



잉크젯 방법을 통한 마이크로 라인 형성에 관한 수치적 연구

이 우 림,¹ 손 기 현^{*2}NUMERICAL STUDY ON THE MICRO-LINE PATTERNING PROCESS
USING AN INKJET PRINTING METHODW.R. Lee¹ and G. Son^{*2}

The droplet motion on a flat substrate with contact angle hysteresis is studied by solving the equations governing the conservation of mass and momentum. The liquid-gas interface is determined by an level-set method which is based on a sharp-interface representation for accurately imposing the matching or coupling conditions at the interface. The method is modified to treat the dynamic contact angle at the liquid-gas-solid interface. The computations are performed to investigate a droplet impact and merging pattern on a flat substrate to find a optimal condition in a micro-line patterning process. The effects of dynamic contact angles on droplet motion are quantified.

Key Words : 액적충돌(Droplet Impact), 레벨셋 방법(Level-Set Method), 잉크젯 방법(Inkjet Printing Method)

1. 서 론

잉크젯 프린팅 방법은 기판 위에 액적을 비접촉식으로 충돌시켜 제작하는 방식으로 공정이 단순하고 재료의 낭비가 적어 공정의 단가를 낮출 수 있는 장점이 있기 때문에 최근 여러 분야에서 다양하게 사용되고 있다[1]. 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 미세라인을 제작하는 공정은 기판 위에 액적을 일정한 간격으로 분사하여 액적들 간의 결합을 유도하는 과정으로 구성된다. 이 때 중요한 요소는 미세라인을 가늘고 균일하게 만드는 것이다. 최근 실험적인 연구들을 통하여 잉크젯 프린팅 방법으로 제작되는 라인의 특성을 규명하려는 많은 시도가 진행되고 있다[2,3]. 이와 같이 잉크젯 프린팅 방법을 이용하여 미세라인을 제작할 때는 기판의 표면에너지에 따라 변화하는 액적과 액적 간의 결합 등의 거동에 대해서 이해하는 것이 매우 중요하다. Li 등[4]은 액적을 기판 위에 일렬로 충돌시킨 후 나타나는 형태에 대해서 연구하였다. 이

들은 액적들이 겹치면서 충돌할 때 표면장력이 서로를 당겨서 길이가 줄어드는 것을 관찰하고 이러한 현상으로 미세라인을 분절될 수 있음을 보였다. 하지만 아직까지 미세라인 형성 시 충돌 액적 간의 영향에 대한 연구는 거의 진행되고 있지 않을 뿐 아니라 이와 같은 마이크로 스케일의 길이와 시간을 갖는 현상은 측정 오차와 한계가 존재하기 때문에 실험만을 통해서 현상을 이해하기에는 많은 어려움이 따른다.

최근에는 이와 같은 어려움을 극복하고자 수치적 해석을 통하여 액적의 충돌과 미세라인 형성을 예측하려는 시도가 진행되고 있다. Soltman과 Subramanian[5]은 Flow-3D 상용프로그램을 이용하여 라인 형성에 관한 수치적 연구를 수행하였다. 이들은 미리 구성되어 있는 미세라인 위에 거리를 달리 한 액적을 충돌시켜 미세라인의 폭을 분석하였다. 하지만 이 연구에서는 일정한 접촉각을 사용하여 표면 에너지에 의한 효과는 규명하지 못했다. 아직까지 미세라인 제작공정에서 액적 간의 충돌, 결합 및 이때 표면에너지에 의한 효과에 대한 해석은 거의 이루어지지 않고 있으며 액적 충돌에서부터 미세라인을 형성하는 전 과정을 해석한 예는 보고되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 평판 위에 충돌하는 액적들에 대한 결합 현상을 수치적으로 해석하였다. 계산에는 최근에 개발되고 있는

1 학생회원, 서강대학교 기계공학과 대학원

2 정회원, 서강대학교 기계공학과

* TEL : 02) 705-8641

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

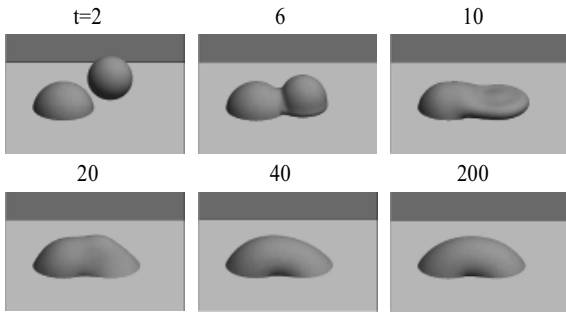


Fig. 1 Droplet impact and merging process with dynamic contact angle of $\theta_a = 150^\circ$ and $\theta_r = 30^\circ$

Sharp-Interface LS 방법을 기반으로 하여 접촉각 조건 및 액적 간의 거리에 의한 결합 액적의 형상에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치 해석

2.1 원고의 양식 및 분량

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 Suh와 Son[6]의 Sharp-Interface 구현을 위한 LS 방법을 기반으로 하였다. 기체-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,

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

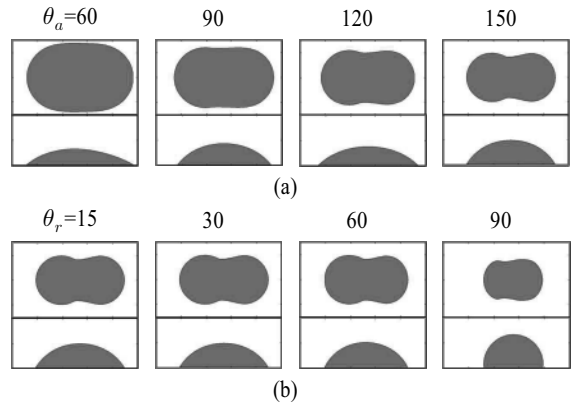


Fig. 2 Effect of dynamic contact angle on steady state droplet shape: (a) receding contact angle with $\theta_r = 30^\circ$ and (b) advancing contact angle with $\theta_a = 150^\circ$

위의 식에서 H_ϕ 는 액상과 기상을 구분하는 불연속적 계단 함수이며, 상경계면의 곡률(κ)는 거리 함수로 정의된 연속적인 LS 함수로부터 계산된다.

실제 표면에서 접촉각은 액체-기체-고체 접촉선의 속도에 따라서 퍼짐 접촉각(θ_a)과 수축 접촉각(θ_r) 사이에서 변화한다($\theta_r \leq \theta \leq \theta_a$). 본 연구에서 접촉각이 $\theta_r < \theta < \theta_a$ 이면 접촉선은 정지되어 있으며, 접촉선이 이동할 때는 접촉각이 $\theta = \theta_a$ 또는 $\theta = \theta_r$ 을 만족하도록 하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 PEDOT의 물성치 값을 사용하였다. 계산에서는 첫 번째 액적을 4m/s로 충돌시킨 후 정상상태의 결과에 동일한 직경(30 μ m)의 두 번째 액적을 일정 거리(l_d)만큼 떨어진 후 같은 속도로 충돌시켜 그 결과를 관찰하였다.

Fig. 1은 기판과 액적의 사이에서 퍼짐접촉각(θ_a)이 150°이고, 수축접촉각(θ_r)이 30°으로 매우 크게 차이가 날 때 액적의 충돌 및 결합과정을 보여준다. 액적이 바다에 충돌하면서 150°의 접촉각을 유지한 채로 오른쪽으로 퍼져나가게 된다. 하지만 왼쪽으로는 영향이 크게 가지 못하여 왼쪽 접촉선은 진행하지 않고 고정되어 있다. 표면장력에 의해 곧 액적의 퍼짐이 멈추고 수축하지만 이 때 수축접촉각이 30°로 매우 작기 때문에 수축이 거의 일어나지 못하고 최대 퍼짐 지점에 그대로 접촉선을 유지하는 것을 볼 수 있다. 또한 액적들이 겹치는 영역에서 충분히 퍼지지 못하고 수축이 일어나기 힘들기 때문에 액적은 가운데에서 약간 들어간 모습을 보인다. 이에 따라서 결합된 액적은 기다란 타원형에 가운데가 약간 들어간 모습을 나타내게 된다.



액적과 기관의 퍼짐 및 수축 접촉각을 달리하였을 때 결합 액적의 최종 형태가 Fig. 2에 나타나 있다. 수축 접촉각을 30°로 고정하고 퍼짐 접촉각을 증가시키면 액적의 퍼짐이 쉽지 않기 때문에 액적의 폭이 좁아지는데 가운데 쪽에서 또한 폭의 증가가 일어나지 못하고 아령형태를 보인다. 또한 퍼짐 접촉각을 150°으로 고정한 상태에서 수축 접촉각을 증가시키면 60도까지는 큰 변화가 보이지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만 수축접촉각이 90도로 증가하였을 때 전체적으로 매우 수축하여 단면이 매우 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 레벨셋 방법을 이용하여 기관 위에 연속적으로 충돌하는 액적의 결합 현상에 대하여 수치해석 하였다. 이를 통하여 수축 및 퍼짐 접촉각을 달리함에 따라 결합 액적의 형태가 변화하는 것을 확인하고 이를 통하여 미세라인 형성을 위한 최적값에 대하여 고찰하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 ‘다중현상 CFD연구센터(ERC)’의 과제로 수행된 연구임(No.2009-0083510).

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, Li, R., Ashgriz, N., Chandra, S., Andrews, J.R., and Williams, J., "Drawback During Deposition of Overlapping Molten Wax Droplets," *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol.130, pp.041011.
- [5] 2008, Soltman, D. and Subramanian, V., "Inkjet-Printed Line Morphologies and Temperature Control of the Coffee Ring Effect," *Langmuir*, Vol.24, pp.2224-2231.
- [6] 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.