

# UV-NIL 공정의 기포 결함에 대한 해석적 및 수치적 연구

석정민<sup>+</sup>, 김남웅<sup>\*</sup>

(논문접수일 2012. 04. 24, 수정일 2012. 05. 31, 심사완료일 2012. 06. 05)

## Analytic and Numerical Study for air Bubble Defect of UV-NIL Process

Jeong Min Seok<sup>+</sup>, Nam Woong Kim<sup>\*</sup>

### Abstract

In this paper, the air bubble formation mechanism in the rectangular and triangular line-and-space pattern during dispensing UV Nanoimprint Lithography (UV-NIL) at an atmospheric condition is studied. To investigate the air bubble formation, an analytic model based on geometric approach and a numerical model based on CFD(computational fluid dynamics) were used in the analysis. It was found in the numerical analysis that every time the flow front passed through a corner of the pattern, it proceeded with a newly formed shape, occurring due to interface reconfiguration, since the flow fronts were formed such that they minimized the surface energy. Moreover, the conditions for the air bubble formation were investigated by applying the analytic analysis based on geometric approach and the numerical analysis. Good overall agreement was found between the analytic and numerical analysis.

**Key Words :** UV Nanoimprint lithography(자외선 나노임프린트 공정), Air bubble(기포), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Non-vacuum environment(비진공 환경), Contact angle(접촉각)

### 1. 서론

나노 임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography, NIL) 공정은 10nm 이하의 뛰어난 미세 패턴 전사 능력과 단순한 작업 공정으로 인하여 현재 큰 주목을 받고 있는 마이크로/나노 패턴 제조 공정이다. 이 공정은 광학부품, 센서 등 마이크로/나노 일렉트로닉스 분야 혹은 반도체 및 디스플레이 산업에서 기존 고가의 포토 리소그래피(photo lithography) 공정을 대체할 주요한 대안으로 평가되고 있다<sup>(1)</sup>.

최근 NIL 기술은 공정의 고속화 및 대면적화를 통한 대량생산 기술로의 전환을 목표로 하고 있다. 그러나 이를 실현하기 위해서는 이형(demolding) 결함, 비진공 환경에서 기포(bubble)

생성에 의한 패턴 결함 문제, 몰드 변형 및 내구성 문제, 다층 레이어 성형의 어려움 등 많은 문제를 기술적으로 해결해야만 한다. 특히, UV-NIL 공정의 경우, 비진공 환경(non-vacuum environment)에서 공정이 가능하다면, 설비비용을 낮추고 공정시간을 줄이는데 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 하지만 비진공 환경에서는 공정 중 공기의 유입에 의해 최종 패턴에서 기포 결함이 일상적으로 발생하기 때문에 기포 생성 메커니즘을 규명하여 기포를 저감할 수 있는 공정 조건을 밝히기 위한 연구가 시급한 실정이다.

NIL 공정의 기포 생성 및 이의 저감 방법에 대해서는 소수의 그룹을 위주로 연구가 수행되어 왔다. Hiroshima 및 Hirai<sup>(2-3)</sup> 그룹에서는 사각단면의 줄무늬(line-and-space) 패턴을 고려하

<sup>+</sup> 서울대학교 기계항공공학부

<sup>\*</sup> 교신저자, 동양미래대학교 기계공학부 (freedesign@dongyang.ac.kr)

주소: 152-714 서울시 구로구 경인로 445

여 UV-NIL의 충전과정 중 발생하는 기포 생성 메커니즘을 수치적으로 연구하였다. 레지스트의 점성은 물과 같은 1cPs로 가정하고 몰드의 전진 속도는 40 $\mu$ m/s로 고정된 채로 몰드와 기관 각각의 접촉각(contact angle)을 변화시켜가며 기포 생성 메커니즘을 보여주었다. 또한 기포 저감 대책으로서, 공기보다 레지스트에 대한 용해도가 더 큰 물질 환경 하의 공정을 제안하였다<sup>(4-5)</sup>. 이 환경에서는 기포가 생성되더라도 레지스트에 의해 쉽게 용해되어 기포 결합이 미미해지거나 생기지 않게 된다. 한편, Chou<sup>(6)</sup> 그룹은 분자확산 이론(molecular diffusion theory)과 유체역학(hydrodynamics)을 이용하여 기포의 레지스트에 대한 용해와 수축에 관한 이론 및 수치해석 모델을 개발하고, 기포의 수축시간은 초기 기포의 크기, 임프린팅 압력, 공기 용해도, 레지스트의 잔류 두께 등에 관련된다고 보고하였다. 그리고, Reddy<sup>(7-8)</sup>의 연구에서는 사각단면을 가지는 줄무늬 형상의 충전과정을 유동 선단의 재구성(reconfiguration)과 윤활 이론(lubrication theory)을 적용하여 설명하였고, 기포가 생성되는 조건을 기하학적 해석(geometric analysis)을 통하여 보여주었다. 또한 디스펜싱(dispensing)되는 레지스트 액적이 합쳐지는 상황을 해석적으로 모사(simulation)하고, 액적의 개수가 많을수록 그리고 작은 부피 영역에 분사할수록 충전 시간이 단축됨을 확인하였다.

본 논문에서는 비진공 환경에서 UV-NIL 공정을 기반으로 하는 줄무늬 패턴 전사 공정이 이루어질 때, 기포 생성 메커니즘에 대하여 살펴보았다. 먼저, 기포가 발생하지 않고 완전한 충전이 이루어진 경우, 사각단면과 삼각단면에서 유동 선단의 전진 양상을 서로 비교하고 분석하였다. 또한, 기포가 발생하는 경우에 대하여 기하학적 해석을 통한 기포 생성 조건을 알아보고, 수치 해석을 통한 결과와 비교하였다.

## 2. 기포 생성 유체 유동 수치 해석(CFD) 모델

### 2.1 VOF 방법 및 지배 방정식

NIL 충전과정에서의 기포 생성을 모사하기 위해서는 패턴 내에서 폴리머 레지스트의 유동과 공기와의 경계 즉, 레지스트 선단의 거동을 예측해야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 고정 격자계 기반의 유체 체적 분율 방법(volume of fluid, VOF)<sup>(9-10)</sup>을 사용하였다. 고정 격자계 VOF 방법은 매 해석 단계마다 새로운 격자를 생성할 필요가 없기 때문에 자유표면의 추이를 효율적으로 계산할 수 있다. 이 방법은 여러 개의 상(phase)이 존재하는 유동 문제에 적용할 수 있다. 하나의 셀에 여러 개의 상이 존재할 수 있고, 이를 표현하기 위해 각각의 상은 0과 1사이의 값을 해당 셀에 대한 부피비(volume fraction)로서 갖게 된다. 즉, 특정 셀이 특정의 상으로 모두 채워졌다면, 해당하는 상의 부피비는 1이고, 언급한 상을 제외한 다른 상의 부피비는

모두 0이 되는 것이다. VOF 방법을 사용하는 경우 연속 방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서,  $\rho$ ,  $u_i$ ,  $x_i$ 는 각각 밀도, 속도, 좌표를 나타내며  $\rho_q$ ,  $\alpha_q$ 는 각각 해당 상의 밀도와 셀에서 차지하는 부피비를 나타낸다. 운동량 방정식(momentum equation)과 구성 방정식(constitutive equation)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서,  $\eta$ ,  $\eta_q$ ,  $f_\sigma$ ,  $\sigma_{ij}$ ,  $P$ ,  $g$ 는 각각 점성, 각 상의 점성, 표면 장력에 의한 운동량, 응력 압력, 중력 가속도를 나타낸다. 그리고 부피비는 매 time step마다 다음 식에 의해서 결정된다.

$$f + u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $f$ 는 부피비이다.

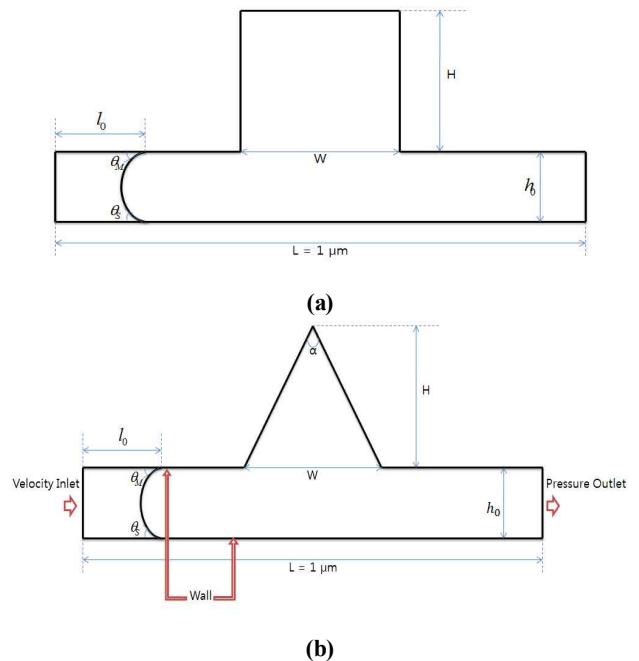


Fig. 1 Analysis model with loading/boundary condition: (a) rectangular cross section, (b) triangular cross section

2.2 해석 모델 및 물성치

해석에서 고려하는 모델은 일정한 단면의 형상이 길이방향으로 충분히 길게 형성되어 있으므로 2차원으로 가정하여 해석을 수행할 수 있다. 또한 같은 모양의 단면이 반복적으로 이루어져 있으므로, 한 단위의 패턴 형상에 대하여 해석을 수행할 수 있다. 광학 소재 및 나노 공정에 광범위하게 사용되는 사각단면과 LCD(liquid crystal display) 패널의 BLU(back light unit)에서 널리 사용되는 프리즘 시트(prism sheet)<sup>(11)</sup>의 한 삼각단면을 Fig. 1에 나타내었다.

패턴 전체의 길이(L)는 1 $\mu$ m이고, 초기에 레지스트가 일정만큼 유입된 상태(L<sub>0</sub>)에서 충전이 시작된다고 가정하였다. 경계 조건으로는 왼쪽 측면은 속도 입구(velocity inlet), 오른쪽 측면은 압력 출구(pressure outlet), 레지스트와 몰드 및 레지스트와 기관에 맞닿은 부분은 벽면(wall)으로 설정하였다.

레지스트의 도포 방법으로는 디스펜싱(dispensing)<sup>(2)</sup> 방법을 고려하였다. 이 방법은 미세 체적 레지스트 방울(drop)을 기관 전면에 걸쳐 일정 간격으로 도포한 후, 몰드 가압을 통해 레지스트를 퍼지게 하여 패턴 내부로 충전시키는 방식이다. 디스펜싱된 단위 방울에 대한 UV NIL 가압 공정을 Fig. 2에 나타내었다.

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

$$V_{in} = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{r}{2h_0} \cdot \left(-\frac{dh}{dt}\right) \tag{5}$$

여기서, r은 레지스트의 반경, h<sub>0</sub>는 레지스트의 잔류층의 두께, (-dh/dt)는 몰드의 전진 속도이다. 초기 레지스트 부피가 8 $\times 10^{-12}$  m<sup>3</sup>, 몰드의 임프린팅 속도가 40 $\mu$ m/s라고 가정한다면 몰드와 기관 사이의 간격이 100nm일 때, 레지스트의 반경은 5mm이고 유입 속도는 1m/s가 된다. 레지스트의 유입 속도가 1m/s일 때, 레지스트가 하나의 패턴을 충전하는 시간은 10<sup>-6</sup> sec에 지나지 않는다. 즉, 레지스트가 1 $\mu$ m를 이동하는 시간 동안 몰드는 0.04nm를 전진하게 된다. 이 값이 매우 작기 때문에 몰드는 전진하지 않고 고정된 상태로 가정할 수 있다.

한편 UV-NIL 공정에 사용되는 레지스트는 수 cPs에서 수십

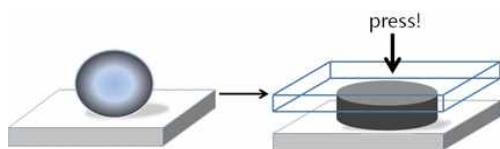


Fig. 2 Form of resist changing from sphere to cylinder as pressed by mold

cPs 정도의 낮은 점도를 가진다. 이에 레지스트를 물(water)로 가정하여 점도( $\eta$ )는 1cPs, 밀도( $\rho$ )는 998.2kg/m<sup>3</sup>, 표면 장력( $\sigma$ )은 0.072N/m로 고려하였다. 진공이 아닌 대기 중에서 공정이 이루어지므로 레지스트와 공기의 2상 유동이 고려된다.

마이크로/나노 유동에서는 표면 장력이 지배적인 영향을 미친다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 표면 장력에 대한 점성력의 비를 나타내는 Capillary number(Ca)<sup>(12)</sup>가 낮은 상황을 고려한다. Ca를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$Ca = \frac{\mu V}{\sigma} \tag{6}$$

위에서 고려된 레지스트의 점도, 표면 장력, 그리고 유입 속도를 적용시켜보면, Ca = 1.4 $\times 10^{-2}$ 이 되므로 낮은 Ca상황으로 생각할 수 있다.

해석은 유체 해석 전문 프로그램 Fluent 6.3<sup>(13)</sup>을 이용하여 수행되었다.

3. 기포 생성 기하학적 모델

2장에서 설명한 CFD에 기반한 수치해석모델은 정확한 물리적 거동을 모사할 수 있다는 장점이 있으나, 수치해석적으로 복잡한 2상유동을 고려하기 때문에 각 공정조건의 민감도를 살펴보는 데에는 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 기포가 발생하는 경우에 대하여 보다 간단하고 도식적인 방법을 적용하기 위하여 기하학적 모델을 적용하였다. 기하학적 모델에 의한 기포 생성 연구는 최초 Reddy<sup>(7)</sup>에 의해 제안되었는데 본 논문에서는 그가 제안한 사각단면 패턴에 대한 기하학적 모델 외에, 새롭게 삼각단면 패턴에 대한 기하학적 모델을 새롭게 정의하였으며 이를 기포생성 연구에 적용하였다.

3.1 사각단면 기포 생성 모델

먼저 사각단면을 가지는 패턴에 대한 Reddy의 기하학적 해석을 살펴본다. UV NIL 공정 중, 레지스트 유동 선단 모양을 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 원의 일부분이라 가정하면, 유동선

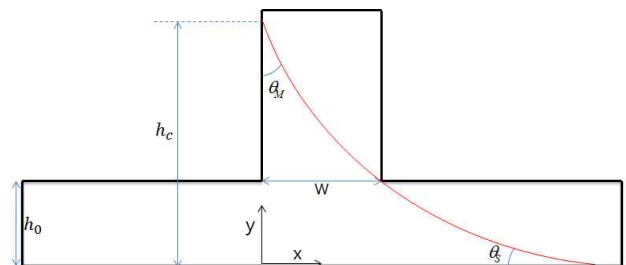


Fig. 3 A schematic interface configuration that catches the right down corner of the feature

단의 기하모형을 가상의 원의 중심  $(x_0, y_0)$ 과 원의 반지름( $r$ )에 대한 방정식으로 나타낼 수 있다. 이 경우, 몰드의 오른쪽 아래 모서리와 유동 선단이 만날 때 기포가 생성되는 것으로 판단할 수 있는 것이다. 그에 따른 원의 방정식은 다음과 같다.

$$(W-x_0)^2 + (h_0-y_0)^2 = r^2 \tag{7}$$

$$x_0 = r\cos\theta_M \tag{8}$$

$$y_0 = r\cos\theta_S \tag{9}$$

$$r = \frac{h_c}{\cos\theta_S - \sin\theta_M} \tag{10}$$

### 3.2 삼각단면 기포 생성 모델

본 논문에서는 삼각단면 패턴의 UV NIL 공정에 대하여 새롭게 기하학적 해석을 모델을 유도한다. 공정시의 다양한 삼각단면 패턴을 고려하기 위하여 삼각형의 꼭지각을 하나의 기하학적 변수로 고려하였다. Fig. 4는 삼각단면 줄무늬 패턴의 2차원 모델을 나타낸다. 삼각단면의 경우 유동선단을 나타내는 원의 방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$(W-x_0)^2 + (h_0-y_0)^2 = r^2 \tag{11}$$

$$x_0 = \frac{W}{2H}(h_c - h_0) + r\cos(\theta_M - \frac{\alpha}{2}) \tag{12}$$

$$y_0 = r\cos\theta_S \tag{13}$$

$$r = \frac{r}{\cos\theta_S - \sin(\theta_M - \frac{\alpha}{2})} \tag{14}$$

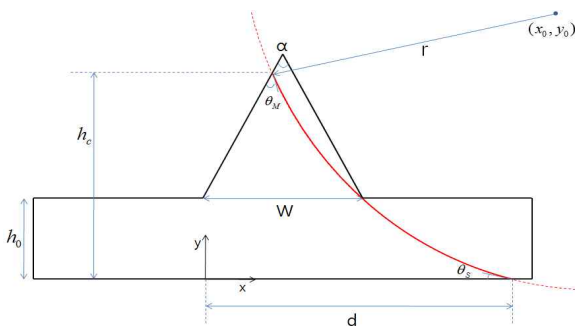


Fig. 4 Geometrical model of triangular cross section in case when bubble is trapped.

실제 작업 공정에서 이형과정을 고려하는 경우, 몰드와의 접촉각은 크게(소수성) 기관과의 접촉각은 작게(친수성) 설정하여야 하는 조건이 있으므로, 본 연구에서는 접촉각에 대한 관계를 파악하는 것에 초점을 맞추었다.

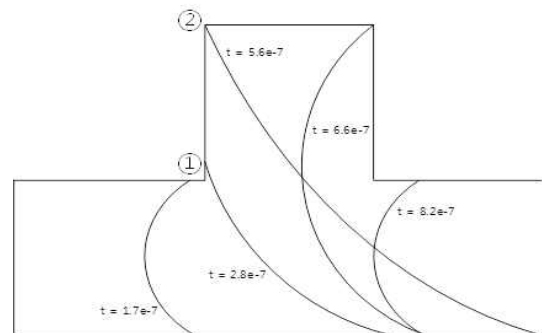
## 4. 결과

UV-NIL 공정을 통하여 사각단면과 삼각단면의 충전 과정이 이루어질 때, 기포가 생성되지 않고 완전히 충전이 이루어지는 경우와 기포가 발생하는 경우로 구분하여 유동 선단의 전진 양상과 기포 발생 조건에 대하여 알아보았다.

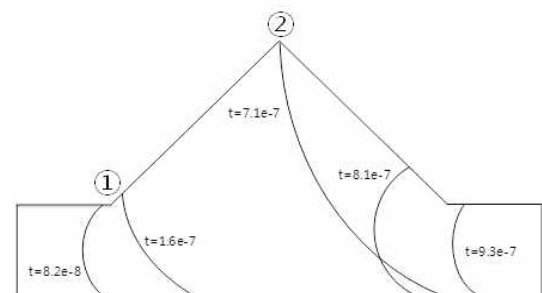
### 4.1 기포가 발생하지 않는 경우

기포가 생성되지 않고 충전이 완전히 이루어진 경우, Reddy<sup>(7)</sup>의 사각단면 패턴에 대한 연구에 따르면, 패턴 내부를 흐르는 유동 선단이 몰드의 여러 모서리(corner)를 지날 때 마다 표면 에너지를 최소화하는 방향으로 재구성(interface reconfiguration)이 이루어진다고 보고하였다.

본 절에서는 사각단면 패턴은 물론, Reddy가 다루지 않았던 삼각단면 패턴에 대해 유체유동해석을 수행하여 충전과정 중 발생하는 유동선단의 시간별 추이 및 유동선단의 재구성 경향



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of numerical simulation results between two full filled flow fronts( $H=200\text{nm}$ ,  $W=200\text{nm}$ ,  $h_0=100\text{nm}$ ,  $\theta_M=30^\circ$ ,  $\theta_S=30^\circ$ ): (a) rectangular cross section, (b) triangular cross section( $\alpha=90^\circ$ ).

그리고 양 패턴의 유사성 및 상이점에 대하여 조사하였다. Fig. 5는 사각 및 삼각단면 패턴의 계산 결과를 나타낸다.

Fig. 5 (a)에 나타난 사각단면의 경우 모서리 ①에서 첫 번째 선단 재구성이 나타나게 된다. 유동 선단이 몰드와 맞닿은 위쪽 끝(upper end)은 선단의 이동이 없이 아래 끝(lower end)만 이동하면서 새로운 유동 선단이 만들어 지는 형태를 확인할 수 있다. 이렇게 만들어진 유동 선단이 모서리 ②까지 전진하게 되고, 모서리 ②에 도착한 유동 선단은 새로운 선단 재구성이 이루어지게 되는데, 여기서 유동 선단의 아래 끝은 순간적으로 진행방향에 역행하는 모습을 보이게 된다. 이는 각 모서리에서 새롭게 만들어지는 유동 선단은 표면에너지를 최소화하는 형태로 만들어지기 때문이다.

Rossen<sup>(14)</sup>의 연구에 따르면, 얇은 판막이 단면적이 넓어지다가 좁아지는 튜브(tube)를 통과하는 경우 표면에너지를 최소화하기 위해 단면적이 좁아지는 부분에서 순간적으로 유동 선단의 모양이 볼록한 형태(convex)에서 오목한 형태(concave)로 바뀌는 현상이 실험을 통해 확인되었다. 이러한 선단 재구성을 삼각형 단면에서도 확인할 수 있다.

Fig. 5 (b)에 나타난 삼각단면 모델 역시 모서리 ①에서 사각 단면과 유사하게 선단 재구성 현상이 발견되고, 모서리 ②에서도 표면에너지가 최소화 되는 방향으로 선단 재구성이 이루어짐을 확인할 수 있다. 하지만 여기서 선단의 아래 끝이 진행방향에 역행하는 현상이 비교적 미미하게 나타나게 되는데, 이는 선단의 위쪽 끝이 몰드 벽면을 타고 올라가는 기울기가 사각단면에 비하여 작기 때문에 이동하는 동안 표면에너지 최소화를 위하여 아래 끝이 사각단면에 비하여 상대적으로 많이 이동하지 않기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4.2 기포가 발생하는 경우

기포가 생성되는 경우를 상정하여, 유체유동해석 결과와 기하학적 해석과의 결과를 비교하여 기포 발생 조건을 살펴

보았다. 일반적으로 UV NIL 공정시 대개 패턴의 몰드 패턴 형상은 이미 결정되어 있는 상태이므로, 공정에서 직접적으로 제어할 수 있는 물성 조건을 표면처리에 따른 접촉각 조건으로 상정하여, 접촉각의 변화에 따른 기포 생성 여부를 조사하는 것을 목적으로 하였다. 즉, 패턴의 형상과 잔류층의 높이를 고정한 상태에서 레지스트 대 기판 및 레지스트 대 몰드의 접촉각 즉,  $\theta_s$ 와  $\theta_M$ 을 변수로 놓고 기포가 생성되기 시작하는 접촉각 조건을 조사하였다.

먼저 사각단면 패턴에 대하여 기하학적 해석을 수행한 결과를 확인해 보면, Fig. 6의 곡선에서 볼 수 있듯이 기포가 생성되기 시작하는 접촉각 조건이  $\theta_s$ 가 20°를 넘으면서 거의 선형적인 증가 경향을 갖는 것으로 나타났다. 이는 수치해석의 결과 (Fig. 6의 점 데이터)와 비교적 잘 일치하는 양상이다.

이와 유사한 방법으로 삼각단면 패턴에 대하여 3.2절에서 세르게 유동된 기하학적 해석을 수행해 보고 그 결과를 유체유동 해석결과와 비교하였다. 여기서 삼각단면의 밑 폭(W)대 높이(H)비는 0.71일 때, 즉 꼭지각( $\alpha$ )이 70°일 때를 이용하였고,  $Ca = 10^{-2}$ 의 조건으로 해석이 수행되었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이, 기하학적 해석 결과는 유체유동 해석결과와의 전반적인 증가경향을 잘 나타내는 것으로 나타났으며, 특히  $\theta_s$ 가 50° 이하 범위에서는 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났다. 반면,  $\theta_s$ 가 50° 이상의 범위에서, 기하학적 해석 결과와 유체유동해석 결과가 다소 차이를 보이는데, 이는 기하학적 모델의 경우,

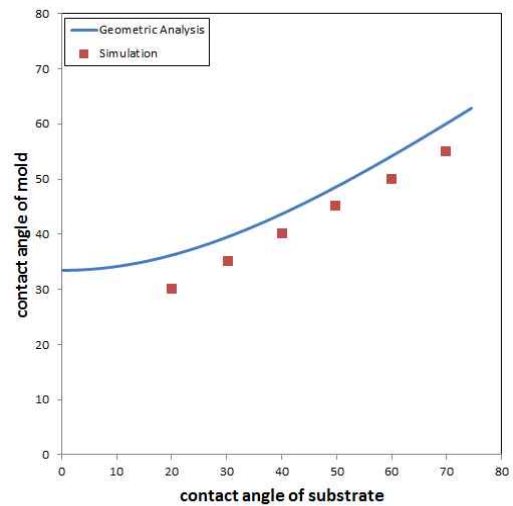


Fig. 6 Air bubble formation conditions with respect to the contact angles for rectangular cross section pattern(H=200nm, W=200nm,  $h_0$ =100nm).

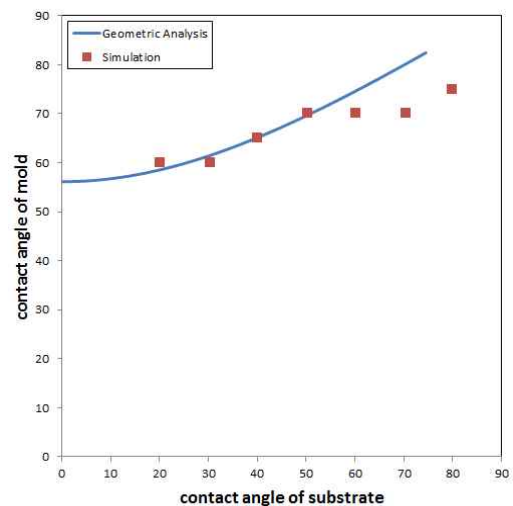


Fig. 7 Air bubble formation conditions with respect to the contact angles for triangular cross section pattern(H=200nm, W=280nm,  $h_0$ =100nm).

물리적 의미를 갖지 않는 한계 때문에, 점성과 속도에 의해 유동 선단의 모양이 곡률 하나만을 갖는 단순 원의 형태가 아닌 다소 복잡한 형태의 곡선으로 변화하는 것을 완벽히 나타내지 못하기 때문이다.

Fig. 6~7에서 살펴보았듯이 사각단면은 물론 사각단면 패턴에 대해서도 기하학적 해석결과는 유체유동해석에 의한 기포 생성 조건을 정성적으로 잘 추종하는 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 사각 및 삼각단면의 줄무늬 형상 패턴 몰드를 사용하는 UV NIL 공정에서 레지스트 유동 선단의 전진 양상과 기포 발생 조건을 밝히는 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기포 발생 조건을 밝힐 수 있는 기하학적 해석모델로서 Reddy에 의해 기개발되어 있는 사각단면 패턴의 모델 외에 삼각단면 패턴에 대해서 최초로 기하학적 해석모델을 개발하였다.
- (2) 기포가 발생하지 않고, 완전히 충전이 이루어지는 경우에 대하여, VOF기법 기반의 유체유동해석을 수행하여 사각 및 삼각단면 패턴의 유동선단 추이를 검토하였다. 양 단면의 패턴 모두 유동 선단이 몰드 캐비티의 각각의 모서리 (corner)를 지날 때 마다 표면에너지가 최소화하는 방향으로 선단의 재구성(interface reconfiguration)이 나타남을 확인하였다.
- (3) 기포가 생성되는 경우에 대하여, 기하학적 해석 및 유체유동해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 기하학적 해석 모델은 과학적 엄밀성이 떨어지는 모델임에도 불구하고, 기포생성 조건을 찾아내는데 있어 유체유동해석 모델의 해석결과를 정성적으로 잘 추종하였다. 따라서 통상의 공정 조건이 적용되는 UV-NIL 공정에서 기하학적 모델의 유용성을 확인하였다.

향후 유동 선단의 모양에 영향을 미치는 레지스트의 점도, 속도, 그리고 접촉각을 고려하여 원의 방정식을 보정할 수 있다면, 보다 정확하게 기포 생성 조건을 해석적으로 표현할 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2011-0023783)

### 참 고 문 헌

- (1) Chou, S. Y., and Krauss, P., 1997, "Imprint Lithography with Sub-10 nm Feature Size and High Throughput," *Microelectronic Engineering*, Vol. 35, No. 1-4, pp. 237-240.
- (2) Morihara, D., Hiroshima, H., and Hirai, Y., 2009, "Numerical study on Bubble Trapping in UV-nanoimprint Lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, No. 4-6, pp. 684-687.
- (3) Nagaoka, Y., Morihara, D., Hiroshima, H., and Hirai, Y., 2009, "Simulation study on Bubble Trapping in UV Nanoimprint Lithography," *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 171-174.
- (4) Hiroshima, H., Komuro, M., Kasahara, N., Kurashima, Y., and Taniguchi, J., 2003, "Elimination of Pattern Defects of Nanoimprint under Atmospheric Condition," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42, pp. 3849-3853.
- (5) Hiroshima, H., and Komuro, M., 2007, "Control of Bubble Defects in UV Nanoimprint," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 9B, pp. 6391-6394.
- (6) Liang, X., Tan, H., Fu, Z., and Chou, S. Y., 2007, "Air Bubble Formation and Dissolution in Dispensing Nanoimprint Lithography," *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 2, pp. 1-7.
- (7) Reddy, S., Schunk, P. R., and Bonnetcaze, R. T., 2005, "Dynamics of Low Capillary Number Interfaces Moving through Sharp Features," *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 12, pp. 122104-1-6.
- (8) Reddy, S., and Bonnetcaze, R. T., 2005, "Simulation of Fluid Flow in the Step and Flash Imprint Lithography Process," *Microelectronic Engineering*, Vol. 82, No. 1, pp. 60-70.
- (9) Hirt, C. W., and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.
- (10) Lee, Y. H., Kim, N. W., and Sin, H. C., 2009, "Effect of Boundary Slip Phenomena in Nanoimprint Lithography Process," *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 2, pp. 144-153.
- (11) Park, J., Kim, Y., Yi, J., and Kwon, J., 2009, "Enhancement of the optical performance by optimization of optical sheets in direct illumination LCD backlight", *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 13, No. 1, pp. 152-157.
- (12) Fulcher, R. A., 1985, "Effect of capillary number and its constituents on two-phase relative permeability curves", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 37, pp. 249-260.
- (13) Fluent 6.3.26, 2006, Fluent Inc, USA.
- (14) Rossen, W. R., 1990, "Theory of mobilization pressure gradient of flowing foams in porous media", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 136, pp. 38-53.