

열-나노임프린트 리소그래피 공정에서의 폴리머 유동에 대한 해석적 접근

김국원*, 김남웅⁺

(논문접수일 2007. 9. 7, 심사완료일 2008. 3. 25)

Analytical Approach of Polymer Flow in Thermal Nanoimprint Lithography

Kug Weon Kim*, Nam Woong Kim⁺

Abstract

Nanoimprint lithography(NIL) is becoming next generation lithography of significant interest due to its low cost and a potential patterning resolution of 10nm or less. Success of the NIL relies on the adequate conditions of pressure, temperature and time. To have the adequate conditions for NIL, one has to understand the polymer flowing behavior during the imprinting process. In this paper, an analytical approach of polymer flow in thermal NIL was performed based on the squeeze flow with partial slip boundary conditions. Velocity profiles and pressure distributions of the polymer flow were obtained and imprinting forces and residual thickness were predicted with the consideration of the slip velocity between the polymer and the mold/substrate. The results show that the consideration of the slip is very important for investigating the polymer flow in Thermal NIL.

Key Words : Thermal nanoimprint lithography(열-나노임프린트 리소그래피), Polymer flow(폴리머 유동), Squeeze flow(스퀴즈 유동), Slip velocity(미끄러짐 속도)

1. 서론

최근 나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography, 이후 NIL) 공정이 마이크로/나노 스케일의 소자 개발에 있어서 경제적으로 대량 생산할 수 있는 기술로 주목 받고 있

다. 이 방법은 BT, IT 및 NT 분야에서 폭넓게 응용될 수 있으며, 특히 반도체 및 디스플레이 산업에 이용되고 있는 고가의 포토 리소그래피 공정을 대체할 수 있는 유력한 대안으로 인식되고 있다⁽¹⁾.

전형적인 NIL 공정은, 표면에 나노형상을 가지는 몰드

* 순천향대학교 기계공학과 (kimkug1@sch.ac.kr)
주소: 336-745 충남 아산시 신창면 읍내리 646
⁺ 서울대학교 기계항공공학부 대학원

(혹은 스탬프, 템플리트 라고 부름)를 가압하여 기판 위의 레지스트에 물리적 혹은 화학적 방법으로 패턴을 복제하게 된다. 여러 가지 타입의 NIL 중 열 나노임프린트 리소그래피(이하 Thermal NIL)는 공정이 간단하여 현재까지 많은 연구가 이루어지고 있다^(2,3). 이 방법은 레지스트로 사용되는 고분자 소재를 가열하여 점성을 낮게 만든 후 몰드에 압력을 가한 상태로 냉각시켜 몰드의 형상을 전사하게 된다.

Thermal NIL공정에서 적절한 공정조건(압력, 온도, 시간 등)을 선정하기 위해서는 임프린트 과정 중 폴리머의 거동에 대한 올바른 이해가 필요하다. 최근 수많은 연구자들이 Thermal NIL공정 중의 폴리머 거동에 대해서 해석적 혹은 유한요소법을 이용한 수치적 방법으로 연구를 수행하고 있으며, 폴리머의 거동은 점성유동, 초탄성 및 점소성 등으로 다양하게 가정되고 있다. Hirai 등^(4,5)은 초탄성 재료의 구성 방정식인 Mooney-Rivlin 모델을 이용해 가압 중의 폴리머의 거동에 대한 유한요소해석을 수행하여 폴리머의 초기 두께와 몰드 패턴의 형상에 따른 폴리머의 거동 특성을 분석하였다. Hocheng과 Nien⁽⁶⁾은 같은 초탄성 모델을 이용해 NIL 공정에서 패턴 밀도 및 마찰의 민감도를 분석했다. Young⁽⁷⁾은 폴리머를 비압축성 점성 유체로 가정하여 유한요소해석을 수행하였다. 이러한 유한요소법을 이용한 연구들은 패턴 형상을 고려할 수 있고 폴리머의 거동을 다양하게 가정할 수 있는 장점이 있는 반면 계산 시간과 해석의 정확도 측면에서 아직까지 많은 문제점을 가지고 있다. 특히 폴리머의 변형에 따른 재 배위 과정에서 많은 오류를 내포하고 있으며 안정적인 수렴성을 보장하지 못하고 있다. Thermal NIL 공정에서의 폴리머 거동에 대한 해석적 연구는 별로 많지 않다. Hcyderman 등⁽⁸⁾과 Jeong 등⁽⁹⁾은 점성유체의 간단한 스퀴즈 유동으로 가정하여 충전시간, 공정에 필요한 힘, 폴리머 두께 변화 등을 계산하였다.

본 논문은 Thermal NIL공정에서 폴리머의 거동에 대한 해석적 연구로서, 폴리머와 몰드/기판 사이에서의 slip 을 고려한 모델링을 수행하여 수식화하였다. 이전의 연구들^(8,9)에서는 no slip 조건이라 가정하였으나, 일반적으로 폴리머와 몰드사이에는 anti-adhesion 층이 존재하므로 보다 정확한 해석을 위해서는 slip을 고려해야 한다. 해석적 모델링을 바탕으로 Thermal NIL공정조건과 폴리머 두께(레지스트 잔류층)간의 관계를 살펴보고 slip이 임프린트 공정에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 폴리머 유동에 대한 모델링

2.1 열-나노임프린트 공정에서의 폴리머 거동

Thermal NIL에서 레지스트로 사용되는 열가소성 폴리머의 온도에 따른 거동은 Fig. 1과 같다. 유리전이온도(Glass Transition Temperature, Tg) 이하에서는 탄성체로 가정되며, Tg 이상에서는 점탄성체로 가정된다. 이 영역에서 탄성계수와 점성은 급격히 감소되며 변형은 비가역성을 띠게 된다. 온도가 더욱 올라 유동온도(Tf) 이상에서는 폴리머의 거동은 유체와 같아진다.

일반적으로 폴리머의 점도 η 은 전단변형률속도 $\dot{\gamma}$ 에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \eta_0 & , \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_0 \\ \eta_0(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)^{n-1} & , \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \end{cases} \quad (1)$$

$\dot{\gamma}$ 가 한계전단변형률속도(limit shear strain rate) $\dot{\gamma}_0$ 보다 작은 경우 점도는 일정한 값으로 가정되며 이 때의 값을 제로 전단점도(zero shear viscosity) η_0 라 부른다. $\dot{\gamma}$ 가 $\dot{\gamma}_0$ 보다 큰 경우 점도는 지수법칙을 따르며 감소된다. 대부분의 임프린트 공정에서 전단변형률속도의 최대값이 $\dot{\gamma}_0$ 보다 작기 때문에 $\eta = \eta_0$ 로 가정되며 뉴턴유동으로 취급할 수 있다.

2.2 수학적 모델링

몰드가 한 방향으로 일정한 형상을 가지는 사각평판인 경우 그 방향에 수직인 단면에 대해서 2차원 해석이 가능하다 (Fig. 2 참조). 몰드의 요철부위가 규칙적으로 배열되어 있다고 가정하고 대칭성을 고려하면 Fig. 3과 같은 단위형상을

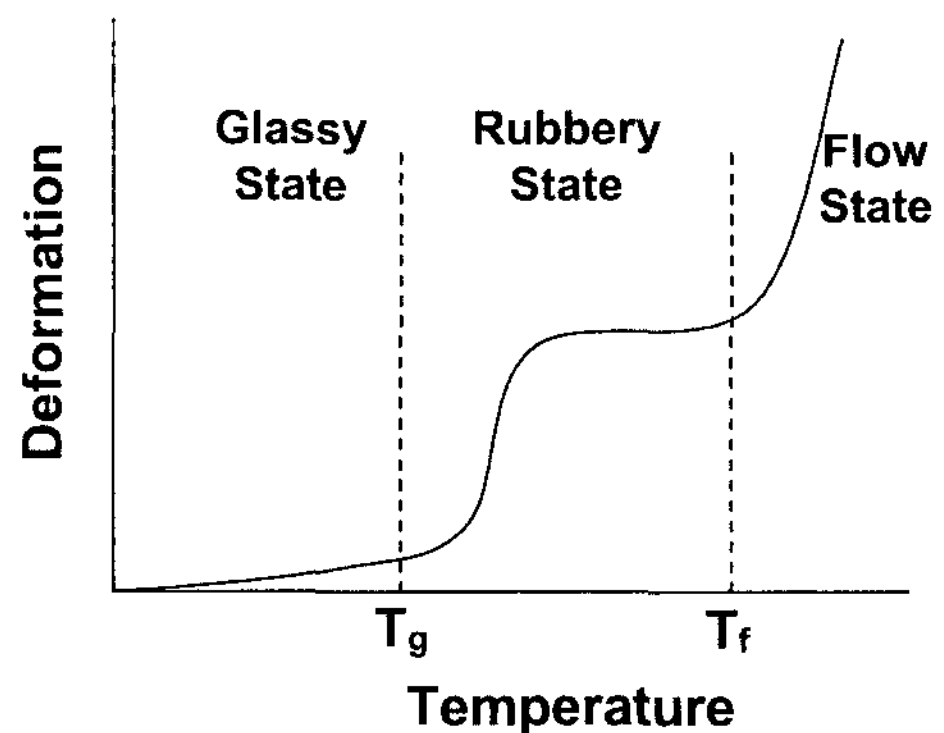


Fig. 1 Typical deformation behavior of thermal plastic polymer as a function of temperature

생각할 수 있다. 레지스트의 초기 두께는 $2h_0$, 몰드의 돌출부 너비는 $2S$, 동공부 너비는 $2W$, 길이는 L 이다.

임프린트 공정 시의 폴리머 유동해석을 위하여 폴리머의 흐름은 이상적인 점성유동을 따르며, 비압축성이라 가정한다. 또한 스퀴즈 유동을 따를 경우 $v_x = v_x(x, y)$, $v_y = v_y(y)$, $p = p(x)$ 라 가정할 수 있다. 이 경우 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{Continuity: } \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad (2)$$

$$\text{Motion(x): } -\frac{dp}{dx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

여기서 τ_{yx} 은 전단응력이며 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{yx} = \eta_0 \dot{\gamma}_{yx} = \eta_0 \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (4)$$

식 (2)에서 v_y 는 y 만의 함수이고 $x=0$ 에서 $v_x=0$ 이므로 v_x 는 임의의 함수 $g(y)$ 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

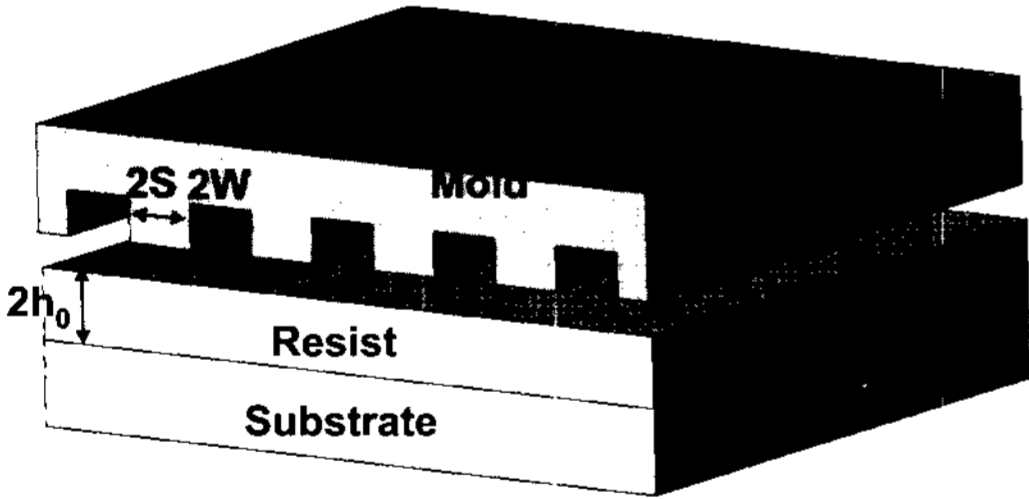


Fig. 2 Geometrical definitions used for thermal NIL

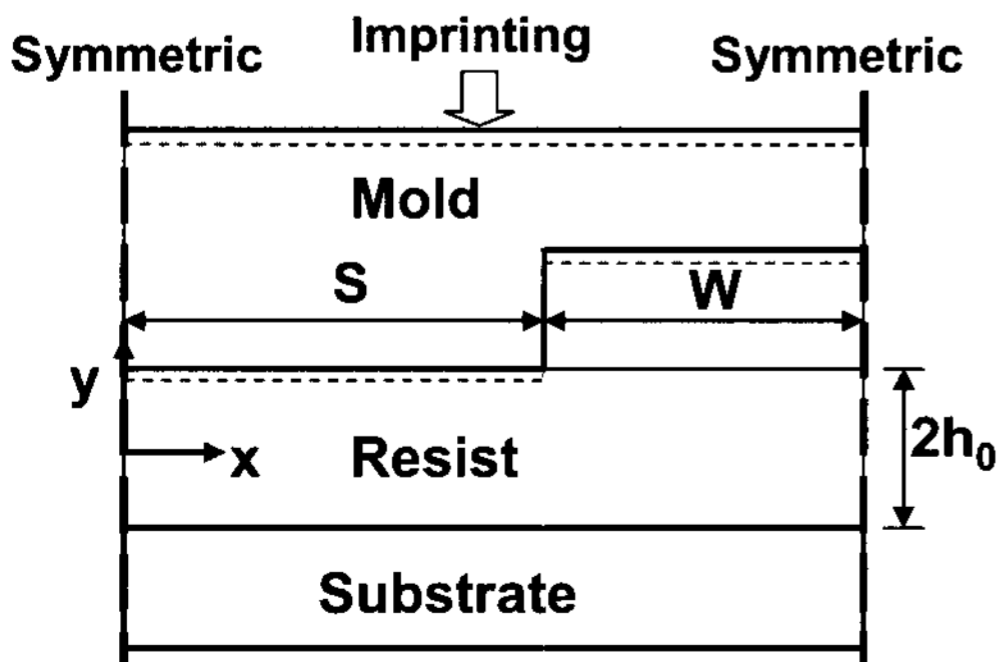


Fig. 3 Computation domain and boundary conditions

$$v_x = xg(y) \quad (5)$$

$y=0$ 에서 $\frac{\partial v_x}{\partial y} = 0$ 이므로 식 (3)을 y 에 대해 적분하여 정리하면,

$$\frac{1}{x} \frac{dp}{dx} = \eta_0 \frac{1}{y} \frac{dg(y)}{dy} \quad (6)$$

위 식에서 좌변은 x 만의 함수이고, 우변은 y 만의 함수이므로 위 식의 값은 상수가 되어야 한다. 따라서 압력 분포는 다음과 같은 x 의 2차 다항식으로 가정할 수 있다.

$$p = A + Bx^2 \quad A, B \text{는 상수} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (3)에 대입하여 y 에 대해 두 번 적분하면

$$By^2 + C = \eta_0 g(y) \quad (8)$$

여기서 C 는 적분상수이다.

폴리머와 기판/몰드 사이의 slip을 고려하기 위하여 $x = S$, $y = h$ 에서의 slip 속도를 v_s 라 가정한다. 즉 $v_x(S, h) = v_s$ 이다. 이 경우 식 (5)로부터 $g(h) = v_s/S$ 이며 slip 속도분포는 다음과 같다.

$$v_x(x, h) = xg(h) = \frac{x}{S} v_s \quad (9)$$

$g(h) = v_s/S$ 를 이용하여 식 (8)의 적분상수 C 와 $g(y)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$C = \eta_0 \frac{v_s}{S} - Bh^2 \quad (10)$$

$$g(y) = \frac{B}{\eta_0} (y^2 - h^2) + \frac{v_s}{S} \quad (11)$$

한편 식 (5)를 식 (2)에 대입하면

$$g(y) + \frac{dv_y}{dy} = 0 \quad (12)$$

식 (11)을 식 (12)에 대입하고, 대칭조건인 $v_y(0) = 0$ 를 이용하여 y 에 대해 적분하면 다음과 같이 v_y 를 구할 수 있다.

$$v_y = -\frac{B}{\eta_0} \left(\frac{y^3}{3} - yh^2 \right) - \frac{v_s}{S} y \quad (13)$$

$v_y(h) = \dot{h}$ 으로부터 상수 B 를 구할 수 있다.

$$B = \frac{3\eta_0}{2h^3} \left(\dot{h} + \frac{h}{S} v_s \right) \quad (14)$$

여기서 slip 속도와 관련된 무차원 변수 δ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\delta \equiv \frac{h v_s}{(-\dot{h})S} \quad (0 \leq \delta \leq 1) \quad (15)$$

$\delta = 1$ 일 때 최대 slip 속도를 가지며 이는 완전윤활의 경우이다. $\delta = 0$ 은 no slip 조건이다. δ 를 사용하여 식 (14)를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$B = -\frac{3\eta_0}{2h^3} (-\dot{h})(1-\delta) \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 v_y 의 최종식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_y = (-\dot{h}) \left[-\frac{3}{2}(1-\delta) \left(\frac{y}{h} - \frac{1}{3} \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) - \frac{\delta}{h} y \right] \quad (17)$$

식 (5), (11), (16)로부터 v_x 는 다음과 같다.

$$v_x = x \frac{(-\dot{h})}{h} \left[\delta + \frac{3}{2}(1-\delta) \left(1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \right] \quad (18)$$

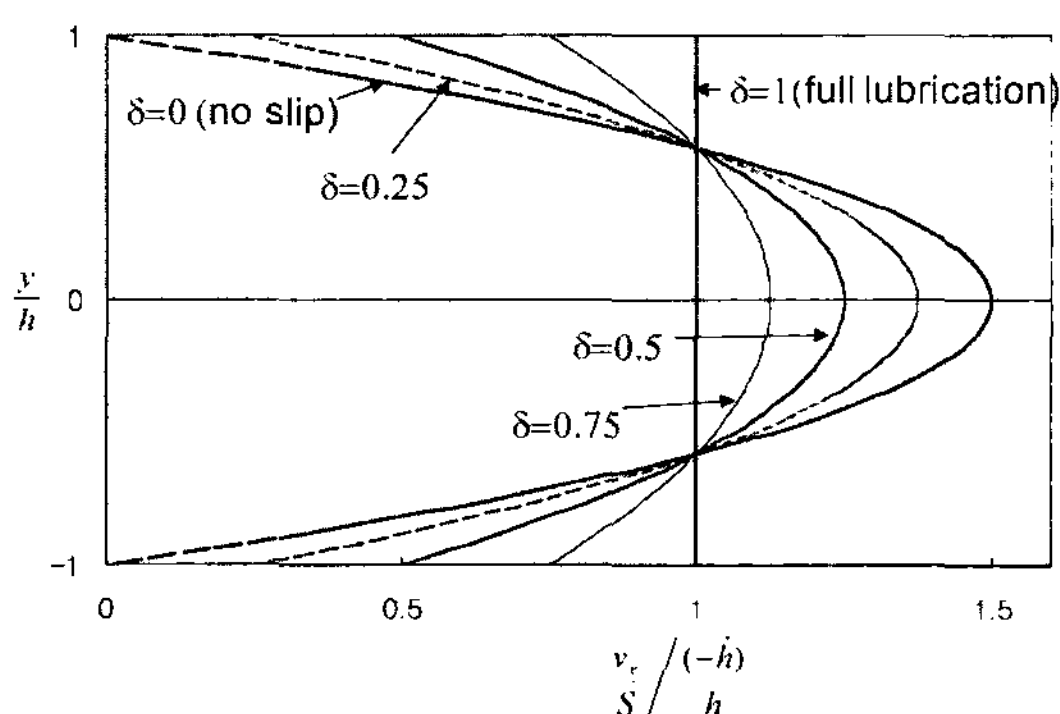


Fig. 4 Non-dimensional lateral velocity profiles $\frac{v_x}{S} \frac{(-\dot{h})}{h}$ with various slip velocity boundary conditions

3. 폴리머 유동에 대한 고찰

3.1 폴리머 속도 분포

다양한 slip 조건에서의 v_x 속도 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 가로 축은 식 (18)에서 $x = S$ 에서의 무차원 값 $\frac{v_x}{S} \frac{(-\dot{h})}{h}$ 이며 세로 축은 y/h 이다. Slip속도를 나타내는 무차원 변수 δ 가 증가할수록 속도 프로파일이 완만해짐을 알 수 있다.

3.2 임프린트 공정에 필요한 하중

유도된 속도분포로부터 폴리머 내의 응력상태를 알 수 있다. 먼저 x, y 방향으로의 변형률속도분포 $\dot{\epsilon}_x, \dot{\epsilon}_y$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_x = \frac{dv_x}{dx} = \frac{3}{2} \left(\frac{-\dot{h}}{h} \right) \left[(1-\delta) \left(1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) + \frac{2}{3} \delta \right] \quad (19)$$

$$\dot{\epsilon}_y = \frac{dv_y}{dy} = -\frac{3}{2} \left(\frac{-\dot{h}}{h} \right) \left[(1-\delta) \left(1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) + \frac{2}{3} \delta \right] = -\dot{\epsilon}_x \quad (20)$$

응력분포는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -2\eta_0 \dot{\epsilon}_x \\ &= (-3)\eta_0 \left(\frac{-\dot{h}}{h} \right) \left[(1-\delta) \left(1 - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) + \frac{2}{3} \delta \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\sigma_y = -2\eta_0 \dot{\epsilon}_y = -\sigma_x \quad (22)$$

식 (7)의 압력분포를 구하기 위해 $x = S$ 에서의 압력은 주변압력 p_a 과 같다는 경계조건을 가정하면 상수 A 를 구할 수 있다.

$$A = p_a + \frac{3\eta_0}{2h^3} (-\dot{h})(1-\delta)S^2 \quad (23)$$

따라서

$$p - p_a = \frac{3\eta_0}{2} \frac{(-\dot{h})}{h^3} S^2 (1-\delta) \left(1 - \frac{x^2}{S^2} \right) \quad (24)$$

폴리머에 가해지는 하중은 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$F = L \int_0^S (p - p_a + \sigma_y(h)) dx \quad (25)$$

식 (24)와 (22)를 식 (25)에 대입하여 최종적으로 임프린팅에 필요한 하중을 계산하면 다음과 같다.

$$F = L\eta_0 S^3 \frac{(-\dot{h})}{h^3} \left(1 + \left(2 \frac{h^2}{S^2} - 1 \right) \delta \right) \quad (26)$$

위의 식을 살펴보면, 임프린팅에 필요한 힘은 몰드 길이 L , 폴리머 점도 η_0 , 몰드 돌출부 너비 S , 폴리머 두께 h , 임프린팅 속도 $-\dot{h}$, 그리고 slip을 나타내는 무차원 변수 δ 와 관련된다.

No slip의 경우 $\delta = 0$ 이며 식 (26)은 다음과 같이 표현된다.

$$F = L\eta_0 S^3 \frac{(-\dot{h})}{h^3} \quad (27)$$

임프린팅 속도가 일정할 경우, 폴리머 두께 h 는 선형적으로 감소하므로 이에 필요한 힘은 급격히 증가된다. 또한 임프린팅에 필요한 힘은 몰드 돌출부 너비 S 의 3제곱에 비례함을 알 수 있다.

완전 윤활의 경우 $\delta = 1$ 이며 식 (26)은 다음과 같이 표현된다.

$$F = 2L\eta_0 S \frac{(-\dot{h})}{h} \quad (28)$$

임프린팅 속도를 일정하게 하기 위한 필요한 힘은 폴리머 두께에 반비례하고, 몰드 돌출부 너비 S 에 비례함을 알 수 있다.

$\delta \neq 0$ 인 경우, 일정한 임프린팅 속도에 필요한 힘은 식 (26)에서 보듯이 $(2h^2/S^2 - 1)$ 의 값에 영향을 받는다. $h/S = 1/\sqrt{2}$

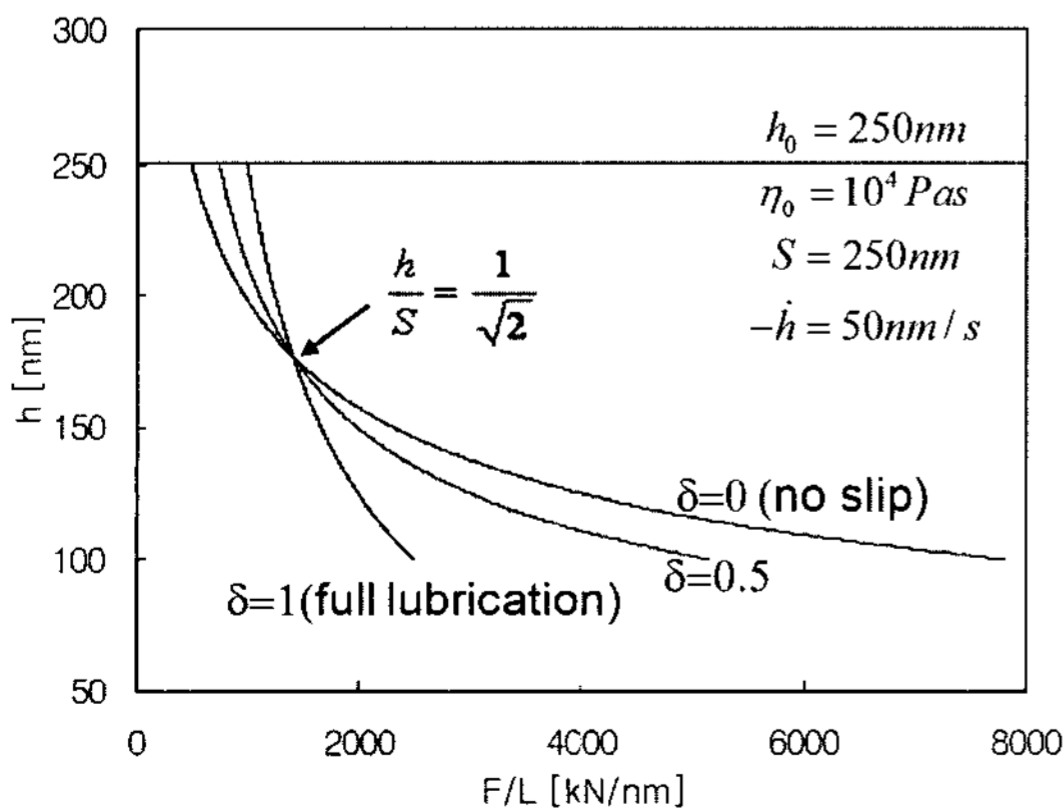


Fig. 5 Forces needed for constant imprinting velocity with various slip velocity boundary conditions

를 경계로 하여 이보다 큰 경우 하중은 증가하고, 반대로 작은 경우 하중은 감소한다. 일반적으로 폴리머 두께 h 가 몰드 돌출부 너비 S 에 비해 작으며, 임프린팅이 진행될수록 h 는 작아지므로 slip의 존재는 하중을 감소시키는 효과를 나타낸다.

Fig. 5는 일정한 임프린팅 속도에 필요한 하중을 계산한 그림이다. 해석에 사용된 폴리머는 PMMA이며, 점도 η_0 는 10^4 Pas, 몰드 돌출부 너비 S 는 250nm, 임프린팅 속도 $-\dot{h}$ 는 50nm/s, 초기 폴리머 두께 h_0 는 250nm이다. 폴리머 두께가 초기 250nm에서 100nm까지 선형적으로 감소하는데 필요한 하중을 가로축으로 나타내었다. $\delta = 0$ 인 no slip 경우 초기에는 하중 증가가 크지 않지만 폴리머의 두께가 감소될수록 급격히 하중이 증가함을 알 수 있다. 또한 $\delta \neq 0$ 인 경우 즉 slip이 존재하는 경우 두께 감소에 필요한 하중 증가율이 상대적으로 감소됨을 알 수 있다. 그림에서 $\delta = 0$ 인 곡선과 $\delta \neq 0$ 인 곡선이 만나는 점이 바로 $h/S = 1/\sqrt{2}$ 인 지점이다.

3.3 폴리머 두께 변화

실제 나노 임프린트 공정에서는 임프린트 속도를 조절하기 보다는 하중(압력)을 제어하는 경우가 대부분이다. 본 절에서는 일정한 압력으로 몰드를 가압하는 경우 시간에 따른 폴리머의 두께 변화를 고찰하겠다.

No slip의 경우 식 (26)에서 $\delta = 0$ 이며 $\dot{h} = dh(t)/dt$ 임을 이용하여 각각 h 와 t 에 대해 적분을 수행하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{h^2(t)} = \frac{1}{h_0^2} + \frac{2F}{\eta_0 L S^3} \cdot t \quad (29)$$

몰드 상면의 가압력 P 와 폴리머에 가해지는 하중 F 사이에는 다음의 식이 성립한다.

$$F = P(S+W)L \quad (30)$$

$S+W$ 의 길이 중 S 의 비율을 κ 라 한다면 식 (29)는 다음과 같이 나타내어 진다.

$$\frac{1}{h^2(t)} = \frac{1}{h_0^2} + \frac{2P}{\eta_0 \kappa S^2} \cdot t \quad (31)$$

완전윤활의 경우 $\delta = 1$ 이며 이 경우 폴리머의 두께는 다음과 같이 계산된다.

$$\log \frac{h(t)}{h_0} = -\frac{F}{2\eta_0 L S} \cdot t \quad (32)$$

혹은

$$\log \frac{h(t)}{h_0} = -\frac{P}{2\eta_0\kappa} \cdot t \quad (33)$$

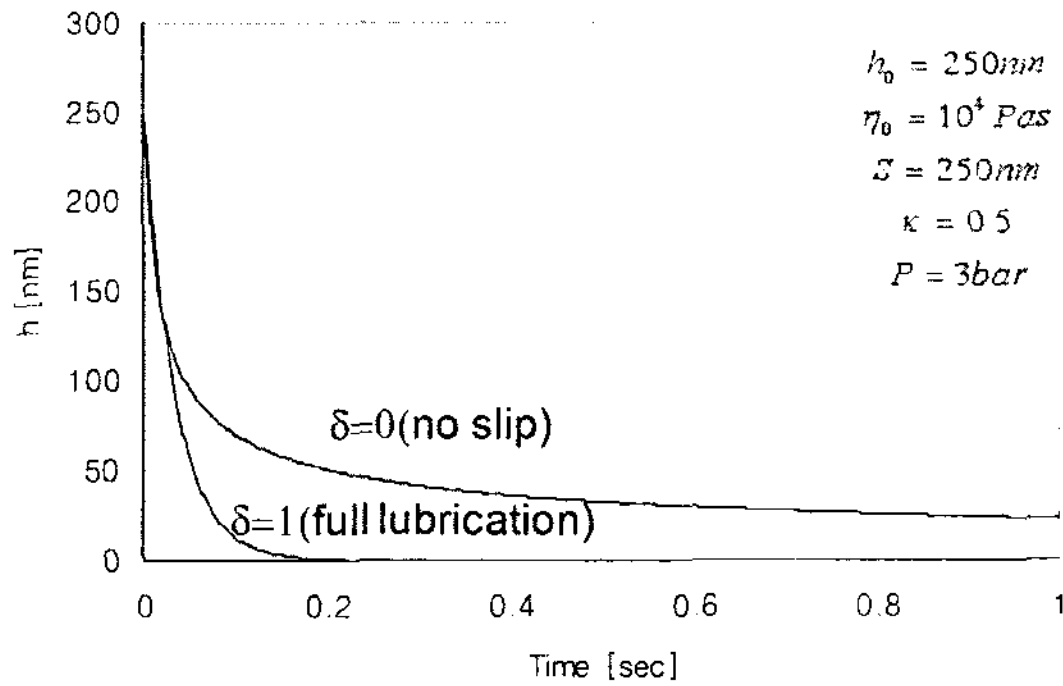
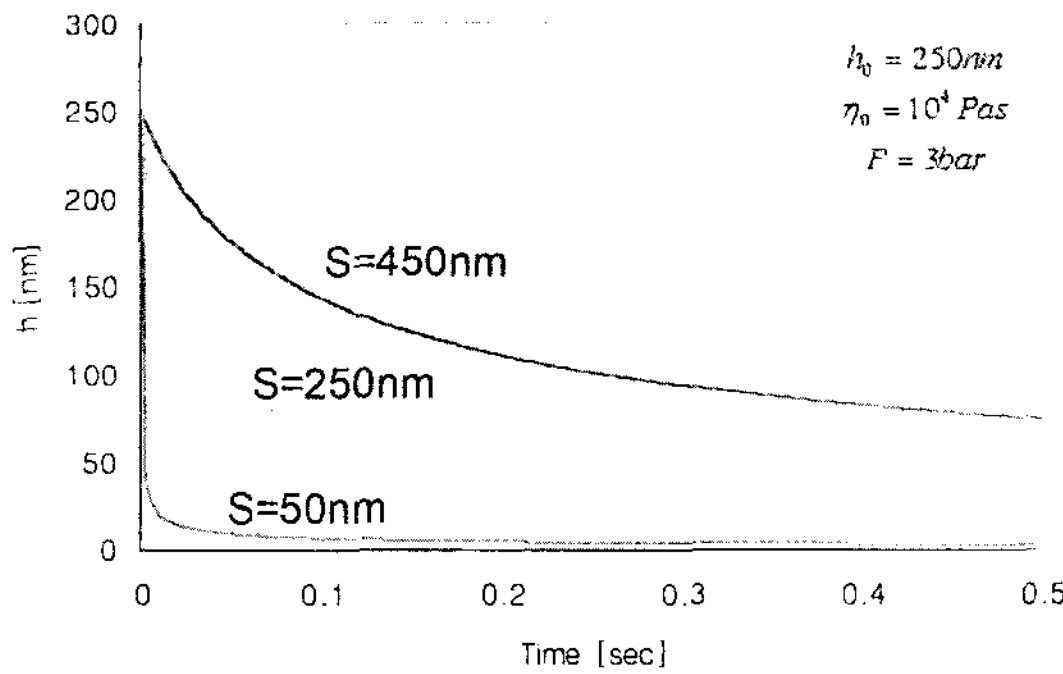
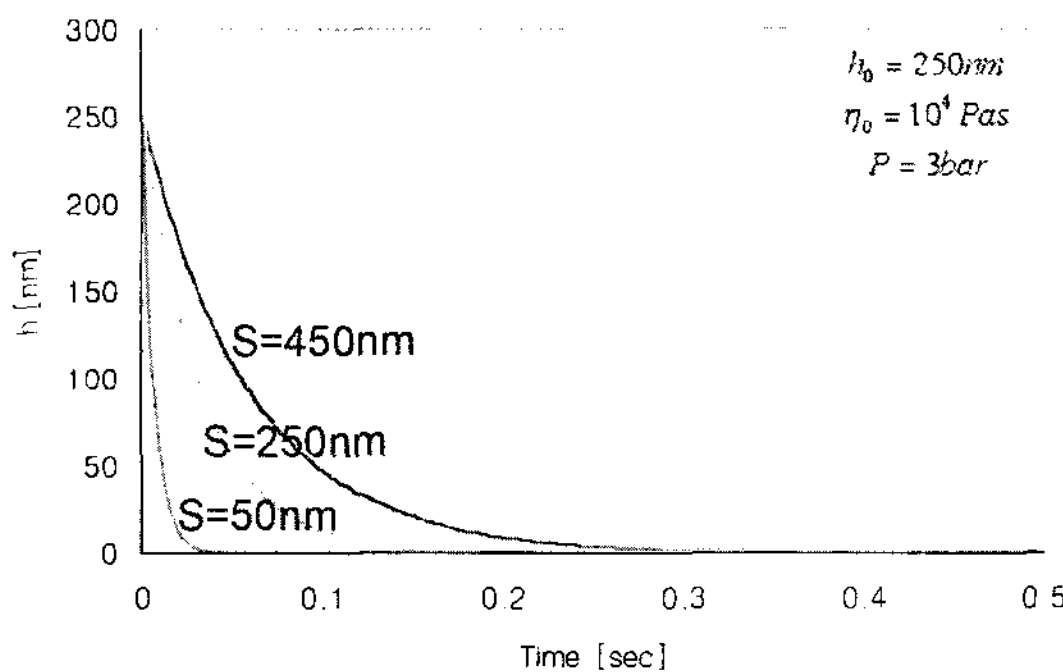


Fig. 6 Polymer thickness variation for constant imprinting pressure with two extreme slip velocity boundary conditions



(a) No slip



(b) Full lubrication

Fig. 7 Polymer thickness variation for constant imprinting pressure with various mold protrusion length S

Fig. 6은 몰드를 일정한 값으로 가압하는 경우 시간에 따른 폴리머의 두께 변화를 나타낸 그림이다. 앞 절에서와 마찬가지로 해석에 사용된 폴리머는 PMMA이며, 가압력 P 는 3 bar, 점도 η_0 는 10^4 Pas, 몰드 돌출부 너비 S 는 250nm, 돌출부와 동공부 길이의 합 $S+W$ 은 500nm(이 경우 κ 는 0.5), 초기 폴리머 두께 h_0 는 250nm이다. No slip 및 완전윤활 두 경우 모두 가압 초기에는 급격히 폴리머의 두께가 감소되나 점차 두께 감소가 완만해지는 경향을 보인다. 폴리머와 몰드/기판 사이가 완전윤활인 경우 상대적으로 매우 짧은 시간에 폴리머 두께가 0으로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 7은 몰드 돌출부 너비 S 가 폴리머 두께변화에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. S 의 값이 작을수록 급격히 폴리머 두께가 감소함을 알 수 있다. 또한 폴리머와 몰드/기판 사이 no slip 조건의 경우(a) 완전 윤활의 조건(b)에 비해 몰드 돌출부 너비의 영향이 더욱 큼을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) Thermal NIL 공정에서 폴리머의 거동을 점성유동으로 가정하고 폴리머와 몰드/기판 사이의 slip을 고려한 해석적 모델링을 수행하였다. Slip을 고려한 폴리머의 속도분포, 압력 분포 및 폴리머 두께 변화 등을 계산할 수 있었으며 slip의 고려는 NIL공정에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (2) 임프린팅 속도가 일정한 경우, 공정에 필요한 하중은 폴리머 두께가 감소될수록 급격히 증가한다. 또한 폴리머와 몰드/기판 사이의 slip이 존재하는 경우, h/S (폴리머 두께/몰드 돌출부 너비) = $1/\sqrt{2}$ 의 값을 기준으로 하여 이보다 큰 경우 필요한 하중은 증가하고, 반대의 경우 하중은 감소하는 특성을 나타낸다. 일반적으로 공정이 진행될수록 h 는 작아지므로 slip의 존재는 하중을 감소시키는 효과를 나타낸다고 볼 수 있다.
- (3) 몰드 가압력이 일정한 경우, 가압 초기에는 폴리머의 두께가 급격히 감소되나 점차 두께 감소가 완만해지는 경향을 보인다. 폴리머와 몰드/기판 사이에 slip이 존재할 경우 no slip에 비해 상대적으로 더 짧은 시간에 폴리머 두께가 0으로 수렴한다.
- (4) 몰드 돌출부 너비가 작을수록 폴리머 두께는 더욱 빨리 감소된다. 폴리머와 몰드/기판 사이 no slip 조건의 경우 slip이 있는 경우에 비해 몰드 돌출부 너비가 폴리머 두께 감소에 상대적으로 더 큰 영향이 있다.

참고 문헌

- (1) Chou, S. and Krauss, P., 1997, "Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput," *Microelectronic Engineering*, Vol. 35, pp. 237~240.
- (2) Guo, L. J., 2004, "Recent progress in nanoimprint technology and its applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp. R123~R141.
- (3) Lee, K., Lee, M., Lee, J., Lim, S., Shin, D., J, S., Jeong, J., and Yim, H., 2007, "Dynamic Analysis of a Nano Imprinting Stage Using CAE," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 211~217.
- (4) Hirai, Y., Fujiwara, M., Okuno, T., and Tanaka, Y., 2001, "Study of the resist deformation in nanoimprint lithography," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 19, No. 6, pp. 2811~2815.
- (5) Hirai, Y., Konishi, 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, No. 6, pp. 3288~3293.
- (6) H. Hocheng and C. C. Nien, 2006, "Numerical analysis of effects of mold features and contact friction on cavity filling in the nanoimprint lithography," *Journal of Microlithography Microfabrication and Microsystems*, Vol. 5, No. 1, 011004~1.
- (7) Young, W. B., 2005, "Analysis of the nanoimprint lithography with a viscous model," *Microelectronic Engineering*, Vol. 77, pp. 405~411.
- (8) Heyderman, L. J., Schiff, H., David, C., Gobrecht, J., and Schweizer, T., 2000, "Flow behaviour of thin polymer films used for hot embossing lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 54, pp. 229~245.
- (9) Jeong, J. H., Choi, Y. S., Shin, Y. J., Lee, J. J., and Park, K. T., 2002, "Flow behavior at the embossing stage of nanoimprint lithography," *Fibers and Polymers*, Vol. 3, No. 3, pp. 113~110.