

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.10.789

마이크로 Groove에서 액적충돌에 대한 수치적 연구

이우림* · 서영호** · 손기현†

(2009년 7월 31일 접수, 2009년 8월 25일 수정, 2009년 8월 25일 심사완료)

A Numerical Study on Droplet Deposition in a Micro-Groove

Woorim Lee, Youngho Suh and Gihun Sin

Key Words: Droplet Deposition(액적 충전), Inkjet Printing(잉크젯 프린팅), Level-Set Method(레벨셋 방법), Micro Line(마이크로 라인)

Abstract

Microdroplet deposition in a micro-groove is studied numerically. The droplet shape is determined 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 and contact angle conditions at an immersed solid surface. The computations are carried out to investigate the droplet behavior derived by the interfacial characteristics between the liquid-gas-solid phases. The effects of contact angle, impact velocity and groove geometry on droplet deposition in a micro-groove are quantified.

기호설명

- g : 중력
- h : 격자간격
- l_o : 길이의 대표값
- n : 액상-기상계면에서 법선방향 단위벡터
- n_s : 고체 경계면에서 법선방향 단위벡터
- p : 압력
- S : sign 함수
- t : 시간
- t_0 : 시간의 대표값
- u : 속도벡터

V_0 : 액적의 충돌 속도

그리스문자

- α : 계단 함수
- κ : 상경계면의 곡률
- μ : 점성계수
- ρ : 밀도
- σ : 표면장력계수
- τ : 임의의 시간
- ϕ : 액체-기체 상경계면으로부터 거리함수
- ψ : 고체-유체 상경계면으로부터 거리함수
- φ : 유체-고체의 접촉각

하첨자

- f : 액체 또는 기체
- g, l : 기체, 액체
- sub : 바닥면
- w : 고체

[이 논문은 2009년도 마이크로/나노공학부문 춘계학술대회 (2009. 5. 28.-29., 서울대 호암교수회관) 발표논문임]

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

1. 서 론

최근 디스플레이 및 전자기기의 초소형화 추세로 인하여 마이크로 단위의 미세한 전기회로를 구성하는 것에 대한 관심이 높아지고 있다. 초소형 전기회로를 제작할 때에는 미세라인을 정교하고 저렴하게 제작하는 것이 요구된다. 기존의 포토리소그래피 방식은 10단계 이상의 긴 공정이 필요하며 재료의 소모와 폐기물 발생이 많고 공정시간이 오래 걸리며 가격이 많이 드는 단점이 있다. 최근 이러한 단점을 극복하는 방법으로 기판 위에 직접 인쇄하는 프린팅 기법이 크게 각광받고 있는데 액적을 기판에 비접촉식으로 충돌시켜 미세배선을 형성하는 공정에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 잉크젯 프린팅 기법은 기판 위에 직접 인쇄하기 때문에 공정이 적고, 소모되는 재료의 양도 줄어 친환경적이며 상대적으로 낮은 가격의 공정이 가능하기 때문에 수십 μm 의 패턴 공정이 필요한 PDP의 전극배선, TFT 소자 등의 가공에 효과적으로 사용되고 있다.⁽¹⁾

하지만 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 미세라인을 제작할 때 잉크젯 노즐 크기의 한계로 인해 미세라인의 너비는 20~50 μm 로 제한⁽²⁾되는 문제가 발생한다. 이로 인해 잉크젯 프린팅 방법을 수 마이크로 크기의 패턴링 공정에 사용하기에는 어려움이 있다. 또한 잉크젯 프린팅 방법을 이용할 경우 미세라인의 두께가 0.5 μm 이하로 제작되어 종횡비가 매우 낮게 형성되기 때문에 미세라인에서 저항이 증가하는 문제가 발생한다.⁽³⁾

이를 극복하기 위한 방법으로 기판 위에 미리 마이크로 groove를 제작하고 그 위에 액적을 투사하는 방식이 제시되고 있다.⁽⁴⁾ 이 경우 미세라인의 너비가 미리 형성된 마이크로 groove의 폭에 따라서 결정되기 때문에 액적의 반경과 상관없이 좁고 균일한 라인을 만들 수 있는 장점이 있고, groove의 깊이에 따라서 미세라인의 두께를 조절하는 것 또한 가능하기 때문에 최근 많은 주목을 받고 있다.

마이크로 groove에서 액적은 접촉각 및 groove의 종횡비 등에 따라서 형상이 매우 다양하게 나타난다.⁽⁵⁾ 따라서 전기회로의 groove 위에 미세하고 종횡비가 큰 라인을 정교하게 제작하기 위해서는 매우 짧은 시간에 일어나는 액적의 변형과 groove와의 상호작용 등의 복합현상에 대하여 이

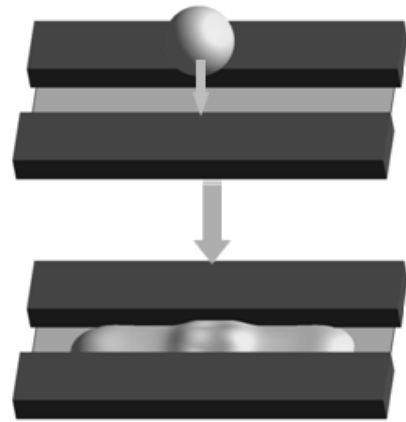


Fig. 1 Schematic diagram of micro-line patterning using an inkjet printing method.

해하는 것이 필수적이다.

잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 전자기판 위에 미세라인을 제작하는 연구는 매우 활발하게 이루어지고 있다.^(6,7) 하지만 대부분의 연구는 평판 위에 액적을 떨어뜨리는 연구에 집중되어 있고 groove 위에 액적을 떨어뜨려 미세라인을 형성시키는 연구는 매우 미흡하다.

Narayan 등⁽²⁾은 100 μm 직경의 반원 형상 groove에 액적을 떨어뜨리고 전압을 이용하여 표면에너지 변화를 변화시키면서 groove 내에서 액적의 충전 현상에 대한 연구를 수행하였다. Khare 등⁽⁵⁾은 groove 내부에서 액적의 충전현상에 대해서 연구하였다. 삼각형, 직사각형 등 다양한 groove의 형상, 표면에너지 및 종횡비에 따라서 액적이 어떤 형태로 충전되는지에 대한 연구를 수행하였다. Hendriks 등⁽⁴⁾은 다양한 형태의 groove를 제작하여 미세라인을 제작하는 연구를 수행하였다. groove는 사다리꼴, 직사각형을 모양을 갖는 형상으로 제작하였는데 폭은 42 μm 에서 최소 5 μm 의 미세라인을 성공적으로 가공하였다. Gian 등⁽³⁾은 직사각형 groove를 이용하여 높은 종횡비를 가진 미세라인을 제작하였다. 이들은 43 μm 의 깊이를 갖는 groove에 액적을 분사하여 평판에 인쇄하는 방식에 비하여 더 큰 종횡비를 얻을 수 있는 것을 보여주었다.

하지만 실험만으로는 측정 방법의 한계로 인하여 액적의 거동, groove와의 상호관계에 대한 정확한 분석이 쉽지 않다. 최근에는 이와 같은 한계를 극복하기 위하여 잉크젯 프린팅 방법으로 토출된 액적의 거동에 대한 수치적 연구가 활발하게 진행되고 있다.

Khatavkar 등⁽⁸⁾은 원형 홈이 설치된 평판 위에 충돌하는 액적에 대한 계산을 DIM (Diffuse Interface Model)을 이용하여 2차원 계산을 수행하였다. 이들은 벽면의 접촉각과 폭을 달리하면서 액적의 충전현상에 대하여 연구하였다. Liou 등⁽⁹⁾은 사각 홈이 설치된 기판 위에서 액적의 충돌 및 충전에 관하여 VOF(Volume-of-Fluid) 방법을 이용하여 수치적 연구를 수행하였다. 액적의 충돌 속도 및 기판을 이루는 구조물의 접촉각에 대한 영향에 대한 해석을 수행하였다. 또한 최근 Suh와 Son⁽¹⁰⁾은 레벨셋(Level-set) 방법을 이용하여 사각 홈 위에서 액적의 거동에 대하여 연구하였다. 이들은 액적의 충돌속도 및 동적 접촉각 효과뿐만 아니라 제조 공정에서 패터닝의 오차를 줄일 수 있는 자기정렬(Self-alignment) 기법을 사용하여 패터닝 정밀도의 향상 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

하지만 대부분의 연구가 디스플레이 등의 제작을 위한 사각 홈에 대하여 수행되었고 기판 배선을 위한 groove 위의 액적 충돌에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 groove가 있는 기판에 액적의 충돌현상을 수치적으로 해석하였다. 계산에는 VOF방법에 비해 표면장력을 효과적으로 계산할 수 있는 레벨셋 방법을 바탕으로 상경계면 조건을 정확하게 적용할 수 있는 sharp-interface⁽¹¹⁻¹⁴⁾ 모델링 기법과 격자점과 일치하지 않는 미세구조물 형상을 고려하는 수치기법을 결합하였다. 이를 이용하여 액적과 마이크로 groove의 접촉각, 액적의 직경 및 액적의 충돌 속도의 변화에 따른 미세라인 형성에 관한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 Suh와 Son⁽¹⁰⁾의 sharp-interface 구현을 위한 레벨셋 방법을 기반으로 하였다. 기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 레벨셋 함수에 의해 계산된다. 기상, 액상 영역 모두에 적용될 수 있는 운동량 및 질량 보존식과 레벨셋 함수 ϕ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

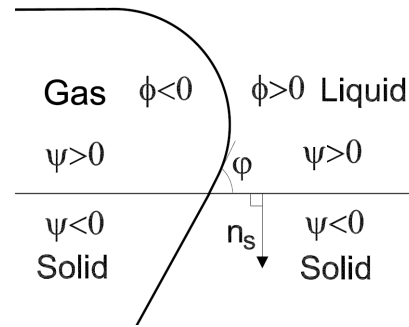


Fig. 2 Extension of Level-set function into a solid region

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{u} + \mathbf{f} \tag{2}$$

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

여기서,

$$\mathbf{f} = -\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} - \sigma \kappa \nabla H_\phi + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u})^T$$

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

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

$$\rho = \rho_g (1 - F_\phi) + \rho_l F_\phi \tag{4}$$

$$\mu^{-1} = \mu_g^{-1} (1 - F_\phi) + \mu_l^{-1} F_\phi$$

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

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

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

상경계면($\phi = 0$)은 식 (3)에 의해 결정되지만, H_ϕ 와 κ 를 정확하게 계산하기 위해서는 레벨셋 함수를 거리함수($|\nabla \phi| = 1$)가 되도록 식 (6)을 사용하여 보정하는 것이 바람직하다.⁽¹⁵⁾

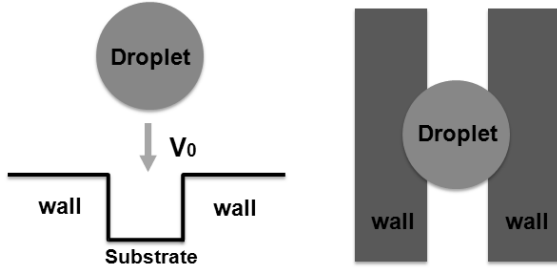


Fig. 3 Computational domain for droplet impact on micro-groove

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

여기서

$$S = \begin{cases} 0 & \text{if } |\phi_0| < h/2 \\ \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0^2 + h^2}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ϕ_0 은 식 (3)의 해이며, τ 는 식 (6)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.

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

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \cdot \frac{\mu}{F_\psi} \nabla \mathbf{u} + \mathbf{f} \quad \text{if } \psi > 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{u} = 0 \quad \text{if } \psi \leq 0$$

고체영역에서의 접촉각 조건을 고려하기 위하여 레벨셋 이류방정식은 다음과 같이 수정하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad \text{if } \psi > 0 \quad (9)$$

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

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

3. 계산결과 및 검토

본 연구에서 액적의 물성치는 Suh와 Son⁽¹⁰⁾의 논문에서 사용된 PEDOT에 대한 값을 사용하였다. 계산은 $l_0 = 1\mu\text{m}$ 와 $t_0 = 1\mu\text{s}$ 을 대표값으로 지배방정식을 무차원화 하였고, 액적의 직경(D)은 30이다. 또한 계산에 사용된 영역은 Fig. 3과 같으며 일정한 미세라인 제작을 위한 groove를 만들기 위해서 기판 위에 미세구조물을 설치하였다. 형성되는 groove는 폭(W)이 10이고 깊이(H)가 20이며 기판의 접촉각은 $\varphi_{sub} = 30^\circ$ 이다.

Fig. 4는 $4l_0/t_0$ 의 속도를 가진 액적과 groove 간의 충돌과정을 보여준다. 액적의 직경이 groove의 폭에 비하여 크기 때문에 액적은 벽면과 충돌 후에 벽면의 접촉각에 따라 다양한 모습을 나타낸다. Fig 4(a)는 groove 벽면의 접촉각이 30° 일 때 액적의 거동을 보여준다. 액적은 충돌 후 벽면과의 낮은 접촉각 때문에 groove의 내부와 외부로 퍼져나간다. 또한 groove의 내부로 들어온 액적은 코너부분을 따라서 실선과 같이 진행하게 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 groove 바깥쪽으로 퍼져나간 액적은 친수성 표면의 영향으로 수축하지 않고 시간이 지난 후에도 내부로 유입되지 않은 채 그대로 남아있게 된다. 접촉각이 90° 인 Fig. 4(b)의 경우, 충돌 후 액적이 groove 바깥쪽으로 퍼진 후, 접촉각에 의한 반발력에 의해 수축하여 가운데로 모이게 된다. $t=50$ 일 때 액적은 모두 groove 내부로 유입되어 일정한 너비의 라인을 형성하게 된다. 접촉각이 150° 로 매우 큰 경우에 액적의 변형은 Fig. 4(c)에서 볼 수 있다. 초기에 액적은 groove에 충돌한 후 옆으로 퍼지게 되지만 표면의 소수성이 매우 크기 때문에 오히려 액적의 퇴감길이 빠르게 진행되는 것을 볼 수 있다. groove 내부 또한 소수성이 매우 크기 때문에 퇴감된 액적은 내부로 유입되지 못하고 다시 튕겨나가게 된다.

접촉각에 따라 groove 내부로 유입되는 액적의 부피비는 Fig. 5에 나타나있다. 접촉각이 30° 인 경우 초기에는 액적이 빠른 속도로 groove 내부로 유입되지만 바깥쪽에 남아있는 액적이 내부로 들어오지 못하기 때문에 최종적으로 약 60%의 액적만 내부에 존재하게 된다. 또한 $\varphi_w = 150^\circ$ 일 때 액적은 부피의 약 30%까지 유입되었다가 점점 줄어들어 $27\mu\text{s}$ 후에는 액적이 모두 튕겨나

가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4와 5로부터 마이크로 groove를 이용하여 미세라인을 제작 시 groove 벽면의 접촉각은 90°가 가장 적합하다고 할 수 있다. 접촉각이 30°인 경우에는 액적이 groove 내부로 모두 유입되지 못하기 때문에 균일한 미세라인 제작이 힘들고, 150°인 경우에는 액적이 탄착되지 못하고 되튐현상이 나타나 정확한 배선이 불가능해진다.

Fig. 6은 충돌속도에 따른 액적의 충돌 및 충전 현상을 보여준다. 충돌속도가 0.5로 비교적 작은 Fig. 6(a)의 경우 관성력이 작기 때문에 액적은 크게 퍼지지 않은 상태에서 서서히 groove 내부로 흘러들어가는 것을 볼 수 있다. 초기 충돌 관성이 작음에도 불구하고 액적이 내부로 흘러드는 것은 액적이 groove 안쪽과 바깥쪽에서 곡률반경이 다르기 때문이다. groove 안쪽에서 액적의 곡률 반경은 바깥쪽에 비해 크게 나타난다. 외부의 압력이 거의 일정한 상태에서 액적 내부의 상대 압력은 곡률반경에 반비례한다는 라플라스 법칙에 따라 액적은 groove 바깥쪽에서 안쪽으로 이동하게 된다. 또한 충돌속도가 8로 비교적 큰 값인 Fig. 6(c)에서는 액적의 하단이 짧은 시간에 groove의 바닥에 닿고, 초기의 충돌관성이 크기 때문에 바깥쪽으로 크게 퍼지는 것을 볼 수 있다. 하지만 곧 접촉각에 의한 반발력으로 액적의 되감김 현상이 나타나 액적은 빠른 속도로 groove 내부로 들어가게 된다.

Fig. 7은 충돌속도에 따라 groove를 충전시키는 액적의 부피비를 보여준다. 충돌속도가 큰 경우에 초기 액적의 충전은 빠른 속도로 이루어진다. 하지만 액적이 바닥면에 충돌한 후에는 초기 속도의 효과가 사라지게 되어 액적은 초기속도보다 매우 작은 충전속도를 갖는다. 그 후 액적의 충전은 충돌속도에 상관없이 거의 일정한 속도로 느리게 진행되기 때문에 충전시간에 큰 영향을 준다. 이 때문에 충돌속도가 8.0으로 4.0에 비해 두 배 증가했지만 충전시간은 약 10%의 감소만 이루어졌다.

Fig. 8은 groove 내부 기관의 접촉각을 달리 하였을 때 액적의 충전현상을 보여준다. 기관 위에 다른 형상으로 구조물을 만들어 groove를 만들 때 접촉각이 30°인 경우는 90°에 비해서 충전시간이 약 15%정도 빠르게 진행된다. 또한 $\varphi_{sub} = 150^\circ$ 일 때는 90°에 비해 약 27%의 충전

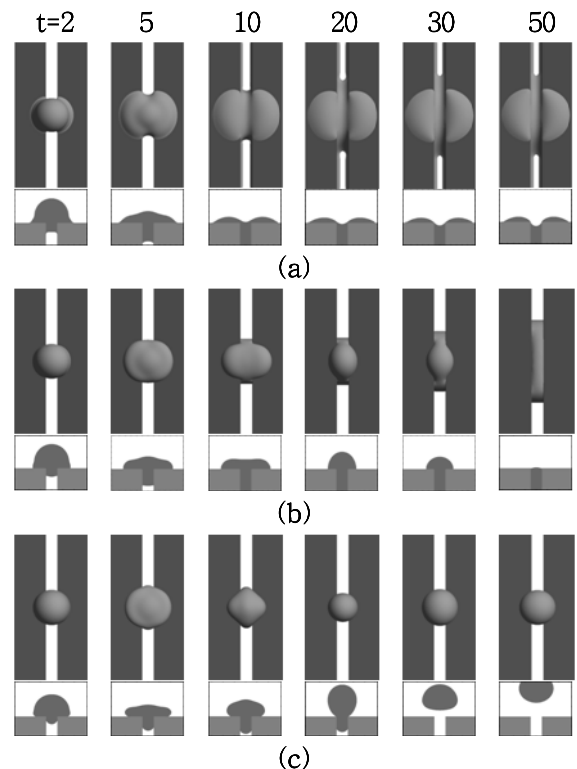


Fig. 4 Effect of contact angle of groove on droplet motion for $D=30$, $V_0=4.0$, $\varphi_{sub} = 30^\circ$: (a) $\varphi_w = 30^\circ$, (b) $\varphi_w = 90^\circ$ and (c) $\varphi_w = 150^\circ$

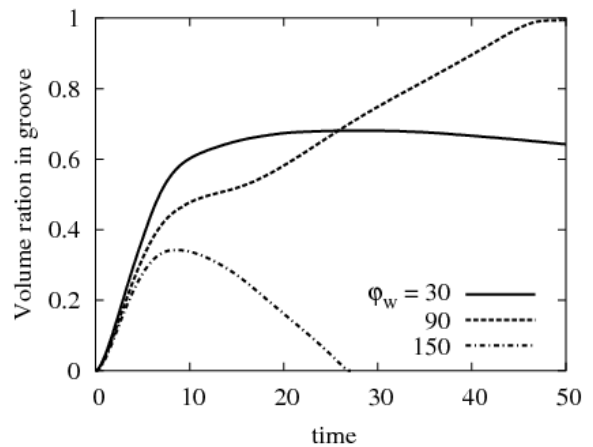


Fig. 5 Effect of contact angle of groove on the volume ratio of droplet deposited in a groove

시간이 더 걸리는 것을 알 수 있다. 바닥면의 접촉각이 작은 경우 액적이 groove 내부로 잘 퍼져 나가기 때문에 충전이 빠르게 이루어진다.

Fig. 9는 중형비가 더 큰 미세라인을 제작하기 위해 groove의 깊이를 30으로 증가하였을 때 액

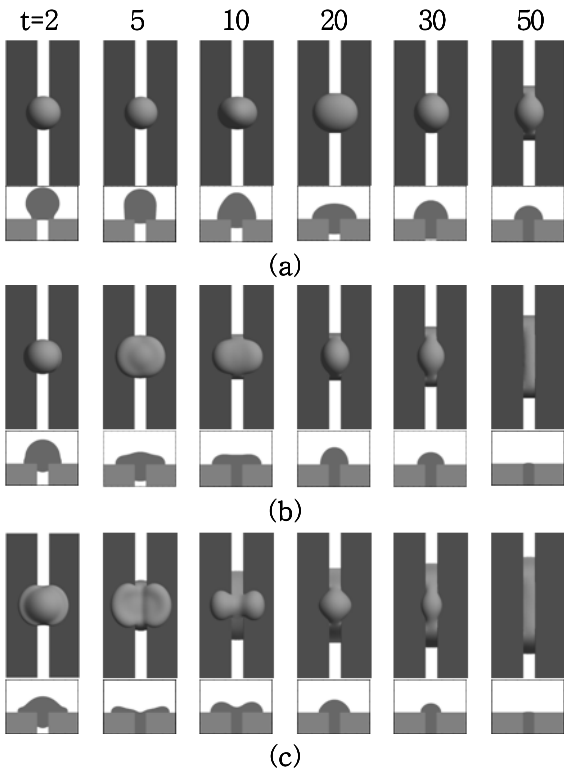


Fig. 6 Effect of impact velocity on droplet motion for $D=30$, $\varphi_w = 90^\circ$, $\varphi_{sub} = 30^\circ$: (a) $V_0=0.5$, (b) $V_0=4.0$ and (c) $V_0=8.0$

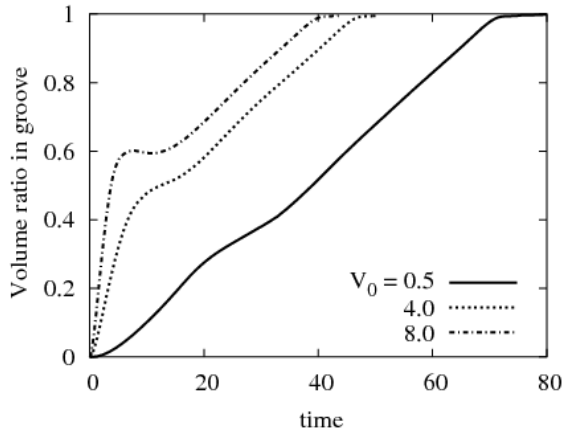


Fig. 7 Effect of impact velocity on the volume ratio of droplet deposited in a groove

적의 거동을 보여준다. Fig. 9에서 보이는 것처럼 깊이가 20이었을 때와 같이 액적은 초기 충돌관성에 의해 groove 내부로 들어간다. 그 후 액적은 서서히 바닥면에 닿아 groove의 깊이 30과 같은 높이를 갖는 미세라인을 형성하게 된다.

Fig. 10, 11은 액적의 직경(D)을 변화시켰을 때

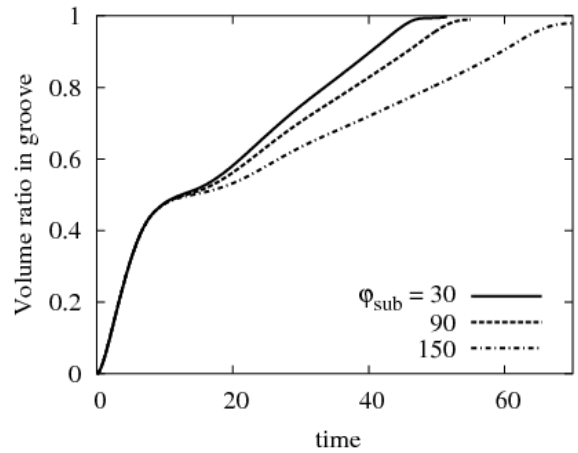


Fig. 8 Effect of contact angle of substrate on the volume ratio of droplet deposited in a groove with $D=30$, $V_0=4.0$ and $\varphi_w = 90^\circ$

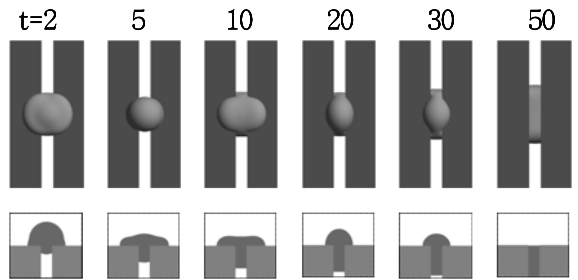


Fig. 9 Droplet motion on the groove with $H=30$, $D=30$, $V_0=4$, $\varphi_w = 90^\circ$, $\varphi_{sub} = 30^\circ$

액적의 거동을 보여준다. 직경이 20으로 작은 경우 액적은 groove의 외부 벽면과 접치는 부분이 작고, 부피 또한 작기 때문에 빠른 속도로 모두 유입된다. 액적의 직경이 40으로 증가하는 경우에 충돌 후 액적 전체가 유입되는데 걸리는 시간이 더 커지게 된다. 하지만 직경이 커지면 초기 운동량이 커지기 때문에 유입되는 액적의 양은 직경과 함께 증가하는 것을 볼 수 있다.

잉크젯을 이용하여 패터닝할 때 액적이 정확한 위치에 분사되지 못하면 균일한 배선 형성이 이루어지지 않게 된다. Fig. 12는 분사오차가 발생했을 때 액적의 충돌 및 충전현상을 보여준다. 접촉각이 30°일 때는 분사오차가 없을 때와 마찬가지로 액적의 일부분이 groove 외부에 그대로 남아 있는 모습을 볼 수 있다. 접촉각이 90°인 Fig. 12(b)에서는 초기에 액적이 한쪽으로 치우쳐서 퍼지는 모습을 볼 수 있다. 하지만 곧 접촉각 효과에 의해서 되감김이 일어나고 시간이 지나면서 모든 액적이 groove 내부로 이동하게 되어 분

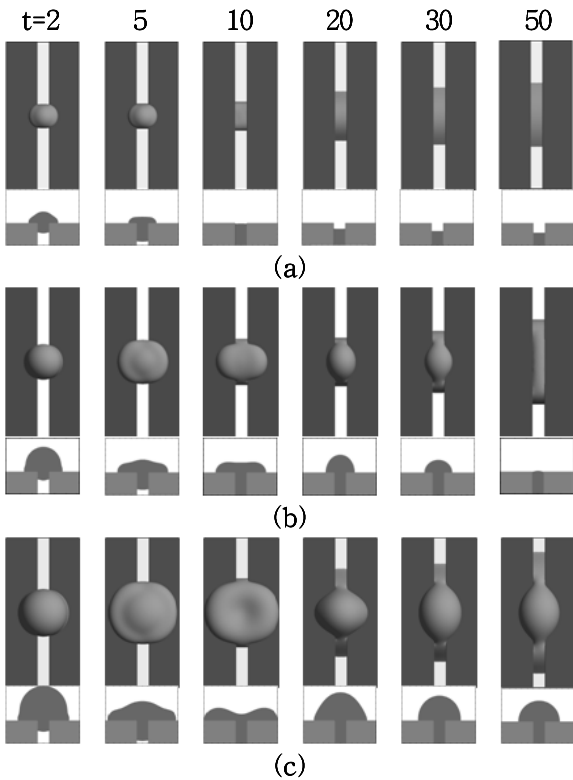


Fig. 10 Effect of droplet diameter on droplet motion for $V_0=4$, $\varphi_w = 90^\circ$ and $\varphi_{sub} = 30^\circ$: (a) $D=20$, (b) $D=30$ and (c) $D=40$

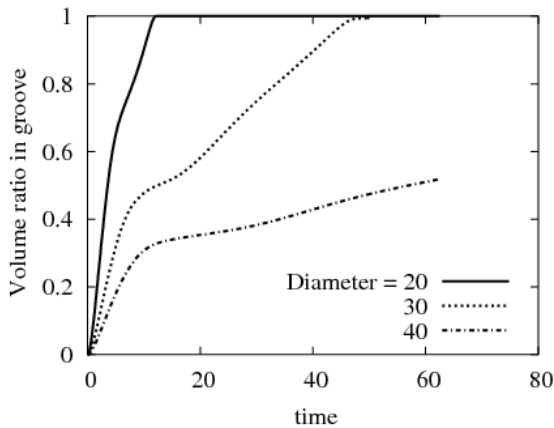


Fig. 11 Effect of droplet diameter on the volume of droplet deposited in a groove

사오차가 발생하더라도 균일한 미세라인의 제작이 가능하게 된다. 벽면의 접촉각이 120° 일 경우 액적은 소수성 표면에 의한 반발력으로 퍼짐이 어려워져 groove 내부로 흘러드는 것이 쉽지 않다. groove 안에서 액적의 퍼짐이 어렵기 때문에 $t=50$ 일 때에도 액적의 일부분이 바깥쪽에서 유입되지 못하고 남아있는 모습을 볼 수 있다.

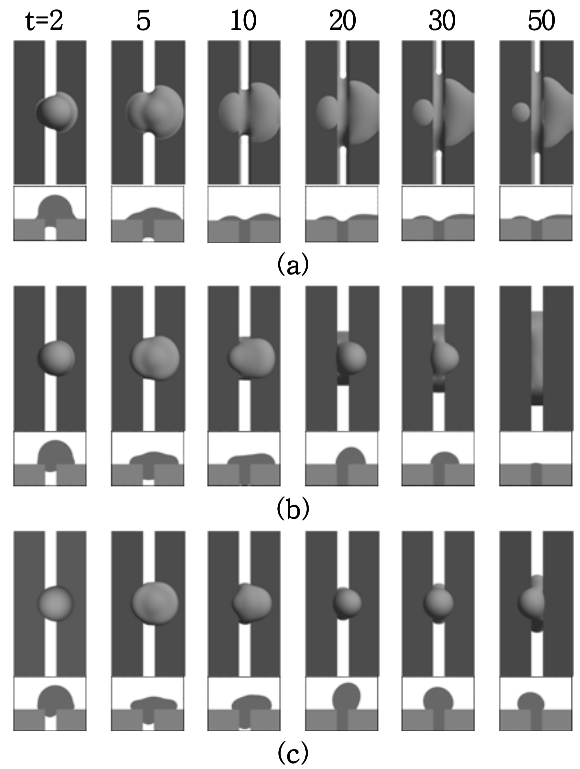


Fig. 12 Effect of contact angle of groove wall on droplet motion with droplet placement error for $D=30$, $V_0=4$ and $\varphi_{sub} = 30^\circ$: (a) $\varphi_w = 30^\circ$, (b) $\varphi_w = 90^\circ$ and (c) $\varphi_w = 120^\circ$

4. 결론

레벨셋 방법을 이용하여 기관 위에 미세라인 제작에 사용될 수 있는 마이크로 groove에서의 액적 충돌 특성에 대한 수치적 해석 연구를 수행하였다. 벽면의 접촉각, 충돌속도, 깊이의 변화 및 액적의 직경에 따른 해석에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

마이크로 groove 위에 충돌하는 액적은 groove 벽면의 접촉각에 따라 형상을 변화하게 되며 30° , 150° 일 때에 비하여 90° 일 때 액적이 모두 groove 안으로 흘러들어가 균일한 미세라인을 제작할 수 있었다.

액적의 충돌속도를 증가시켰을 때 액적은 초기에 충돌속도의 영향을 받지만 곧 일정한 속도로 충전된다. 충돌속도가 두 배 증가한 경우의 충전 시간은 약 10%가 감소하였다. 또한 속도가 비교적 작을 때에도 라플라스 법칙에 의한 압력차로

액적은 groove 내부로 유입되는 것을 볼 수 있다.

기판의 접촉각을 달리하여 기판의 접촉각이 작을 때 액적의 충전이 빠르게 진행되며, groove의 깊이를 30으로 늘림으로 큰 종횡비를 얻을 수 있음을 보았다. 액적의 직경을 달리하였을 때 직경이 작으면 빠르게 groove로 유입되지만 전체 부피는 직경이 클 때 더 많이 유입된다.

패터닝 공정에서 미세 구조물의 접촉각을 달리하여 분사오차를 극복할 수 있음을 확인하였다. 벽면의 접촉각이 90°일 때 액적은 분사오차가 존재함에도 모두 groove 내부로 유입되었다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단 지정 마이크로 열시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) de Gans, B. J., Duinveld, P. C. and Schubert, U. S., 2004, "Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments," *Adv. Mater.*, Vol. 14, No. 3, pp. 203~213.
- (2) Narayan, K. S. and Rao, M., 2006, "Electric-field-induced Steering of Conducting Polymer Dispersion in Microchannels," *Applied Phy. Letters*, Vol. 88, 073506.
- (3) Gian, P. W., Shan, X., Liang, Y. N., Lok, B. K., Lu, C. W. and Ooi, B. L., 2008, "High Aspect Pattern Formation by Integration of Micro Inkjetting and Electroless Plating," *Symp. on DTIP of MEMS & MOEMS 2008*, pp. 162~167.
- (4) Hendriks, C. E., Smith, P. J., Perelaer, J., van den Berg, M. J. and Schubert, U. S., 2008, ""Invisible" Silver Tracks Produced by Combining Hot-Embossing and Inkjet Printing," *Adv. Mater.*, Vol. 18, No. 7, pp. 1031~1038.
- (5) Khare, K., Herminghaus, S., Baret, J. C., Law, B. M., Brinkmann, M. and Seemann, R., 2007, "Switching Liquid Morphologies on Linear Grooves," *Langmuir*, Vol. 23, pp. 12997~13006.
- (6) Park, B. K., Lim, D., Jeong, S., Moon, J. and Kim, J. S., 2007, "Direct Writing of Copper Conductive Patterns by Ink-jet Printing," *Thin Solid Films*, Vol. 515, pp. 7706~7711.
- (7) Stringer, J. and Derby, B., 2009, "Limits to Feature Size and Resolution in Ink Jet Printing," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol. 29, pp. 913~918.
- (8) 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 Commu.*, Vol. 26, pp. 298~303.
- (9) 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 Microvacities," *J. MEMS*, Vol. 17, pp. 278~287.
- (10) Suh, Y. and Son, G., 2008, "A Numerical Study on Patterning Process Including a Self-Alignment Technique of a Microdroplet," *Trans. KSME (B)*, Vol. 33, No. 1, pp. 28~37.
- (11) Fedkiw, R. P., Aslam, T., Merriman, B. and Osher, S., 1999, "A Non-oscillatory Eulerian approach to Interfaces in Multimaterial Flows (th 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. 1~13.
- (13) Sussman, M., Smith, K. M., Hussainin, 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.