



동접촉각 이력 효과를 포함한 평판 위에서 액적의 충돌 및 결합 현상에 대한 수치적 연구

이 우 림,¹ 손 기 현^{*2}

NUMERICAL STUDY OF DROPLET IMPACT AND MERGING PROCESSES ON A FLAT SUBSTRATE WITH CONTACT ANGLE HYSTERESIS

W. Lee¹ and G. Son^{*2}

The droplet impact and merging process on a flat substrate with contact angle hysteresis is numerically studied. The droplet deformation is determined by an improved level-set method employing a sharp-interface technique for the stress condition at the liquid-gas interface and the contact angle condition at the liquid-gas-solid interline. Based on the computations, the droplet impact and merging pattern is investigated to find the optimal condition in manufacturing a micro-line. The effects of dynamic contact angles and droplet spacing on droplet motion are quantified.

Key Words : 잉크젯 프린팅(Inkjet Printing), 마이크로 라인(Micro Line), 레벨셋 방법(Level-Set Method), 동적 접촉각(Dynamics Contact Angle), 액적 충돌(Droplet Impact)

기호설명

g	: 중력
h	: 격자간격
l_d	: 액적 간의 거리
l_o	: 길이의 대표값
\mathbf{n}	: 액상-기상계면에서 법선방향 단위벡터
p	: 압력
S	: sign 함수
t	: 시간
t_0	: 시간의 대표값
\mathbf{u}	: 속도벡터
U_c	: 접촉선의 이동 속도
V_0	: 액적의 충돌 속도

그리스문자

α	: 계단 함수
θ	: 유체-고체의 접촉각
κ	: 상경계면의 곡률
μ	: 점성계수
ρ	: 밀도
σ	: 표면장력계수
τ	: 반복계산 단계
ϕ	: 액체-기체 상경계면으로부터 거리함수

하첨자

a	: 퍼짐
g, l	: 기체, 액체
r	: 수축

1. 서 론

1 이우림, 서강대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: gihun@sogang.ac.kr

최근 전자기기의 초소형화 추세로 인하여 마이크로 단위의 초미세 전기회로에 대한 관심이 높아지고 있다 잉크젯 프린

팅 방법은 기판 위에 액적을 비접촉식으로 충돌시켜 제작하는 방식으로 공정이 단순하고 재료의 낭비가 적어 공정의 단가를 낮출 수 있기 때문에 기존의 포토리소그래피 방식을 대체할 수 있는 수단으로 큰 주목을 받고 있다[1].

잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 미세라인을 제작하는 공정은 Fig. 1과 같이 기판 위에 액적을 일정한 간격으로 분사하여 액적들 간의 결합을 유도하는 과정으로 구성된다 이 때 가장 중요한 것은 미세라인의 폭을 조절하는 것이다 Duineveld[2]는 액적을 평판 위에 충돌시켜서 제작한 라인의 형태에 대해 연구하였다 그는 세 가지의 다른 기판 위에서 형성되는 라인의 모습을 관찰하고 접촉각에 따라서 라인의 폭이 일정하지 않은 불균일한 모습으로 형성될 수 있음을 보였다. 기판 위에서 접촉각이 일정할 경우 액적이 라인을 이루기보다는 분산된 여러 개의 액적들로 분리되었으며 접촉각이 퍼짐 접촉각에 비해서 클 경우에 라인의 폭이 일정하지 않은 불안정한 라인을 형성함을 발표하였다 Stringer와 Derby[3]는 액적의 크기와 접촉각, 액적 간의 간격에 따라서 형성되는 라인의 폭을 예측하였다 이들은 잉크젯 프린팅 방법으로 생성되는 라인의 폭이 한계가 있음을 실험을 통하여 관찰하였고 여러 변수들을 달리하면서 라인의 형태와 폭의 균일도를 분석하였다. Lee 등[4]은 액적 라인의 폭을 형성하는데 영향을 주는 주요 원인으로 기판 위에서 분사되는 액적들 간의 간격과 액적의 젖음성을 주목하고 이를 변화시켜가면서 라인의 제작 가능성을 연구하였다 표면이 소수성이고 액적 간의 간격이 상대적으로 작을 때에는 액적끼리 결합하여 서로 연결된 라인 형태를 이루지 못하고 원형의 패턴을 만드는 것을 관찰하였다 이와 같이 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 미세라인을 제작할 때는 기판의 표면에너지에 따라서 변화되는 액적의 충돌 및 결합 등의 거동에 대해서 이해하는 것이 매우 중요하다.

액적이 기판 위에서 움직일 때 표면의 성질이 매우 균일하면 접촉각이 일정한 값을 나타내고, 표면에서 물리적, 화학적 불균일성이 존재하면 액체기체-고체의 접촉선(contact line)이 기체 방향으로 이동할 때는 최대 접촉각을 갖게 되고, 액체 방향으로 수축할 때는 최소 접촉각을 이루는 접촉각 이력현상(contact angle hysteresis) 또는 동적 접촉각 조건이 나타나게 된다. 이와 같은 일정 접촉각 조건과 동적 접촉각 조건에서 기판 위에 충돌하는 액적의 거동은 다른 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서 액적의 기판 위에서 충돌 및 결합 현상을 이해하기 위해서는 두 가지 조건에 대하여 모두 고려할 필요성이 있다.

최근 이루어지고 있는 연구들의 대부분은 실험을 통하여 실제적인 라인을 제작하는 것에 집중되어 있고 미세라인 형성의 기본적인 원리를 설명할 수 있는 액적 간의 영향에 대

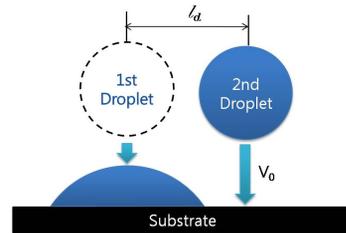


Fig. 1 Schematic of a droplet impact and merging process.

한 연구는 거의 진행되고 있지 않다 또한 잉크젯에서 분사되는 액적 충돌 현상과 같이 마이크로 스케일의 길이와 시간을 갖는 현상은 측정 오차와 한계가 존재하기 때문에 실험만을 통해서 현상을 이해하기에는 많은 어려움이 존재한다 최근에는 이와 같은 어려움을 극복하고자 수치적 해석을 통하여 액적의 충돌과 미세라인 형성을 예측하려는 시도가 진행되고 있다.

Soltman과 Subramanian[6]은 Flow-3D 상용프로그램을 이용하여 라인 형성에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 이들은 미리 구성되어 있는 미세라인에 액적을 충돌시켰을 때의 거동에 대하여 분석하였다 액적과 미세라인 간의 거리를 증가시켜감에 따라 액적이 라인에 흡수되거나 일정부분만 결합되는 경우 또는, 결합하지 못하고 분리되는 현상에 대한 결과를 얻고 실험 데이터와 비교하였다 하지만 이 연구에서는 미세라인을 미리 형성한 상태에서 액적의 충돌에 대한 연구를 수행하였기 때문에 초기 라인의 형성에 대해 설명해 주지 못하며 또한 일정 접촉각 조건을 사용함으로써 액적 충돌 시 다른 거동을 보여주는 동적 접촉각 조건에서의 현상을 정확하게 예측하지 못하는 한계가 있다 아직까지 미세라인 제작공정과 관련된 액적의 충돌 및 합체에 대한 해석은 매우 제한적이며, 액적 충돌에서 미세라인의 형성 전 과정을 해석한 예는 보고되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 평판 위에 충돌하는 다수의 액적에 대한 결합 현상을 수치적으로 해석하였다 계산에는 VOF방법에 비하여 표면장력을 효과적으로 계산할 수 있는 레벨셋 방법을 기반으로 하여 상경계면 조건을 정확하게 나타낼 수 있는 Sharp-Interface 모델링 기법을 결합하여 사용하였다 이를 이용하여 일정 접촉각 조건 및 동적 접촉각 조건 액적 간의 거리에 의한 액적의 결합에 대한 효과를 분석하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 Suh와 Son[7]의 Sharp-Interface 구현을 위한 LS 방법을 기반으로 하였다 기체

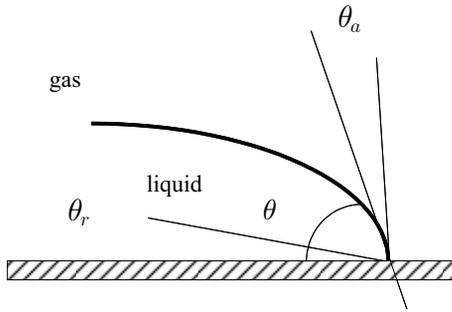


Fig. 2 Definition of contact angle.

-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 갖는 거리 함수로 정의된 LS 함수에 의해서 계산된다. 기상, 액상 영역 모두에서 적용될 수 있는 질량 및 운동량 보존식과 LS 함수 ϕ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다

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

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

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

여기서,

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

위의 식에서 H_ϕ 는 액상과 기상을 구분하는 불연속적 계단 함수이며, 상경계면의 곡률(κ)는 거리 함수로 정의된 연속적인 LS 함수로부터 계산된다 또한 밀도 및 점도의 효과적인 계산을 위해서 다음과 같은 F_ϕ 를 도입하였다.

$$\begin{aligned} F_\phi &= 1 \quad \text{if } H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 1 \\ &= 0 \quad \text{if } H_\phi(\phi_A) = H_\phi(\phi_B) = 0 \end{aligned}$$

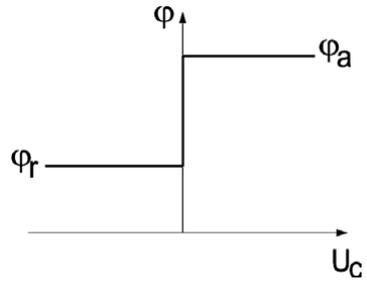


Fig. 3 Dynamic contact angle model.

$$= \frac{\max(\phi_A, \phi_B)}{\max(\phi_A, \phi_B) - \min(\phi_A, \phi_B)} \text{ otherwise} \tag{5}$$

여기에서 하첨자 A와 B는 F_ϕ 의 계산 지점에 근접한 두 격자점을 나타낸다.

상경계면($\phi = 0$)은 식 (3)에 의해서 결정되지만 H_ϕ 와 κ 를 정확하게 계산하기 위해서 LS 함수를 거리함수($|\nabla \phi| = 1$)가 되도록 식 (6)을 사용하여 보정하는 것이 바람직하다

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

여기서,

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

ϕ_0 는 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 나타나기 때문에 부호함수를 식 (7)과 같이 수정하였다.

접촉각(θ)은 Fig. 2와 같이 정의된다. 실제 표면에서 접촉각은 Dussan[8]이 제시한 바와 같이 접촉선의 속도에 따라서 퍼짐 접촉각(θ_a)과 수축 접촉각(θ_r) 사이에서 변한다 ($\theta_r \leq \theta \leq \theta_a$). Fig. 3은 이 연구에서 사용한 동적 접촉각 모델을 보여준다. U_c 가 양일 때 접촉선은 기체 방향으로 이동하며 접촉각은 θ_a 이고, U_c 가 음일 때 접촉선은 액체 방향으로 이동하고 접촉각은 θ_r 값을 갖는다. 본 연구에서 접촉각이 $\theta_r < \theta < \theta_a$ 이면 액체-기체-벽면의 접촉선은 정지되어 있으며, 접촉선이 이동할 때는 접촉각이 $\theta = \theta_a$ 또는 $\theta = \theta_r$ 을 만족하도록 하였다. 이에 관한 구체적인 수식은 Son과 Hur[9]

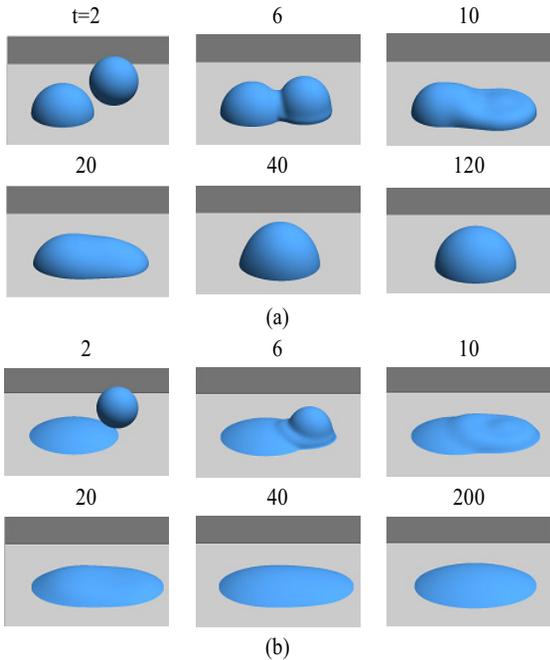


Fig. 4 Droplet impact and merging process with constant contact angle: (a) $\theta_a = \theta_r = 90^\circ$ and (b) $\theta_a = \theta_r = 30^\circ$.

의 연구에서 제시되었다.

3. 계산결과 및 토의

본 연구에 사용된 물성치는 Suh와 Son[8]의 논문에서 사용된 PEDOT에 대한 값을 사용하였다. 계산에서는 $l_0 = 1\mu\text{m}$ 와 $t_0 = 1\mu\text{s}$ 을 대표값으로 지배방정식을 무차원하였으며 액적의 직경(D)은 30이다. 계산에 사용된 영역은 Fig. 1과 같이 일정 거리(l_d)가 떨어져 있는 동일한 직경의 두 개 액적을 시간차를 두고 초기속도 $V_0=4$ 로 충돌시켰다. 두 번째 액적의 중심이 평판에 대하여 30만큼 위의 위치에 있을 때의 시간을 0로 설정하였다. 계산 시간을 줄이기 위해서 계산과정은 두 단계로 나누어 진행하였는데 먼저 첫 번째 액적을 확대칭 조건에서 평판에 충돌시키고 정상상태에 이른 결과를 두 번째 액적 충돌에 대한 3D계산의 초기조건으로 사용하였다.

액적과 기판이 일정 접촉각 조건일 때 액적의 충돌과 결합에 대하여 알아보기 위하여 두 액적 간의 거리(l_d)를 30으로 고정하고, $\theta_r = \theta_a$ 를 30° , 60° 및 90° 으로 변화시켜주며 계산을 수행하였다. 이 때, 첫 번째 액적은 충돌한 후 접촉각의 영향으로 기판 위에 퍼져서 초기 액적의 지름보다 더 큰 지름을 갖는 접촉면을 형성한다 Fig. 4는 기판의 접촉각이 각각

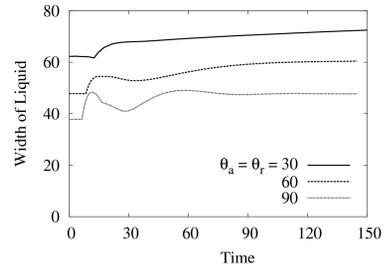


Fig. 5 Temporal variation of the width of a merged droplet under the constant contact angle condition.

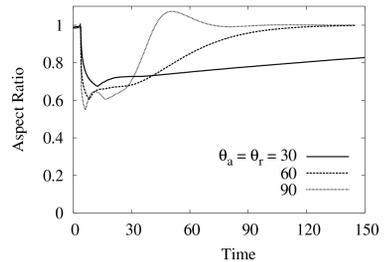


Fig. 6 Temporal variation of the width-length ratio of a merged droplet under the constant contact angle condition.

90° , 30° 일 때 액적의 충돌 과정을 보여준다. 접촉각이 90° 일 때 충돌하는 두 번째 액적은 미리 형성된 첫 번째 액적과 한 면을 접촉한 상태에서 충돌하기 때문에 초기에 8자 형태를 보인다. 두 번째 액적이 충돌 한 후 퍼짐이 일어나기 때문에 결합된 액적의 오른쪽의 폭이 더 넓게 퍼졌다가 다시 수축하게 된다. 이 과정을 반복하면서 길게 퍼져있던 액적의 모양이 가운데로 모이기 시작한다 시간이 100을 지났을 때 두 개의 합체된 액적은 라인의 형태를 이루지 않고 하나의 반구 형태로 만들어지는 것을 볼 수 있다 액적과 기판이 30° 의 접촉각을 이룰 경우에는 초기 액적이 크게 퍼져서 두 번째 액적의 충돌 중심지점까지 액적이 퍼지게 된다 두 번째 액적의 충돌에 따라 액적의 접촉선은 퍼져나가고 그 후 접촉각의 영향으로 퍼진 곳에서 수축하지 않은 채 그대로 기판위에서 멈춘 것처럼 보인다. 하지만 시간이 200이 지났을 때를 보면 이전 시간에 비하여 액적이 길이 방향으로 줄어들었음을 볼 수 있다.

Fig. 5,6은 각각 두 개의 액적이 충돌할 때 일정 접촉각조건의 효과에 의한 액체의 폭과, 폭과 길이의 중횡비를 나타낸다. 접촉각의 영향으로 액적의 초기 폭은 세 경우에서 각각 다르며, 두 번째 액적이 충돌한 후 액체의 폭은 시간에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다 접촉각이 60° , 90° 일 때는 충돌 액적의 수축 및 퍼짐이 있기 때문에 액체의 폭이 잠시 진동한다. $t=140$ 에서 합체된 액적의 중횡비를 보면 60° , 90° 일 때 1인 것을 확인할 수 있다. 이는 일정시간이 흐른 후 액적은 기

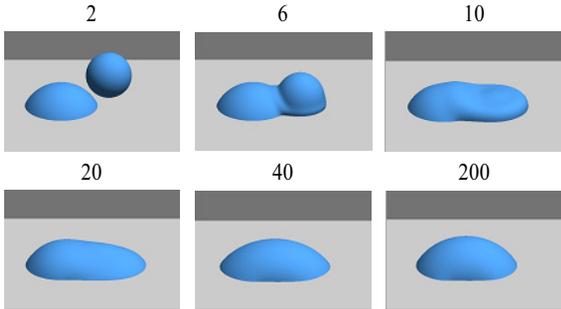


Fig. 7 Droplet impact and merging process with dynamic contact angle of $\theta_a = 90^\circ$ and $\theta_r = 60^\circ$.

다란 타원 형태에서 폭과 너비가 같은 반구형 모양으로 변형되는 것을 의미한다. 접촉각이 30° 인 경우 시간이 140에서 종횡비는 1보다 작아 아직 타원 형태를 이루고 있지만 종횡비가 점차 선형적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다 즉, 이 경우에도 시간이 더 지나게 될 경우 종횡비가 1로 근접하게 된다. 이처럼 액적과 기판이 일정 접촉각 조건인 경우에 기판 위에 연속적으로 충돌한 액적들은 서로 결합하여 종횡비가 같은 큰 액적을 형성하는 것을 알 수 있다 접촉각이 30° 일 때 액적은 길이 방향으로 더 길게 나타나지만 결국 수축하여 일정 접촉각 조건에서는 라인형태를 유지하기 어렵게 된다

실제 고체표면에서처럼 액적이 퍼짐 접촉각(θ_a)과 수축 접촉각(θ_r) 사이에서 변하는 동적 접촉각 조건에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 7은 퍼짐 접촉각이 90° , 수축 접촉각이 60° 일 경우 액적의 충돌 및 결합 모습을 보여준다. 초기 액적의 형태는 일정 접촉각 조건의 60° 와 90° 인 경우의 중간 모습을 보이며 두 번째 액적의 충돌 후 초기 액적과 결합하여 퍼져나간다. 하지만 일정 접촉각 조건인 경우와 다르게 액적은 폭 방향으로 수축하지 않고 그 자리에 남아 있다 $t=200$ 일 때 모습을 일정 접촉각 조건과 비교해 보면 액체는 좀 더 라인과 비슷한 모양을 하고 있음을 알 수 있다

동적 접촉각 조건에서 접촉각이 $90^\circ-30^\circ$, $90^\circ-60^\circ$ 및 $60^\circ-30^\circ$ 로 달리하였을 때 액체의 폭을 Fig. 8에 나타내었다. 세 가지 경우에서 초기 액적의 폭은 일정 접촉각 조건의 30° 일 경우에 비해서 크지만 90° 보다 작다. 두 번째 액적의 충돌하고 난 후 접촉각이 $60^\circ-30^\circ$ 인 경우에 폭이 약간 증가하는 모습을 보이고 나머지 두 경우는 폭이 첫 번째 액적의 폭과 동일하게 형성된다. 즉, 액적이 결합한 후 폭 방향으로의 퍼짐은 제한되어 있는 채로 길이 방향으로만 퍼짐이 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 폭과 길이의 종횡비를 나타낸다. 세 경우 모두에서 종횡비는 0.7보다 작으며, 이는 액적이 바닥과 만드는 접촉면이 일정 접촉각 조건에서와 같이 원 모양이 아니라 길이 방향이 폭 방향에 비하여 더 긴 타원 형태임을 알 수 있

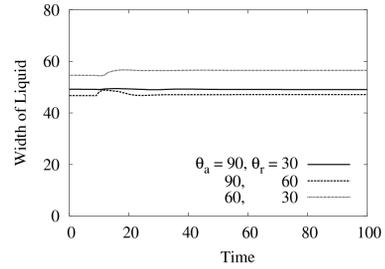


Fig. 8 Temporal variation of the width of a merged droplet under the dynamic contact angle condition.

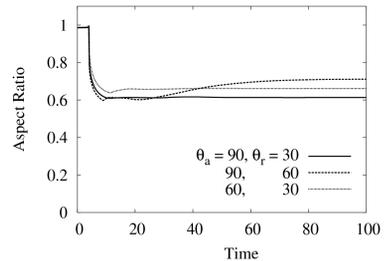


Fig. 9 Temporal variation of the width-length ratio of a merged droplet under the dynamic contact angle condition.

다. 접촉각이 $90^\circ-60^\circ$ 인 경우는 다른 경우 보다 종횡비가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 액체가 길이 방향으로 수축하기 때문이다. 이 경우에는 액체의 폭이 가장 좁게 형성되지만 길이 방향 또한 매우 짧아지게 된다

일정 접촉각 조건과 동적 접촉각 조건에서 액적의 접촉면의 형태는 Fig. 10과 같다. 일정 접촉각 조건에서는 접촉면이 원 모양이지만 동적 접촉각일 때는 균일한 폭을 갖는 라인의 형태를 갖는 것을 확실히 구분할 수 있다 만약 이와 같은 형태로 계속 액적을 충돌시켜 나가면 균일한 폭을 갖는 미세라인을 형성할 것이라 예측할 수 있다

미세라인의 형성에 영향을 주는 또 다른 요인은 충돌 액적 간의 거리이다. 액적 간의 거리에 의한 효과를 알아보기 위해서 동적 접촉각 조건에서 거리를 30, 40, 45로 변화시켜가며 계산을 수행하였다. Fig. 11과 12는 퍼짐 접촉각이 90° , 수축 접촉각이 60° 인 상태에서 액적 간 거리를 달리하였을 때 액체의 폭과 종횡비를 나타낸다. 액적 간 거리가 멀어짐에 따라서 액체의 폭은 줄어드는 모습을 보이며 이에 따라서 종횡비 또한 작아진다. 액적 사이의 거리가 45보다 크게 되면 충돌 액적이 초기 액적과 결합하지 못하게 된다. 따라서 $\theta_a = 90^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$ 인 경우 직경이 30인 액적을 이용하여 형성할 수 있는 라인의 최소 폭은 액적 간 거리가 액적 지름의 1.5배일 때이고 이 때 만들어지는 액체의 폭은 액적 지름의 약 1.46배이다.

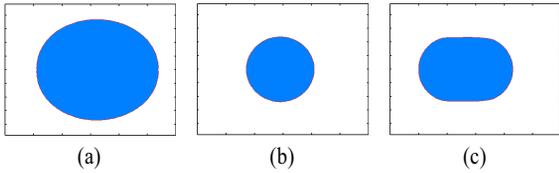


Fig. 10 Droplet-substrate contact area for different contact angle conditions: (a) $\theta_a = \theta_r = 30^\circ$, (b) $\theta_a = \theta_r = 90^\circ$ and (c) $\theta_a = 90^\circ$, $\theta_r = 60^\circ$.

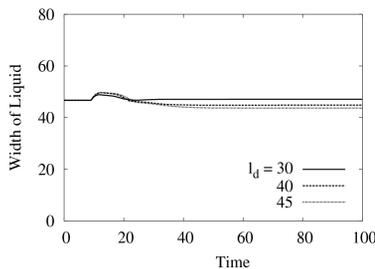


Fig. 11 Effect of droplet-droplet impact distance on the width of a merged droplet under the dynamic contact angle condition of $\theta_a = 90^\circ$ and $\theta_r = 60^\circ$.

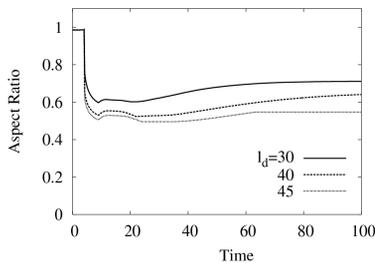


Fig. 12 Effect of droplet-droplet impact distance on the width-length ratio of a merged droplet under the dynamic contact angle condition of $\theta_a = 90^\circ$ and $\theta_r = 60^\circ$.

4. 결 론

레벨셋 방법을 이용하여 기판 위에 일정 간격을 가지고 연속적으로 충돌하는 두 개의 액적의 결합 현상에 대하여 수치적 해석 연구를 수행하였다. 액적이 기판과 형성하는 접촉각이 일정한 조건과 접촉각이 변화하는 동적 접촉각 조건에 대해서 라인의 형성 가능성을 비교해 보았다 또한 충돌하는 액적의 간격에 대한 효과를 조사하고 얻을 수 있는 최소 폭의 값을 계산하였다 계산에 따른 해석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

액적과 기판의 접촉각이 일정한 경우에는 충돌, 결합한 액

적은 다소의 시차는 있을지라도 접촉각의 크기에 상관없이 기판과 접촉면이 원인 형태 즉 반구의 형태를 이룬다

액적의 퍼짐 수축각과 수축 접촉각이 다른 동적 접촉각 조건에서는 충돌, 결합한 액적은 기판과 접촉면이 타원 형태를 유지할 수 있게 되며, 액체의 폭은 액적 직경의 약 1.7배이다. 이는 동적 접촉각 조건이 마이크로 라인형성에 유리한 조건임을 의미한다. $\theta_a = 60^\circ$ 이고 $\theta_r = 30^\circ$ 인 동적 접촉각 조건에서 액적 간 거리를 달리하였을 때 거리가 멀어질수록 폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있으며 형성할 수 있는 라인의 최소 폭은 액적 지름의 1.5배일 때이고 이 때 만들어지는 액체의 폭은 액적 지름의 약 1.46배이다.

참고문헌

- [1] 2004, de Gans, B.J., Duineveld, P.C. and Schubert, U.S., "Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments," *Adv. Mater.*, Vol.14, No.3, pp.203-213.
- [2] 2003, Duineveld, P.C., "The Stability of Ink-Jet Printed Lines of Liquid with Zero Receding Contact Angle on a Homogeneous Substrate," *J. Fluid Mech.*, Vol.477, pp.175-200.
- [3] 2009, Stringer, J. and Derby, B., "Limits to Feature Size and Resolution in Ink Jet Printing," *J. Eur. Ceram. Soc.*, Vol.29, pp.913-918.
- [4] 2008, Lee, S.H., Shin, K.Y., Hwange, J.Y., Kang, K.T. and Kang, H.S., "Silver Inkjet Printing with Control of Surface Energy and Substrate Temperature," *J. Micromech. Microeng.*, Vol.18, pp.075014.
- [5] 2008, Roisman, I.V., Opfer, L., Tropea, C., Raessi, M., Mostaghimi, J. and Chandra, S., "Droplet Impact onto a dry surface: Role of the Dynamic Contact Angle," *Colloids Surf.*, A322, pp.183-191.
- [6] 2008, Soltman, D. and Subramanian, V., "Inkjet-Printed Line Morphologies and Temperature Control of the Coffee Ring Effect," *Langmuir*, Vol.24, pp.2224-2231.
- [7] 2008, Suh, Y. and Son, G., "A Numerical Study on Patterning Process Including a Self-Alignment Technique of a Microdroplet," *Trans. KSME (B)*, Vol.33, No.1, pp.28-37.
- [8] 1979, Dussan, V.E.B., "On the Spreading of Liquids on Solid Surface: Static and Dynamic Contact Lines," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.11, pp.371-400.
- [9] 2005, Son, G., Hur, N., "A Level Set Formulation for Incompressible Two-Phase Flows on Nonorthogonal Grids," *Numer. Heat Transfer B*, Vol.48, pp.303-316.