

〈 논문 〉

버블 잉크젯에서의 기포성장 및 액적분사에 관한 수치적 연구

서 영 호* · 손 기 현†

(2006년 7월 12일 접수, 2006년 9월 12일 심사완료)

Numerical Study on Bubble Growth and Droplet Ejection in a Bubble Inkjet Printer

Youngho Suh and Gihun Son

Key Words: Bubble Growth(기포성장), Bubble Inkjet(버블 잉크젯), Droplet Ejection(액적분사), Level Set Method(Level Set 방법)

Abstract

The droplet ejection process driven by an evaporating bubble in a thermal inkjet printhead is investigated by numerically solving the conservation equations for mass, momentum and energy. The phase interfaces are tracked by a level set method which is modified to include the effect of phase change at the interface and extended for multiphase flows with irregular solid boundaries. The compressibility effect of a bubble is also included in the analysis to appropriately describe the bubble expansion behaviour associated with the high pressure caused by bubble nucleation. The whole process of bubble growth and collapse as well as droplet ejection during thermal inkjet printing is simulated without employing a simplified semi-empirical bubble growth model. Based on the numerical results, the jet breaking and droplet formation behaviour is observed to depend strongly on the bubble growth and collapse pattern. Also, The effects of liquid viscosity, surface tension and nozzle geometry are quantified from the calculated bubble growth rate and ink droplet ejection distance.

기호설명

c_p : 비열
 d_n : 노즐출구 직경
 H : 액상/기상을 구분하는 함수
 h : 격자간격
 h_{fg} : 증발 잠열
 k : 열전도율
 n : 액상-기상계면에서 법선방향 단위벡터
 n_s : 고체 경계면에서 법선방향 단위벡터
 p : 압력
 Oh : Ohnesorge 수

T : 온도
 T_{bn} : 기포 생성 온도
 u : 속도벡터
 \dot{V}_q : 상변화에 의한 체적 생성량

그리스문자

α : 고체/유체영역을 구분하는 함수
 κ : 상경계면의 곡률
 μ : 점성계수
 ρ : 밀도
 σ : 표면장력계수
 ϕ : 액체-기체 상경계면으로부터 거리함수
 ψ : 고체-유체 상경계면으로부터 거리함수
 φ : 유체-고체의 접촉각

* 회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : gihun@sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8641 FAX : (02)712-0799

하첨자

g, l : 기체, 액체

sat : 포화상태

1. 서론

버블 잉크젯은 프린터 헤드안의 잉크를 높은 온도까지 가열하여 기포를 생성시키고 이때 발생하는 높은 증기압을 이용하여 잉크를 액적형태로 분사하는 방식이다. 이러한 버블 구동 액적분사 장치는 다른 잉크젯보다 제작비용이 낮고 분사노즐의 간격이 좁아 높은 해상도를 구현할 수 있다는 장점이 있으며, 사무용 프린터 외에 평판 디스플레이 패널 제조공정, 제트엔진에서의 마이크로 인젝터, MEMS 제조공정 등 다양한 분야에서 응용될 수 있다.

버블 잉크젯의 인쇄 품질을 높이거나 응용분야에서 유동 또는 공정을 정확하게 제어하기 위해서는 액적분사 시 일차액적에 이어 후속적으로 생성되는 위성액적의 양을 감소시키는 것이 중요한 문제이다. 그러나 버블 잉크젯은 액적의 형성 및 분열뿐만 아니라 기포의 생성, 성장, 소멸 등의 복합적인 현상이 매우 짧은 시간에 마이크로 스케일의 영역에서 일어나기 때문에 실험만으로 충분히 해석하기 어렵다. 이러한 현상에 대한 이해를 넓히기 위해서는 국부적인 현상을 자세히 묘사할 수 있고 다양한 변수에 대한 폭넓은 해석이 가능한 수치적 연구가 필요하다.

Allen 등⁽¹⁾은 MAC(Marker-and-Cell) 기법을 사용하여 버블 잉크젯에서 기포의 성장 및 수축에 의한 액적 분사과정을 수치적으로 해석하였다. 그러나 이 연구에서는 노즐형상을 격자면에 일치한 계단형태의 거친 형상으로 나타내었으며, 버블 잉크젯에서 액적분사의 구동력인 기포압력을 구하는 과정에 대해 명확하게 서술하지 못하였다. 온도를 결정하는 에너지 방정식을 해석에 포함하지 않았기 때문에 기포의 압력변화를 기포의 체적과 이상기체 방정식만으로 구해야 하는 문제점이 있다. Asai 등⁽²⁾은 포화상태에서 온도와 압력간의 관계를 나타내는 Clausius-Clapeyron 방정식, 이상기체 방정식, 일차원적인 에너지 방정식과 잉크와 기포간의 에너지 균형으로부터 기포압력을 계산하는 모델을 이용하여 액적거동을 해석하였다. 하지만, 노즐로부터 분사된 액적을 강제

취급함으로써 액적거동에 대한 해석을 단순화 하였다. 또한 Asai⁽³⁾는 VOF(Volume-of-Fluid) 방법을 이용하여 기포성장에 의한 액적분사에 대한 3차원 수치해석을 수행하였다. 그러나 이 연구에서는 기포거동을 수치모사에 포함하지 않고 기포압력에 대한 실험 모델식을 액적계산의 경계조건으로 사용하였으며 액적이 노즐로부터 분리되어 생기는 이차액적의 경향에 대한 결과를 제시하지 않았다. Chen 등⁽⁴⁾은 전기적인 펄스를 매개변수로 선택하여 Asai 등⁽²⁾이 제시한 모델로부터 기포압력을 계산하고 이를 바탕으로 노즐로부터 액적의 이탈 및 이차액적 생성과정을 해석하는 포괄적인 연구를 수행하였다. 그러나 액적거동에 대한 수치해석에서 연속방정식과 운동량방정식을 축방향 변화만 고려하는 일차원으로 단순화하였다. 이 경우 전단응력이 중요한 점성의 효과를 제대로 해석할 수 없고, 상경계면이 축 방향 좌표에 대해 다수의 값을 가질 수 없으므로 액체젯의 수축현상 등에 대한 묘사를 할 수 없는 한계가 있다. 또한 버블 잉크젯에서 중요한 역할을 하는 기포 거동 및 매니스커스의 형성 등 노즐내부 현상에 대한 연구가 포함되지 않았다.

최근 Hong 등⁽⁵⁾은 잉크젯 응용을 위한 마이크로히터에서의 기포의 성장 및 수축현상을 VOF 방법을 이용하여 3차원으로 수치모사하였다. 그러나 사용한 VOF 방법에 상변화 효과가 포함되어 있지 않기 때문에 이전의 수치연구와 마찬가지로 기포압력을 경계조건으로 취급하였으며, 기포압력은 Asai 등⁽²⁾이 제시한 것과 유사한 일차원적인 모델을 사용하여 계산하였다.

위에서 살펴본 바와 같이, 버블 잉크젯에 대한 기존의 수치연구에서는 액적분사의 구동력인 기포압력을 계산하기 위해서 상당히 단순화된 식이나 실험데이터에 기초한 모델식에 의존하고 있다. 본 연구에서는 액적분사뿐만 아니라 상변화를 동반하는 기포의 성장 및 수축을 포함하는 버블 잉크젯 전체 과정을 수치모사하는 방법을 제시하고자 한다. 상경계면을 추적하는 방법으로 각 상의 체적비에 기반을 둔 VOF 방법 대신 상경계면으로부터 거리로 정의된 함수를 사용함으로써 마이크로 스케일에서 중요한 표면장력을 효과적으로 계산할 수 있는 LS(Level Set) 방법⁽⁶⁾을 사용하였다. 여기에 버블 잉크젯 해석에 추가적으로 필요한 격자점과 일치하지 않는 노즐형상을

고려하는 수치기법과 기포의 상변화 및 압축성 효과를 포함하는 기법을 결합하여 기포성장을 포함한 버블 잉크젯에서의 액적분사 과정을 수치적으로 해석하고자 한다.

2. 수치해석방법

기체-액체의 상경계면은 기상에서 음의 값, 액상에서 양의 값을 가지는 거리함수로 정의된 LS 함수에 의해 계산되며 기포 및 액적 거동을 2차원 축대칭, 층류 조건하에서 수치 해석하였다. 기상은 공기 영역과 수증기 영역으로 구분되며 본 연구에서는 두 영역이 혼합되지 않는 경우에 한정하였다. 또한, 기체의 열전도율은 작기 때문에 기상내부에서의 열전달을 고려하지 않았으며, 증기-액체 상경계면은 포화온도로 유지된다고 가정하였다. 기상/액상 영역 모두에 적용될 수 있는 에너지, 운동량 및 질량 보존식과 LS 함수 ϕ 를 지배하는 방정식은 다음과 같이 표현된다.⁽⁷⁾

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot k \nabla T \quad \text{if } H > 0 \quad (1)$$

$$T = T_{sat} \quad \text{if } H = 0$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \nabla u + f \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = \dot{V}_q \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (4)$$

위의 식에서 H , 상경계면의 곡률(κ), 물성치 등은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \cdot \nabla$$

$$\dot{V}_q = \frac{k \nabla T \cdot \nabla \rho}{\rho^2 h_{fg}}$$

$$f = \rho g - \sigma \kappa \nabla H + \nabla \cdot \mu (\nabla u)^T$$

$$H = \max \left[0, \min \left[1, \frac{\phi}{2} + \frac{\phi}{3h} + \frac{\sin(2\pi\phi/3h)}{2\pi} \right] \right]$$

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

$$\rho = \rho_g + (\rho_l - \rho_g)H$$

$$\mu = \mu_g + (\mu_l - \mu_g)H$$

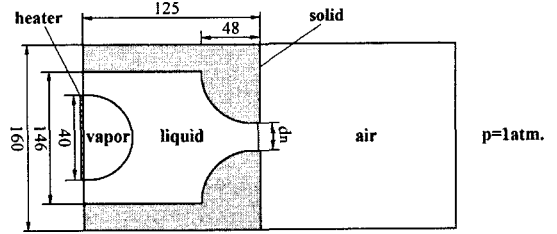


Fig. 1 Computational domain for bubble inkjet simulation (unit: μm)

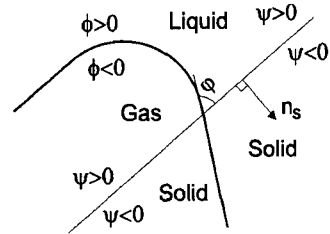


Fig. 2 Extension of LS function into a solid region

식 (3)에서 \dot{V}_q 는 상변화로 인한 체적증가량이고, 식 (4)에서 u_{int} 는 상경계면의 속도로 에너지 균형을 나타내는 식 (5)에 의해 결정된다. 상경계면을 포함하는 각 격자점에서의 LS 함수(ϕ)는 식 (5)를 계산영역 전체로 확장하여 정의된 속도에 의해 이루어진다.

$$u_{int} = u + k \nabla T / \rho h_{fg} \quad (5)$$

Fig. 1은 버블 잉크젯의 해석에 사용한 계산영역을 나타낸다. 격자점과 일치하지 않는 불규칙한 형상의 노즐을 고려하기 위해, Fig. 2에 표시된 것처럼 고체영역에서 음의 값, 유체영역에서 양의 값을 가지는 고체-유체 상경계면으로부터 거리함수로 정의된 LS 함수 ψ 와 액상-기상을 구분하는 함수 H 와 유사한 계단함수 $\alpha = H(\psi)$ 를 도입하였다. 유체영역에서 정의된 식 (2)-(4)는 다음과 같이 고체를 포함하는 전체영역으로 확장될 수 있다.⁽⁸⁾

$$\rho \alpha \frac{Du}{Dt} = -\alpha \nabla p \quad (6)$$

$$+ \nabla \cdot \frac{\mu}{\alpha} \nabla u + \alpha f \quad \text{if } \alpha > 0$$

$$u = 0 \quad \text{if } \alpha = 0$$

$$\nabla \cdot \alpha u = \alpha \dot{V}_q \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \alpha \mathbf{u}_{int} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (8)$$

여기서, μ/α 는 일종의 유효점성계수이며 고체경계면($\psi=0$)이 격자점과 일치하지 않을 때 점성응력을 효과적으로 계산하기 위해 도입되었다. 상경계면($\phi=0$)은 식 (8)에 의해 결정되지만, H 와 κ 를 정확하게 계산하기 위해서는 LS 함수를 거리함수($|\nabla \phi|=1$)가 되도록 식 (9)를 사용하여 보정하는 것이 바람직하다.^(6,8)

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = S(1 - |\nabla \phi|) \quad (9)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\phi_0}{\sqrt{\phi_0 + h^2}} & \text{if } |\phi_0| > h/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

여기서, ϕ_0 은 식 (8)의 해이며, τ 는 식 (9)의 우변이 상경계면 주위에서 0이 될 때까지 계산하는 반복단계를 의미한다. 식 (8)은 유체영역($\alpha=1$)에서 정의되는 LS 함수에 적용되는 식이며, 상경계면의 곡률을 효과적으로 계산하기 위해서는 LS 함수를 고체영역으로 확장할 필요가 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 접촉각(φ)과 고체영역으로 향하는 단위벡터(\mathbf{n}_s)를 도입하면, 접촉각 조건은 $\mathbf{n}_s \cdot \nabla \phi / |\nabla \phi| = \cos \varphi$ 로 표현된다. 고체영역에서 접촉각 조건을 만족하는 LS 함수는 식 (11)로 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \cos \varphi - \mathbf{n}_s \cdot \nabla \phi \quad \text{if } \psi \leq 0 \quad (11)$$

버블 잉크젯 과정에서 기포의 압력은 매우 큰 폭으로 변하기 때문에 기포의 밀도변화 즉 압축성 효과가 고려되어야 한다. 기포의 압축성 효과를 질량 방정식에 다음과 같이 추가하였다.

$$\nabla \cdot \alpha \mathbf{u} = -\alpha(1-H) \frac{1}{\rho_v} \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \alpha \dot{V}_g \quad (12)$$

기포 내부를 포화증기로 가정하면 기포의 밀도는 압력에 대한 함수로 표현할 수 있다.

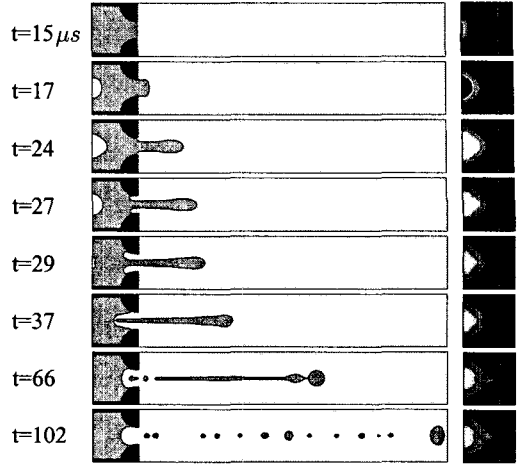


Fig. 3 Inkjet process including bubble growth and droplet ejection (left), and the temperature fields in the nozzle (right)

$$\rho_v = \rho_{v,ref} \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{1/\gamma} \quad (13)$$

여기서 γ 는 1.05를 사용하였으며, 이 값은 $1.2\text{kPa} \leq p_{sat} \leq 7.5\text{Mpa}$ 범위에서 증기표의 데이터와 5% 오차범위 이내에서 일치한다. 식 (13)을 이용하면 식 (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot \alpha \mathbf{u} = -\alpha(1-H) \frac{1}{\gamma p} \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha \dot{V}_g \quad (14)$$

3. 계산결과 및 검토

3.1 기포성장 및 액적분사

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 수치해석 방법을 이용하여 버블 잉크젯에서의 기포의 성장 및 수축으로 인한 액적분사 과정을 모사한 결과이다. 잉크의 물성치는 Chen 등⁽⁴⁾의 실험조건을 참고로 하여 $\rho_l=1020\text{kg/m}^3$, $\mu_l=1.31\text{mPa}\cdot\text{s}$, $\sigma=0.045\text{N/m}$ 로 결정하였으며, 증기 밀도는 식 (13)을 사용하여 계산하였다. 또한, 노즐의 직경은 $50\mu\text{m}$, 히터의 직경은 $40\mu\text{m}$, 열유속은 200MW/m^2 , 기포의 접촉각은 90° , 액적-공기의 접촉각은 30° 를 사용하였다. 전체 계산영역에서 초기온도를 30°C 로 하였고 노즐 바닥에 부착된 히터로부터 첫 번째 격자의 온도가 기포생성 온도인 T_{bm} 에 도달할 때까지

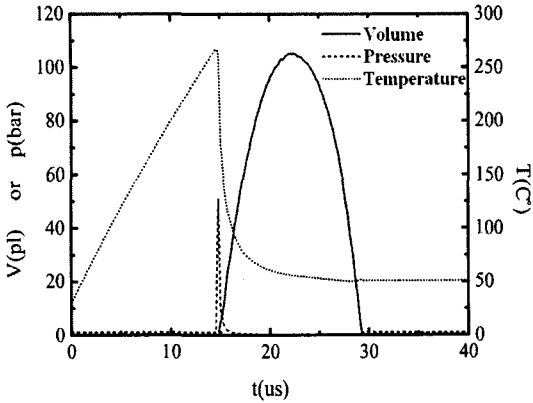


Fig. 4 Temporal variation of properties during bubble inkjet printing: bubble volume, pressure and temperature

열유속을 가하였다. 기포 생성 온도에 대해서는 실험조건에 따라 다르지만 대체적으로 270~330 $^{\circ}C$ 의 값을 가진다고 알려져 있다.^(1-3,9,10) 본 계산에서는 T_{bn} 의 값으로 Asai 등⁽²⁾이 제시한 270 $^{\circ}C$ 를 사용하였으며 어떤 계산 격자든지 $T > T_{bn}$ 을 만족하게 되면 격자간격 크기의 지름을 갖는 작은 기포를 격자 안에 삽입하였다. 이때 기포의 초기 압력은 270 $^{\circ}C$ 의 포화증기압인 5.5MPa로 하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 가열면에 생성된 기포는 초기압력과 열전달로 인한 상변화에 의하여 성장하게 되고, 기포성장과 함께 챔버 안에 있는 액체가 노즐 밖으로 밀려나가 길게 늘어진 모양을 형성한다. 성장한 기포는 $t=24\mu s$ 이후부터 응축으로 인하여 수축하게 되고, 이로 인해 유도된 분사 반대방향으로 발생한 유속과 액적 분사방향으로의 관성력에 의하여 액주 부분이 점점 가늘어지게 된다. $t=37\mu s$ 에서는 가늘어진 액주 부분이 끊어져서 액적이 노즐로부터 완전히 분리가 되며, 노즐 안에 남아 있는 잉크는 표면장력에 의하여 매니스커스를 형성하게 된다. $t=66\mu s$ 에서는 표면장력의 작용으로 액주로부터 일차액적이 분리되고, $t=102\mu s$ 에서는 떨어진 액주 부분 또한 표면장력의 영향으로 이차액적을 형성하게 됨을 관찰할 수 있다. 이러한 이차액적들은 보통 크기가 작고 낮은 속도를 갖고 있기 때문에 일차액적과 다른 궤도를 가지게 되어 인쇄 질을 떨어뜨리는 요인으로 작용한다. 잉크젯의 성능향상을 위해서는 이차액적의 양을 줄이는 것이 중요하다. 분사된 잉크의 속도는 9.51m/s, 체적은 96pl(picoliter)이며 이 중 일차액적의 체적은 54pl이다.

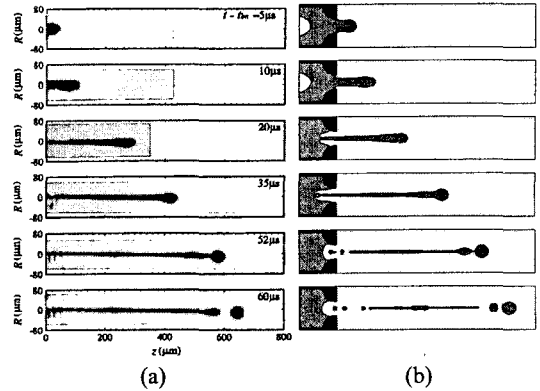


Fig. 5 Comparison of the droplet ejection patterns obtained from (a) experiment⁽⁴⁾ and (b) numerical simulation

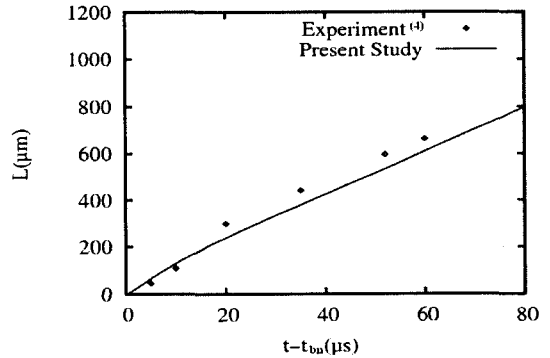


Fig. 6 Comparison of droplet ejection distances obtained from numerical simulation and experiment⁽⁴⁾

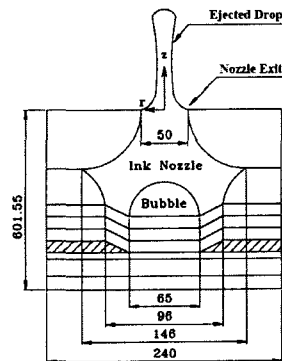


Fig. 7 Schematic of the bubble inkjet printhead used in Chen et al.'s experiment⁽⁴⁾

Fig. 4는 시간에 따른 기포의 부피, 기포 발생 지역에서의 압력 및 온도의 변화를 나타낸 것이다. 계산된 기포의 수명은 약 15 μs 이며 최대 부피는 105pl이다. Fig. 4(b)에서 기포가 팽창할 때 기포의 압력은 급격하게 감소하여 기포 생성 후

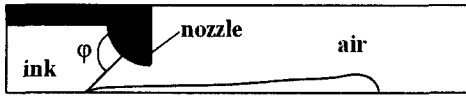


Fig. 8 Configuration of contact angle

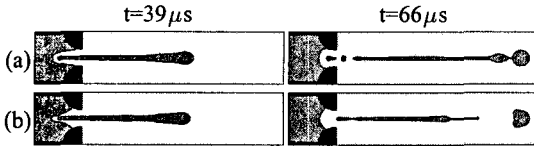


Fig. 9 Droplet ejection pattern with different contact angles : (a) $\phi = 30^\circ$ and (b) $\phi = 90^\circ$

2 μ s 동안 1기압 이하로 떨어지다가 기포가 수축 하면서 12kPa까지 떨어지게 된다. 또한 기포가 발생한 영역의 온도는 T_{bn} 인 270 $^\circ$ C에서 응축으로 인한 냉각으로 50 $^\circ$ C로 낮아진다.

본 연구에서 얻은 액적분사에 대한 수치결과와 Chen 등⁽⁴⁾의 실험데이터를 Fig. 5와 6에서 비교하였다. Chen 등⁽⁴⁾의 실험에서 사용한 프린트 헤드는 Fig. 7과 같으며 노즐의 형상 및 크기는 본 연구와 동일하다. Fig. 5와 6에서 $t-t_{bn}$ 은 기포 생성 후 시간을 나타내며 계산에서 t_{bn} 은 14 μ s이다. Fig. 5에서 액적 분사 형태에 대한 계산결과와 실험결과가 대체로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 액적의 분사 길이를 비교한 Fig. 6에서 수치 결과는 실험데이터와 최대 18%의 오차 이내에서 잘 일치하였다.

3.2 접촉각에 따른 액적분사 형태

잉크젯에 대한 기존의 실험과 수치적인 연구에서는 노즐 벽면과 잉크의 상경계면이 만나는 부분에서 형성되는 접촉각(Fig. 8 참조)을 명확하게 고려하지 않고 있다. Fig. 9는 이러한 접촉각이 액적의 분사 거동에 미치는 영향을 수치해석한 결과이다. 접촉각이 30 $^\circ$ 에서 90 $^\circ$ 로 증가함에 따라 액주로부터 일차액적이 분리되는 시점이 빨라지게 되며 $t=66\mu$ s에서 접촉각이 큰 경우에는 일차액적이 완전히 분리되는 반면 접촉각이 30 $^\circ$ 일 경우에는 액주로부터 일차액적의 분리가 시작되고 있는 것을 볼 수가 있다. 잉크가 분사되는 초기 단계에서는 접촉각이 클수록 표면장력의 영향을 덜 받아 분사량이 증가하게 되지만, 기포의 수축 시에는 접촉각이 작을수록 잉크가 노즐로 더 빨리 유입되어 액주부분이 가늘어지고 노즐로부터 일찍 분리된다. 그 결과 접촉각이 90 $^\circ$ 일 경우

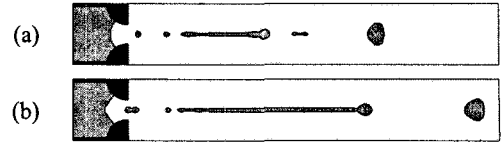


Fig. 10 Droplet ejection pattern at $t-t_{bn}=57\mu$ s with various bubble nucleation temperature: (a) $T_{bn}=270^\circ$ C and (b) $T_{bn}=300^\circ$ C

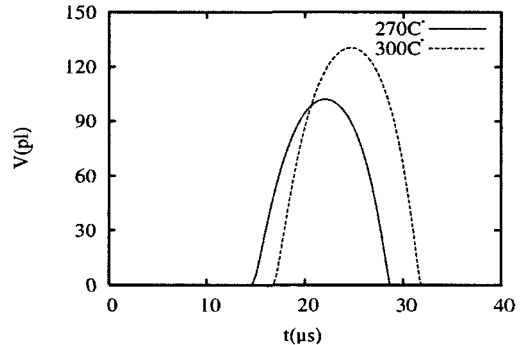


Fig. 11 Effect of bubble nucleation temperature on bubble growth

일차액적의 체적은 67pl로 증가하게 된다. 하지만 액적의 분사속도는 9.50m/s로 30 $^\circ$ 일 경우와 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

3.3 기포 생성 온도에 따른 액적분사 형태

Fig. 10과 11은 기포 생성 온도 T_{bn} 을 300 $^\circ$ C로 증가시켰을 경우 기포성장 및 액적거동에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 기포의 초기압력으로 300 $^\circ$ C의 포화증기압인 8.6MPa로 하였으며 다른 계산 조건은 동일하다. Fig. 11에서 나타난 바와 같이 T_{bn} 이 270 $^\circ$ C에서 300 $^\circ$ C로 증가하면 기포의 생성시간이 14 μ s에서 17 μ s로 지연되고 기포 초기압력의 증가에 의해 기포의 성장속도 및 성장량 또한 증가함을 볼 수가 있다. 이로 인하여 Fig. 10에서와 같이 동일한 기포 생성 후 시간에 대해서 300 $^\circ$ C일 경우 액적의 분사속도는 14.1m/s로 더 빠르게 되고 전체 분사량 또한 125pl로 증가하는 것을 볼 수가 있으며 이때 전체 분사액적에 대한 일차액적의 체적 비율은 270 $^\circ$ C일 경우 29%에서 300 $^\circ$ C일 경우 42%로 증가하게 된다.

3.4 잉크의 특성에 따른 액적분사 형태

잉크의 특성 중 점도와 표면장력이 기포성장과 액적거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 점도 변

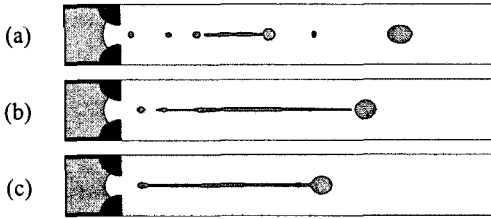


Fig. 12 Droplet ejection pattern at $t=80\mu s$ with various ink viscosities: (a) $1.31\text{mPa}\cdot\text{s}$, (b) $5.24\text{mPa}\cdot\text{s}$ and (c) $10.5\text{mPa}\cdot\text{s}$

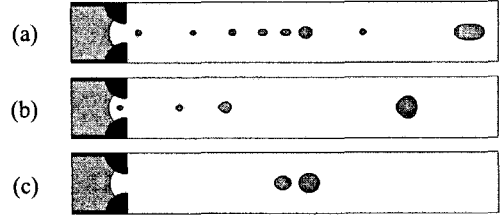


Fig. 14 Droplet ejection pattern at $t=95\mu s$ with various ink surface tensions: (a) 0.045N/m , (b) 0.090N/m and (c) 0.180N/m

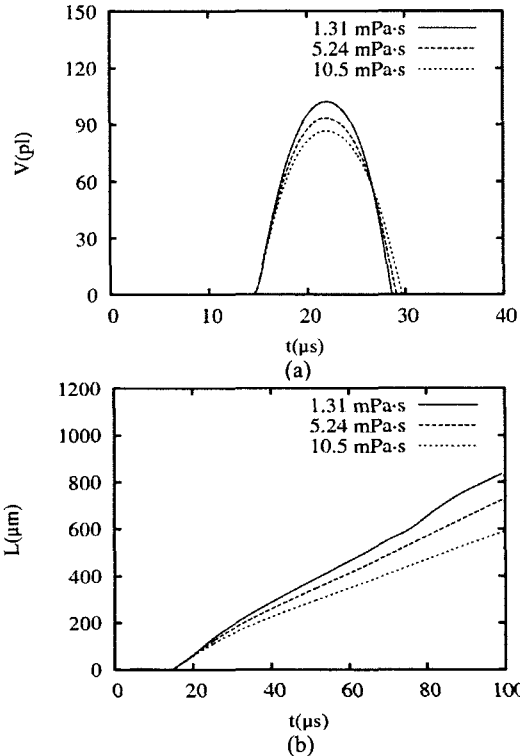


Fig. 13 Effect of viscosity on (a) bubble growth and (b) droplet ejection

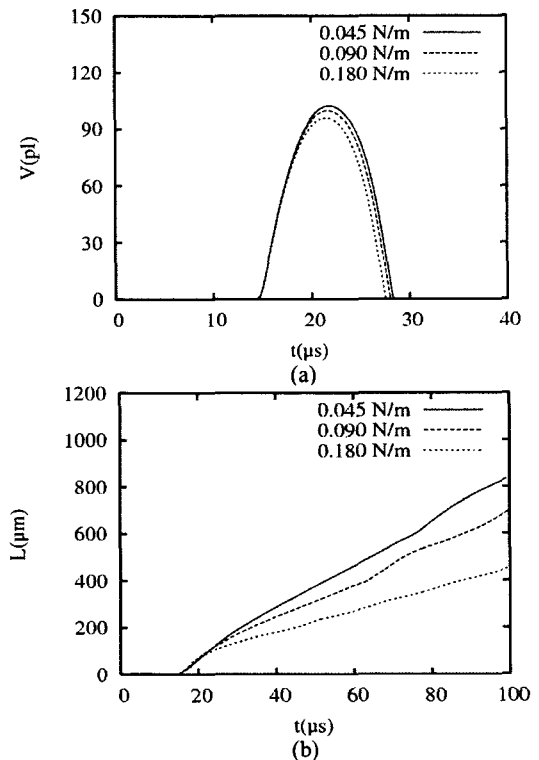


Fig. 15 Effect of surface tension on (a) bubble growth and (b) droplet ejection

화에 따른 계산 결과는 Fig. 12와 13과 같다. 계산에서 다른 조건은 고정하고 점도를 $1.31\text{mPa}\cdot\text{s}$ 에서 4배, 8배 증가시켰다. 이 조건을 액적거동의 해석에서 많이 사용하는 점도와 표면장력의 비를 나타내는 무차원 수인 Oh 수($= \mu / \sqrt{\rho\sigma d_n}$)를 도입하여 나타내면, Oh 수가 0.027에서 0.11, 0.22로 증가시킨 경우에 해당된다. 점도가 증가하여 액적거동에 대한 저항이 증가하면 기포의 성장속도가 감소하게 되고 이로 인하여 액적의 분사속도는 점성이 4배, 8배 증가 시에 각각 8.5m/s ,

6.8m/s 로 10%, 27% 감소하게 된다. 또한 점도가 높아질수록 기포의 수축속도가 지연되는 것을 볼 수 있는데 이로 인해 액적이 노즐로부터 분리되는 시간이 점도가 클수록 증가하게 되고, 그 결과 액적에 매달려 있는 액주의 길이가 길어지게 된다. 그리고 점성력의 증가는 일차액적에 매달려있는 액주 부분이 잘게 끊어지는 것을 방지하는 역할을 하기 때문에 분사된 잉크 중 이차액적이 차지하는 체적비가 29%에서 점도를 4, 8배로 증가시켰을 경우 26%, 23%로 감소하게 된다.

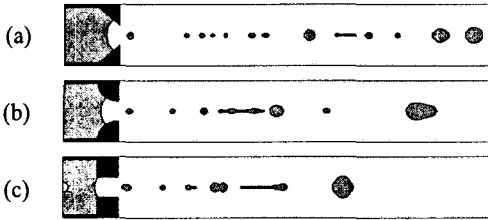


Fig. 16 Droplet ejection pattern at $t=85\mu s$ for various nozzle shapes: (a) Case 1, (b) Case 2 and (c) Case 3

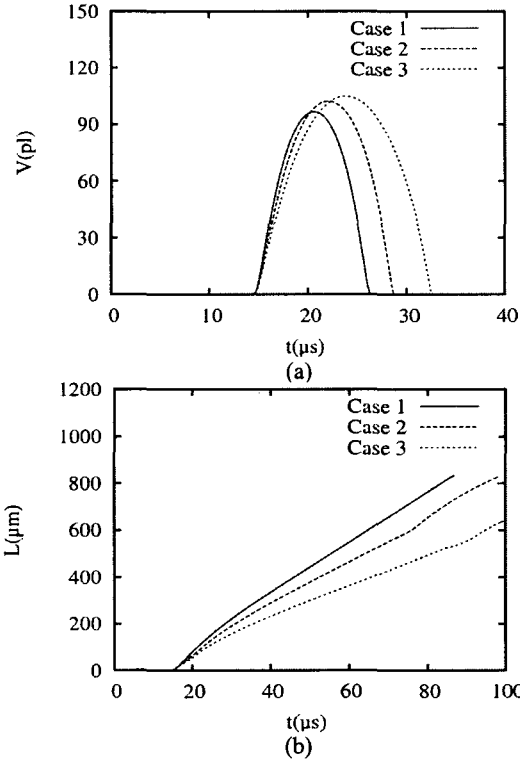


Fig. 17 Effect of nozzle shape on (a) bubble growth and (b) droplet ejection

Fig. 14와 15는 표면장력의 변화가 액적 및 기포의 거동에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 버블 잉크젯에서 잉크의 표면장력은 잉크의 매니스커스 형성 및 잉크 저장소로부터 챔버로의 잉크의 재충전 등과 같이 잉크젯의 구동에 중요한 역할을 한다. Fig. 14와 15에서 표면장력이 2배, 4배 증가함에 따라 또는 Oh 수가 0.019, 0.014로 감소함에 따라 액적의 분사속도는 각각 14%, 44% 감소하게 되고, 액주 또한 짧아지고 잘게 끊어져 이차액적의 양이 감소하는 것을 볼 수가 있다. Fig. 14에서 표면장력이 2배로 증가하였을 경우, 이차액적의 비율이 15%로 감소하게 되고 표면장

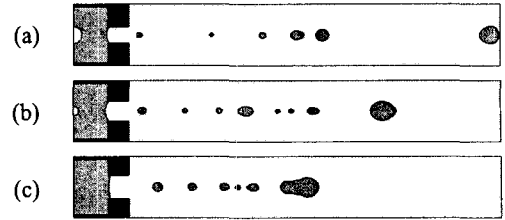


Fig. 18 Droplet ejection pattern at $t=95\mu s$ for various nozzle diameters: (a) $40\mu m$, (b) $50\mu m$ and (c) $60\mu m$

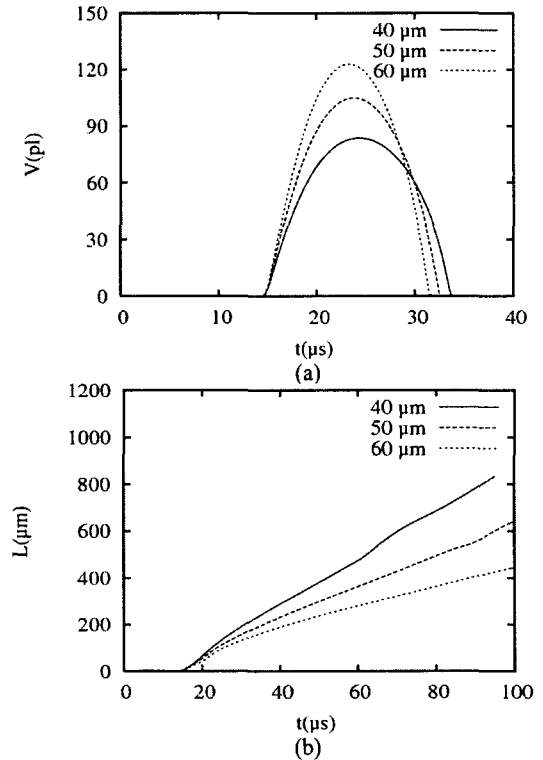


Fig. 19 Effect of various nozzle diameters on (a) bubble growth and (b) droplet ejection

력이 4배로 증가하였을 경우에는 시간이 지남에 따라 일차 액적과 이차액적이 합쳐져 단일 액적을 형성하게 된다.

3.5 노즐형상에 따른 액적분사 형태

버블 잉크젯에서 흔히 사용되는 3가지 형태의 노즐에 대해서, 노즐형상이 액적의 분사 거동에 미치는 영향을 살펴보았다. Fig. 16과 Fig. 17은 노즐 출구 직경이 일정할 때 노즐형상에 따른 액적거동의 변화를 나타낸 것이다. Case 1의 경우에는 유동저항이 상대적으로 작아 기포의 성장속도가 가장 빠른 반면 액주길이의 증가로 인해

상대적으로 많은 양의 이차액적이 발생하는 것을 볼 수가 있다. 이 경우 액적의 분사속도는 11.5m/s이고 분사액적 체적 83pl 중 이차액적의 비율은 57%이다. 노즐형상이 Case 2 또는 Case 3 인 경우에는 Case 1에 비해 유동저항의 증가에 의한 분사속도 감소의 영향과 노즐 끝부분이 액적의 분사 방향과 평행한 유로 형상으로 인하여 액적거동을 안정적으로 유지시켜 주기 때문에 이차액적의 양이 줄어드는 것을 볼 수가 있다. Case 2의 경우 액적 분사속도는 Case 1보다 17% 감소하고, 전체 분사 액적 중 이차액적의 비율은 29%로 감소하게 된다. 또한 Case 3의 경우 액적 분사속도는 7.5m/s로 Case 1보다 34% 감소하고, 이차액적의 비율도 24%로 감소하게 된다. 하지만 Case 3의 경우 Fig. 17에서 볼 수 있듯이 기포가 수축하면서 잉크가 노즐내로 유입되는 과정에서 노즐형상의 영향으로 공기가 유입되는 부작용이 있는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 18과 19는 노즐 직경의 변화가 액적분사에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 가열조건이 같은 경우 노즐 직경이 커질수록 기포의 성장속도는 증가하지만 오히려 액적 분사 속도는 노즐 직경이 40 μ m인 경우 10.3m/s이고 60 μ m인 경우 5.2m/s로 49% 감소하게 되는데 이는 노즐의 직경이 클수록 분사액적의 체적이 76pl에서 122pl로 증가하기 때문이다. 또한 이차액적의 체적비율은 노즐 직경이 40 μ m인 경우 37%에서 60 μ m인 경우에는 17%로 감소하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 Level Set 방법을 바탕으로 기상과 액상뿐만 아니라 불규칙한 형상의 물체를 포함하고, 상변화에 의한 압축성 기포의 성장 및 수축을 포함한 버블 잉크젯에서의 분사된 액적이 노즐로부터 이탈되어 다수의 액적으로 분리되는 현상을 종합적으로 해석할 수 있는 수치기법을 제시하였으며, 참고문헌에 보고된 실험결과와 비교를 통하여 개발된 수치기법의 적용가능성을 확인하였다.

수치해석 결과로부터 버블 잉크젯에서 노즐의 형상 및 잉크 물성치의 변화는 기포 및 액적 거동에 영향을 주며, 액적의 분사속도는 기포의 성

장속도에 비례하며 액적의 분사량은 기포의 성장량에 비례함을 알 수 있었다. 잉크의 점도와 표면장력을 증가시키면 이차액적의 양이 감소하게 되지만 점도를 증가시키는 경우에 비해 표면장력을 증가시키는 경우 이차액적의 감소량이 상대적으로 커서 버블 잉크젯의 성능 면에서 보다 효과적임을 알 수 있었다. 또한 노즐 끝부분이 액적 분사 방향과 평행한 형상이 액적 분사를 안정화시키는 경우 이차액적의 생성을 억제함을 알 수가 있었고 노즐 직경이 증가할수록 액적의 분사속도와 이차액적의 양이 감소하는 것을 볼 수가 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 마이크로 열시스템 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Allen, R. R., Meyer, J. D. and Kight, W. R., 1985, "Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets," *Hewlett Packard J.*, Vol. 36, pp. 21~27.
- (2) Asai, A., Hara, T. and Endo, I., 1988, "One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 26, pp. 1794~1801.
- (3) Asai, A., 1992, "Three-Dimensional Calculation of Bubble Growth and Drop Ejection in a Bubble Jet Printer," *J. Fluid Eng.*, Vol. 114, pp. 638~641.
- (4) Chen, P. H., Chen, W. C., Ding, P. P. and Chang, S. H., 1998, "Droplet Formation of a Thermal Sideshooter Inkjet Printhead," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 382~390.
- (5) Hong, Y., Ashgriz, N., Andrews, J. and Parizi, H., 2004, "Numerical Simulation of Growth and Collapse of a Bubble Induced by a Pulsed Microheater," *J. MEMS*, Vol. 13, pp. 857~869.
- (6) 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.
- (7) Son, G., 2001, "Numerical Simulation of Bubble

- Motion During Nucleate Boiling," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 25, No. 3, pp. 389~396.
- (8) Kim, S. and Son, G., 2005, "Numerical Study on Drop Formation Through a Micro Nozzle," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 2, pp. 205~213.
- (9) Avedisian, C. T., Osbourne, W. S., McLead, F. D. and Curley, C. M., 1999, "Measuring Bubble Nucleation Temperature on the Surface of a Rapidly Heated Thermal Inkjet Heater Immersed in a Pool of Water," *Proc. Roy. Soc. London Series A*, Vol. 455, pp. 3875~3899.
- (10) Hong, Y., Ashgriz, N. and Andrews, J., 2004, "Experimental Study of Bubble Dynamics on a Micro Heater Induced by Pulse Heating," *J. Heat Trans.*, Vol. 126, pp. 259~271.