

레지스트 조건에 따른 나노임프린트 Filling 현상

Resist Filling behavior in Nanoimprint Lithography

*류지형¹, #이재종², #정상현³

*J. H. Ryu¹, #J. J. Lee(jjlee@kimm.re.kr)², S. H. Jeong(shjeong@kimm.re.kr)³

¹ 한국기계연구원(과학기술연합대학교대학원), ² 한국기계연구원, ³ 한국기계연구원

Key words : Nanoimprint Lithography, Filling Behavior, Simulation

1. 서론

리소그래피 기술은 반도체, 디스플레이, MEMS, 바이오 등의 소자 제조에 있어 핵심공정으로 마스크에 설계된 패턴을 여러 가지 파장대의 빛을 이용해 전사시키는 역할을 하고 있다. 이중 나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography) 공정은 적은 비용, 단순공정으로 6nm이하의 나노구조물을 전사할 수 있는 잠재력과 함께 차세대 리소그래피로 각광받고 있다. 이러한 나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography)는 1995년 프린스턴대학의 Chou 교수[1]가 최초로 제안하여 레지스트(Resist) filling 해석, 폴리머, 스탬프 표면처리 등 여러 분야에 걸쳐 많은 연구자들이 다양한 방법과 개선 방안을 제시하고 있다.

나노임프린트 공정은 크게 열을 이용한 Thermal Nanoimprint Lithography 와 자외선(UV)을 이용한 UV Nanoimprint Lithography 나뉜다. Thermal Nanoimprint는 나노패턴이 각인된 스탬프(Stamp)를 기재(Substrate) 위에 스핀코팅(spin-coating)된 레지스트(Resist)를 Tg(Glass Temperature)이상의 온도에서 가압하여 레지스트를 스탬프 패턴에 filling 시킨 후 냉각하여 레지스트(resist)를 경화시키는 방법이다. 자외선 나노임프린트(UV Nanoimprint Lithography)는 점도가 낮은 레지스트에 가압한 후 자외선으로 경화시키는 방법으로 다층화작업과 대량생산에 장점을 가지고 있다. 이에 반해 가열식 나노임프린트(Thermal Nanoimprint Lithography)는 열과 고압을 이용하여 공정시간이 상대적으로 길며, 기재의 열변형 및 파손 위험이 있다. 따라서 이러한 가열식 나노임프린트(Thermal Nanoimprint Lithography)의 문제점을 개선하기 위해서는 레지스트(resist)의 재료가 되는 폴리머계열의 해석뿐만 아니라 모세관력, 표면장력, 레지스트 두께 등 나노임프린트(Nanoimprint)에 영향을 미치는 인자에 대해서 이해하는 것이 중요하다.

최근, 많은 연구자들이 이러한 폴리머거동을 유한 차분법, 유한요소법, 유한체적법 등의 다양한 수치적 기법뿐만 아니라 AFM을 이용한 실험적 방법 등을 이용해 거동을 분석하고 있다. 폴리머의 유동 및 재료를 어떻게 정의하느냐에 따라 그 지배방정식과 수치적 방법이 차이가 나는데 첫 번째로 유한요소법을 이용한 Hirai[2] 등은 폴리머를 점탄성으로 가정하여 Mooney-Rivlin 방정식을 이용하여 스탬프 패턴의 형상에 따른 폴리머 거동을 분석 하였으며, Young[3]는 비압축성 유체로 가정하여 유한요소해석을 하였다. 두 번째로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 이용한 Heyderman[4]과 Jeong[5]은 점성유체를 스퀴즈 유동으로 가정하여 표면장력 및 모세관력의 영향을 분석 하였다.

본 연구는 가열식 나노임프린트(Thermal Nanoimprint Lithography)공정에서 폴리머의 레지스트에 대한 거동에 대한 수치적 해석으로써 레지스트(Resist)와 스탬프 사이에서의 미끄럼 조건(slip condition)을 고려하였다. 또한 레지스트(Resist)를 비압축성(Incompressible) 스퀴즈 유동(Squeeze Flow)으로 근사하여 레지스트(Resist) 두께에 따른 filling현상을 알아보고 타당성을 검증하기 위해 Rowland[6]와 Lee[7]의 filling 현상과 비교하였다.

2. 수치해석의 조건과 모델링

미끄럼 경계 조건

실제로 나노임프린트 공정 시에 스탬프의 SAM(Self Assembly Monolayer) 처리에 의한 anti-adhesion layer가 존재하므로 스탬프(Stamp)와 레지스트(Resist)의 경계조건에서 미끄럼(Slip)이 발생한다. 유체 유동의 해석에서 미끄럼 경계조건(Slip Boundary)과 연속체의 가정 시 필요한 무차원수는 Knudsen Number 이다.

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \tag{1}$$

식(1)에서 λ 는 분자들의 평균 자유행정, L은 특성길이를 나타내며, jeong[5,6]에 의해 나노임프린트(Nanoimprint Lithography) 시 Knudsen Number가 0.0334~0.0834 정도가 된다고 계산되었다. Knudsen number가 통상 0.001~0.1 사이 값을 갖는 경우 유체는 미끄럼 조건(Slip Condition)을 가지며 연속체로 가정할 수 있다.

점도 조건

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0 \\ \eta_0 (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{\frac{1-k}{k}} & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{cases} \tag{2}$$

식(2)는 절단 멱법칙 모델(Truncated Power Law Model)을 나타낸 것이다. 나노임프린트(Nanoimprint Lithography)공정 시 전단 변형률은 임계값보다 적기 때문에 점도는 일정하므로 뉴턴유체(Newtonian fluid)로 가정이 가능하다.

VOF 모델

$$\dot{f} = u_i \frac{df}{dx_i} \tag{3}$$

VOF모델은 두 가지 이상의 상이 존재하는 유체 해석에 많이 쓰이는 오일러(Eulerian) 방법으로 자유 표면에서의 해석이 간단하며 새로운 격자(Mesh)를 생성이 필요 없어 많이 쓰이는 방법이다. Fractional Volume은 식(3)으로 정의 되며, f는 Fractional Volume을 u_i 는 x_i 방향의 속도를 나타내며, 각 시간 스텝마다 유체의 부피를 계산하여 레지스트(Resist) 표면의 형상을 결정한다.

수치해석 모델

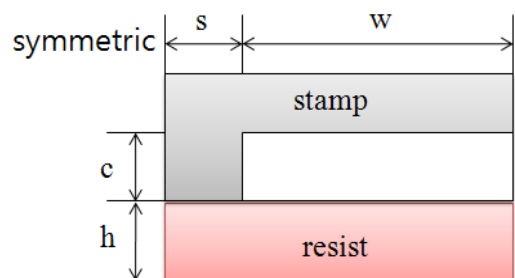


Fig. 1 Diagram for single cavity of nanoimprint

본 연구에서는 유체의 유동을 비압축성(Incompressible) 스퀴즈 유동(Squeeze Flow)[5]으로 가정하여 Jeong[5], Lee[7], Rowland[8]등에 의해 정의된 경계조건 및 지배방정식을 이용하여 표면장력(Surface Tension), 미끄럼 현상(Slip Condition), 모세관력(Capillary Force) 등을 고려하여 수치해석을 수행하였고, 이 결과를 Rowland[8]와 Lee[9]의 논문 유동현상 및 거동을 비교하여 타당성을 검증하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 모델로써 한 개의 미세 사각 패턴을 그림으로 표현한 것이다.

3. 결과

본 연구에서 사용된 레지스트(Resist)는 Jeong[5,6]이 사용한 PMMA로 밀도(density) $1.17 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ [8], 점도(viscosity) $10000 \text{kg/m}\cdot\text{s}$ [7], 표면장력(surface tension) 29.7mN/m [9], 스탬프(Stamp)와 레지스트(Resist)의 접촉각을 120° , 나노임프린트(Nanoimprint)공정의 속도를 200nm/s [9]로 정의하여 수치해석을 하였다. 또한 시간 스텝은 Courant number를 이용[5]하여 0.001을 얻었다.

Table 1 Flow behavior at different variable

Resist thickness	Width of Stamp Cavity		
	120nm	200nm	250nm
100nm			
200nm			
400nm			

Table 1에서 볼 수 있듯이 레지스트(Resist)가 filling 될 때 단일 피크 혹은 더블피크의 형상을 띤다. 여러 가지 인자 스탬프 너비대 캐비티 너비의 비, 레지스트두께, 점성(viscosity), 모세관력(Capillary force) 등에 의해 레지스트(Resist)의 filling 현상이 달라지며, 이러한 형상은 edge effect, 나노임프린트(Nanoimprint) 후 패턴형상 등에 영향을 미치므로 형상을 예측하는 일은 중요하다. 이 중 본 연구에서는 레지스트(Resist)의 두께와 캐비티(Cavity)의 너비에 따른 형상을 예측하였고 Table. 1에 나타내었다. 레지스트(Resist)형상을 구분짓는 한 요인인 레지스트두께(h) 대비 캐비티 너비(W)비(W/h)[6]에서 1.25에서 Lee[7]는 1.5 Rowland[6]는 1.2 이상의 값에서 더블 피크가 나타났다. 약간의 차이는 표면장력(Surface tension), 미끄럼(slip) 효과[7] 등의 경계조건 차이로 인해 발생하였으며, Rowland[6]와 Lee[7]의 결과를 비교함으로써 결과의 타당성을 나타내었다.

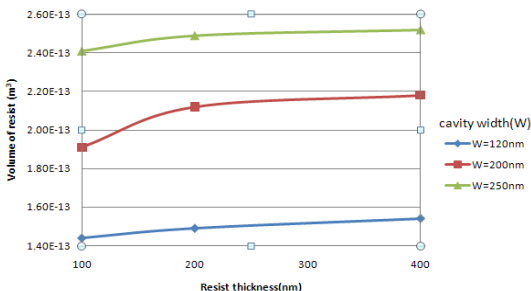


Fig. 2 Volume of resist in cavity for each resist thickness and width of cavity

Fig. 2는 flow time이 1초 일 때 캐비티(Cavity) 안에 있는 PMMA의 부피를 각 캐비티너비(W)에 따라 그래프로 그린 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 레지스트두께(h)와 캐비티너비(W)가 커지면 캐비티(Cavity) 안으로 유입되는 레지스트(Resist)의 양이 많아

지며, Rowland[6]의 그래프에서 나타난 내용이 일치했다. 이는 캐비티너비(W)가 커지면 상대적으로 스탬프의 돌출부(S)가 작아지는데 이 돌출부(S)가 작아짐으로써 압력이 크게 발생하고, 이 압력에 의해 레지스트의 유입속도가 빨라져 많이 유입된다. 하지만 나노임프린트(Nanoimprint) 시 filling이 완료되는 시간은 캐비티(Cavity)의 부피와 상관관계가 있으므로 달라질 수 있으며, 이 filling완료 시간은 스퀴즈 모델로 얻을 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 레지스트 두께와 캐비티의 너비에 따른 filling 시 일어나는 피크 현상과 같은 시간에 캐비티에 유입되는 레지스트(Resist)의 양을 나타내고, 그 결과를 Lee[7] Rowland[6]의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

레지스트두께(h) 대비 캐비티너비(W)[6](W/h)에서 더블 피크가 일어나는 값을 찾아 Rowland[6]와 Lee[7]의 값과 비교하였으며 Rowland[6]와는 0.05 Lee[7]와는 0.25의 차이가 있었다. 약간의 차이는 수치해석 시 표면장력(Surface tension)과 미끄럼경계조건(Slip condition)의 포함 때문으로 사료된다. 또한 캐비티(Cavity) 안으로 레지스트(Resist) 유입량과 캐비티너비(W), 레지스트두께(h) 등의 상관관계를 규명하였고, 그 결과 캐비티 너비와 레지스트(Resist) 두께에 비례하는 것을 Fig. 2에 나타내고, Rowland의 결과와 비교해보았다. 캐비티너비(W)가 증가 시 돌출부(S)의 압력증가로 인해 레지스트(Resist) 유입속도의 증가를 유발하여 유입량이 많아졌고, 레지스트두께의 상관관계는 압력은 레지스트(Resist) 두께의 3제곱에 반비례한다는 스퀴즈 모델의 식으로 설명이 가능하다.[7] 압력이 일정하다고 가정하면 레지스트의 두께가 감소할수록 더 큰 압력이 필요하게 됨으로 상대적으로 레지스트 두께가 증가하면 상대적으로 압력이 증가하게 되는셈이므로 이러한 결과가 나오게 된다.

이러한 연구를 통해 나노임프린트(Nanoimprint)공정 후 공정이 실패 했을 때의 원인 규명과 스탬프의 캐비티 너비에 따른 레지스트두께 조절 등 실험에서 도움 될 것이라 사료된다.

참고문헌

1. Chou S and Krauss P., "Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput," *Microelectron Eng.* 35 237-40, 1997.
2. Hirai, Y., Konish, T., Yoshikawa, T., and Yoshida,S., 2004, "Simulation and Experimental Study of Polymer Deformation in Nanoimprint Lithography," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol.22, pp. 3288-3293.
3. H. Schiff and L. J. Heydermann, in *Alternative Lithography*, edited by C.M. S. Torres Kluwer Academic/Plenum, New York, 2003.
4. L. J. Heydermann, H. Schiff, C. David, J. Gobrecht, and T. Schweizer., *Microelectronic Engineering*, **54**, 229, 2000.
5. J. H. Jeong, Y. S. Choi, Y. J. Shin, J. J. Lee, and K. T. Park, *Fibers Polym.* **3**, 113 2002
6. H. D. Rowland, A. C. sun, P. Randy Schunk and W. P. King., "Impact of polymer film thickness and cavity size on polymer flow during embossing", *Micromech. Microeng.* 2005.
7. Y. H. Lee and H. C. Sin, " Impact of slip and contact angle on imprinting pressure imprint lithography", *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* **27**, 590 ,2009.
8. Z. Tadmor and C. Gogos., "Principles of polymer processing", Wiley, New York, 1970.
9. E. Schaffer., "Ph. D. Thesis", University of Groningen, $L \geq 100 \text{ nm}$ Groningen, 2001.