

미세액적의 분사를 이용한 박막 패터닝 공정에 대한 수치적 연구

서영호*·손기헌**

Numerical Study on a Thin Film Patterning Process Using Microdroplet Ejection

Youngho Suh* and Gihun Son**

Key Words : Level Set Method(Level Set방법), Microdroplet Ejection(미세액적분사), Thin Film Patterning Process(박막 패터닝 공법)

Abstract

Numerical simulation is performed for a microdroplet deposition on the pre-patterned micro-structure. The liquid-air interface is tracked by level set method improved by incorporating the ghost fluid approach based on a sharp-interface representation. The method is further extended to treat the contact angle condition at an immersed solid surface. The present computation of a patterning process using microdroplet ejection demonstrates that the multiphase characteristics between the liquid-gas-solid phases can be used to overcome the patterning error.

1. 서론

미세 액적을 이용한 패터닝 기술은 잉크젯과 같은 미세노즐로 피코 리터 단위의 잉크를 분사하는 매우 유용한 비접촉식 기술로 분사된 액적은 기판위에 충돌하여 미세 구조물을 채우게 되고 건조과정을 거쳐 박막의 패턴을 형성하게 된다. 이러한 패터닝 기술은 기존 패터닝 공정의 기반은 리포그래피 방식보다 공정이 단순하며 재료 소모율이 적어 제조원가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 잉크젯을 이용한 패터닝 기술은 액정디스플레이(LCD)의 컬러 필터를 비롯하여 DNA 마이크로어레이, 유기 TFT 장치, 마이크로 전자기판 그리고 마이크로 렌즈 제작 등 많은 분야에서 응용되고 있다.[1] 수 마이크로 단위의 미세한 패턴을 형성하기 위해서는 액적을 정확한 위치에 분사하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 잉크젯 패터닝 기술에서는 Fig. 1(a)와 같이 잉크젯 노즐 위치 제어 및 잉크젯 장비의 이동에 따른 분사 오차 등으로 패터닝 오차를 가지게 되며 결과적으로 Fig. 1(b)와 같이 원하는 패턴이 형성되지 않는다. 최근 이러한 패터닝 오차 한계를 극복하고 정밀도는 높이고자 기판은 친수성으로 미세 구조물은 소수성으로 처리한 후, 이러한 표면에너지 차이로 액적이 패터닝 되기 원하는 표면으로 이동시키는 기법에 대한 연구가 진행되고 있다[2,3]. 하지만 다양한 응용분야에도 불구하고 잉크젯을 이용한 패터닝에 대한 연구는 벽면 충돌에 의한 액적의 변형 과 분열 또한 미세 구조물과의 상호작용 등과 같이 복잡한 현상이 매우 짧은 시간에 마이크로 스케일의 영역에서 일어나기 때문에 제한적으로 진행되고 있

다. 이러한 현상에 대한 이해를 넓히기 위해서는 국부적인 현상을 자세히 묘사할 수 있고 다양한 변수에 대한 폭넓은 해석이 가능한 수치적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Ghost Fluid 방법을 바탕으로한 Level Set 방법을 이용하여 미세 구조물이 있는 벽면에서 미세 액적의 충돌 현상을 해석할 수 있는 수치 기법을 개발하고, 이를 이용한 패터닝 공법과 공정의 정밀도를 높이는 미세 액적의 정렬 기법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. 수치해석방법

기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 LS 함수에 의해 계산된다. Ghost fluid 방법을 바탕으로 기상, 액상 영역 모두에 적용될 수 있는 운동량 및 질량 보존식과 LS 함수 ϕ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) &= -\nabla p - \sigma \kappa \nabla H + \rho \mathbf{g} \\ &\quad + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} &= -\mathbf{u} \cdot \nabla \phi \end{aligned}$$

위의 식에서 H는 일종의 불연속적인 계단 함수이며, 상경계면의 곡률(κ), 물성치 등은 다음과 같이 계산된다.

$$H = \begin{cases} 1 & \text{if } \phi > 0 \\ 0 & \text{if } \phi \leq 0 \end{cases}$$

* 서강대학교 대학원, bighug@sogang.ac.kr

** 서강대학교 기계공학과, gihun@sogang.ac.kr

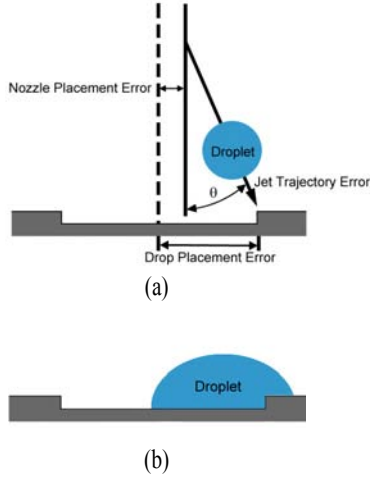


Fig. 1 Schematic diagram of inkjet patterning process: (a) droplet placement error and (b) undesired droplet deposition.

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$$

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)F, \quad \mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)F$$

여기서 F 는 효과적인 물성치 계산을 위하여 다음과 같이 도입하였다.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{if } H(\phi_A) = H(\phi_B) = 1 \\ 0 & \text{if } H(\phi_A) = H(\phi_B) = 0 \\ \frac{\max(\phi_A, \phi_B)}{\max(\phi_A, \phi_B) - \min(\phi_A, \phi_B)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 ϕ_A 와 ϕ_B 는 근접한 격자점으로부터 구한 거리이다. 또한 격자점과 일치하지 않는 불규칙한 고체면을 고려하기 위하여 고체영역에서는 음의 값, 유체영역에서 양의 값을 갖는 또 다른 거리함수 ψ 를 도입하였다. 고체영역에서의 접촉각 조건을 고려하기 위하여 LS 이류방정식은 다음과 같이 수정하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \cos \varphi - \mathbf{n}_s \cdot \nabla \phi \quad \text{if } \psi \leq 0$$

여기서 \mathbf{n}_s 는 고체영역으로 향하는 단위벡터이며 $-\nabla \psi / |\nabla \psi|$ 로 얻을 수 있다[4].

3. 계산 결과 및 검토

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 수치해석 방법을 이용하여 미세 액적의 패터닝 공정에서 액적의 분사오차가 있는 경우에 대한 계산 결과를 나타낸 것이다. 계산에 사용된 액적의 물성치는 $\rho_l = 1020 \text{ kg/m}^3$, $\mu_l = 1.31 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, $\sigma = 0.045 \text{ N/m}$ 로 하였으며 액적의 직경은 $50 \mu\text{m}$ 그리고 구조물에 의한 구멍의 크기는 가로, 세로 길이 모두 $80 \mu\text{m}$ 으로 하였다. 액적의 충돌 속도는 8 m/s 로 하였으며 바닥면의 접촉각은 30° 를 사용하였다. Fig. 2(a)는 액적과 구조물의 접촉각이 30° 인 경우 미세 액적의 바닥 충돌 후 형상 변화를 나타낸 것이다. 분사된 액적은 분사오차로 인하여 구조물에 먼저 충돌하게 되며 충돌 후 바닥면과 구조물 모두에서 넓게 퍼지게 된다. 하지만 구조물이 친수성 표면, 즉 접촉각이 작

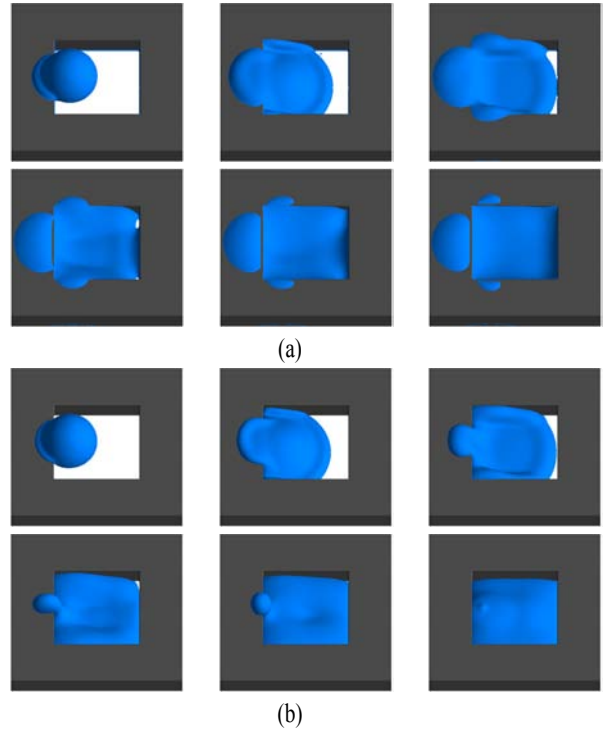


Fig. 2 Effect of contact angle on droplet deposition pattern : (a) $\varphi_{\text{substrate}}=30^\circ, \varphi_{\text{structure}}=30^\circ$ and (b) $\varphi_{\text{substrate}}=30^\circ, \varphi_{\text{structure}}=120^\circ$

기 때문에 수축과정에서 액적의 많은 부분은 구조물 안을 채우지만 일부분이 구조물 위에 그대로 남아 있는 것을 볼 수가 있다. 그와는 대조적으로 액적과 구조물의 접촉각이 120° 인 경우 구조물이 소수성 표면이기 때문에 액적의 이동이 쉬워져 대부분의 액적이 구조물 안으로 채워지는 것을 볼 수가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Level Set 방법을 바탕으로 액상과 기상 뿐만 아니라 불규칙한 형상의 고체를 해석할 수 있는 수치기법을 개발하여 미세액적을 이용한 박막 패터닝 공정에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 계산 결과로부터 미세 액적의 벽면 충돌 후 형상변화는 액적과 충돌면의 접촉각에 따라 달라지며, 패터닝 공정에서 미세 구조물의 접촉각을 변화시킴으로 패터닝 오차를 개선할 수 있음을 볼 수 있었다.

참고문헌

- [1] C. T. Chen, Micro-fabrication of color filter for liquid crystal display by inkjet-based method, Proc. SPIE., Vol. 4928 (2002), pp. 77-84.
- [2] R. Seemann, M. Brinkmann, E. Kramer, F. Lange and R. Lipowsky, Wetting morphologies at microstructured surfaces, PNAS, Vol. 102 (2005), pp. 1848-1852.
- [3] V. V. Khatavkar, P. D. Anderson, P. C. Duineveld and H. H. E. Meijer, Diffuse interface modeling of droplet impact on a pre-patterned solid surface, Macromol. Rapid. Commun., Vol. 26 (2005), pp. 298-303.
- [4] G. Son and V. K. Dhir, A level set method for analysis of film boiling on an immersed solid surface, Numer. Heat Transfer, Part B, Vol. 52(2007), pp. 153-177.