

저온 나노임프린트 공정에서 압력과 폴리머 레지스트 초기 두께의 영향

김남웅*, 김국원⁺, 신호철**

(논문접수일 2008. 8. 28, 심사완료일 2008. 12. 31)

Effect of Pressure and Initial Polymer Resist Thickness on Low Temperature Nanoimprint Lithography

Nam Woong Kim*, Kug Weon Kim⁺, Hyo-Chol Sin**

Abstract

A major disadvantage of thermal nanoimprint lithography(NIL) is the thermal cycle, that is, heating over glass transition temperature and then cooling below it, which requires a significant amount of processing time and limits the throughput. One of the methods to overcome this disadvantage is to make the processing temperature lower. Accordingly, it is necessary to determine the effects on the processing parameters for thermal NIL at reduced temperatures and to optimize the parameters. This starts with a clear understanding of polymer material behavior during the NIL process. In this work, the squeezing and filling of thin polymer films into nanocavities during the low temperature thermal NIL have been investigated based upon a two-dimensional viscoelastic finite element analysis in order to understand how the process conditions affect a pattern quality; Pressure and initial polymer resist thickness dependency of cavity filling behaviors has been investigated.

Key Words : Low Temperature Nanoimprint(저온 나노임프린트), Pressure(압력), Initial Polymer Resist Thickness(폴리머 레지스트 초기 두께), Finite Element Method(유한요소법)

1. 서론

나노 임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography, NIL)

공정은 1990년대 중반 Chou 등^(1,2)에 의해 최초 제안된 이래, 플루이딕스(fluidics), 광학, 센서 등의 마이크로/나노일렉트로닉스 분야나 반도체 및 디스플레이 산업에서서 기존

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

+ 교신저자, 순천향대학교 기계공학과 (kimkug1@sch.ac.kr)

주소: 336-745 충남 아산시 신창면 읍내리 646번지

** 서울대학교 기계항공공학부

고가의 포토 리소그래피 공정을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 주목 받고 있다. NIL은 몰드(혹은 스템프)에 기 형성되어 있는 나노 구조의 패턴 형상을 기계적 가압을 통해 반복적으로 기판에 전사시키는 기술로서, 사용되는 레지스트의 종류 및 경화시키는 방법에 따라 대체적으로 열 나노임프린트 리소그래피(thermal NIL)와 자외선 나노임프린트 리소그래피(UV NIL)로 구별된다.

Thermal NIL 공정을 통해 성공적으로 나노 패턴을 전사하기 위해서는 적절한 공정 조건 즉, 압력, 온도, 시간 등의 선택이 필요하다. 특히 대량생산에 적합한 대면적 NIL 공정에서는 몰드 혹은 스템프의 전면적에 걸쳐 패턴의 밀도나 크기가 변화하는 경우가 많다. 이러한 경우에 잔류층(residual layer)을 최소화하고 패턴 균일도(pattern uniformity)를 높일 수 있는 최적의 공정 조건을 찾는 것은 쉽지 않은 일이다. 종래에는 공정 조건을 설정할 때, 주로 실험적 연구나 제작자의 경험에 의존하는 경우가 많았다. 이에 따라 NIL 공정에 대한 해석적 연구의 필요성이 증대되고 있다. 최근까지 많은 연구자들이 최적의 공정 조건을 구하기 위해 비선형 탄성^(3,4), 점탄성⁽⁵⁾, 점성^(6,7), 점소성⁽⁸⁾ 등 다양한 구성 방정식 모델을 이용해 NIL 공정에 대한 수치해석적 접근을 시도해왔다. 언급한 연구의 대부분은 유리전이온도(glass transition temperature, T_g)로부터 80°C 이상의 일반적인 공정온도 조건을 가정하고 있다.

Thermal NIL 공정은 일반적으로 폴리머 레지스트를 T_g 로부터 80°C 이상으로 가열했다가 다시 T_g 이하로 냉각하는 가열-냉각 주기를 갖기 때문에⁽²⁾ 생산성 면에서는 UV NIL 공정에 비해 상대적으로 불리하다. 이에 저온 공정을 도입한다면 생산성을 향상시킬 수 있을 것이다. 저온 공정은 언급한 생산성 측면의 장점 외에 고온에서 내열 특성이 나쁜 기판이나 폴리머 재료를 사용하는 경우에 유리하다. 또한 몰드와 기판의 재질이 서로 다른 경우에, 열팽창 차이에 따르는 패턴 치수의 열화나 정렬 문제에 대해 장점을 가지고 있다. 이에 따라 저온 NIL 공정에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다. 그러나 현재까지 발표된 저온 공정에 대한 연구는 그리 많지 않은 실정이다. 그 중 대표적인 것으로 Khang and Lee⁽⁹⁾에 의해 제안된 R-NIL(room-temperature imprint lithography)을 들 수 있다. 이 방법은 폴리머 재료에 솔벤트 처리를 하여 점도를 낮춘 후, 상온에서 NIL 공정을 수행하는 것으로 최소 60nm 패턴까지 성공적으로 전사했다고 보고되고 있다. 그러나 솔벤트 처리 및 후증발 공정 그리고 300~1500 bar에 달하는 초고압 공정을 사용하였기 때문에 양산성에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 한편 Alkai⁽¹⁰⁾는 질화 규소(silicon nitride, SixNy) 몰드를 이용해 58°C에

서 polymethyl methacrylate(PMMA)에 최소 70nm grating 패턴을 성공적으로 전사하였다고 보고하였다. 여기서도 역시 100 bar 정도의 고압 공정이 사용되었다. 이러한 실험적 연구들에서는 주로 공정의 새로운 제시라는 측면에 치중하여 폴리머의 거동에 대한 설명은 부족하였다.

본 논문에서는 저자들의 이전 연구^(5,15)에 이어 폴리머가 반용융상태(semi-molten state)가 되는 $T = T_g + 20^\circ\text{C}$ 의 저온 온도 범위를 고려하여, thermal NIL 공정 중 가압에 의한 폴리머의 충전 과정을 유한요소해석 하였다. 이를 통하여 압력 및 폴리머 레지스트 초기 코팅 두께의 두 공정 변수가 NIL 공정에 미치는 영향을 보다 자세히 분석하였다. 고려되는 폴리머는 PMMA이며 점탄성체로 가정되어 재료의 응력 완화 현상을 고려하였다.

2. 열-나노임프린트 공정해석

2.1 이론 및 물성치

점탄성체의 응력해석을 위한 지배방정식 및 적합조건은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2 \quad (2)$$

여기서 $\rho, u_i, \sigma_{ij}, \epsilon_{ij}, f_i$ 는 각각 밀도, 변위, 응력, 변형, 외력을 나타낸다.

재료의 거동에서 탄성(가역적)인 부분과 점성(비가역적)인 부분이 동시에 나타날 때, 그 거동을 점탄성(viscoelasticity)이라 한다. 반용융상태에서 thermal NIL 공정을 수행할 때, 폴리머는 압력에 대해 즉각적으로 탄성 변형을 하고, 시간이 지남에 따라 일정한 변형을 유지하는데 필요한 가압력이 점점 줄어들게 되는데 이는 점성에 의한 재료 내부의 응력완화 현상 때문이다. 점탄성 모델은 스프링과 대수 포트의 기계요소로 나타낼 수 있는데, 본 논문에서는 일반화된 맥스웰 모델(generalized Maxwell model)을 사용한다. 다음은 Duhammel 적분형태로 나타낸, 등방성 점탄성체의 구성 방정식을 나타낸다.

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t G_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\epsilon_{kl}}{d\tau} d\tau + G_{ijkl}(t)\epsilon_{kl}(0) \quad (3)$$

여기서 $G_{ijkl}(t)$ 는 응력완화계수(stress relaxation modulus), t 는 현재 시간, τ 는 과거 시간을 나타낸다. 응력완화계수는 다음과 같이 이산화된 스펙트럼을 갖는 Prony series의 형태로 나타낼 수 있다.

$$G_{ijkl}(t) = G_{ijkl,\infty} + \sum_{n=1}^N G_{ijkl_n} e^{-\frac{t}{\lambda_n}} \quad (4)$$

여기서 $G_{ijkl,\infty}$ 은 무한시간에서의 계수를 나타내며 G_{ijkl_n} 은 완화 강도(relaxation strength), λ_n 은 완화 시간(relaxation time), N 은 고려된 Prony series의 총개수를 나타낸다.

열탄성 문제에 대해서, 해석 대상을 열유변학적 단순(thermorheologically simple)재료로 가정하면, t 와 τ 는 시간-온도의 중첩을 통해, 환산시간(reduced time) t' 와 τ' 로 대체할 수 있다. 환산시간 $t'(T,t)$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t' = \int_0^t \frac{1}{a_T(t)} dt \quad (5)$$

여기서 온도-시간 이동인자(shift factor) a_T 는 기준온도(reference temperature) T_0 에서의 응답함수에 대해 새로운 온도 T 에서의 응답함수의 관계를 나타내는 물성치이다. 본 논문에서는 이동인자로서 WLF(Williams-Landel-Ferry) 식을 사용한다.

$$\log_{10} a_T(T) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (6)$$

본 논문에서는 McLoughlin과 Tobolsky의 측정결과에 따른 PMMA의 마스터 응력완화 곡선을 Schapery의 collocation method를 통해 curve fitting하여, Table 1에 나타낸 10개 요소의 Prony series 계수를 구하였다⁽¹¹⁻¹³⁾. Fig. 1은 구해진 Prony series를 이용해서 구한 전단 응력완화 곡선을 나타낸다.

Table 1 Prony series constants for the shear stress relaxation functions of PMMA

n	λ_n (sec)	G_n (MPa)
1	7.92E-05	1.40E+02
2	6.12E-03	2.25E+02
3	1.79E-01	1.71E+02
4	2.67E+00	9.05E+01
5	2.75E+01	2.63E+01
6	2.16E+02	8.55E+00
7	2.49E+03	2.13E+00
8	4.89E+04	6.68E-01
9	1.94E+06	2.71E-01
10	1.39E+08	1.02E-01

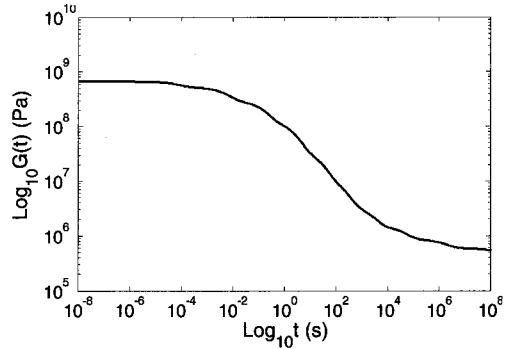


Fig. 1 Master curve for polymethyl methacrylate (PMMA)

여기서 G 는 2.04MPa이다. 한편 PMMA의 T_g 는 109°C, WLF 식의 T_0 는 T_g , C_1 과 C_2 는 같은 McLoughlin과 Tobolsky의 측정결과로부터 각각 16.14, 56을 사용하였다^(11,12).

2.2 유한요소모델

몰드가 한 방향으로 일정한 형상을 갖는 사각평판인 경우 그 방향에 수직인 단면에 대해서 2차원 해석이 가능하다. 여기에 몰드의 요철부위가 line and space 형태로 규칙적으로 배열되어있다고 가정하고 대칭성을 고려하면 Fig. 2와 같은 단위 형상을 갖는 2차원 평면변형률 유한요소모델을 생각할 수 있다. 그림에서 레지스트의 초기 두께는 $2h_0$, 몰드의 돌출부 너비 및 높이는 각각 $2S$ 와 h_m , 중공부 너비는 $2W$ 로 정의한다.

본 논문의 해석에는 상용 비선형해석 전문 유한요소해석 프로그램인 MARC가 사용되었다. Thermal NIL에 사용되는 몰드는 대개 quartz 등의 강성이 높은 재료로 제작되어 그 강성이 폴리머에 비해 대단히 크다. 이에 따라 몰드는 강

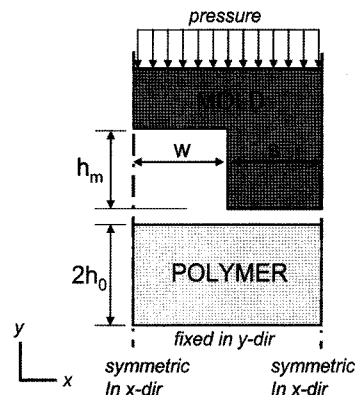


Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

체면으로 가정하였다. 몰드의 가압을 구현함에 있어, 속도나 변위 경계 조건이 아닌 압력하중 조건을 부여하여, 실제 thermal NIL 공정조건을 모사할 수 있도록 하였다. 한편 몰드와 폴리머 레지스트 간의 접촉해석을 수행할 때, 몰드의 돌출부의 삽입에 의해 큰 변형이 생기는데 이에 따른 요소의 왜곡(distortion)이 커지면, 부정확한 결과가 나올 수 있기 때문에 remesh 기법을 사용하여 해석의 정확성을 높였다. 공정환경은 진공으로 고려하여 몰드의 증공부에 갇힐 수 있는 공기의 거동은 고려하지 않았다.

몰드 패턴의 형태 및 폴리머 레지스트의 초기 두께에 따른 thermal NIL 결과에의 민감도를 분석하기 위해, h_m 과 $(S+W)$ 를 100nm의 기본 치수로 고정하고, 다음과 같이 패턴의 밀도를 나타내는 duty ratio(DR) 및 패턴 깊이에 대한 폴리머 레지

스트의 초기 코팅 두께비를 나타내는 thickness ratio(TR)의 매개변수를 정의하였다.

$$DR = W / (S + W) \quad (7)$$

$$TR = 2h_0 / h_m \quad (8)$$

해석에서 고려되는 공정조건 중 압력은 특정시간 t_r 까지 선형적으로 증가하여, 이후 일정치를 유지하는 것으로 설정되었다.

3. 해석 결과

3.1 임프린팅 압력의 영향

먼저 특정 값의 임프린팅 압력에 의해 완전 충전이 이루어

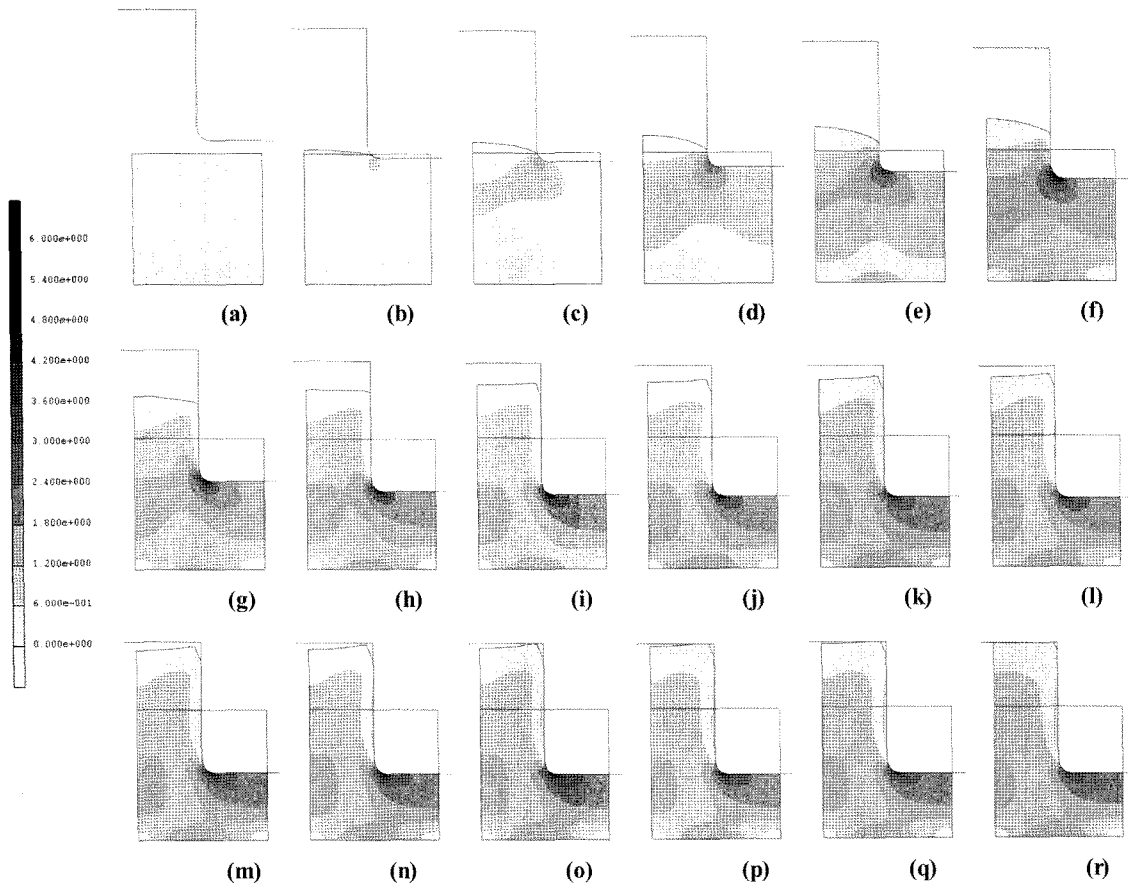


Fig. 3 Deformation profiles and Von Mises stress distribution in MPa with time of (a) 0 s, (b) 1 s, (c) 2 s, (d) 3 s, (e) 4 s, (f) 5 s, (g) 10 s, (h) 20 s, (i) 30 s, (j) 40 s, (k) 50 s, (l) 60 s, (m) 70 s, (n) 80 s, (o) 90 s, (p) 110 s, (q) 120 s, (r) 140 s ($P = 20$ bar, $T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5$ s, $DR = 0.5$, $TR = 1$)

지는 과정을 살펴 보기 위해 $P = 20 \text{ bar}$, $T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5 \text{ s}$, $TR = 1$ 의 공정 조건 및 $DR = 0.5$ 의 패턴 형상 조건을 갖는 경우에 대해 해석을 수행하였다. 각 시간 별로 PMMA 레지스트의 변형 양상 및 Von Mises 응력 분포를 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)~(f)는 공정개시 후, $t = 5 \text{ s}$ 까지의 결과로서 이 시간대역에서는 임프린팅 압력이 0부터 20 bar까지 선형적으로 상승하는 구간이다. 변형의 양상을 살펴보면 다음과 같다. 몰드 돌출부의 스퀴징에 의해 돌출부 하부의 PMMA 레지스트는 압축 및 전단응력을 받는다. 따라서 자유 경계를 갖는 중공부 하부 PMMA 레지스트의 선단은 중공부를 따라 충전이 이루어지게 되며 동시에 몰드는 가압축으로 전진하게 된다. 이때, 자유 표면의 형상은 단일 피크 즉, 위로 볼록한 형태를 갖는다. Fig. 3(g)~(l)은 $t = 5 \text{ s}$ 부터 충전이 거의 완료되는 $t = 140 \text{ s}$ 까지의 결과이다. 이 구간에서 임프린팅 압력은 20 bar로 일정하게 유지됨에도 불구하고 몰드는 지속적으로 전진하고 있는데 이는 점탄성 재료의 시간의존효과 즉, 응력완화 현상 때문이다. 시간이 진행됨에 따라 PMMA 레지스트의 변형은 느리지만 지속적으로 진행된다. 자유 표면의 형상은 20 s를 기점으로 위로 오목하게 변하면서 이중 피크의 양상을 보인다. 시간이 흘러 90 s 정도가 되면 이중 피크의 첨점이 몰드 중공부의 천정에 접촉하기 시작하며, 이후 가압시간이 지속됨에 따라 중공부 위상단의 미충전 부분도 부피가 줄어들어 결국 충전이 완료된다. 상기 결과는 Juang 등⁽¹⁴⁾이 $T = T_g + 10 \sim 30^\circ\text{C}$ 의 공정 온도에서 PMMA를 포함한 세 종류의 폴리머에 대해 NIL 공정을 수행한 실험결과와 정성적으로 일치하

는 것이다. 즉, 가압 초기 즉각적인 탄성 변형에 의해 임프린팅 깊이가 빠르게 증가하고, 이후 점성 효과에 의해 천천히 증가하는 물리적 현상을 잘 묘사하고 있는 것이다.

압력 증가에 따른 임프린팅 깊이를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 전술하였듯이 특정 시점에서 임프린팅 압력과 임프린팅 깊이는 서로 비례에 가까운 관계를 가진다. 임프린팅 압력이 20 bar에 달하면 120 s 이후 임프린팅 깊이가 일정치에 수렴하는 현상을 보이는데 이는 충전이 거의 완료되었기 때문이다. 본 연구에서 고려하고 있는 좌우 대칭 형태의 유한요소모델은 충전이 완료되고 나면, 폴리머의 자유 선단이 모두 몰드의 벽에 접촉하기 때문에 충전 완료 후에는 모든 경계에서 압축력을 받게 된다. 따라서 임프린팅 깊이는 매우 미미하게 증가한다. 그러나 실제의 공정에서는 몰드의 좌우 끝단이 자유 경계이므로 몰드 패턴의 충전이 이루어진 이후에도 완만한 속도로 임프린팅 깊이가 증가한다.

한편 본 논문에서 다루는 저온 NIL 공정이 아닌 일반적인 온도 범위($T > T_g + 80^\circ\text{C}$)에서의 임프린팅 특성은 스퀴즈 유동(squeeze flow) 이론식에 따라 분석이 가능하다^(15,16).

$$\frac{1}{h^2(t)} = \frac{1}{h_0^2} + \frac{2P(S+W)}{\eta_0 S^3} t \quad (9)$$

여기서 $h(t)$ 는 몰드 돌출부의 가압축 방향 높이, P 는 임프린팅 압력, η_0 는 제로 전단 점도(zero shear viscosity)를 나타낸다. 식 (9)에서 임프린팅 깊이(imprinting depth, $h_0 - h(t)$)는 압력과 비례적인 관계를 갖지 않는다.

본 연구의 점탄성 모델에 기반한 결과와 스퀴즈 유동 이론식 결과가 서로 차이점을 보이는 이유는 본 연구의 공정 온도가 낮아서 폴리머 레지스트가 탄성 거동을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 저온의 thermal NIL 공정에서 압력의 민감도는 일반적인 공정 조건과 다르며 실제 공정시 주의하여야 함을 알 수 있었다.

3.2 폴리머 레지스트 초기 코팅 두께의 영향

본 절에서는 압력 및 온도를 균일하게 유지한 상태에서 PMMA 레지스트의 초기 코팅 두께를 변화시키면서 계산된 결과에 대해 논한다. 공통적으로 적용된 공정 조건은 $P = 5 \text{ bar}$, $T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5 \text{ s}$, $DR = 0.5$ 이며 계산된 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 먼저 변형의 양상에 대해 설명한다. Fig. 5(a)~(g)는 $t = 5 \text{ s}$ 시점의 결과를 나타낸 것으로, 공정 개시 후 임프린팅 압력이 선형적으로 증가되어 설정치에 도달한 시점이다. 이후 임프린팅 압력은 일정하게 유지된다. TR

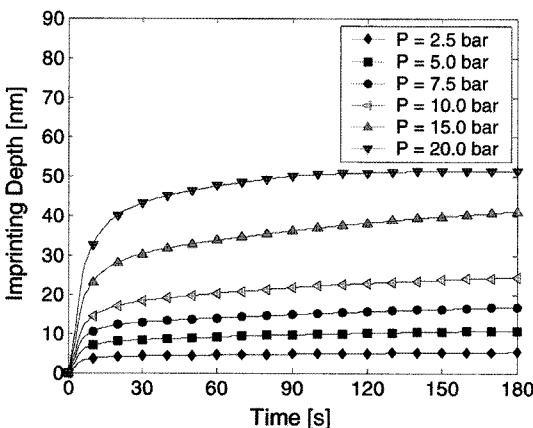


Fig. 4 Imprinting depth with time($T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5 \text{ s}$, $DR = 0.5$, $TR = 1$)

= 0.25를 제외하면 몰드 패턴 중공부로 충전되는 PMMA의 자유 선단이 모두 볼록한 단일피크의 형태를 보였다. Fig. 5(h)~(n) 은 $t = 120$ s 시점에서의 결과로서 시간이 흐름에 따라 TR에 관계없이 폴리머 레지스트의 선단 자유 표면에서 오목한 형태의 이중 피크 형상으로 변하는 것을 볼 수 있다.

주목할만한 부분은 초기 코팅 두께의 변화에 따른 임프린팅 깊이의 변화 추이이다. 고전적인 두 원판 사이의 스퀴즈 유동식에 의하면, 폴리머 초기 코팅 두께의 절반을 스퀴즈하는데 걸리는 시간은 다음 식으로부터 구할 수 있다^(15,16).

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{9\pi}{16} \frac{\eta_0}{F} \frac{R^4}{h_0^2} \quad (10)$$

여기서 R 은 원판 반경, F 는 가압력을 나타낸다. 이를 NIL 공정에 적용해 보면, 만일 몰드의 돌출부 및 중공부 높いや

폴리머 초기 코팅 두께가 공통적으로 같다면, 몰드 중공부의 절반을 충전하는데 걸리는 시간은 폴리머의 초기 코팅 두께의 제곱에 반비례한다. 여기서 몰드 돌출부 높이가 고정된 상태로 폴리머 초기 코팅 두께가 두꺼워 진다면, 그만큼 충전 공정에 걸리는 시간은 적게 드는 것이다.

그러나 점탄성체 가정에 의한 본 연구의 해석 결과는 상기 스퀴즈 유동식에 의한 해석결과와 다른 양상을 보였다. 즉, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 TR이 1보다 작을 때에는 스퀴즈 유동식과 유사하게 PMMA의 초기 코팅 두께가 증가함에 따라 임프린팅 깊이는 증가 추세를 보였다. 그러나 TR이 1 이상이 되면, PMMA 초기 코팅 두께의 증가가 임프린팅 깊이의 증가에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 스퀴즈 유동의 경우, 상하 경계에서의 no slip 조건으로 인해, 폴리머의 초기 두께가 두꺼워지면 경계에서의 마찰의 영향에서 벗어나 유

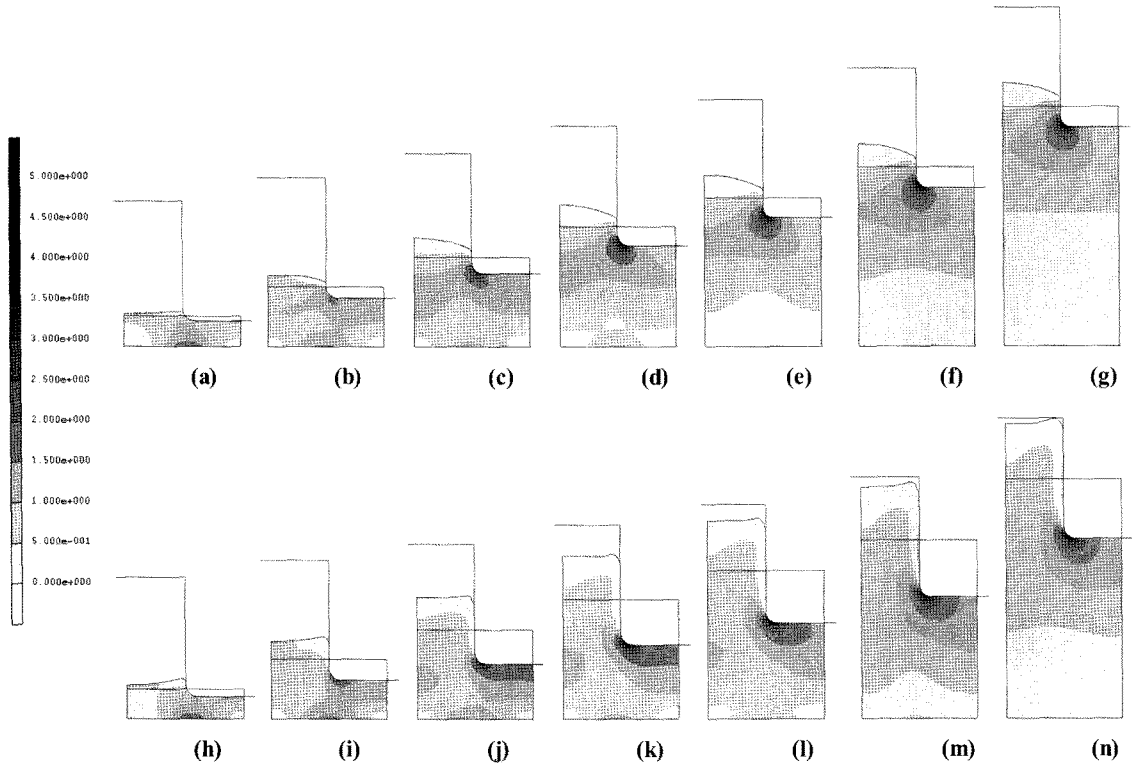


Fig. 5 Cross-section profiles and Von Mises stress distributions in MPa at $t = 5$ s ((a)~(g)) and $t = 120$ s ((h)~(n)) for various initial polymer thicknesses of (a) $TR = 0.25$, (b) $TR = 0.50$, (c) $TR = 0.75$, (d) $TR = 1.00$, (e) $TR = 1.25$, (f) $TR = 1.50$, (g) $TR = 2.00$, (h) $TR = 0.25$, (i) $TR = 0.50$, (j) $TR = 0.75$, (k) $TR = 1.00$, (l) $TR = 1.25$, (m) $TR = 1.50$, (n) $TR = 2.00$ ($P = 15$ bar, $T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5$ s, $DR = 0.5$)

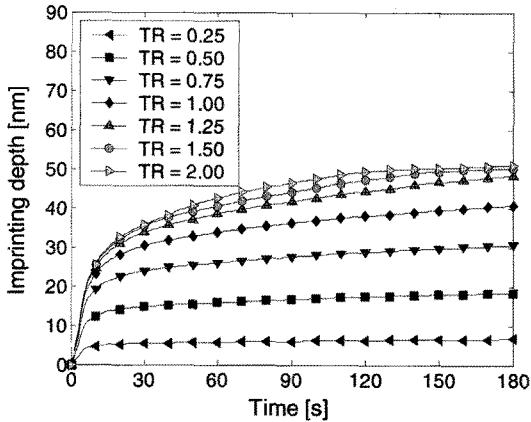


Fig. 6 Imprinting depth with time for the variation of initial polymer thickness ($P = 15$ bar, $T = T_g + 20^\circ\text{C}$, $t_r = 5$ s, $DR = 0.5$)

동지항이 작아진다. 따라서 폴리머의 초기 두께가 두꺼워지면 초기 두께의 절반을 스쿠즈 하는 시간이 줄어들게 되는 것이다. 물론 100% 스쿠즈 상태에 가까워질수록 스쿠즈 속도는 점점 줄어들게 될 것이다. 점탄성 가정에 기반한 본 연구의 해석에서는 기본적으로 벽면의 no slip 경계 조건이 적용되지 않아 스쿠즈 유동의 가정과는 차이점을 갖는다. 한편 Fig. 5에서 보면 하중 경계에서 거리가 충분히 떨어진 지점 즉, 하부 기판 근처 재료의 응력 분포가 TR 이 1.0 이상의 경우에 대해서는 TR 의 증가에 따라 그 응력 분포 및 절대치의 차이가 크지 않은 것을 보았을 때, 거리 효과(distant effect)를 가지고 있는 것으로 사료된다. 즉 재료에 임프린팅에 의해 국부적인 변형이 가해질 때, 이로부터 멀리 떨어진 재료는 큰 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 해석 결과에 따르면, 저온의 NIL 공정에서 폴리머의 초기 두께를 특정치 이상으로 두껍게 코팅하는 것은 공정 후 남게 되는 잔류층만 두껍게 할 뿐, 공정속도 면에서는 장점이 없는 것으로 사료된다.

4. 결론

폴리머가 반용융상태(semi-molten state)로 존재하는 $T = T_g + 20^\circ\text{C}$ 정도의 저온 Thermal NIL공정에 대해, 폴리머의 응력완화특성을 고려한 점탄성 유한요소해석을 수행하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 저온 NIL 공정을 수행함에 있어, 임프린팅압력의 변화에 따른 임프린팅 깊이(imprinting depth)의 관계는 대체적으로 비례적인 관계를 보였다. 이는 일반적인 NIL 공정온도($T > T_g + 80^\circ\text{C}$)에서 보이는 임프린팅 특성과는 구별되는 것으로서 공정 온도가 낮게 설정된 관계로 폴리머 레지스트의 탄성 효과가 크기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) 폴리머 레지스트의 초기 코팅 두께에 대한 영향을 보았을 때, 동일 압력, 온도 조건 하에 TR (thickness ratio)을 증가시키면, TR 이 1.0 정도까지는 폴리머 레지스트의 초기 코팅 두께와 임프린팅 깊이가 비교적 비례 관계를 보이나, TR 이 그 이상 증가하면 임프린팅 깊이에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 반면 순수 점성유체 가정 하의 스쿠즈 유동 이론을 적용할 수 있는 일반적인 공정온도($T > T_g + 80^\circ\text{C}$) 조건에서는 초기 두께가 증가할수록 임프린팅 속도가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 상이점은 다음과 같이 설명할 수 있다. 점성 유체의 경우, 벽면에서 no slip 경계조건에 의한 유동 영역의 마찰 효과가 줄기 때문에, 몰드 돌출부 및 중공구 높이가 고정된다고 가정하면, 폴리머 레지스트 초기 코팅 두께가 증가할수록 충전시간(filling time)이 축진된다. 반면 본 연구의 점탄성 고체의 거동에는 이러한 영향이 거의 나타나지 않는다.

따라서 이상의 해석결과로부터 저온 NIL 공정은 일반적인 고온 NIL 공정과 특성이 다르기 때문에 주의를 요함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Chou, S., and Krauss, P., 1997, "Imprint Lithography with Sub-10nm Feature Size and High Throughput," *Microelectron. Eng.*, Vol. 35, pp. 237-240.
- (2) Guo, L. J., 2004, "Recent Progress in Nanoimprint Technology and Its Applications," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. R123-R141.
- (3) Hirai, Y., Fujiwara, M., Okuno, T., Tanaka, Y., Endo, M., Irie, S., Nakagawa, K., and Sasago, M., 2001, "Study of the Resist Deformation in Nanoimprint Lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 19, pp. 2811-2815.
- (4) Hirai, Y., Konish, T., Yoshikawa, T., and Yoshida, S., 2004, "Simulation and Experimental Study of

- Polymer Deformation in Nanoimprint Lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 22, pp. 3288~3293.
- (5) Kim, N. W., Kim, K. W., and Sin, H.-C., 2007, “A Viscoelastic Finite Element Analysis of Thermal Nanoimprint Lithography Process,” *Journal of the Microelectronics & Packaging Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 1~7.
- (6) Young, W. B., 2005, “Analysis of the Nanoimprint Lithography with a Viscous Model,” *Microelectron. Eng.*, Vol. 77, pp. 405~411.
- (7) Rowland, H. D., and King, W. P., 2004, “Polymer Deformation and Filling Modes During Microembossing,” *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 14, pp. 1625~1632.
- (8) Son, J. W., Song, N. H., Rhim, S. H., and Oh, S. I., 2007, “Prediction of Defects in Nano-imprint Lithography Using FEM Simulation,” *Key Eng. Mater.*, Vols. 345~346, pp. 665~668.
- (9) Khang, D. Y., and Lee, H. H., 2000, “Room temperature Imprint Lithography by Solvent Vapor Treatment,” *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 76, No. 7, pp. 870~872.
- (10) Alkaisi, M. M., Blaikie, R. J., and McNab, S. J., 2001, “Low Temperature Nanoimprint Lithography Using Silicon Nitride Molds,” *Microelectron. Eng.*, Vols. 57~58, pp. 367~373.
- (11) McLoughlin, J. R., and Tobolsky, A.V., 1952, “The Viscoelastic Behavior of Polymethyl Methacrylate,” *Journal of Colloid Science*, Vol. 7, pp. 555~568.
- (12) Takahashi, M., Shen, M. C., Shen, Taylor, R. B., and Tobolsky, A.V., 1964, “Master Curves for Some Amorphous Polymers,” *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 8, pp. 1549~1561.
- (13) Cost, T. L. and Becker, E. B., 1970, “A Multidata Method of Approximate Laplace Transform Inversion,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 2, pp. 207~219.
- (14) Juang, Y. J., Lee, L. J., and Koelling, K. W., 2002, “Hot Embossing in Microfabrication. Part I: Experimental,” *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, pp. 539~550.
- (15) Kim, K. W., and Kim, N. W., 2008, “Analytical Approach of Polymer Flow in Thermal Nanoimprint Lithography,” *Trans. of the KSMTE*, Vol. 17, No. 3, pp. 20~26.
- (16) Schiff, H., and Heyderman, L. J. in: Sotomayor Torres C. M. (Ed.), 2003, *Alternative Lithography*, Kluwer Academic Plenum, New York.