28 대한기계학회논문집 B권, 제33권 제1호, pp. 28~37, 2009

〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.1.28

미세액적의 자기정렬 기법을 포함한 패터닝 공법에 대한 해석적인 연구

서 영 호* · 손 기 헌†

(2008년 8월 11일 접수, 2008년 11월 14일 수정, 2008년 12월 3일 심사완료)

A Numerical Study on Patterning Process Including a Self-Alignment Technique of a Microdroplet

Youngho Suh and Gihun Son

Key Words: Microdroplet Ejection(미세액적분사), Thin-Film Patterning Process(박막 패터닝 공법), Level-Set Method(Level set 방법), Self-Alignment Technique(자기정렬기법)

Abstract

Numerical simulation is performed for microdroplet deposition on a pre-patterned micro-structure. The liquid-air interface is tracked by a level-set method, which is improved by incorporating a sharp-interface modeling technique for accurately enforcing the matching conditions at the liquid-gas interface and the no-slip condition at the fluid-solid interface. 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 improve the patterning accuracy.

기호설명

D : 액적의 직경
g : 중력
h : 격자간격
H : 계단 함수
l_o : 길이의 대표값

* 서강대학교 기계공학과
† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과
E-mail : gihun@sogang.ac.kr
TEL : (02)705-8641 FAX : (02)712-0799

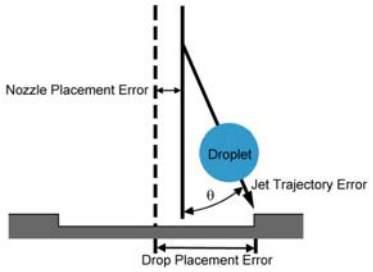
l : 액체
sub : 기판
w : 기판을 제외한 구조물

1. 서 론

최근 액정디스플레이(LCD)를 비롯한 PDP, OLED 등 디스플레이 방식간의 가격경쟁이 치열해짐에 따라 제조단가를 낮출 수 있으면서 대면적화가 용이한 새로운 디스플레이 제조방식에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존의 디스플레이 박막의 제조 또는 패터닝을 위해 널리 이용된 리소그래피 방식은 높은 청정도, 고가의 장비, 다단계의 공정이 요구되고, 재료의 낭비가 많아서 제품가격을 낮추기 힘든 단점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하는 방법으로 잉크젯 프린팅 기법을 이용하여 박막을 직접 패터닝하는 공정에 대한 연구가 최근 들어 활발히 진행되고 있다. 잉크젯으로 분사된 피코리터 단위의 미세액적은 홈(cavity)이 형성된 기판 위에 충돌하여 홈을 채우게 되고 건조과정을 거쳐 박막의 패턴을 형성하게 된다. 이러한 잉크젯을 이용한 패터닝 공법은 기존 리소그래피 방식보다 공정이 단순하며 재료 소모율이 적어 제조원가를 낮출 수 있는 장점이 있기 때문에, 액정디스플레이(LCD)의 컬러 필터 제작 외에도 DNA 미세 배열, 유기 TFT 장치, 마이크로 전자기판 그리고 마이크로 렌즈 제작 등 많은 분야에서 응용되고 있다.[1,2]

잉크젯 프린팅을 이용한 패터닝 공정에서 가장 중요한 것은 정확한 위치에 정확한 폭과 두께로 패턴을 만드는 것이다. 하지만 기존의 잉크젯 기술로 수 마이크로미터의 미세한 패턴을 형성하는 데에는 극복해야 할 문제가 있다. 일반적으로 잉크젯 장비의 위치 이동 오차는 약 10μm이며, 탄도가 변하는 오차는 약 5 μm정도이다. 그 외에도 노즐 크기 등 다른 오차 요인 등을 감안하면 잉크젯 공정은 보통 10-15μm의 패터닝 오차를 가지는 것으로 알려져 있다.[3] 패터닝 공정에서 액적의 분사위치 오차가 발생하면 Fig. 1과 같이 원하지 않는 패턴이 형성될 수 있다.

패터닝 오차를 극복하고 정교한 패터닝 공정을 구현하기 위해서는 벽면 충돌에 의한 미세액적의 변형과 분열 및 액적과 홈 또는 미세구조물과의 상호작용 등의 매우 짧고 작은 크기에서 일어나는 복잡한 현상에 대한 이해가 필수적이다.



(a)

(b)

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

잉크젯을 이용하여 LCD 등의 다양한 디스플레이 패널을 제작하는 실험적 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다.[3-5] 하지만 대부분의 연구는 실험적으로 이루어졌으며 측정 방법상의 한계로 인하여 액적의 거동 및 미세구조물과의 상호작용에 대한 분석이 상당히 미흡한 실정이다. 최근 들어 패터닝 공정에 동반된 액적거동에 대한 이해를 넓히고 다양한 설계변수에 대한 해석이 가능한 수치적 연구가 활발히 수행되고 있다.

Khatavkar 등[6]은 DIM(Diffuse-Interface Model) 방법을 이용하여 원형 홈이 설치된 평판에서의 액적충돌 현상을 2차원 축대칭 조건에서 수치해석하였다. 바닥면의 접촉각이 고정된 상태에서 홈의 측벽면의 접촉각 변화에 따른 액적의 형상 변화를 계산하였다. 하지만 액적의 체적보다 홈의 깊이가 얕아 액적의 충전현상에 대한 내용이 포함되지 않고 2차원 원형의 홈을 이용하는 등 비교적 단순한 경우에 대한 계산만 수행하였다.

Yang 등[7]은 VOF(Volume-of-fluid) 방법을 이용하여 사각 홈이 있는 기판에서 홈의 형상과 액적의 충돌속도 및 충돌위치를 변화시키면서 액적이 홈을 충전하는 현상에 대한 포괄적인 연구를 수행하였다. 그러나 이들의 연구에는 미세액적을 이용한 패터닝에서 중요한 변수인 접촉각 변화에 대한 효과가 고려되지 않았다.

Liou 등[8] 또한 VOF 방법을 이용하여 사각 홈이 있는 기판 위에서의 액적의 충돌 및 충전 현

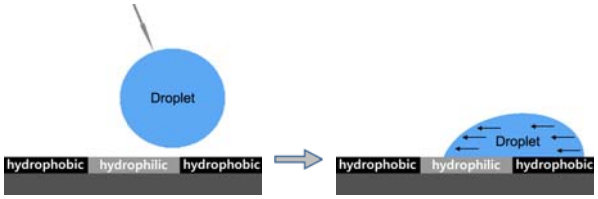


Fig. 2 Schematic of self-aligned droplet motion

상에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 이들은 액적의 충돌속도뿐만 아니라 기판 및 홈을 이루는 미세구조물의 접촉각 변화가 액적의 형상 변화에 미치는 영향에 대해 해석하였다. 하지만 VOF 방법은 공간상에 이차미분이 포함되는 상경계면의 곡률을 정확하게 계산할 수 없고, 상경계면을 기하학적으로 재구성하는 알고리즘이 복잡하며, 고체-액체-기체의 영역이 존재하는 다상유동의 경우 불규칙한 고체면에서 접촉각 조건을 정확히 적용하는 것이 쉽지 않다는 문제가 있다. 그러므로 잉크젯을 이용한 패터닝에 대한 기존의 연구에서는 액적 충전에 미치는 접촉각 효과에 대한 해석이 미흡한 실정이다.

최근 DNA 칩 등의 제조 공정에서 패터닝 오차를 극복하고 정밀도를 높이는 방법으로 미세액적의 자기정렬(Self-alignment) 기법이 제시되고 있다.[9,10] 자기정렬 기법이란 기판의 표면에너지 차이를 이용하여 액적을 원하는 위치로 이동시키는 방법이다. Fig. 2와 같이 액적이 안착되는 표면을 친수성으로 하고 나머지를 소수성으로 처리하면 액적이 소수성 표면에 떨어지더라도 표면장력의 특성에 의해 친수성 표면으로 이동하는 원리를 이용한 것이다.

본 연구에서는 미세구조물이 있는 벽면에서 미세액적의 충돌현상을 해석할 수 있는 수치기법을 개발하였다. 상경계면을 추적하는 방법으로 각 상의 체적비에 기반을 둔 VOF 방법보다 표면장력을 효과적으로 계산할 수 있는 LS(Level-Set) 방법을 바탕으로 상경계면의 조건을 보다 정확하게 적용할 수 있는 sharp-interface 모델링 기법[11-13]과 격자점과 일치하지 않는 미세구조물 형상을 고려하는 수치기법을 결합하였다. 이를 이용하여 액적의 속도 그리고 액적과 기판 및 미세구조물의 접촉각 변화에 따른 패턴 형성과정을 해석하였다. 또한, 패터닝 공정의 정밀도 향상에 자기정렬 기법의 적용 가능성을 분석하는 연구를 수행하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 Son과 Dhir[14]의 sharp-interface 구현을 위한 LS 방법을 기반으로 하였다. 기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 LS 함수에 의해 계산된다. 기상, 액상 영역 모두에 적용될 수 있는 운동량 및 질량 보존식과 LS 함수 ϕ를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \nabla \boldsymbol{u} + \boldsymbol{f} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\boldsymbol{u} \cdot \nabla \phi \tag{3}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f} &= -\rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} + \rho \boldsymbol{g} - \sigma \kappa \nabla H_\phi \\ &\quad + \nabla \cdot \mu (\nabla \boldsymbol{u})^T \\ H_\phi &= 1 \qquad \text{if} \quad \phi > 0 \\ &= 0 \qquad \text{if} \quad \phi \le 0 \\ \kappa &= \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \\ \rho &= \rho_g (1 - F_\phi) + \rho_l F_\phi \\ \mu^{-1} &= \mu_g^{-1} (1 - F_\phi) + \mu_l^{-1} F_\phi \end{aligned} \tag{4}$$

위의 식에서 H_ϕ는 액상-기상을 구분하는 불연속적인 계단 함수이며, 상경계면의 곡률(κ)은 거리함수로 정의된 연속적인 LS 함수로부터 계산된다. 또한 밀도 및 점도의 계산에 사용된 F_ϕ는 효과적인 물성치 계산을 위하여 다음과 같이 도입하였다.

$$\begin{aligned} F_\phi &= 1 \qquad \text{if} \quad H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 1 \\ &= 0 \qquad \text{if} \quad H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 0 \\ &= \frac{\max(\phi_A, \phi_B)}{\max(\phi_A, \phi_B) - \min(\phi_A, \phi_B)} \; otherwise \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 하첨자 A, B는 F_ϕ의 계산 지점에 근접한 두 격자점을 나타낸다.

상경계면($\phi = 0$)은 식 (3)에 의해 결정되지만, H_ϕ와 κ를 정확하게 계산하기 위해서는 LS 함수를 거리함수($|\nabla \phi| = 1$)가 되도록 식 (5)를 사용하

여 보정하는 것이 바람직하다.[15]

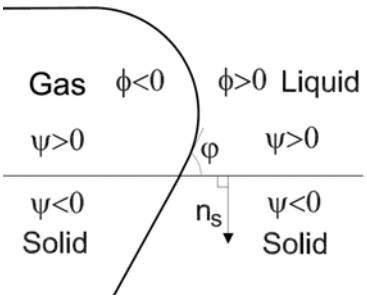


Fig. 3 Extension of LS function into a solid region

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(1 - |\nabla \phi|) \tag{6}$$

여기서,

$$\begin{aligned} S &= 0 && \text{if } |\phi_o| < h/2 \\ &= \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0 + h^2}} && otherwise \end{aligned} \tag{7}$$

ϕ_0은 식 (3)의 해이며, τ는 식 (5)의 우변이 상경계면 주위에서 0이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다. 식 (6)을 푸는 동안 각 상의 체적이 보존하지 않는 경향이 나타나며, 이를 줄이기 위해 부호 함수를 식 (7)과 같이 수정하였다. 실제 해법으로는 상경계면에 인접한 격자점에 대해 식 (6)을 적용하지 않도록 하는 것이며, 이 방법을 통하여 체적 비보존의 문제가 상당히 개선되었다.[16]

또한 격자점과 일치하지 않는 불규칙한 고체면을 고려하기 위하여 Fig. 3에 표시된 것처럼 고체영역에서는 음의 값, 유체영역에서 양의 값을 갖는 또 다른 거리함수 ψ를 도입하였다. 유체영역에서 정의된 식 (1)-(2)는 다음과 같이 고체를 포함하는 전체영역으로 확장될 수 있다.[14]

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} &= -\nabla p + \nabla \cdot \frac{\mu}{F_\psi} \nabla \boldsymbol{u} + \boldsymbol{f} && \text{if } \psi > 0 \\ \boldsymbol{u} &= 0 && \text{if } \psi \le 0 \end{aligned} \tag{8}$$

고체영역에서의 접촉각 조건을 고려하기 위하여 LS 이류방정식은 다음과 같이 수정하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \phi &= 0 && \text{if } \psi > 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial \tau} &= \cos\varphi - \boldsymbol{n_s} \cdot \nabla \phi && \text{if } \psi \le 0 \end{aligned} \tag{9}$$

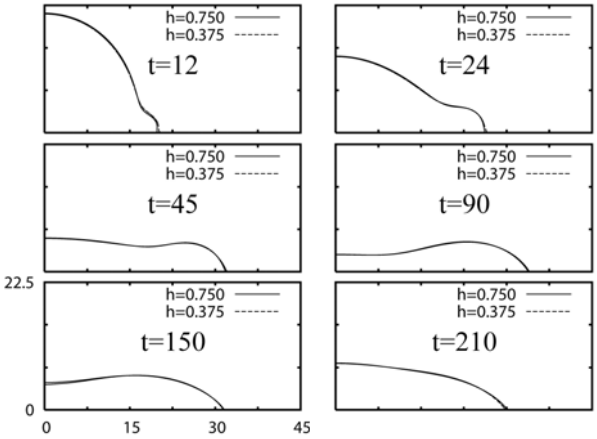


Fig. 4 Effect of mesh size on droplet-wall impact process.

여기서 $\boldsymbol{n_s}$는 고체영역으로 향하는 단위벡터이며 $-\nabla\psi/|\nabla\psi|$로 얻을 수 있으며, 우변항은 고체면과 액체-기체 상경계면에서 형성되는 접촉각(φ)에 대한 조건을 LS 함수를 이용하여 나타낸 것이다.

3. 계산결과 및 검토

패터닝 공정에서 미세액적-벽면 충돌현상을 해석하기 위해 사용된 물성치는 다음과 같다.

$$\rho_l = 1020 kg/m^3,\ \mu_l = 1.31 \times 10^{-3} Pa \cdot s$$
$$\rho_g = 1.2 kg/m^3,\ \mu_g = 1.78 \times 10^{-5} Pa \cdot s,$$
$$\sigma = 0.045 N/m$$

모든 계산에서 $l_0 = 1\mu m$와 $t_0 = 1\mu s$를 대표 값으로 하여 지배방정식을 무차원화 하였다. 계산에 사용된 액적의 직경은 30이며 대부분의 경우 액적의 분사 속도는 $8l_0/t_0$로 하였다.

3.1 격자 수렴도 검사

먼저, 격자 수렴성 검사를 위하여 액적의 벽면 충돌 현상을 h=0.750와 h=0.375인 경우에 대하여 계산하였다. 2차원 축대칭 조건하에서 계산을 수행하였으며 다른 조건은 앞에서 언급한 조건과

동일하며, 액체-공기-고체 면에서의 접촉각(φ)은 60^o로 하였다. 결과는 Fig. 4와 같으며, h=0.750인 경우의 액적의 벽면 충돌 후 형상이 h=0.375인 경우와 거의 일치하는 것을 볼 수가 있다. 전체

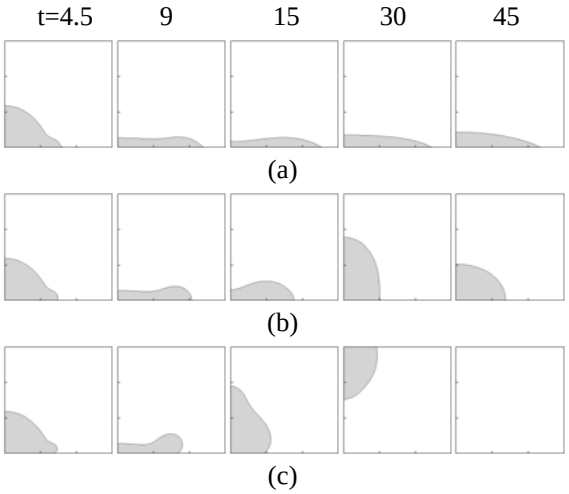


Fig. 5 Effect of contact angle on droplet-wall impact: (a) $\varphi = 30^o$, (b) $\varphi = 90^o$ and (c) $\varphi = 150^o$

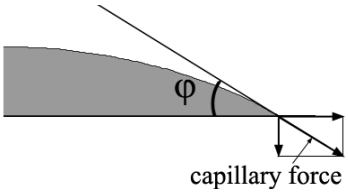


Fig. 6 Schematic of a surface tension force acting on a droplet on a substrate.

계산시간 동안 액적의 퍼짐 반경은 최대 1% 오차이내에서 일치하였으며 액적의 높이의 경우 최대 6% 오차 이내에서 일치하였다. 그러므로 본 연구에서는 대부분의 계산에서 격자간격을 h=0.750로 선택하여 결과의 정확성을 잃지 않으면서 계산시간을 단축하도록 하였다.

3.2 평판에서의 액적의 벽면 충돌

Fig. 5는 격벽 또는 구조물이 없는 평판에서의 액적 충돌현상에 대해 접촉각을 변화시키면서 계산한 결과이다. 액적-벽면 충돌과정의 초기에는 관성력에 의해 얇은 액막이 벽면에 형성된다. 액막의 반지름은 액적의 운동량이 표면장력과 점성마찰력에 의해 감소하여 0이 될 때까지 증가하게 되며 이후에는 표면장력에 의하여 수축하게 된다. 접촉각이 작은 경우($\varphi = 30°$), Fig. 6에 나타난 바와 같이 표면장력의 수평방향 성분이 증가하게 됨으로 액적은 벽면충돌 후 넓게 퍼지게 되며 되감김 현상이 잘 일어나지 않는 것을 볼 수가 있다. 접촉각이 $\varphi = 90°$로 증가하게 되면 표면장력의 수평성분이 감소하게 되어 Fig. 5(b)에

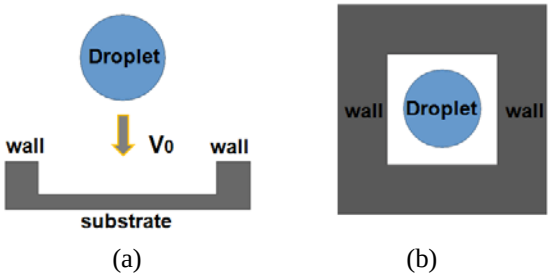


Fig. 7 Computational domain for droplet impact on square cavity: (a) side view and (b) top view.

서 보는 것과 같이 퍼짐 반경이 줄어들게 되며 되감김 현상은 더 활발하게 일어나 액적은 관성과 표면장력의 불균형에 의하여 퍼짐과 수축을 반복하게 되는 것을 볼 수가 있다. 접촉각이 $\varphi = 150°$으로 커지게 되면 표면장력이 액적의 퍼짐 방향과 반대로 작용하게 되어 퍼짐현상을 지연시키고 되감김 현상이 잘 일어나게 되어 Fig. 5(c)에서 보는 것과 같이 액적의 되튐 현상이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 그러므로 잉크젯을 이용한 패터닝 공정의 경우 기판의 접촉각이 작을수록 액적이 빠른 속도로 퍼지게 되며 수축 현상에 의한 되튐없이 안정적인 패턴을 형성하게 되는 것을 볼 수 있다.

3.3 측벽이 있는 기판에서의 액적의 벽면 충돌

패터닝 공정의 경우 액적의 퍼짐 현상을 조절하기 위해 기판위에 미세구조물로 홈을 만들어 준다. 기판에 구조물이 있는 경우의 액적-벽면 충돌 현상 및 액적과 구조물의 상호작용에 대한 해석을 수행하기 위해 Fig. 7과 같은 계산영역을 사용하였다. 계산에 사용된 액적의 직경은 30 또는 36이며 구조물에 의한 사각 홈의 크기는 가로, 세로 길이 모두 50이며 바닥으로부터의 높이는 10이다.

Fig. 8은 액적의 직경이 30이며 기판의 접촉각을 $\varphi_{sub} = 30°$ 유지하면서 측벽면의 접촉각을 변화시킨 경우 액적의 충돌 및 충전 현상에 대한 결과이다. 충돌 초기에는 바닥면의 접촉각이 일정하게 작기 때문에 액적은 측벽까지 쉽게 퍼져

홈을 채우게 된다. 이 후 액적의 거동은 측벽면의 접촉각에 따라 달라진다. 측벽면의 접촉각이 30°인 Fig. 8(a)의 경우, 벽면과의 낮은 접촉각을 유지하기 위해 액막의 상경계면이 벽을 따라 이동하게 되고 이로 인하여 액막은 가운데가 얇은 오목한 형태를 형성하게 된다. 결국 $t = 30$ 이후에는 중앙에 채워지지 않는 부분이 생기게 된다. 측벽의 접촉각이 60°, 90°로 증가함에 따라 액막은 수평에 가까운 형태에 도달한다. 접촉각이 120°인 Fig. 8(d)의 경우 측벽면의 접촉각을 유지하기 위해 가운데가 볼록한 액막이 형성되는 것을 볼 수 있다.

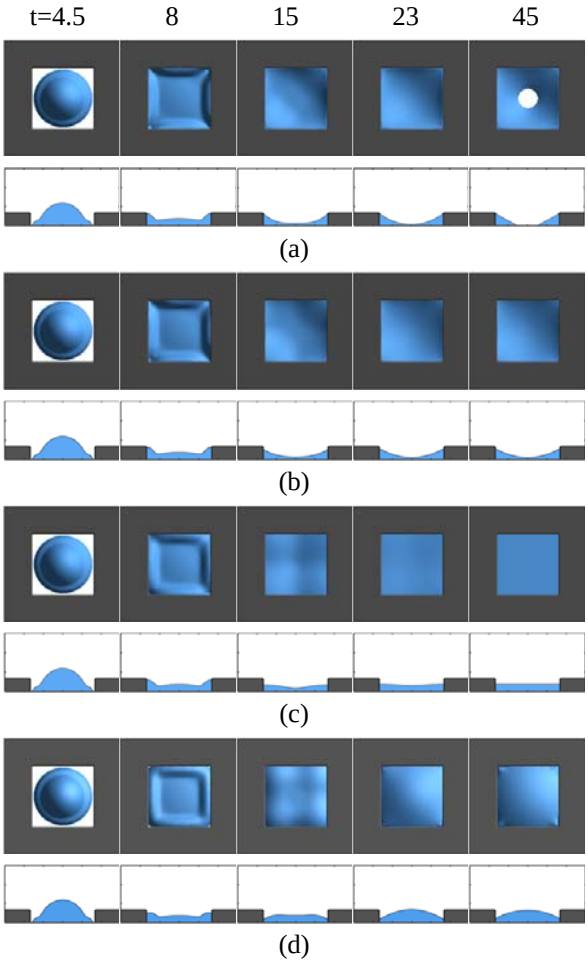


Fig. 8 Effect of contact angle of cavity wall on droplet motion for $D = 30$ and $\varphi_{sub} = 30°$: (a) $\varphi_w = 30°$, (b) $\varphi_w = 60°$ (c) $\varphi_w = 90°$ and (d) $\varphi_w = 120°$.

Fig. 8의 결과로부터 액적의 부피가 미세구조물에 의한 홈의 부피보다 작을 때 측벽면의 접촉각이 90°인 경우 평탄도 측면에서 가장 우수한 형상을 이루게 되는 것을 볼 수가 있다. 반면 벽면 접촉각이 120°인 경우 액막은 볼록한 형상으로, 60°인 경우 오목한 형상이 되어 액막의 평탄도 측면에서 불리한 것을 볼 수가 있다. 패터닝 공정에서 증발은 초기단계에서 Chen 등[17]이 언급한 바와 같이 기체-액체-벽 접촉점이 고정된 상태에서 일어나는 것을 고려하면, 액막의 가운데가 오목한 형상보다는 볼록한 형상 즉 접촉각이 120°인 경우가 60°인 경우보다 평탄한 액막 형성에 유리하다고 할 수 있다.

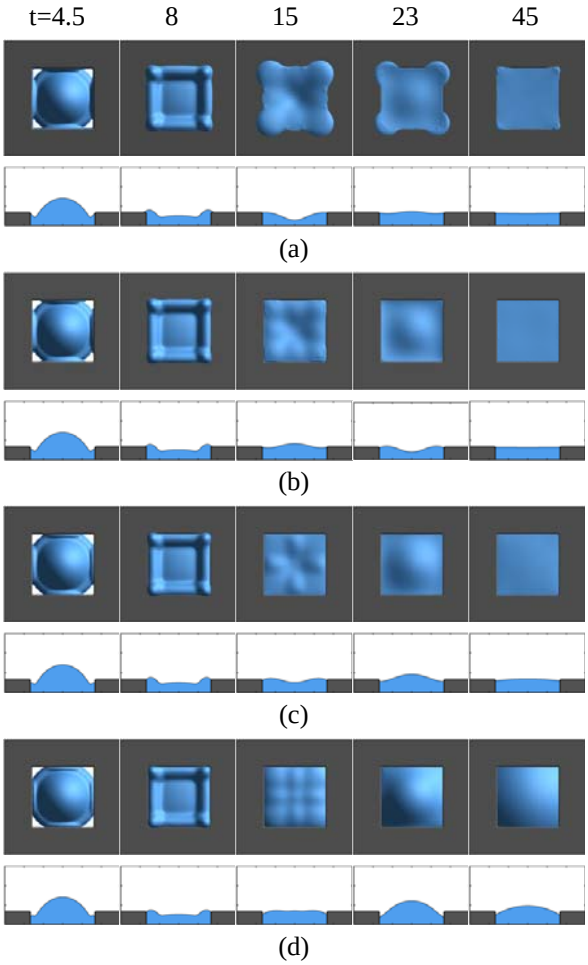


Fig. 9 Effect of contact angle of cavity wall on droplet motion for $D = 36$ and $\varphi_{sub} = 30°$: (a) $\varphi_w = 30°$, (b) $\varphi_w = 60°$ (c) $\varphi_w = 90°$ and (d) $\varphi_w = 120°$.

Fig. 9는 액적의 직경이 36로 증가하였을 경우 액적의 충돌 및 충전 현상에 대해서 계산한 결과이다. 액적의 관성이 증가하였기 때문에 바닥면과 충돌 후 t=8에서 보는 바와 같이 벽면 근처에서 액막이 벽면보다 높게 퍼져 올라가는 것을 볼 수 있다. 측벽면의 접촉각이 30°인 Fig. 9(a)의 경우 작은 접촉각 즉 친수성 효과로 인하여 액막의

일부분이 벽면위로 넘쳐서 퍼지게 되는 것을 볼 수가 있다. 시간이 지남에 따라 벽면 위로 퍼진 부분은 표면장력에 의해 구조물에 의한 홈 안으로 대부분 돌아오게 되지만 모서리 부분에 약간

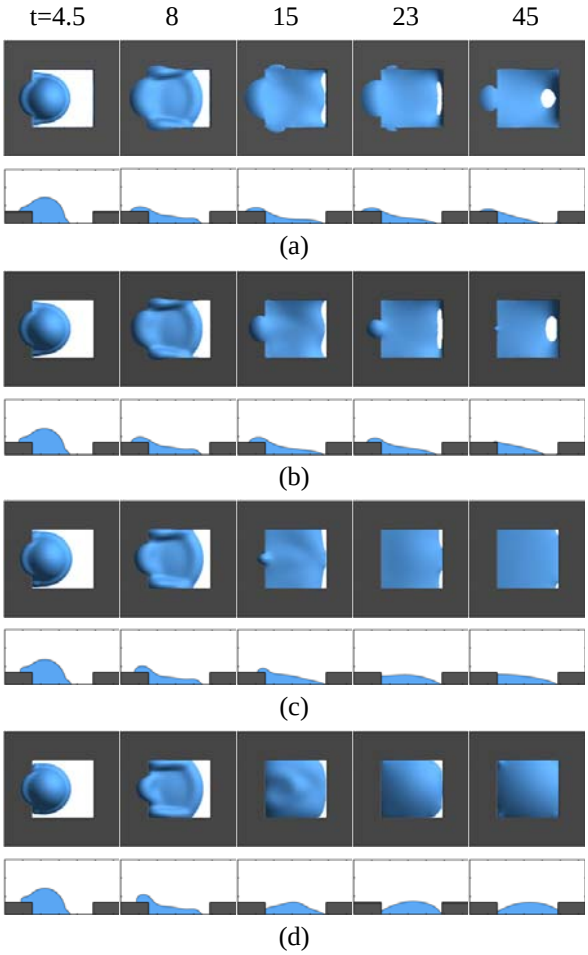


Fig. 10 Effect of contact angle of cavity wall on droplet motion with droplet placement error for $D=30$ and $\varphi_{sub}=30°$: (a) $\varphi_w=30°$, (b) $\varphi_w=60°$, (c) $\varphi_w=90°$ and (d) $\varphi_w=120°$.

의 넘침이 남아있다. 벽면의 접촉각이 60°, 90°로 증가하면 액적이 측벽면 위로 퍼지는 현상이 거의 나타나지 않으며 결국 액막은 수평에 가까운 형태에 도달하는 것을 볼 수 있다. 접촉각이 120°인 경우 액막의 상경계면이 측벽면의 아래쪽으로 이동하게 되어 가운데가 볼록한 형상을 이루는 것을 볼 수가 있다. Fig. 9로부터 액적의 체적이 홈의 체적과 비슷할 경우 벽면의 접촉각이 60°에서 90°인 경우 액막의 형상은 접촉각에 상관없이 바닥과 수평을 이루게 되어 평탄도가 우수한 액막을 형성함을 볼 수가 있다. 하지만 접촉각이 90°보다 큰 경우에는 벽면 접촉각의 영향을 받아 가운데가 볼록한 형상을 이루게 되는 것을 볼 수가 있다.

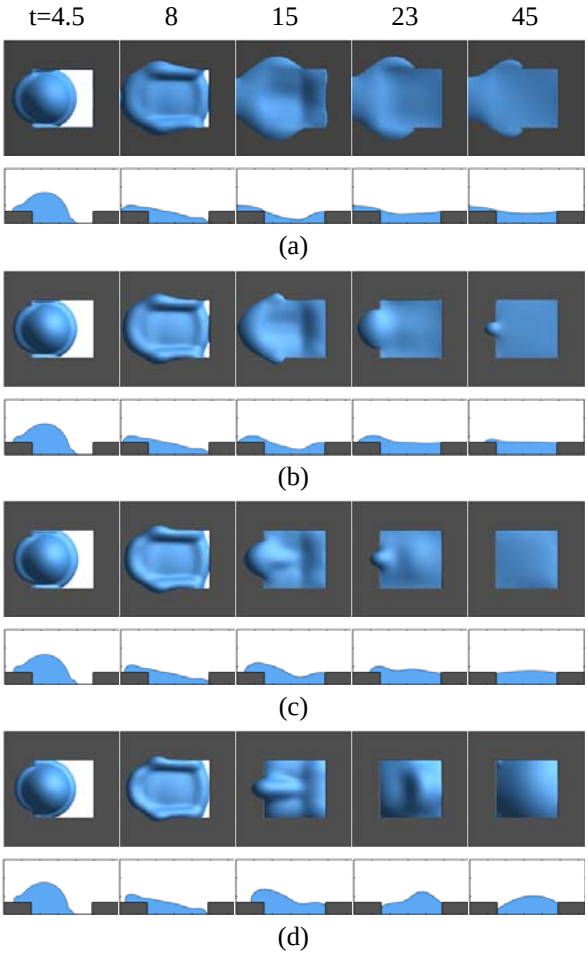


Fig. 11 Effect of contact angle of cavity wall on droplet motion with droplet placement error for $D=36$ and $\varphi_{sub}=30°$: (a) $\varphi_w=30°$, (b) $\varphi_w=60°$, (c) $\varphi_w=90°$ and (d) $\varphi_w=120°$.

3.4 분사오차가 있는 경우의 액적의 벽면 충돌

잉크젯을 이용한 패터닝 공정에서 발생하는 액적분사 오차를 줄이는 방안으로, 본 연구에서는 미세구조물의 접촉각을 변화시켜 패터닝 오차를 극복하는 자기정렬 기법의 가능성에 대해 살펴보았다.

Fig. 10은 중심으로부터 15의 거리만큼 이동된 곳에 액적을 충돌시켰을 경우 구조물 또는 측벽의 접촉각이 액적 거동에 미치는 영향에 대해 해석한 결과이다. 접촉각이 30°, 60°인 Figs. 10(a), 10(b)의 경우, 분사된 액적은 분사오차로 인하여

측벽을 이루는 구조물에 먼저 충돌하게 되며 충돌 후 기판과 구조물 모두에서 넓게 퍼지게 된다. 액적의 많은 부분은 홈을 채우지만 구조물이 접촉각이 작은 친수성 표면이기 때문에 수축과정

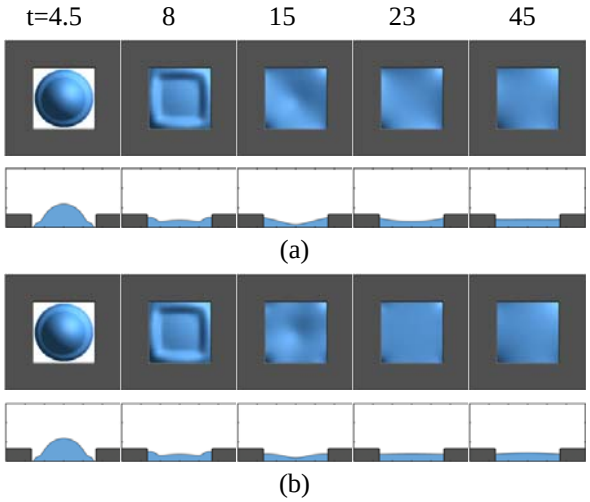


Fig. 12 Effect of contact angle hysteresis of cavity wall on droplet motion for $D = 30$ and $\varphi_{sub} = 30°$: (a) $30° \le \varphi_w \le 120°$, (b) $90° \le \varphi_w \le 120°$.

에서 일부분이 구조물 위에 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 또한 시간이 지남에 따라 가운데 홈을 채운 액막이 얇아져서 $t = 23$ 이후에는 바닥면이 보이는 공동이 생기게 되는 것을 관찰할 수가 있다. $\varphi_w = 90°$인 경우 구조물 위에 충돌한 액적은 구조물위에서 잘 퍼지지 않게 되고 충돌 관성에 의하여 구조물 안으로 모두 이동하는 것을 볼 수가 있다. 하지만 액적은 충돌한 벽면에서 접촉각을 만족시키기 위하여 벽면에 붙어있게 되어 반대편 벽면 방향으로 이동이 제한된다. 결국은 Fig. 10(c)에서 보는 것과 같이 액적이 충돌한 부분의 반대편 바닥면에 충전되지 못한 부분이 발생한다. 미세구조물의 접촉각이 $\varphi_w = 120°$인 경우 대부분의 액적이 구조물 안으로 채워지는 것을 볼 수가 있다. 또한 이 경우도 액적은 충돌한 벽면에서 접촉각을 만족시키기 위하여 벽면에 붙어있게 되지만 접촉각이 크기 때문에 벽면과의 상경계면과의 접점이 $\varphi_w = 90°$보다 아래로 내려오게 된다. 결과적으로 반대편 벽면으로 이동되는 액적의 양이 증가되어 상대적으로 평탄한 패턴을 형성하게 됨을 볼 수가 있다. 이 결과로부터 홈의 충전량보다 체적이 작은 액적을 분사할 때 분사 오차가 있으면, 벽면의 접촉각이 90°이하일 경우에는 홈을 완전히 채우지 못하고 비어있는 부분이 발생하게 된다. 그러나 벽면의 접촉각을 120°로 증가시키면 패턴의 평탄도 측면에서는 완벽하지는 않지만 홈을 빈곳 없이 채울

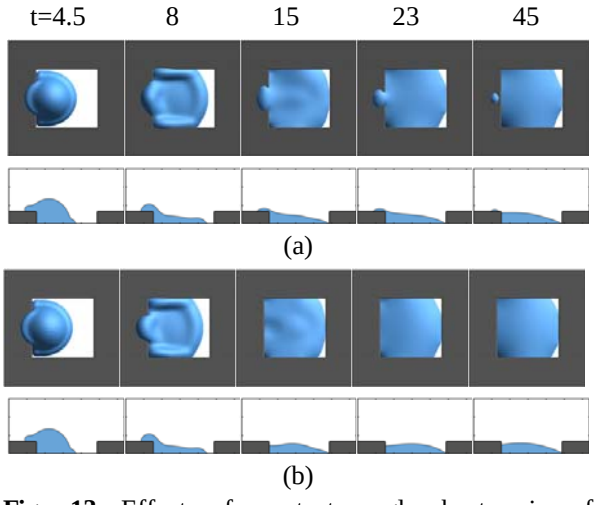


Fig. 13 Effect of contact angle hysteresis of cavity wall on droplet motion with droplet placement error for $D = 30$ and $\varphi_{sub} = 30°$: (a) $30° \le \varphi_w \le 120°$, (b) $90° \le \varphi_w \le 120°$.

수 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 액적의 직경이 36일 경우 액적의 충돌 거동을 해석한 결과이다. $\varphi_w = 30°$인 경우 충돌 후 액적의 일부분이 구조물 위에 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 액적의 부피가 증가되었기 때문에 바닥면에 채워지지 않고 비어있는 부분이 생기는 현상은 발생하지 않았다. 접촉각이 60°인 경우 또한 충돌한 액적의 일부분이 작은 양이지만 구조물 위에 남아 있는 것을 볼 수가 있다. 그러나 벽면의 접촉각을 90°로 증가시키는 경우 충돌한 액적은 구조물 위에서 잘 퍼지지 않게 되고 구조물에 의한 홈 안으로 모두 들어오는 것을 볼 수가 있으며 결과적으로 평탄도 측면에서 우수한 패턴을 형성하게 된다. $\varphi_w = 120°$의 경우에도 구조물 위로 잘 퍼지지 않기 때문에 충돌한 액적 모두 홈 안쪽으로 들어오게 되는 것을 볼 수가 있지만, 홈 안으로 들어온 액적은 벽면과의 접촉각을 유지하기 위하여 Fig. 11(d)와 같이 가운데가 볼록한 액막을 형성하게 되는 것을 볼 수가 있다. Fig. 11로부터 홈의 부피와 액적의 양이 비슷한 경우 벽면의 접촉각이 90°이상이면 분사오차를 극복할 수 있음을 확인하였다. 그러

나 벽면 접촉각이 90°일 경우 평탄도가 우수한 액막을 형성하게 되지만 그 이상일 경우 가운데가 볼록한 액막을 하기 때문에 액막의 평탄도 확보를 벽면의 접촉각을 90°로 유지하는 것이 바람직하다.

3.5 동적 접촉각을 고려한 액적의 벽면 충돌

벽면의 상태가 완전하지 않은 대부분의 경우, 액적-기체-벽면의 접점에서 형성되는 접촉각은 접점의 이동방향에 따라 퍼짐접촉각과 수축접촉각 사이에서 변하는 접촉각 이력 현상(contact angle hysteresis) 또는 동적 접촉각을 가지게 된다.[18,19] 본 연구에서는 Fukai 등[18] 이 제시한 동적 접촉각 모델을 LS 방법에 적용한 기법[20]을 사용하여 접촉각 이력 현상이 액적 충돌에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 12는 액적의 직경이 30이며 측벽면의 접촉각이 각각 $30^\circ \le \varphi_w \le 120^\circ$와 $90^\circ \le \varphi_w \le 120^\circ$의 범위 안에서 변할 때 액적의 충돌 및 충전 현상에 대한 결과이다. $30^\circ \le \varphi_w \le 120^\circ$의 결과를 접촉각 이력이 없는 Fig. 8의 결과와 비교하면, 액적 충돌 초기에는 120°의 접촉각을 유지하면서 벽면을 따라 퍼져 올라가는 Fig. 8(d)와 유사하다가 표면장력에 의한 수축과정에서는 벽면과 30°의 접촉각을 유지하면서 내려오는 Fig. 8(a)와 유사함을 볼 수 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 액막은 더 이상 움직이지 않는 정상상태가 되는 과정에서 측벽에 대해 90°를 이루는 경향이 나타났다. Fig. 12(b)의 경우도 마찬가지로 액막과 벽면이 이루는 각이 90°와 120°사이에서 움직일 수 있기 때문에 비교적 평탄한 액막을 형성하게 된다.

Fig. 13은 중심으로부터 15의 거리만큼 이동된 곳에 직경이 30인 액적을 충돌시켰을 경우 구조물 또는 측벽의 접촉각 이력현상이 액적거동에 미치는 영향에 대한 결과이다. $30^\circ \le \varphi_w \le 120^\circ$인 Fig. 13(a)의 경우 액적은 구조물과 충돌 후 퍼짐 현상에서 120°의 접촉각을 유지하기 때문에 구조물 위로 많이 퍼지지 않게 된다. 하지만 수축 과정에서는 30°의 접촉각을 유지하기 때문에 여전히 액적의 일부분이 구조물 위에 남게 되는 것을 볼 수가 있다. 또한 구조물 안으로 들어간 액적은 충돌한 벽면에서 30°와 120°사이의 접촉각을 유지하는 한 붙어있게 되어 반대편 벽면 방향으로 이동이 제한되며 이로 인해 액체가 덮이지 않는 부분이 생기게 된다. $90^\circ \le \varphi_w \le 120^\circ$의 결과인 Fig. 13(b)의 경우 수축 현상에서 90°의 접촉각을 갖기 때문에 모든 액적이 구조물 안으로 들어오는 것을 볼 수가 있다. 하지만 Fig. 13(a)의 경우와 마찬가지로 액적은 충돌한 벽면에 붙어있게 되어 반대편으로 이동이 제한되어 결국은 채워지지 않는 부분이 생기게 된다. 그러므로 접촉각 이력 현상은 패터닝 오차를 극복하기 위해 표면에너지 변화를 이용하는 자기정렬 기법에 방해요소인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Level-Set 방법을 바탕으로 액상과 기상뿐만 아니라 불규칙한 형상의 고체를 포함하는 이상유동을 해석할 수 있는 수치기법을 개발하여 미세액적을 이용한 박막 패터닝 공정에 대한 수치적 연구를 수행하였다.

분사하는 액적의 체적이 홈의 체적보다 작은 경우에는 홈의 측벽면의 접촉각을 90° 이상으로 함으로 원하는 충전 결과를 얻을 수 있었으며, 액적의 체적과 홈의 체적이 비슷한 경우에는 60° 이상일 경우 원하는 충전 결과를 얻을 수 있음을 볼 수 있었다. 그러나 액막의 평탄도 확보를 위해서는 두 경우 모두 벽면 접촉각을 90°로 하는 것이 유리하였다.

또한 잉크젯을 이용한 패터닝 공정에서 미세구조물의 접촉각을 변화시킴으로 패터닝 오차를 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다. 액적의 체적이 홈의 체적 보다 작은 경우에는 미세구조물의 접촉각을 120°로 할 때 잉크젯의 분사오차를 개선할 수 있음을 확인하였다. 반면 액적의 체적이 홈의 체적과 비슷하면 벽면의 접촉각을 90°에서 분사오차를 개선할 수 있음을 확인하였다. 접촉각 이력 현상은 패터닝 오차를 극복하는데 방해가 됨을 볼 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-313-D00103).

참고문헌

(1) Percin, G., Lundgren, T. S. and Khuri-Yakub, B. T., 1998, "Controlled Ink-jet Printing and Deposition of Organic Polymers and Solid Particles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 73, pp. 2375~2377.

(2) Chen. C. T., 2002, "Micro-fabrication of Color Filter for Liquid Crystal Display by Inkjet-based Method," *Proc. SPIE.*, Vol. 4928, pp. 77~84.

(3) Xu, T. and Albertalli, D., 2006, "Achieving High Accuracy and Precision Inkjet Drop Placement using Imperfect Components in an Imperfect Environment," *IMID/IDMC '06 DIGEST*, pp. 1660~1665.

(4) Kim, S., Kim, D., Lee, W., Shin, D. and Kim. C., 2006, "Ink-jet Printing Technology for Paradigm Shift in Mass Production," *Trans. of J. of KSPE*, Vol. 23, pp.15~21.

(5) Ueda, M. and Oguchi, T. Y., 2006, "Precise Positioning of Spacers for LCD Using Ink-jet Method," *SID 2006 DIGEST*, pp. 444~447.

(6) Khatavkar, V. V., Anderson, P. D., Duineveld, P. C. and Meijer, H. H. E. 2005, "Diffuse Interface Modeling of Droplet Impact on a Pre-Patterned Solid Surface," *Macromol. Rapid Commun.*, Vol. 26, pp. 298~303.

(7) Yang, A.-S., Yang, M.-T. and Hong, M.-C., 2007, "Numerical Study for the Impact of Liquid Droplets on Solid Surfaces," *Proc. IMechE, Part C: J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, pp. 293~301.

(8) Liou, T.-M., Chan, C.-Y., Fu, C.-C. and Shih, K.-C., 2008, "Effects of Impact Inertia and Surface Characteristics on Deposited Polymer Droplets in Microcavities," *J. MEMS*, Vol, 17, pp. 278~287.

(9) Yu, C., Lin, M., Hu, Y., Fu, T. and Chou, H., 2004, "Self-Alignment Optical Detection System for Droplet Based Biochemical Reactions," *Proceeding of IEEE Sensors 2004 Conference, Vienna, Austria*, pp. 1206-1209.

(10) Mermoud, G., Fakhfouri, V., Martinoli, A. and Brugger, J., 2007, “Towards Smart Substrates for Controlling Micrometric Droplet Motion,” *FNANO07*, p. SWIS-CONF-2007-007.

(11) Fedkiw, R. P., Aslam, T., Merriman, B. and Osher, S., 1999, “A Non-oscillatory Eulerian approach to Interfaces in Multimaterial Flows (the Ghost Fluid Method)," *J. Comput. Phys.*, Vol. 152, pp. 457~492.

(12) Marella, S., Krishnan, S., Liu, H. and Udaykumar, H.S., 2005, "Sharp Interface Cartesian grid Method I: An Easily Implemented Technique for 3D Moving Boundary Computations," *J. Comput. Phys.*, Vol. 210, pp. 1~31.

(13) Sussman, M., Smith, K. M., Hussaini, M. Y., Ohta, M. and Zhi-Wei, R., 2007, "A Sharp Interface Method for Incompressible Two-phase Flows," *J. Comput. Phys.*, Vol. 221, pp. 469~505.

(14) Son, G. and Dhir. V. K., 2007, "A Level Set Method for Analysis of Film Boiling on an Immersed Solid Surface," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 52, pp. 153~177.

(15) Sussman, M., Smereka, P. and Osher, S., 1994, "A Level Set Approach for Computing Solution to Incompressible Two-Phase Flow," *J. Comput. Phys.*, Vol. 114, pp. 146~159.

(16) Son, G., 2005, "A Level Set Method for Incompressible Two-Fluid Flows with Immersed Solid Boundaries," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 47, pp. 473~489.

(17) Chen, C.-T., Tseng, F.-G. and Chieng, C.-C., 2006, "Evaporation Evolution of Volatile Liquid Droplets in Nanoliter Wells," *Sensors and Actuators A*, Vol 130, pp. 12-19.

(18) Fukai, J., Shiiba, Y., Yamamoto, T., Miyatake, O., Poulikakos, D., Megaridis, C. M. and Zhao, Z., 1995, "Wetting Effects on the Spreding of a Liquid Droplet Colliding with a Flat Surface," Phys. Fluids., Vol. 7, pp. 236~247.

(19) Chen, J., Troian, M., Darhuber, A. and Wagner, S., 2005, "Effect of Contact Angle Hysteresis on Thermocapillary Droplet Actuation," *J. Appl. Phys.*, Vol 97, 014906.

(20) Lee, W. and Son, G., 2008, "Bubble Dynamics and Heat Transfer during Nucleate

Boiling in a Microchannel," *Numer. Heat Transfer A*, Vol. 53, pp. 1074~1090.