

UV NIL 공정에서 몰드 중공부 형상과 기포결함에 대한 수치해석

이호성, 김보선, 김국원*
순천향대학교 기계공학과

Numerical Analysis of Effects of Mold Cavity Shape on Bubble Defect Formation in UV NIL

Hosung Lee, Bo Seon Kim, Kug Weon Kim*

Department of Mechanical Engineering, SoonChunHyang University

요약 최근 나노임프린트 리소그래피 공정이 마이크로/나노 스케일의 소자 개발에 있어서 경제적으로 대량 생산할 수 있는 기술로 주목 받고 있다. 자외선경화 방식의 나노임프린트의 경우 상온 및 저압의 장점과 함께 비진공 환경에서 공정을 통하여 설비 비용의 저감과 생산공정의 고속화를 달성할 수 있다. 그러나 이 경우 비진공 환경에서 발생하는 기포결함의 문제를 해결해야만 한다. 본 연구에서는 비진공 환경에서의 자외선경화 방식의 나노임프린트 공정에서 몰드 중공부 단면의 형상과 기포결함 발생 관계를 연구하였다. 일반적으로 많이 사용되는 사각형 단면과 타원형 단면 그리고 삼각형 단면에 대하여 2차원 유동해석 및 VOF 방법을 통하여 기포결함을 시뮬레이션 하였고 단면의 형상과 다양한 접촉각에 따른 유동선단의 특성을 분석하였다. 해석결과 몰드 중공부 형상은 기포결함 발생에 매우 중요한 영향을 미치며, 고려된 형상 모두 몰드와의 접촉각이 작을수록, 기판과의 접촉각이 클수록 기포결함 발생 가능성이 작아짐을 알 수 있었다. 또한 타원형 형상이 기포결함 발생 방지 측면에서 가장 효과적임을 확인하였다.

Abstract Nanoimprint lithography (NIL) is an emerging technology that enables cost-effective and high-throughput nanofabrication. In ultraviolet (UV) NIL, low-cost and high-speed production can be achieved using a non-vacuum environment at room temperature and low pressure. However, there are problems with the formation of bubble defects in such an environment. This paper investigates the shape of the mold cavity and the bubble defect formation in UV NIL in a non-vacuum environment. The bubble defect formation was simulated using two-dimensional flow analysis and the VOF method for commonly used cavity mold shapes (rectangular, elliptical, and triangular). The characteristics of the resist flow front and various contact angles were also analyzed. The shape of the mold cavity had a very significant effect on the bubble defect formation. For all cavity shapes, a smaller contact angle with the mold and larger contact angle with the substrate decreased the possibility of bubble defect formation. The elliptical shape was the most effective for preventing bubble defect formation.

Keywords : Bubble defect formation, Contact angle, Mold cavity shape, Numerical analysis, UV NIL

1. 서론

나노임프린트 리소그래피(Nanoimprint Lithography, NIL) 공정은 비교적 단순한 공정과 10nm 이하의 패턴

전사 능력으로 인해, 반도체 및 디스플레이 산업에서 기존 고가의 포토 리소그래피(Photo lithography) 공정을 대체할 수 있는 대안으로 활발한 연구가 이루어지고 있다[1]. NIL은 사용되는 레지스트의 종류 및 경화시키는

본 논문은 순천향대학교 학술연구비 지원을 받았음.

*Corresponding Author : Kug Weon Kim(Soonchunhyang Univ.)

Tel: +82-41-530-1225 email: kimkug1@sch.ac.kr

Received October 11, 2017

Revised (1st November 20, 2017, 2nd December 11, 2017)

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

방법에 따라 열 나노임프린트 리소그래피 (Thermal NIL)와 자외선 나노임프린트 리소그래피 (UV NIL)로 구별된다[2-4].

최근 NIL 기술은 공정의 고속화 및 대면적화를 통한 대량생산 기술로의 전환을 목표로 하고 있다. UV NIL 공정은 상온 및 저압의 장점과 함께 비진공 환경에서의 공정을 통하여 설비 비용의 저감과 생산공정의 고속화를 달성할 수 있다. 그러나 이 경우 비진공 환경에서 발생하는 기포결함의 문제를 해결해야만 한다.

UV NIL 공정의 기포 생성 및 이의 저감 방법에 대해서 최근 활발히 연구되고 있다. Morihara 등[5]과 Nagaoka 등[6]은 UV NIL의 충전과정 중 발생하는 기포 생성 메커니즘에 대해 수치적 방법으로 계산하였다. 2차원 유동해석을 통해 몰드와 기판사이의 접촉각 변화에 따른 기포발생을 연구하였다. Hiroshima 등[7,8] 역시 기포발생 메커니즘에 대해 연구하였으며 레지스트의 유량이 증가할수록, 패턴의 크기가 작아질수록 기포 결함이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 공기 대신 레지스트에 대한 용해도가 큰 물질 (trichlorofluoromethane) 을 사용하여 기포가 생기더라도 쉽게 용해되어 사라지게 하는 방식으로 결함 발생을 막는 방법을 제안하였다. Liang 등[9]은 기포생성과 용해의 거동에 대한 실험적 및 이론적 연구를 수행하였고, 기포의 수축시간은 초기 기포의 크기, 임프린팅 압력, 공기 용해도 및 레지스트 잔류 두께 등과 관련 있음을 제시하였다. Reddy 등 [10,11]은 사각단면의 줄무늬형상의 몰드 패턴에 대해 유동 선단의 재구성과 유희이론을 적용하여 충전과정을 설명하였고, 기포형성에 대해 기하학적 해석을 시도하였다. Lee 와 Kim[12]은 액적도포 방법에 따른 기포형성 경향을 실험적으로 분석하였다. Seok 과 Kim[13]은 삼각단면 패턴에 대하여 기하학적 해석모델을 개발하였고, 수치해석결과와 비교하여 유용성을 검증하였다. Lee 등 [14]은 2차원 유동해석을 통해 레지스트 잔류두께 및 몰드 유입속도와 기포결함과의 관계에 대해 분석하였다.

현재까지 다양한 방법으로 UV NIL의 기포발생에 대한 연구가 진행되었으나 몰드 중공부 형상의 영향에 대해서는 Seok 과 Kim[13]의 삼각단면에 대한 연구가 유일하다. 본 연구에서는 비진공 환경에서의 UV NIL 공정에서 줄무늬 패턴 전사 공정이 이루어질 때, 2차원 유동해석으로 가정하여 기포발생 시뮬레이션을 수행하였다. 다양한 몰드 중공부의 단면형상(사각형, 타원형, 삼

각형)과 다양한 접촉각에 따른 기포 결함 발생 여부를 분석하였다.

2. 수치해석 모델

UV NIL 충전과정에서 기포 생성을 시뮬레이션하기 위해서 고정격자계 기반의 유체 체적 분율 방법인 VOF(Volume of Fluid) 를 사용하였다. VOF 를 사용하는 경우 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad \rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (1)$$

여기서, ρ , u_i , x_i 는 각각 밀도, 속도, 좌표를 나타내며 α_q , ρ_q 는 각각 해당 상의 밀도와 셀에서 차지하는 부피 비를 나타낸다. 특정 셀이 특정한 상으로 모두 채워졌다면 해당하는 상의 부피 비는 1이고, 언급한 상을 제외한다면 상의 부피 비는 0이 된다. 운동량 방정식과 구성방정식은 다음과 같다.

$$P \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g + f_\sigma \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \eta = \sum \alpha_q \eta_q \quad (3)$$

여기서 η , η_q , f_σ , σ_{ij} , P , g 는 각각 점성, 각 상의 점성, 표면장력에 의한 운동량, 응력, 압력, 중력가속도를 나타낸다.

해석에서 고려하는 몰드는 단면의 형상이 일정하며 길이방향으로 충분히 길게 형성되어 있어 2차원으로 가정하였다. 또 같은 모양의 단면이 반복적으로 이루어져 있으므로, 한 단위의 패턴 형상에 대하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서 고려한 몰드의 중공부 단면 형상은 광학 소재 및 나노 공정에 광범위하게 사용되는 사각단면과 타원형 단면, 그리고 삼각단면을 고려하였고 Fig. 1에 나타내었다.

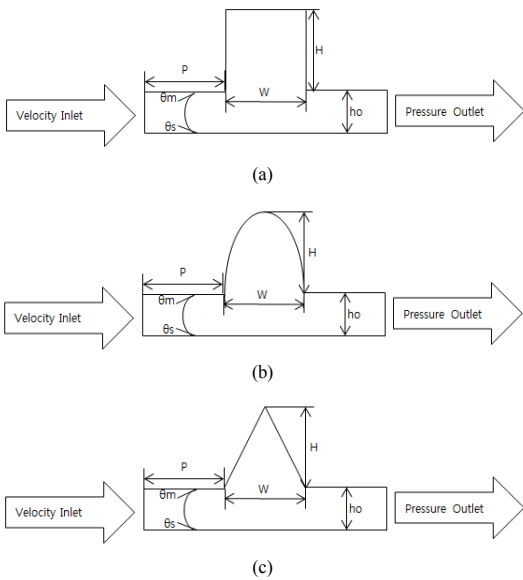


Fig. 1. Analysis models with boundary conditions for 3 different mold-section shapes: (a) rectangle; (b) ellipse; (c) triangle

그림에서 중공부 너비(Cavity width)는 W, 중공부 높이(Cavity height)는 H, 돌출부 너비(Protrusion width)의 1/2은 P, 레지스트 잔류층 두께는 h_0 이다. 수치 해석을 위한 경계조건으로 레지스트의 충전이 시작되는 왼쪽 측면은 레지스트의 속도값(Velocity inlet), 오른쪽 출구는 압력값(Pressure outlet)이 지정된다. 레지스트와 몰드 및 레지스트와 기판이 맞닿은 부분은 벽면으로 설정하였다. θ_S 와 θ_M 은 각각 레지스트와 기판, 레지스트와 몰드와의 접촉각을 나타낸다.

레지스트의 도포 방법으로 디스펜싱 방법이 고려되었다. 이 방법은 레지스트 방울을 기판 전면에 걸쳐 일정 간격으로 도포한 후, 몰드 가압을 통해 레지스트를 퍼지게 하여 패턴 중공부 내부로 충전시키는 방법이다. 디스펜싱된 단위 방울에 대한 UV NIL 가압 공정을 Fig. 2에 나타내었다.

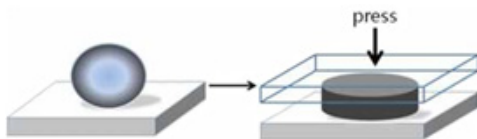


Fig. 2. Resist changing from sphere to cylinder as pressed by mold

초기 도포된 구 형태의 레지스트가 몰드의 가압으로 인하여 원기둥 형태로 변할 때, 패턴의 입구를 통해 유입되는 레지스트의 속도는 레지스트의 원기둥 반지름이 증가하는 속도로 생각할 수 있다.

$$V_{in} = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{r}{2h_0} \cdot \left(-\frac{dh}{dt}\right) \quad (4)$$

여기서 r 은 레지스트의 반경, h_0 는 레지스트의 잔류층 두께, $\left(-\frac{dh}{dt}\right)$ 는 몰드의 임프린팅 속도이다. 초기 레지스트 부피가 $8 \times 10^{-12} m^3$, 몰드의 임프린팅 속도가 $40 \mu m/s$ 라고 가정한다면, 몰드와 기판 사이의 간격이 $100 nm$ 일 때, 레지스트의 반경은 $5 mm$ 이고 유입속도는 $1 m/s$ 가 된다. 이 때, 레지스트가 하나의 패턴을 충전하는 시간은 $10^{-6} sec$ 에 지나지 않는다. 즉, 레지스트가 $1 \mu m$ 를 이동하는 시간 동안 몰드는 $0.04 nm$ 를 전진하게 된다. 이 값이 매우 작기 때문에 몰드는 전진하지 않고 고정된 상태로 가정할 수 있다. 한편 UV NIL 공정에 사용되는 레지스트는 수 cPs에서 수십 cPs 정도의 낮은 점도를 가진다. 따라서 레지스트를 몰로 가정하여 점도는 $1 cPs$, 밀도는 $998.2 kg/m^3$, 표면 장력은 $0.072 N/m$ 로 가정하였다. 진공이 아닌 대기 중에서 공정이 이루어지므로 레지스트와 공기의 2상 유동이 고려되었다.

3. 해석 결과 및 논의

본 연구에서는 몰드 단면의 형상이 기포결함에 미치는 영향을 분석하기 위해, 같은 중공부 너비와 높이를 가지는 사각형, 타원, 삼각형 형상의 중공부 단면에 대해 유동해석을 수행하였다. 고려된 몰드의 형상은 중공부 너비는 $200 nm$, 중공부 높이는 $200 nm$, 돌출부 너비의 1/2은 $200 nm$ 이다. 기판과의 접촉각 θ_S 는 $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$, 몰드와의 접촉각 θ_M 은 $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 가 고려되었다. 수치해석은 유체 해석 전문 프로그램 Fluent를 이용하였다.

Table 1. Mold pattern shape and considered variables

Mold cavity shape	Inlet velocity V_{in} [m/s]	Residual Layer Thickness h_0 [nm]	Cavity Width W [nm]	Half of Protrusion Width P [nm]	Cavity Height H [nm]
Rectangle	1	100	200	200	200
Ellipse					
Triangle					

사각형 단면의 몰드에 대해, 접촉각에 따른 기포 생성 여부를 Table 2에 나타내었다. 저자의 이전 연구[14]와 마찬가지로 기포생성은 접촉각의 영향을 많이 받으며, 기관과의 접촉각, θ_S 가 작을수록, 몰드와의 접촉각, θ_M 이 클수록 기포결함이 잘 생성됨을 알 수 있다.

Table 2. Simulation results of rectangle cavity shape with various contact angles (● : Bubble, ○ : No Bubble)

50°	●	●	●
45°	●	●	●
40°	●	●	○
35°	●	○	○
30°	○	○	○
$\theta_M \backslash \theta_S$	30°	40°	50°

Fig. 3은 기포결함이 생성되는 경우($\theta_S=30^\circ, \theta_M=35^\circ$)와 생성되지 않는 경우($\theta_S=50^\circ, \theta_M=35^\circ$)의 시간에 따른 레지스트의 유동선단을 비교한 그림이다. Reddy 등 [10,11]이 언급하였듯이 유동선단은 몰드의 모서리를 지날 때마다 유동선단을 재구성하고 있음을 알 수 있고, 기관과의 접촉각, θ_S 이 작은 ($\theta_S=30^\circ, \theta_M=35^\circ$)의 경우 유동선단이 상대적으로 완만히 기울어져서 충전이 진행된다. 기포결함이 생성된 경우(Fig. 3(a))의 시간별 추이를 보면 유동선단이 몰드 증공부의 윗면에 도달하기 전 (Point B) 증공부 오른쪽 모서리(Point A)에 먼저 이르게 되어 유동선단의 분기가 이루어짐을 알 수 있다. 이에 반해 기포가 발생하지 않은 경우(Fig. 3(b)) 유동선단이 증공부의 윗면에 먼저 도달하고 이후 유동선단의 재구성이 이루어지지만 점차 증공부를 채운 후 증공부 오른쪽 모서리(Point A)에 이르게 되어 기포가 발생하지 않음을 알 수 있다. 기포결함이 발생한 다른 접촉각 조합의 경우

에도($(\theta_S=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, \theta_M=50^\circ)$, $(\theta_S=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, \theta_M=45^\circ)$, $(\theta_S=30^\circ, 40^\circ, \theta_M=40^\circ)$) 유사한 유동선단의 흐름을 보였다. 이러한 경향을 살펴보면, 유동선단의 형상과 증공부 형상은 기포발생에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

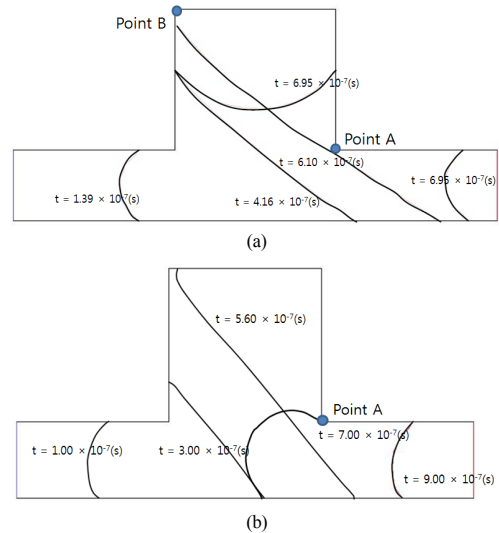


Fig. 3. Simulation results of time evolutions of the resist flow front for rectangle cavity shape: (a) bubble defect formation case ($\theta_S=30^\circ, \theta_M=35^\circ$); (b) no bubble formation case ($\theta_S=50^\circ, \theta_M=35^\circ$)

타원형 단면의 몰드에 대해 접촉각에 따른 기포생성 여부를 Table 3에 나타내었다. 고려된 모든 접촉각에 대해 기포결함은 발생하지 않았다. 기포결함 방지 측면에서 타원형 단면 형상의 몰드가 사각형 단면 형상의 몰드에 비해 훨씬 유리함을 알 수 있다. 타원형은 사각형과 달리 모서리가 존재하지 않으며 형상의 변화가 완만하기 때문에 유동선단의 급격한 변화가 없다. 기포가 발생하기 위해서는 앞에서 살펴본 사각형 단면에서와 마찬가지로 증공부 오른쪽 모서리에 유동선단이 먼저 도달하여 유동선단의 분기가 발생하여야 하는데, 타원형의 특성 상 이러한 유동선단의 분기가 발생할 가능성이 낮을 것으로 예측된다. 따라서, 기포결함이 발생할 가능성이 가장 높은 경우($\theta_S=30^\circ, \theta_M=50^\circ$)에서도 기포는 발생하지 않았다.

Table 3. Simulation results of ellipse cavity shape with various contact angles (● : Bubble, ○ : No Bubble)

50°	○	○	○
45°	○	○	○
40°	○	○	○
35°	○	○	○
30°	○	○	○
θ_M / θ_S	30°	40°	50°

Fig. 4는 $\theta_S=30^\circ$, $\theta_M=50^\circ$ 의 접촉각에 대한 타원형 단면의 시간에 따른 레지스트의 유동선단을 나타낸 그림이다. 이 접촉각은 고려된 접촉각의 조합 중에서는 가장 기울어진 유동선단의 형상을 이루고, 타원형 형상 변화에 따라 유동선단의 재구성성이 이루어지지만 순차적으로 중공부를 채워 기포가 발생하지 않음을 알 수 있다.

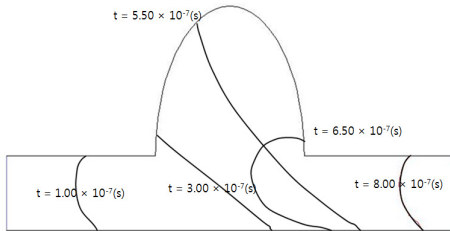


Fig. 4. Simulation result of time evolutions of the resist flow front for ellipse cavity shape with contact angle ($\theta_S=30^\circ$, $\theta_M=50^\circ$)

타원형 단면의 기포발생 경우를 살펴보기 위해 고려 범위 밖의 접촉각에 대해 수치해석 시뮬레이션을 수행하였고, $\theta_S=10^\circ$, $\theta_M=60^\circ$ 의 접촉각에서 기포결함이 발생함을 확인하였다. Fig. 5는 이 경우의 시간에 따른 유동선단을 나타낸 그림이다. 앞의 사각형 단면의 기포결함 발생 경우와 마찬가지로 유동선단이 중공부 오른쪽 모서리(Point A)에 도달할 때, 아직 중공부를 모두 채우지 못한 상태에서 유동선단의 분기가 이루어져 중공부 상단에 기포결함이 발생하게 된다.

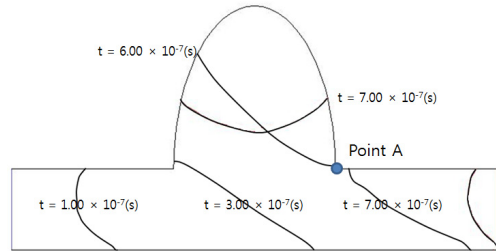


Fig. 5. Simulation result of time evolutions of the resist flow front for ellipse cavity shape with contact angle ($\theta_S=10^\circ$, $\theta_M=60^\circ$)

삼각형 단면의 몰드에 대해, 접촉각에 따른 기포 생성 여부를 Table 4에 나타내었다. 사각형 단면의 경우와 마찬가지로 특정 접촉각에서 기포가 발생하였으며, 기관과의 접촉각, θ_S 가 작을수록, 몰드와의 접촉각, θ_M 이 클수록 기포결함이 잘 생성됨을 알 수 있다. ($\theta_S=30^\circ$, $\theta_M=30^\circ$), ($\theta_S=40^\circ$, $\theta_M=35^\circ$), ($\theta_S=50^\circ$, $\theta_M=40^\circ$)의 접촉각에서 사각형 단면의 경우와 달리 기포가 발생하는 결과를 보이고 있다.

Table 4. Simulation results of triangle cavity shape with various contact angles (● : Bubble, ○ : No Bubble)

50°	●	●	●
45°	●	●	●
40°	●	●	●
35°	●	●	○
30°	●	○	○
θ_M / θ_S	30°	40°	50°

Fig. 6은 기포결함이 생성되는 경우($\theta_S=30^\circ$, $\theta_M=30^\circ$)와 생성되지 않는 경우($\theta_S=50^\circ$, $\theta_M=30^\circ$)의 시간에 따른 레지스트의 유동선단을 비교한 그림이다. 사각형 단면의 유동선단과 마찬가지로 중공부 오른쪽 모서리(Point A)에 도달할 때 중공부를 모두 채우지 못한 경우, 중공부 상부에 기포결함을 발생시킴을 알 수 있다. 기관과의 접촉각이 증가한 경우($\theta_S=50^\circ$, $\theta_M=30^\circ$)에는 유동선단의 기울어짐이 상대적으로 적어 중공부를 순차적으로 채우게 되고 이후 중공부 오른쪽 모서리에 도달하게 된다.

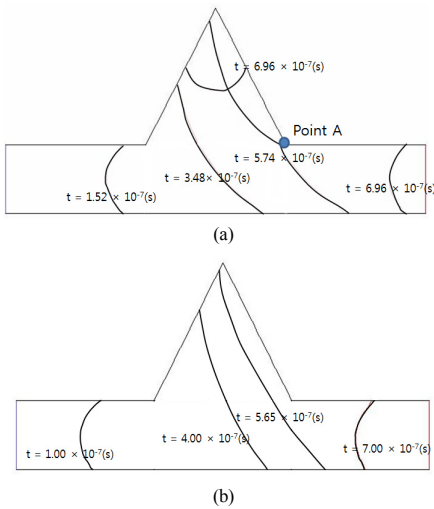


Fig. 6. Simulation results of time evolutions of the resist flow front for triangle cavity shape: (a) bubble defect formation case ($\theta_S=30^\circ$, $\theta_M=30^\circ$); (b) no bubble formation case ($\theta_S=50^\circ$, $\theta_M=30^\circ$)

4. 결론

본 연구에서는 세가지 형상의 몰드 증공부 단면 형상(사각형, 타원형, 삼각형)과 다양한 접촉각(기관과의 접촉각 θ_S : 30° , 40° , 50° , 몰드와의 접촉각 θ_M : 30° , 35° , 40° , 45° , 50°)에서의 기포결함 발생 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 기포결함 발생은 접촉각과 밀접한 관련이 있으며, 고려된 증공부 형상 모두 몰드와의 접촉각이 작을 수록, 기관과의 접촉각이 클수록 기포결함 발생 가능성이 작아진다.
2. 시간에 따른 레지스트의 유동선단을 분석한 결과, 증공부를 모두 채우기 전에 증공부 오른쪽 모서리에 유동선단이 도달한 경우 유동선단의 분기가 발생하고 이로 인하여 증공부 내부에 기포결함이 발생하였다.
3. 고려된 몰드 증공부 형상 중 모서리가 없는 타원형에서는 고려된 접촉각 범위에서 기포가 발생하지 않았으며, 다른 형상(사각형, 삼각형)에 비해 기포결함 발생 방지 측면에서 유리함을 알 수 있다. 그러나 기포발생 가능성을 높이는 접촉각 조건(몰

드와의 접촉각을 크게, 기관과의 접촉각을 작게)을 적용한 경우(몰드와의 접촉각 60° , 기관과의 접촉각 10°)에는 기포결함이 발생함을 확인하였다.

References

- [1] S. Chou and P. Krauss, "Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput," *Microelectronic Engineering*, vol. 35, pp. 237-240, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(96\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(96)00097-4)
- [2] N. W. Kim, K. W. Kim and H.-C.Sin, "Finite element analysis of low temperature thermal nanoimprint lithography using a viscoelastic model," *Microelectronic Engineering*, vol. 85, pp. 1858-1865, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.05.030>
- [3] K. Y. Lee and K. W. Kim, "A study on the filling process and residual layer formation in nanoimprint lithography process," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 13, no. 9, pp. 3835-3840, 2012.
- [4] N. W. Kim, K. W. Kim and H.-C.Sin, "A mathematical model for slip phenomenon in a cavity-filling process of nanoimprint lithography," *Microelectronic Engineering*, vol. 86, pp. 2324-2329, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.04.011>
- [5] D. Morihara, H. Hiroshima and Y. Hirai, "Numerical study on bubble trapping in UV-nanoimprint lithography," *Microelectronic Engineering*, vol. 86, no. 4-6, pp. 684-687, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.12.005>
- [6] Y. Nagaoka, D. Morihara, H. Hiroshima and Y. Hirai, "Simulation study on bubble trapping in UV nanoimprint lithography," *Journal of Photopolymer Science and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 171-174, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2494/photopolymer.22.171>
- [7] H. Hiroshima, M. Komuro, N. Kasahara, Y. Kurashima and J. Taniguchi, "Elimination of pattern defects of nanoimprint under atmospheric condition," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, pp. 3849-3853, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.42.3849>
- [8] H. Hiroshima and M. Komuro, "Control of bubble defects in UV nanoimprint," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 9B, pp. 6391-6394., 2007. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.6391>
- [9] X. Liang, H. Tan, Z. Fu and S. Y. Chou, "Air bubble formation and dissolution in dispensing nanoimprint lithography," *Nanotechnology*, vol. 18, no. 2, pp. 1-7, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/2/025303>
- [10] S. Reddy, P. R. Schunk and R. T. Bonnecaze, "Dynamics of low capillary number interfaces moving through sharp features," *Physics of Fluids*, vol. 17, no. 12, pp. 122104-1-6, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2140691>
- [11] S. Reddy and R. T. Bonnecaze, "Simulation of fluid

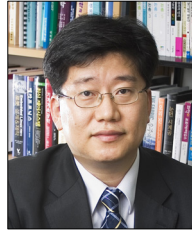
flow in the step and flash imprint lithography process," *Microelectronic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 60-70, 2005.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2005.06.002>

- [12] K. Y. Lee and K. W. Kim, "A Study on the formation of air bubble by the droplet volume and dispensing method in UV NIL," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 14, no. 9, pp. 4178-4184, 2013.
- [13] J. M. Seok and N. W. Kim, "Analytic and numerical study for air bubble defect of UV-NIL process", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, vol. 21, no. 3, pp. 473-478, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2012.21.3.473>
- [14] W. Y. Lee, N. W. Kim, D. H. Kim and K. W. Kim, "Numerical analysis of effects of velocity inlet and residual layer thickness of resist on bubble defect formation", *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, vol. 14, no. 3. pp. 61-66, 2015.

김 국 원(Kug Weon Kim)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1995년 2월 ~ 1999년 2월 : LG전자 디지털미디어연구소 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

CAD/CAM, 초정밀가공

이 호 성(Hoseong Lee)

[정회원]



- 2010년 2월 : 매탄고등학교
- 2016년 2월 : 순천향대학교 기계공학과 (학사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 대학원 재학중

<관심분야>

CAD/CAM, 유동해석

김 보 선(Bo Seon Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 연수고등학교
- 2017년 2월 : 순천향대학교 물리학과 (학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 순천향대학교 기계공학과 대학원 재학중

<관심분야>

CAD/CAE, 정밀가공