

변형률속도를 고려한 상온 나노임프린트 공정의 유한요소해석

송정환¹ · 허 훈[#] · 김승호² · H. Thomas Hahn³

Finite Element Analysis of the Room Temperature Nanoimprint Lithography Process with Rate-Dependent Plasticity

J. H. Song, H. Huh, S. H. Kim, H. Thomas Hahn

Abstract

Nanoimprint lithography (NIL) process at room temperature has been newly proposed in recent years to overcome the shape accuracy and sticking problem induced in a conventional NIL process. Success of the room temperature NIL relies on the accurate understand of the mechanical behavior of the polymer. Since a conventional NIL process has to heat a polymer above the glass transition temperature to deform the physical shape of the polymer with a mold pattern, visco-elastic property of polymer have major effect on the NIL process. However, rate dependent behavior of polymer is important in the room temperature NIL process because a mold with engraved patterns is rapidly pressed onto a substrate coated with the polymer by the hydraulic equipment. In this paper, finite element analysis of the room temperature NIL process is performed with considering the strain rate dependent behavior of the polymer. The analyses with the variation of imprinting speed and imprinting pattern are carried out in order to investigate the effect of such process parameters on the room temperature NIL process. The analyses results show that the deformed shape and imprint force is quite different with the variation of punch speed because the dynamic behavior of the polymer is considered with the rate dependent plasticity model. The results provide a guideline for the determination of process conditions in the room temperature NIL process.

Key Words : room temperature nanoimprint lithography(상온 나노임프린트 리소그래피), strain rate(변형률속도), finite element method(유한요소법), process parameter(공정변수).

1. 서 론

최근 초소형 기계기술은 분자 및 원자 스케일에서 일어나는 현상들에 대한 많은 이해에 힘입어 더욱 가속되어 현재 제조 가능한 미소 구조물들의 크기는 마이크로 미터를 지나 수십~수백 나노미터에 이르고 있으며 또한 매우 광범위하게 일어나고 있다[1].

이러한 초소형 기기들을 만들기 위해서는 크기가 수십~수백 nm에 이르는 구조 및 형상들을 대량으로 만들 수 있는 제조기술이 필수적으로 요구된다. 그러나 현재 미소 구조물들을 제작하는데 가장 널리 사용되고 있는 포토리소그래피(photolithography) 방법은 미소 구조물들을 대량으로 제작하는데 많은 문제점들을 갖고 있다. 포토리소그래피는 빛의 회절현상에 의해 분해능이 제

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. 삼성코닝 정밀유리팀

3. UCLA 기계항공공학부

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과, hhuh@kaist.ac.kr

한되며, 또한 가공 과정이 순차적이기 때문에 시간 및 비용이 많이 든다. 또한 가공하려는 표면 상태에 많은 제약을 받는다. 이러한 한계 때문에 현재 대안적인 제조 기술들이 연구되고 있다[2].

이러한 대안적인 제조 기술들 중에 Chou등[3]이 제안한 나노임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography)는 효과적으로 나노 구조물을 제작할 수 있는 기술로서, 나노미터 크기의 패턴이 각인된 스탬프를 폴리머 레지스트 표면에 눌러 패턴을 전사하는 방법이다. 이 방법은 제작된 스탬프를 반복적으로 사용할 수 있고, 한 번에 대면적의 패턴을 전사할 수 있기 때문에 매우 경제적이다. 이러한 나노임프린트 리소그래피는 유리전이온도(glass transition temperature) 이상으로 가열된 고분자 기판에 패턴을 제작하기 때문에 핫엠보싱공정(hot embossing process)이라고도 한다. 이러한 나노임프린트 리소그래피에서는 패턴을 전사하는 과정 중에 스탬프와 레지스트 사이에 반드시 응착과 마찰이 수반되며 이 응착과 마찰은 패턴 전사의 품질을 떨어트리는 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 고분자 기판을 예열하지 않고 상온에서 직접 패턴을 제작하는 상온 나노임프린트 리소그래피(room temperature nanoimprint lithography)가 새로이 제안되고 있다[4]. Fig. 1에 도시한 상온 나노임프린트 리소그래피 공정은 나노임프린트 공정과 비교하여 예열단계 없이 바로 패턴이 전사되는 특징을 보인다. 그리고 나노임프린트 리소그래피공정에서는 폴리머가 유리전이온도 이상으로 가열되어 점탄성을 보이며 고분자 재료의 유동이 중요하게 작용한다. 이에 반해 상온에서는 임프린트 과정에서 스탬프가 레지스트 표면에 패턴을 빠른 속도로 전사하기 때문에 레지스트로 사용되는 폴리머의 변형률속도에 따른 영향을 무시할 수 없다.

나노 임프린트 리소그래피 공정에서 형상인자에 따른 성형성을 조사하기 위하여 유한요소법을 통한 연구가 많이 진행중이다. 유리전이온도에서 폴리머가 점성을 보이기 때문에 Young[5]은 폴리머를 점탄성유체로 가정하여 공정변수의 영향을 조사하였으며 Hirai 등은 초탄성소재로 가정하고 형상인자의 영향을 조사하였으나[6] 상온 나노임프린트 공정에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 폴리머의 변형률속도 민감도(strain-rate sensitivity)를 고려하여 상온 나노임프린트 공정에 관한 유한요소 해석을 수행하고 각 공정변수 및 형상인자에 따른 영향을 살펴보고자 한다.

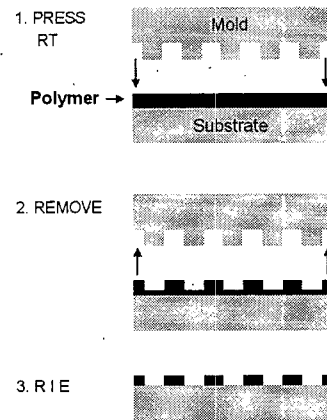


Fig. 1 Schematic description of a room temperature nanoimprint lithography.

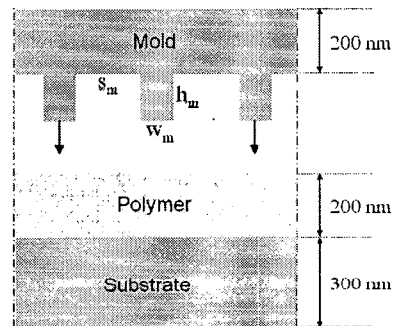


Fig. 2 Description of the unit cell for the analysis of the room temperature nanoimprint lithography.

2. 상온 나노임프린트 리소그래피공정의 유한요소 해석

2.1 유한요소 해석모델

상온 나노임프린트 리소그래피공정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 성형, 이형, 에칭공정으로 구성 되어 있다. 이러한 공정에서 폴리머 레지스트의 변형은 대부분 성형공정에서 수반되기 때문에 본 논문에서는 성형공정에 관한 유한요소 해석을 수행하였다. 이러한 성형공정에 사용되는 스탬프에는 수십개의 나노패턴이 위치한다. 본 논문에서는 시간상의 효율성을 높이기 위하여 유한요소 해석에서 수십개의 나노패턴을 모두 고려하지 않는 대신 Fig. 2에 도시한 해석모델을 하나의 단순구조체(unit cell)로 간주하고 양 끝단에 대칭경계조건을 추가하여 해석을 수행하였다. 유한요소 해석에

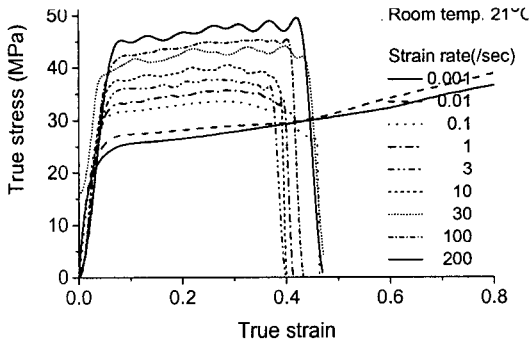


Fig. 3 Variation of true stress-strain curves of polypropylene with respect to strain rate.

서 기관의 폴리머는 폴리프로필렌으로 가정하였으며 폴리프로필렌의 변형률속도에 따른 응력-변형률선도를 Fig. 3 에 도시하였다. 이러한 변형률속도에 따른 소재특성을 고려하기 위하여 본 논문에서는 Johnson-Cook 모델을 사용하였다 [7]. 유한요소해석은 외연적상용프로그램인 LS-DYNA 3D 를 이용하였으며, 각 나노패턴의 높이(h_m) 및 폭(w_m) 과 간격(s_m) 을 각각 120 nm , 50 nm, 200 nm 로 가정하였다.

2.2 임프린팅 속도의 영향

변형률속도에 따른 임프린팅 공정의 영향을 살펴보기 위하여 임프린팅 속도를 각각 20 nm/s,

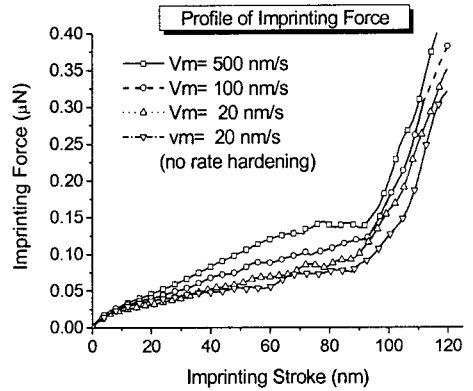


Fig. 4 Profiles of the imprinting force with respect to the imprinting speed

100 nm/s, 500 nm/s 로 고정하고 유한요소 해석을 수행하였다.

Fig. 4 에 임프린팅속도에 따른 임프린팅력의 변화를 도시하였다. 20 nm/s 의 임프린팅 속도에서 변형률속도 효과를 고려한 경우가 변형률속도경화에 의하여 임프린팅력이 증가하며 이러한 변형률속도경화의 영향으로 임프린팅속도가 증가할수록 임프린팅력이 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 5 에 임프린팅 속도 20 nm/s 에서 폴리머의 변형형상을 도시하였다. 스탬프가 하강하면서 폴리머를 밀어내기 시작하여 스탬프가 90 nm 하강할 때, 폴리머가 스탬프의 천장에 닿기 시작, 이때부터 임프린팅력이 급격하게 증가되어 나타난다.

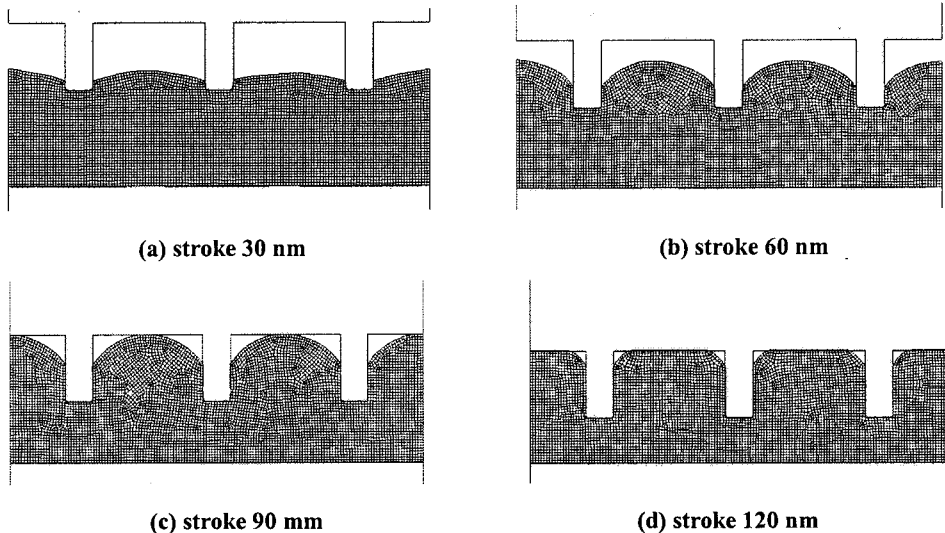


Fig. 5 Deformed shape of the polymer with the constant imprinting speed of 500 nm/sec

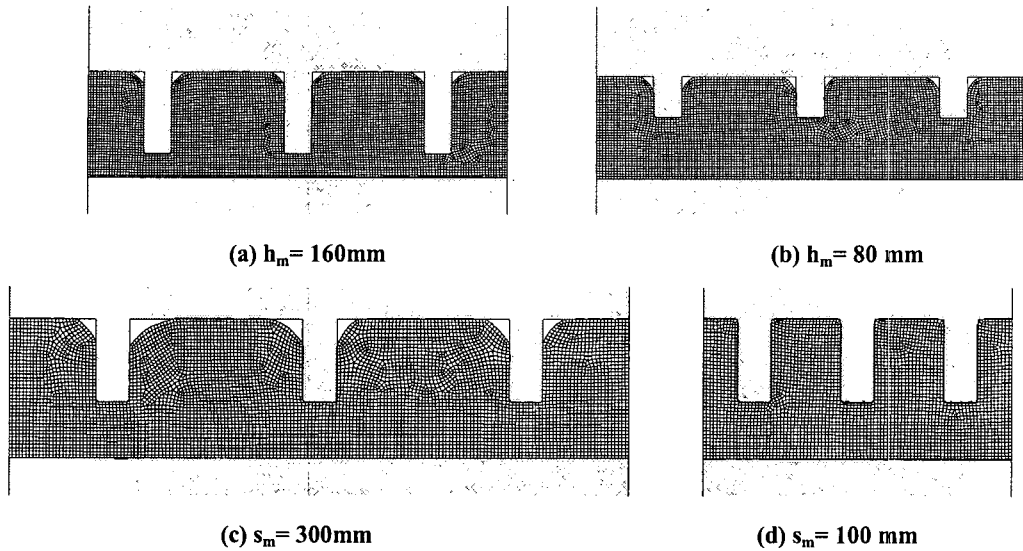


Fig. 6 Deformed shape of the polymer with respect to the imprinting nanopatterns.

2.3 임프린팅 패턴의 영향

상은 나노임프린트 리소그래피 공정에서 임프린팅 패턴의 영향을 살펴보기 위하여 20 nm/s 의 속도에 대하여, 각 패턴의 높이(h_m) 및 폭(w_m) 과 간격(s_m)에 대하여 각각 120 nm, 50 nm, 200 nm 를 기준으로 임프린팅 패턴의 높이 및 간격을 변화하여 해석을 수행하였다. Fig. 6 에 각 임프린팅 패턴에 대한 기판 폴리머의 변형형상을 도시하였다. 해석결과, 임프린팅 패턴의 간격이 기판의 변형형상에 크게 영향을 미치며, 간격이 좁을수록 패턴 성형이 잘 이루어지고 있음을 살펴 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 폴리머 기판의 변형률속도 효과를 고려하여 상온 나노임프린트 리소그래피공정에 관한 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 폴리머의 변형률속도경화에 의하여 변형형상 및 임프린팅력의 차이가 나타난다. 따라서 상온 나노임프린트 리소그래피의 해석에 있어서 변형률속도에 대한 고려가 필수적이다

(2) 임프린팅 속도가 증가할수록 임프린팅력이 증가하며 스탬프의 천장부와의 접촉이 지연된다

(3) 임프린팅 패턴이 기판이 변형형상에 크게 영향을 주며, 특히 각 패턴의 간격이 최종형상에 지배적이다.

참고 문헌

- [1] 강태곤, 권태현, 2005, 핫앰보싱 충전공정에 관한 수치해석, 한국소성가공학회 춘계학술대회, pp. 43~46.
- [2] 강지훈, 김광섭, 김경웅, 2004, 나노임프린트 리소그래피에서의 폴리머 레지스트의 변형에 관한 분자 동역학 시뮬레이션, 대한기계학회 추계학술대회, pp. 410~416.
- [3] S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom, 1996, Nanoimprint Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 14, No. 6, pp. 4129~4133.
- [4] P. S. Hong and H. H. Lee, 2003, Pattern Uniformity Control in Room-temperature Imprint Lithography, Appl. Phys. Lett. Vol. 83, No. 12, pp. 2441~2443.
- [5] W. -B. Young, 2005, Analysis of the Nanoimprint Lithography with a Viscous Model, Microelectron. Eng. Vol. 77, p. 405~411.
- [6] Y. Hirai, S. Yoshida and N. Takagi, 2003, Defect Analysis in Thermal Nanoimprint Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 21, No. 6, pp. 2765~2770.
- [7] G. R. Johnson and W. H. Cook, 1983, A Constitutive Model and Data for Metals subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics, pp.541~547.