구간에서는 흐름이 안정화된 단계이므로 정상상태 해석을 통하여 노즐방향의 코팅 현상을 분석하였다. 해석에서 stop criteria(ϵ_0)는 0.001를 사용하였고, 해석시간은 약 15분 정도 소요되었다.

코팅두께 측정. 실제 코팅두께 측정은 케이맥(K-Mac, S. Korea)사의 ST600시리즈 박막두께 측정장비를 사용하였다. 본 측정장비는 substrate인 순수 유리에서의 반사각과 코팅된 유리의 반사각을 이용하여 코팅층의 두께를 측정하는 방식이다.

결과 및 토론

초기 코팅의 불안정성 검토. Figure 5는 코팅 초기 감광액이 다이 중앙의 입구에 들어오면서 다이 내에서 시간에 따른 압력분포와 속도분포의 변화를 보여 주고 있다. 감광액의 유입 부분인 중앙에서 압력이 높게 형성되며 시간이 지날수록 중앙의 높은 압력이 아래와 옆쪽으로 확산되어 가고 있다. 압력이 높으면 흐름이 커지는 것으로 판단할 수 있으므로 코팅 초기구간에는 중앙부의 두께가 두껍게 나타날 것으로 예측된

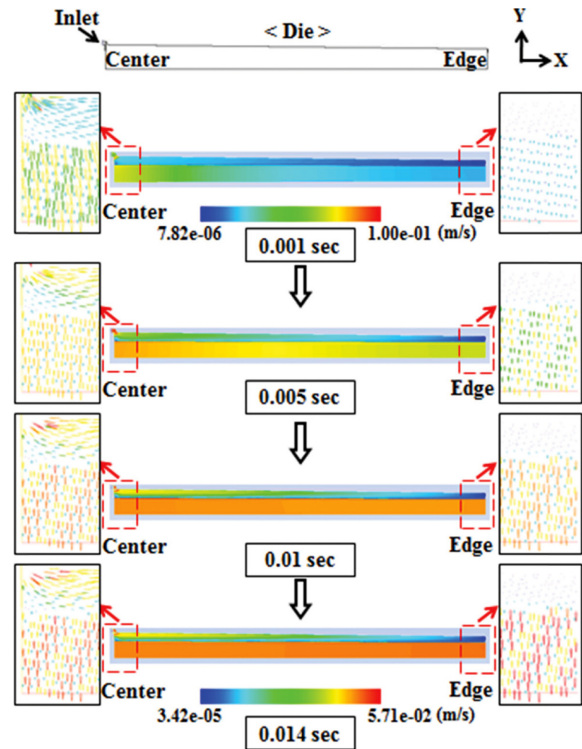
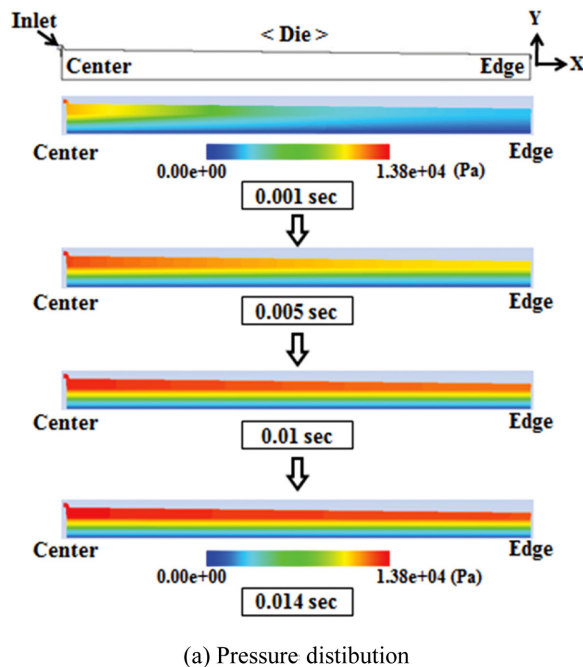


Figure 5. Pressure and velocity distribution of PR in die according to time.

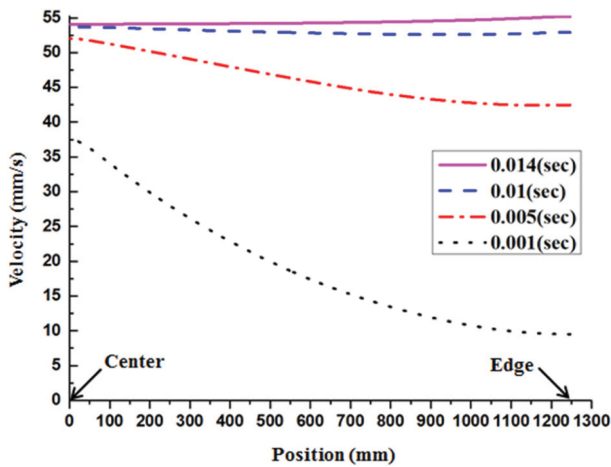


Figure 6. Velocity profile of PR along the die width at the die exit for time.

다. 이러한 코팅두께의 불균일성은 운전방향의 코팅 균일성을 떨어지게 하기 때문에 코팅 초기구간의 일부분은 자르고 사용하게 된다.

시간이 지남에 따라 다이 옆 쪽으로 압력이 증가하다가 0.014초 때는 중앙부와 균일한 압력 분포를 보인다. 펌프에 의해 유입되는 감광액은 다이 끝부분으로 갈수록 면적이 좁아지는 매니폴드의 영향으로 다이 출구 방향으로 균일한 압력을 이루게 되는 것을 확인할 수 있다.

Figure 6은 시간에 따른 다이 출구부의 속도 분포를 나타내고 있다. 출구부 속도는 노즐 갭의 중앙부의 속도이다. 감광액이 다이에 들어오는 초기시간(0~0.01 sec)에는 다이 중앙부분과 다이 끝부분의 속도차이가 크다. 시간이 지남에 따라 다이 끝부분으로 압력이 전달되어 속도가 증가해 0.01초 이후에는 중앙과 끝부분의 속도차이가 작아 균일한 속도분포를 보인다.

Figure 7은 운전방향과 노즐방향을 모두 고려한 코팅되는 유리의 위치별 노즐 갭의 중앙부의 속도 분포이다. 초기 코팅단계 시 다이 끝부분의 토출 속도의 경우 중앙부분보다 작다가 코팅이 진행되면서 중앙부분과 같은 토출속도를 보임을 알 수 있다. 코팅방향으로 거리는 코팅속도 150 mm/sec를 고려하여 환산한 것이다.

Figure 8은 시간에 따른 중앙부와 다이 끝부분에서의 노즐 갭 중앙부의 속도비교이다. 중앙부는 초기부터 속도가 급격히 증가하여 일정속도로 접근하고, 다이 끝부분은 일정 속도로 접근하는데 시간이 소요되고 있다. 이러한 현상은 중앙과 다이 끝부분이 안정된 상태로 운전되는데 차이가 있음을 나타내고 코팅두께의 불균일을 유발시킨다. 그림에서 보면 중앙부는 0.0075초에, 다이 끝부분은 0.015초에 안정된 일정한 속도로 접근한다.

이러한 해석 결과를 토대로 정상상태 해석은 위치별 속도

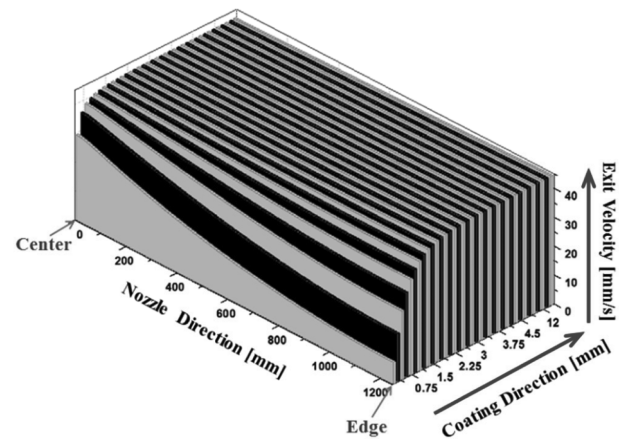


Figure 7. Three dimensional velocity distribution of PR on the glass.

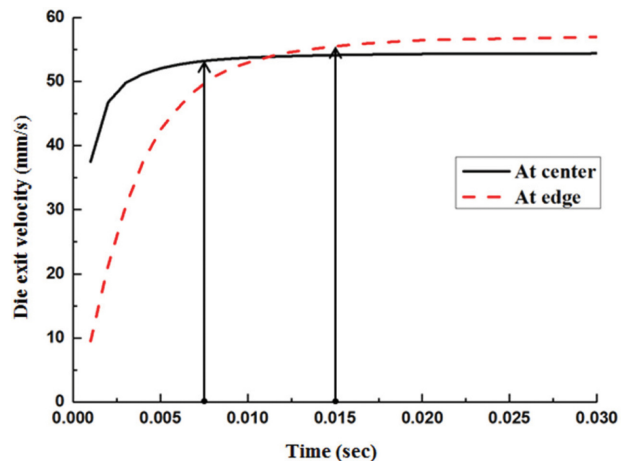


Figure 8. Comparison of exit velocity of PR at center and edge of the die according to time.

편차가 적은 0.014초 이후의 구간이라고 판단된다. 0.015초 일 때의 속도와 완전한 정상상태의 속도 차이는 약 5% 이내이다. 따라서 0.015초를 기준으로 이전의 구간을 초기의 비정상상태 구간으로 정의하고, 0.015초 이후의 구간을 정상상태 구간으로 판단할 수 있다. 코팅 시작 후 0.015초는 코터이송속도(150 mm/sec)를 고려할 때 2.25 mm가 코팅된 때이다. 정상상태 이후의 중앙과 다이 끝부분의 속도의 차이가 있는데 끝부분이 중앙보다 미소하게 높게 나타났다. 이는 정상상태에서 유리의 양쪽 끝부분의 코팅이 두꺼워질 수 있다.

정상상태 코팅 검토. Figure 9는 정상상태의 다이 내부의 압력분포와 속도분포를 보여주고 있다. 이는 Figure 3과 Figure 4의 해석모델에서 시간이 변수가 아닌 정상상태로 해석한 결과이다. 비정상상태에 비해 다이 내의 압력과 속도가 균형있게 분포하고 있다. 그러나 정상상태에서는 다이 끝부분의 속도가 중앙부분보다 약간 높게 나타났다.

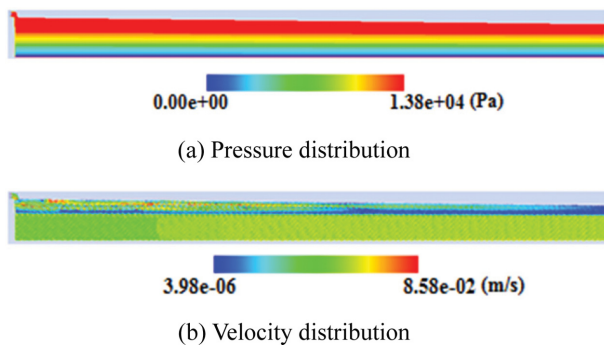


Figure 9. Pressure and velocity distribution of PR for steady state of coating.

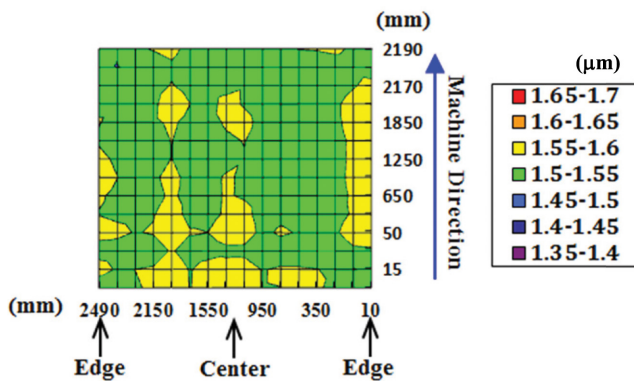


Figure 10. Measured coated thickness distribution.

코팅두께 측정과의 비교. Figure 10은 실제 코팅에서 측정된 코팅두께의 분포를 보여주고 있다. 코팅 후 건조조건은 110 °C에서 2초간이다. 실험에서 사용한 다이의 형상 및 운전 조건 등은 본 연구의 해석에서 사용한 것과 같은 조건이다. 전체적으로 코팅 초기에는 중앙부가 두껍게 나타났고 코팅이 진행되면서 중앙부보다는 양쪽 끝부분의 두께가 두꺼워지는 경향을 보였다. 해석에서 코팅 초기에 다이 내 중앙부의 압력이 높아 중앙에서의 코팅이 두껍게 예측되었는데 실험과 유사한 경향이다. 또한 정상상태 코팅영역에서 양쪽 끝의 코팅이 다소 두꺼우며 역시 해석과 잘 일치한다. 중앙과 다이 끝부분의 코팅이 균일해지는 결과를 얻기 위해서는 정밀한 다이설계가 필요하다.

결 론

본 연구에서는 유리기판에 감광액을 코팅하는 과정에서 코

팅의 균일성을 컴퓨터 해석과 두께측정을 통해 관찰하였다.

비정상상태의 흐름해석을 통해 볼 때 코팅 초기에는 다이 내부의 압력이 균일해지기까지 일정시간이 필요하였으며 이 구간에서 불균일한 압력으로 인해 운전방향과 노즐방향으로 코팅이 균일하게 이루어지지 않았다. 다이 출구 중앙부의 속도가 다이 양쪽 가장자리부의 속도보다 컸으며 이로 인해 중앙부분의 코팅두께가 두껍게 측정되었다. 정상상태에서는 다이 내부의 흐름이 균형있게 나타났으나 다이 가장자리 부위의 속도가 다소 크게 나타나 코팅두께가 다소 두껍게 측정되었다. 해석을 통해 예측되는 현상이 코팅두께의 측정 결과와 유사하여 코팅해석의 유효성을 검증할 수 있었다.

향후 더욱 정밀한 코팅두께가 요구된다면 본 연구에서 나타난 결과를 고려한 다이의 설계가 요구된다.

감사의 글: 본 논문(연구)은 지식경제부의 신성장동력 장비 경쟁력 강화사업 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

1. K. H. Chung, M. P. Kim, and C. W. Kang, *Electron Devices Meeting, IEDM'02*, **1**, 385 (2002).
2. S. I. Youn, S. Y. Kim, D. M. Shin, J. S. Lee, H. W. Jung, and J. C. Hyun, *Korea-Aust. Rheol. J.*, **18**, 209 (2006).
3. J. W. Kim, J. D. Chung, and S. G. Kim, *Journal of the Semiconductor & Display Equipment Technology*, **3**, 41 (2004).
4. O. J. Romeo, W. J. Suszynski, L. E. Scriven, and M. S. Carvalho, *J. Non-Newton. Fluid*, **118**, 137 (2004).
5. Y. R. Chang, C. F. Lin, and T. J. Liu, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 1158 (2009).
6. S. J. Weinstein and K. J. Ruschak, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **36**, 29 (2004).
7. Y. Sun and M. Gupta, *Int. Polym. Proc.*, **20**, 380 (2005).
8. O. J. Romero, L. E. Scriven, and M. D. S. Carvalho, *Am. Inst. Chem. Eng.*, **52**, 447 (2006).
9. T. Wu, B. Jiang, S. Xu, and C. Bi, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 406 (2006).
10. K. Meng, X. Wang, and X. Huang, *Polym. Eng. Sci.*, **49**, 354 (2009).
11. O. J. Romero, L. E. Scriven, and M. S. Carvalho, *J. Non-Newton. Fluid*, **138**, 63 (2006).