

< 논문 >

피에조 잉크젯 헤드에서 액적 토출 현상에 대한 연구

위상권[†] · 오세영* · 이정용* · 이유섭* · 정재우*
(2006년 6월 20일 접수, 2006년 7월 28일 심사완료)

A Study on Droplet Formation from Piezo Inkjet Print Head

Sang-Kwon Wee, Seyoung Oh, Jung Yong Lee, Yu-Seop Lee and Jaewoo Chung

Key Words : Hydrodynamics(유체역학), Piezo Inkjet(피에조 잉크젯), Droplet Formation(액적 토출), Ink Property(잉크물성), Free Surface(자유표면)

Abstract

Droplets are ejected onto a substrate through a nozzle by pushing liquids in flow channels of drop-on-demand devices. The behavior of ejection and formation of droplets is investigated to enhance the physical understanding of the hydrodynamics involved in inkjet printing. The free surface phenomenon of a droplet is described using CFD-ACETM which employs the volume-of-fluid (VOF) method with the piecewise linear interface construction (PLIC). Droplet formation characteristics are analyzed in various flow regimes with different Ohnesorge numbers. The computational results show that the droplet formations are strongly dependent on the physical properties of working fluids and the inlet flow conditions. In addition, the wetting characteristics of working fluids on a nozzle influence the volume and velocity of a droplet produced in the device. This study may provide an insight into how a liquid droplet is formed and ejected in a piezoelectric inkjet printing device.

기호설명

ω : 주파수(1/s)

F : 체적율
 Oh : Ohnesorge 수
 R : 노즐 반경(m)
 \vec{v} : 속도벡터(m/s)
 V : 유로 입구속도(m/s)
 V_n : 평균속도(m/s)
 β : 감쇠계수(1/s)
 μ : 점성계수(kg/m·s)
 θ : 접촉각(degree)
 ρ : 밀도(kg/m³)
 σ : 표면장력(N/m)

1. 서론

유체 스트림(fluid stream)이 부서지면서 액적(droplet)이 생성되는 현상은 Rayleigh⁽¹⁾의 최초 연구를 기념하여 “Rayleigh Instability” 라고 정의된 이후로 최근까지도 자연과학에서 주요한 현상 중의 하나로 인식되어 많은 연구가 이루어지고 있다. 지난 100여년간 액적의 생성을 지배하는 다양한 형태의 비선형방정식이 개발되어 액적의 생성을 이해하는데 많은 진전이 있었으며, 또한 근래의 각종 실험장비와 측정기술의 발달로 인해 이 미세한 현상을 보다 세밀하게 관찰할 수 있는 단계에 이르렀다.⁽²⁾ 이러한 흥미로운 현상을 산업분야에서 제품에 적용한 것이 잉크젯 프린터의 시초가 된다. 대표적인 잉크젯 방식으로 열전사 잉크젯(thermal inkjet)과 피에조 잉크젯(piezo inkjet)이 있다. 열전사 잉크젯은 작동유체를 순간적으로 가열

[†] 책임저자, 회원, 삼성종합기술원 Micro Device & Systems Lab
 E-mail : sk.wee@samsung.com
 TEL : (031)280-9432 FAX : (031)280-6725
 * 삼성종합기술원 Micro Device & Systems Lab

하여 핵비등(nucleate boiling)에 의해 발생한 기포가 팽창하면서 유체를 노즐 밖으로 밀어내어 액적을 토출하는 방식이고, 피에조 잉크젯은 PZT 물질의 압전효과(piezoelectric effect)를 이용하여 압력 챔버의 체적을 변화시켜 액적을 토출한다. 최근에는 제조 공정의 단순화와 비용 절감을 위해 잉크젯 프린팅 방식을 이용한 미세 패터닝 기술이 각광을 받으면서 전자산업을 비롯한 다양한 응용분야에서 피에조 잉크젯 프린팅을 이용하고자 하는 시도들이 이어지고 있다. 피에조 잉크젯 방식은 작동유체를 가열할 필요가 없으므로 다양한 종류의 잉크 사용이 가능하다. 기존의 텍스트나 그래픽 프린팅 뿐만 아니라 폴리머 용액을 이용한 유기 EL 프린팅, 마이크로 렌즈 어레이, 전도성 용액을 이용한 RFID 나 미세회로 패터닝 그리고 바이오 물질 분배에 이르기까지 다양한 종류의 미세 패터닝이 시도되고 있다.^(3,4)

유체 스트림의 불안정은 노즐 끝 단에서 발생하는 미세한 섭동(perturbation)에 의해 유발된다고 일반적으로 알려졌다. 이러한 불안정으로 인해 노즐 출구에서 유체 기둥(liquid column)이 부서지는 과정에서 항상 동일한 모양과 크기의 액적을 생성하지 못하고 주 액적(main drop)과 더불어 ‘세터라이트(satellite)’라고 부르는 미세한 액적이 부수적으로 생성된다. 이러한 세터라이트는 노즐 안의 유동과 액적을 연결하고 있는 유체 브리지(liquid bridge)가 분리되면서 나타나는 부산물이다. 실제 잉크젯 프린터에서 이러한 세터라이트는 주위 기류의 영향을 쉽게 받아 의도 되지 않은 목표점에 떨어져 프린팅의 해상도를 저하시키는 주요원인이 된다. 일반적으로 작동유체의 점도와 표면장력이 세터라이트 생성을 결정하는 주요인자가 된다고 알려졌다. 특히 점도가 높아지면 잉크젯 헤드의 구동부에 높은 부하로 작용하고 노즐 면에서 떨어지는 순간 꼬리를 길게 만들어 세터라이트의 생성 가능성이 높아진다. 작동유체의 높은 점도는 고속 프린팅시에 메니스커스의 불안정을 초래할 수 있는 요인이 될 수 있다. 따라서 적당한 구간 내에서 작동유체의 점도를 유지할 필요가 있다.

한편, 최근의 잉크젯 프린팅 기술을 이용하는 많은 응용분야에서 다양한 조성을 가지는 작동유체를 이용함에 따라 액적의 생성과 토출에 관련된 물리적인 현상이 좀더 복잡하고 다양해졌다. 폴리머가 첨가되면 기존의 잉크와 달리 비뉴턴 유체(non-Newtonian)의 거동을 하게 된다.⁽⁵⁾ 그리고 작동유체에 각종 기능성 물질들이 첨가됨에 따라 미세한 입자들이 유동에 영향을 미쳐 액적의 생성시에 순수용액에서 관찰되지 않던 이상거동을 보이게 된다.⁽⁶⁾ 잉크젯에서 발견되는 이러한 액적 토출 현상에 대한 물리적인 이해를 돕고자 근래에 들어 수치해석과 실험적 접근 방법을 이용한 다양한 연구들이 전개되고 있다.⁽⁵⁻¹⁰⁾

Feng⁽⁷⁾은 FLOW3D® 상용 해석 코드를 이용하여 DOD (Drop-on-Demand) 잉크젯 헤드의 액적 토출 현상에 대한 수치해석을 수행했다. 입구 유동 조건은 플러그(plug) 유동으로 간략화하고 노즐 입구 속도, 구동부 유지 시간, 작동유체의 물성 등을 변화시켜가며 액적의 체적, 속도, 초기 형상 등의 변화를 고찰했다. Wu 등⁽⁸⁾은 SOLA(Solution Algorithm)기법을 기반으로 VOF(Volume-Of-Fluid) 알고리즘과 PLIC(Piecewise Linear Interface Construction) 기법을 결합한 수치해석 기법을 개발하여 스퀴즈(squeeze) 모드의 피에조 잉크젯 헤드의 액적 토출 특성을 계산하고 실험 결과와 비교했다. 노즐 입구의 압력분포는 음파(acoustic wave)의 전파이론(propagation theory)으로부터 구하여 수치해석에 이용했다. 특히, 이 연구에서 액적이 기관 위에 떨어진 후에 퍼져 나가는 과정도 계산하여 최종 유체 박막이 기관 위에 형성된 형상도 수치해석을 통해 보였다. Kim 과 Son⁽⁹⁾은 LS(Level Set) 방법을 이용하여 미세노즐에서의 액적 형성에 관한 특성을 규명하고자 수치해석을 수행했다. 이들은 노즐 입구에 가해지는 압력 펄스와 노즐의 형상 그리고 노즐내의 접촉각 등의 변화에 따른 액적 토출 특성을 고찰했다. 최근에 Yang 등⁽¹⁰⁾은 CFD-ACE™ 상용해석 코드를 이용하여 Picojet® 프린트 헤드의 액적 토출 특성을 계산했다. 그들은 총 17 가지 경우의 다른 조건을 이용한 수치해석을 통해 메니폴드(manifold)의 길이, 입구 유로의 두께, 노즐의 직경, 토출 시간 그리고 작동유체의 물성이 액적의 토출 성능에 미치는 영향을 고찰했다. 특히 작동유체로 물, C₇H₈O, PEDOT, MEH-PPV 을 이용하여 액적의 크기와 속도 등을 비교하여 작동유체의 물성이 Picojet® 프린트 헤드의 성능에 미치는 영향을 비교했다.

이상에서 살펴본 바와 같이 최근에 산업분야에서 피에조 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 다양한 물질들을 미세 패터닝 하고자 함에 따라 작동유체의 물성에 따라 액적 토출 특성을 세밀하게 이해할 필요가 있다. 이러한 작업을 통해 실제 사용 가능한 작동유체의 물성의 범위를 대략적으로 설정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 작동유체의 물성과 노즐의 접촉각이 변함에 따라 피에조 잉크젯 헤드의 노즐에서 생성되는 액적 토출 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 CFD-ACE™ 상용 코드를 이용하여 수치해석하고 그 경향에 대해 고찰해보고자 한다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 방법

다양한 물성의 작동유체를 이용하여 잉크젯 노즐에서 액적이 토출되는 현상을 수치해석하기 위해 최근에 multi-scale/multi-physics 해석에 많이 도

입되고 있는 CFD-ACE™ 상용 전산 수치해석 코드를 이용했다. 노즐의 외부로 밀려난 작동유체는 공기 중에서 자유표면을 형성하여 노즐 면에서 떨어지면서 액적이 되어 기판 위의 목표점으로 날라간다. 이러한 액적의 자유표면은 CFD-ACE™의 PLIC(Piecewise Linear Interface Construction)기법을 이용한 VOF 모듈에 의해 계산된다. 주어진 유동장에서 각각의 계산 격자 내에서 액상(liquid)이 차지하는 체적율(volume fraction)을 나타내는 F 값의 초기치가 주어지면 아래 식 (1)에 주어진 F 에 대한 수송방정식을 풀어서 F 값의 분포를 구하게 된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v}F = 0 \quad (1)$$

위 식에서 \vec{v} 는 속도 벡터를 의미한다. 속도장과 자유 경계면이 수치적으로 커플링 되도록 식 (1)은 질량 보존 방정식과 운동량 방정식과 연계하여 풀게 된다. $F = 0$ 은 첫 번째 유체(air) 영역, $F = 1$ 은 두 번째 유체(liquid) 영역을 각각 나타내며

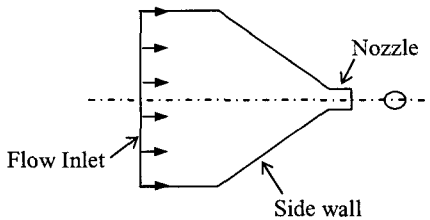


Fig. 1 Schematic of the problem configuration in axisymmetric drop ejection chamber and the grid system

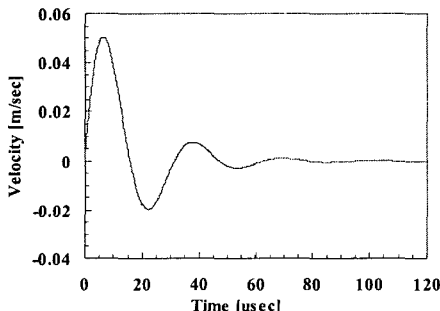


Fig. 2 Time history of the inlet velocity

통상 액적의 모양을 결정하는 자유표면의 형상은 $F = 0.5$ 으로 정의된다.⁽¹¹⁾

2.2 격자계와 경계조건

Fig. 1은 본 연구에 사용된 계산영역과 격자계를 나타낸다. 계산영역은 입구 유로와 노즐 그리고 액적이 토출되어 자유표면이 형성되는 외부 공기 영역으로 구성되어 있다. 노즐의 직경은 $30 \mu\text{m}$ 이다. 압력 챔버에서 발달된 유동은 내부의 각종 유로를 거쳐 노즐에 이를 때는 거의 축대칭 흐름으로 진행되고 또한 노즐 내에 이상 거동이 있지 않는 한 액적이 축대칭 모양으로 토출되므로 모든 계산은 축대칭 좌표계에서 수행되었다. 사용된 격자수는 약 24,000개이다. 주 액적과 세터라이트의 자유표면을 정확하게 포착하기 위해 액적이 형성되는 대칭축과 노즐 내에 격자를 밀집시켰다.

피에조 구동부에 의해 생성된 압력 챔버내의 순간적인 압력상승은 노즐에서 작동유체의 속도로 변환되어 액적이 토출된다. 본 연구에서는 이러한 현상을 단순화시켜 노즐에서 분출되는 액적의 거동에 초점을 맞추기 위해 일반적으로 피에조 잉크젯의 액적 거동 시뮬레이션에서 많이 사용되고 있는 아래 식 (2)와 같은 형태의 속도-시간 관계식을 유로 입구 조건으로 이용했다.

$$V = V_n e^{-\beta t} \sin(\omega t) \quad (2)$$

위 식에서 V_n 는 평균속도, β 는 감쇠계수, ω 는 주파수를 나타낸다. 본 수치해석에서 평균속도, 감쇠계수, 주파수는 각각 0.077, $6E-4$, $2E5$ 로 설정했다. 이러한 값들은 실제 액적 토출 실험에서 측정된 액적의 토출 특성과 피에조 구동부의 동특성을 반영한 것이다. 평균속도는 실험에서 측정된 액적의 평균체적과 속도를 고려해서 설정했고, 감쇠계수와 주파수는 구동부의 잔류 진동 특성을 나타내기 위한 것으로 액적이 토출된 후에도 이러한 구동부의 감쇠특성으로 인해 메니스커스의 불안정을 초래할 수 있다. 위에서 제시한 설정 값들을 적용하여 식 (2)에 주어진 노즐 입구 속도의 시간에 대한 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 본 계산에서 입구 속도 조건을 이와 같이 고정하고 작동유체의 물성을 바꿔가며 그 토출 특성을 고찰했다.

본 수치해석에 사용된 작동유체의 물성은 밀도를 1000 kg/m^3 으로 고정하고 점도와 표면장력을 각각 $0.001 \sim 0.02 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 와 $0.02 \sim 0.07 \text{ N/m}$ 범위 내에서 변화시켜가며 액적의 토출 특성 변화를 상호 비교했다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 액적 생성 과정

Fig. 2 와 같은 입구 속도 조건에 의해 노즐 출구에서 액적이 형성된다. Fig. 3 은 이러한 입구 속도 조건하에 노즐에서 형성되는 액적의 성장 과정을 매 $10 \mu\text{sec}$ 마다 보이고 있다. 작동유체의 표면장력과 점도는 각각 0.029 N/m , $0.01 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 이다. 이때 액적의 속도와 체적은 각각 4.2 m/sec , 25.1 pl 이고, 분리시간(breakup time)과 분리거리(breakup distance)는 각각 $45.6 \mu\text{sec}$, $178.3 \mu\text{m}$ 이다. 입구 속도 조건이 인가된 시간으로부터 액적의 꼬리가 노즐에서 끊어질 때까지 걸린 시간을 분리시간, 이때 노즐의 끝 단에서 액적의 선단까지의 거리를 분리거리로 각각 정의한다. 고속 프린팅시에 액적이 토출된 후에 연속하여 그 다음 액적이 토출되는 경우 메니스커스의 충분한 안정화 시간이 필요함으로 빠른 분리시간이 요구된다. 예를 들어, 10 kHz 로 프린팅되는 경우 $100 \mu\text{sec}$ 마다 액적이 하나씩 토출됨으로 액적의 분리는 $100 \mu\text{sec}$ 이내에 마무리되고 그 다음 토출 신호가 들어오기 전까지 안정된 위치에서 메니스커스가 준비돼야만 원하는 프린팅의 해상도를 확보할 수 있다. 또한 프린팅 헤드는 노즐과 기관과의 거리를 통상 1 mm 이하로 유지하며 작동함으로 이 거리 내에서 액적의 분리가 일어나야 한다. 따라서, 액적의 토출 주파수와 헤드의 상대적인 운동을 고려하여 적절한 분리시간과 분리거리가 확보돼야만 성공적인 프린팅을 수행할 수 있다.

Fig. 3 에서 보면 작동유체가 노즐 밖으로 밀려나면서 표면장력의 작용에 의해 액적의 모양을 형성하며, 점성의 작용으로 액적의 꼬리가 노즐로부터 길게 이어짐을 알 수 있다. 관성력에 의해 액적은 전방으로 계속 진행하고 메니스커스는 구동부의 작용과 모세관력에 의해 다시 제자리로 되돌아오면서 액적의 꼬리가 끊어진다. 액적의 분리가 일어난 뒤 길게 이어진 꼬리들이 작게 뭉치면서 세터라이트를 형성하고 이들은 주 액적을 따라 목표점으로 날아간다. 세터라이트가 발생하더라도 주 액적에 합쳐지는 경우도 있지만, 헤드의 상대적인 운동으로 인해 목표점에서 벗어난 위치에 떨어질 수도 있다. 또한 헤드의 운동으로 발생한 주위 기류에 의해 세터라이트가 주 액적과 반대 방향으로 날아가 노즐 면에 부착하여 노즐을 오염시켜 액적 토출에 방해요인으로 작용할 수 있다. 따라서 액적 토출 과정에서 액적의 체적과 속도뿐만 아니라 분리시간과 분리거리 그리고 세터라이

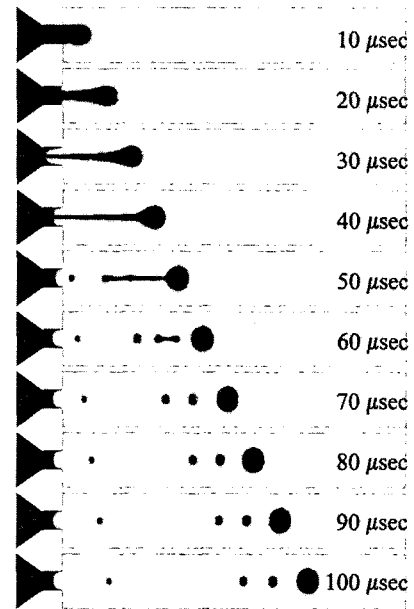


Fig. 3 Snapshots of the droplet formation process

트의 발생여부와 그들의 운동까지 세밀한 관찰이 필요하다.

3.2 작동유체의 점성에 의한 영향

작동유체의 점성은 유동의 저항을 유발하는 면에서 액적의 토출시에 불리하게 작용하지만 메니스커스의 안정화 측면에서는 이롭게 작용한다. 실제 피에조 잉크젯 헤드에서 피에조 구동부가 전압 신호에 의해 진동한 뒤 전압 신호가 끊어지더라도 구동부 자체의 잔류진동이 압력 챔버내 유체의 관성력과 결합하여 계속해서 챔버내에 압력과 전파를 유발하고 이는 메니스커스의 진동으로 이어진다. 계속된 메니스커스의 진동은 그 다음 전압 신호가 가해질 때까지 이어져 불안정한 액적 토출을 야기할 수 있다. 그런데 일반적으로 작동유체의 점성은 이러한 구동부의 잔류진동을 억제하여 압력 챔버를 초기의 안정된 상태로 되돌리는 역할을 한다고 알려져 있다.^(2,12) 따라서 작동유체의 점도가 증가하면 메니스커스가 초기에 안정된 상태에 이르게 되므로 피에조 잉크젯 헤드의 작동영역에 맞게 일정한 구간 내에서 작동유체의 점도를 유지하는 것이 바람직하다. 그러므로 작동유체의 점도 변화에 따른 액적의 토출 특성을 파악할 필요가 있다. Fig. 4 에는 작동유체의 점도 변화에 따라 액적의 토출 특성을 비교하기 위해 표면장력은 0.029 N/m 로 고정하고 점도는 $0.001 \sim 0.02 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 범위에서 변화시키며 액적이 노즐에서 분리되는 순간에 액적의 형상을 비교하여 나타냈다. 점도가

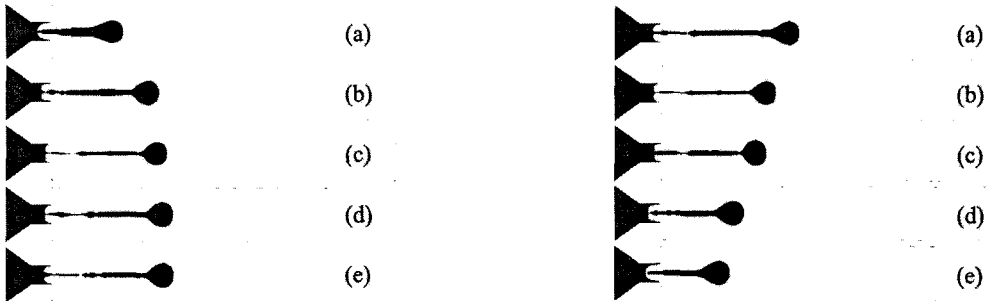


Fig. 4 Comparison of droplet formation for various working fluids at breakup: (a) $\mu = 0.001$ kg/(m·s), (b) 0.005, (c) 0.01, (d) 0.015, (e) 0.02 for $\sigma = 0.029$ N/m

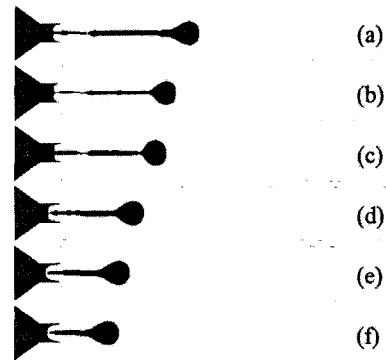


Fig. 7 Comparison of droplet formation for various working fluids at breakup: (a) $\sigma = 0.02$ N/m, (b) 0.029, (c) 0.037, (d) 0.045, (e) 0.056, (f) 0.07 for $\mu = 0.01$ kg/(m·s)

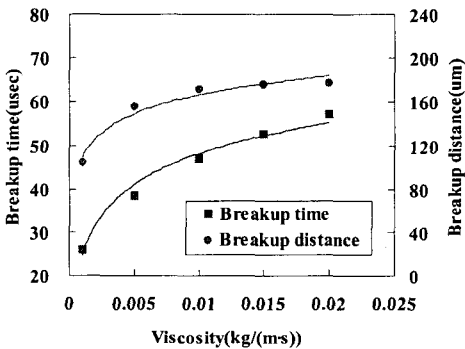


Fig. 5 The effect of viscosity on breakup time and breakup distance for $\sigma = 0.029$ N/m

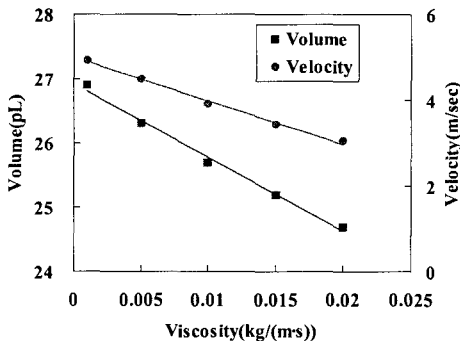


Fig. 6 The effect of viscosity on droplet volume and velocity for $\sigma = 0.029$ N/m

증가함에 따라 액적의 꼬리가 길어지는 것을 알 수 있다. Fig. 5 는 작동유체의 점도 변화에 따라 분리시간과 분리거리의 변화를 도시한 것이다. Fig. 4 에서 보인 바와 같이 작동유체의 점도가 증가함에 따라 분리시간과 분리거리는 증가한다. 분리거리가 증가하면 그만큼 액적의 꼬리가 길어져 세터라이트의 생성 가능성이 커져서 프린팅의 해상도

를 떨어뜨릴 수 있다. 기본적으로 작동유체의 점도 증가는 앞서 설명한 바와 같이 액적 토출시에 메니스커스의 안정화에 도움이 되지만 분리시간을 길게 하는 요인이 된다. 프린팅 주파수가 증가하면 연속 토출되는 액적간의 시간 간격이 줄어들게 되는데, 분리시간이 길어지면 메니스커스가 초기 상태로 되돌아 오기 전에 그 다음 전압 신호가 전달되어 불안정한 액적 토출을 유발하게 된다. 그러므로 세터라이트의 생성을 최대한 억제하고 안정된 액적 토출 조건을 확보하기 위해 작동 유체의 점도는 적당한 범위 내에서 유지되도록 설정해야 한다. Fig. 6 은 작동유체의 점도 변화에 따라 액적의 체적과 속도의 변화를 나타낸 것이다. 점도가 증가하면 액적 토출시 유체 점성에 의한 노즐 내 유동 저항의 증가로 인해 체적과 속도가 감소하게 된다.

3.3 작동유체의 표면장력에 의한 영향

작동유체의 점도와 함께 표면장력도 액적의 토출 특성을 결정하는 주요한 물성중의 하나다. 표면장력에 의한 모세관력이 노즐에 작용하여 액적이 토출된 후에 압력 챔버내에 작동유체가 다시 채워지게 된다. Fig. 7 은 표면장력의 변화에 따른 액적의 토출 특성을 비교하기 위해 노즐에서 분리되는 순간에 액적의 거동을 보여준다. 점도는 0.01 kg/(m·s) 로 고정하고 표면장력은 0.02 ~ 0.07 N/m 구간에서 변화시켰다. 표면장력이 증가함에 따라 노즐로부터 액적이 분리되는 순간에 액적의 꼬리가 짧아짐을 알 수 있다. Fig. 8 은 표면장력의 변화에 따라 액적의 분리시간과 분리거리의 변화를 도시한 것이다. 이는 Fig. 6 에 보인 작동유체의 점도 변화에서 보인 경향과는 반대이다. 작동유체의

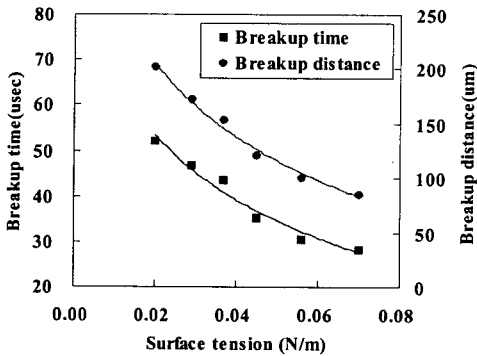


Fig. 8 The effect of surface tension on breakup time and breakup distance for $\mu = 0.01$ kg/(m·s)

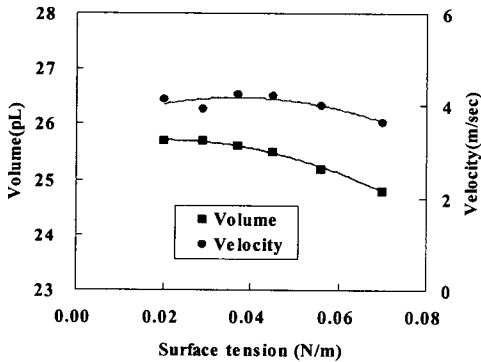


Fig. 9 The effect of surface tension on droplet volume and velocity for $\mu = 0.01$ kg/(m·s)

표면장력이 증가하면 공기 중으로 노출된 유체 스트림은 표면적을 줄여서 표면에너지를 낮추려는 경향 때문에 빠른 시간 내에 액적의 형태를 만들어 분리시간과 분리거리가 감소한다. 이러한 경향은 고속 프린팅시에 메니스커스의 안정화에 유리하게 작용하지만 표면장력이 증가하면 Fig. 9 에 도시한 바와 같이 액적의 체적과 속도가 감소함으로 점도와 마찬가지로 고속 프린팅시에 안정된 액적 토출을 유지하기 위해 표면장력 또한 적절한 값을 가지도록 관리하는 것이 바람직하다.

3.4 노즐 접촉각의 영향

노즐로부터 액적이 분리되어 떨어져나갈 때 노즐 끝 단의 작동유체에 의한 젖음(wetting) 상태는 액적의 속도와 체적에 영향을 미치며 또한 장기적인 잉크젯 헤드의 구동에도 영향을 미친다. 이러한 젖음 상태는 작동유체의 기체-액체 계면이 고체 면과 이루는 접촉각으로 나타낼 수 있다. 노즐 면(outside)과 노즐 내벽(inside)에 접촉각의 모양은

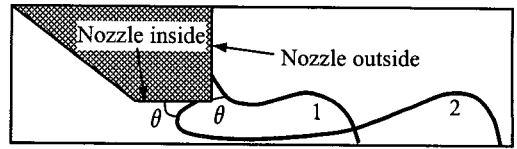


Fig. 10 Contact angle configuration of a nozzle inside and outside

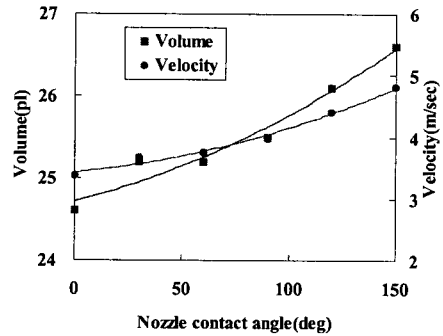


Fig. 11 The effect of nozzle contact angle on droplet volume and velocity

Fig. 10 과 같다. 접촉각이 0 이면 완전 젖음 상태가 되고, 90 도 이상이 되면 소수성 상태가 된다. 노즐 면의 젖음 정도는 코팅처리에 의해 조절이 가능하다. 초기의 압력 챔버내의 압력 상승에 의해 액적이 노즐 밖으로 밀려나서 Fig. 10 의 상태 '1'과 같은 모양으로 노즐 면에 접촉각이 형성되고 이후에 메니스커스가 수축되면서 접촉선은 노즐 안쪽으로 되돌아가 상태 '2'와 같이 노즐 내벽에서 접촉각을 형성한다. 이때 노즐 면과 노즐 내벽의 접촉각의 크기에 따라 메니스커스의 거동이 영향을 받게 된다. 이에 대한 고찰을 위해 노즐 면의 접촉각 변화에 따른 액적 토출 특성을 계산했다. 본 계산에서 접촉각의 히스테르시스에 의한 전진각과 후진각은 고려하지 않고 정적 접촉각만을 계산에 고려했다. Fig. 11 은 노즐 면의 접촉각 변화에 따라 액적의 체적과 속도의 변화를 나타낸다. 노즐 면의 접촉각이 증가함에 따라 체적과 속도는 함께 증가함을 알 수 있다. 이는 유동과 노즐이 접하는 면에서 접촉각이 증가하면 유동 저항이 감소하기 때문이다. 또한 Fig. 10 에 도시한 바와 같이 액적 토출과정에 상태 '1'과 같이 노즐 면에 접촉각이 형성될 때 노즐 면의 접촉각이 작으면 노즐 면을 따라 작동유체가 쉽게 퍼져나가서 노즐 면이 작동유체로 젖게 된다. 노즐 면이 젖은 상태에서 계속 잉크젯 헤드가 구동되면 젖음 상태가 점점 심해지면서 액적의 체적과 속도가 감소하며 결국에는 토

출 실패로 이어진다. 이를 방지하기 위해 소수성 코팅으로 노즐 면의 접촉각을 될 수 있으면 크게 유지하도록 한다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 액적이 토출된 후에 모세관력의 작용에 의해 압력 챔버에 작동유체가 다시 채워지고 메니스커스가 노즐 안쪽으로 되돌아간다. 구동부 운동에 의해 압력 챔버에서 가속된 유동은 관성력에 의해 노즐 밖으로 밀려나지만 모세관력의 제동(breaking) 작용에 의해 액적이 노즐로부터 분리가 되고 나머지 메니스커스 부분은 노즐 안쪽으로 되돌아간다. 노즐 면에서 접촉각이 작아서 노즐 면이 쉽게 젖는다면 이러한 제동 작용이 충분히 발휘되지 못한다. 반면, 노즐 내벽은 접촉각을 작게 하여 액적의 분리 후에 모세관력의 작용으로 메니스커스의 복귀가 쉽도록 한다. 모세관력을 증가시킴으로써 작동유체를 압력 챔버 내로 재충전할 때도 원활하게 유입되도록 한다. 따라서 잉크젯 헤드의 제작 시 노즐 면은 소수성으로 노즐 내벽은 친수성을 유지하도록 한다.⁽¹²⁾

3.5 Oh 수의 변화에 따른 액적 토출 특성

앞서 작동유체의 점도와 표면장력의 변화에 따라 액적의 토출 특성을 살펴본 바와 같이 두 물성은 서로 다른 경향을 보인다. 이 두 물성을 통합하여 하나의 무차원 변수로 표현하면 편리하므로 통상 노즐에서 생성되는 액적의 거동 특성을 나타내는 무차원 변수로 Ohnesorge 수가 사용된다. Ohnesorge 수는 점성력과 표면장력의 비를 나타내며 다음과 같은 형태로 정의된다.

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho R \sigma}} \quad (3)$$

위 식에서 μ 는 유체의 점도, ρ 는 밀도, R 는 노즐의 반경 그리고 σ 는 작동유체의 표면장력을 각각 나타낸다. 노즐에서 분출되는 유체 스트림의 크기나 길이 그리고 액적이 형성되는 과정에서 부수적으로 발생하는 세터라이트의 크기나 개수 등은 작동유체의 점도에 따라 달라지는데 이러한 특성은 Oh 수의 영역에 따라 분류된다. 일반적으로 잉크젯 프린팅에서 Oh 수의 역수가 1~10 의 범위에 있도록 설계한다.⁽¹³⁾ Oh^{-1} 이 작아지면 점성의 영향이 커져서 액적을 토출하는 데 많은 에너지가 필요하고 액적의 속도가 떨어지며 액적의 꼬리가 길어지는 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 Fig. 12 과 13 에서 확인할 수 있다. 특히, Fig. 13 에서 보이는 바와 같이 $Oh^{-1} \leq 1$ 이 되면 분리시간과 분리거리

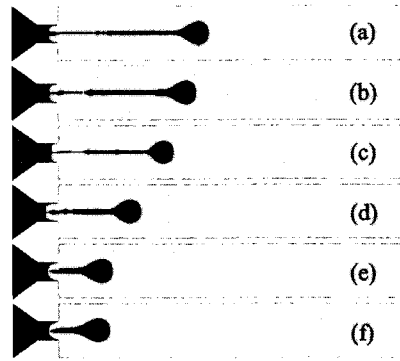


Fig. 12 Comparison of droplet formation for various working fluids at breakup: (a) $Oh^{-1} = 0.84$ (b) 1.67, (c) 2.01, (d) 2.51, (e) 7.94, (f) 15.57

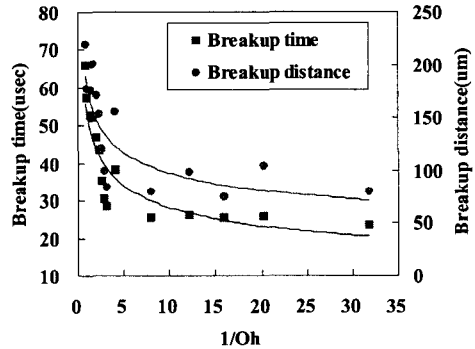


Fig. 13 The change in breakup time and breakup distance with various Ohnesorge numbers

가 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 이 영역에서 점도의 영향은 증가하고 상대적으로 표면장력의 영향은 감소한다. 또한, 유체의 점도가 증가함에 따라 액적의 꼬리는 길어져서 액적의 분리가 늦게 일어나고, 표면장력이 감소하면 액적을 형성하는데도 더 긴 시간이 소요되기 때문이다. 반면, Oh^{-1} 가 커지면 점도가 감소하고 표면장력이 증가하여 액적의 꼬리가 짧아지고 액적도 빠른 시간 내에 형성된다. 수치해석 결과, $Oh^{-1} \geq 5$ 이면 분리시간과 분리거리에 큰 변화 없이 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 본 연구의 결과 $Oh^{-1} = 2\sim3$ 영역에서 액적의 토출 특성이 가장 좋은 결과를 얻었다.

3.6 실험결과와 비교

Fig. 14 는 비슷한 Oh^{-1} 수에 대해 수치해석 결과와 실험결과를 비교한 것이다. 각각 그림의 왼쪽은 실험결과이고 오른쪽은 수치해석 결과를 나타낸다. Oh^{-1} 이 감소함에 따라 액적의 꼬리가 길어지는 경향은 서로 비슷하다고 할 수 있지만 정량적

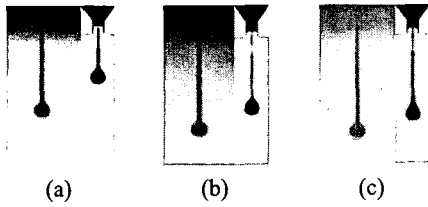


Fig. 14 Comparison of experimental and numerical results at the nearly same Ohnesorge No.; (a) $Oh^{-1}_{exp}=2.43/Oh^{-1}_{num}=2.51$, (b) 2.06/2.01, (c) 1.72/1.67

으로는 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 본 수치해석의 여러 가지 한계점으로 풀이된다. 본 계산에서 입구 조건 설정 시에 식 (2)와 Fig. 2에 나타난 바와 같이 노즐 입구 속도의 시간에 대한 변화를 모든 계산에 동일하게 적용했다. 하지만 실험에서는 작동유체의 물성이 바뀔 때 따라 구동부에서 유체-구조 상호작용에 의해 노즐 쪽으로 전달되는 유동의 압력이나 속도 분포가 바뀌어 노즐 입구에서도 유동 조건이 변하게 된다. 이러한 입구 유동 조건의 변화가 실험결과와의 차이를 유발하는 한 가지 원인으로 판단된다. 그리고 실험에 사용된 작동유체는 유기물을 포함한 각종 첨가 물질에 의해 비뉴턴 거동을 보일 수 있고 내부에 함유된 미세 입자들의 영향으로 순수 용액으로 가정한 수치해석과 다른 결과를 보일 수 있다. 따라서 피에조 잉크젯의 액적 토출 현상을 수치해석적 방법으로 실제 상황과 좀더 근접하게 모사하기 위해 피에조 구동부의 작용에 의한 압력 챔버내의 압력 변화와 속도 변화를 계산하여 노즐의 입구 조건으로 설정하고 작동유체의 특성도 함께 고려할 필요가 있다. 피에조 구동부의 동적 거동을 계산하여 피에조 잉크젯 헤드의 내부 유로 전체를 계산하면 좀더 실제와 가까운 결과를 얻을 수도 있지만 이는 과도한 계산 시간이 소요됨으로 일반적으로 잘 채택되지 않는다. 특히, 본 연구와 같이 작동유체의 물성을 바꿔가며 여러 가지 작동조건을 계산하는 경우에는 바람직하지 않다. 근래에는 계산시간을 단축하기 위한 효율적인 방법의 하나로 집중질량모델(lumped mass model)을 도입하여 피에조 구동부의 유체-고체 연동문제(fluid-structure interaction)를 간략하게 처리하여 빠른 시간 내에 노즐 입구 조건을 계산한 뒤 이를 3 차원 유동해석의 노즐 입구 조건으로 설정하여 액적의 토출을 계산하기도 한다.⁽¹⁴⁾

4. 결 론

피에조 잉크젯 헤드에서 액적이 토출되는 현상

을 이해하기 위해 수치해석을 수행하였으며 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 작동유체의 점도가 증가하면 액적의 체적과 속도가 감소한다. 또한 액적의 꼬리가 길어져서 분리시간과 분리거리가 증가하고 세터라이트를 생성할 가능성이 높아진다.

(2) 작동유체의 표면장력이 증가하면 액적의 속도와 체적은 감소하며, 노즐 밖으로 밀려난 유체 스트림이 표면적을 작게 하려는 유체의 성질이 강해져서 분리시간과 분리거리는 감소한다.

(3) 노즐 면의 접촉각이 증가하면 작동유체가 노즐 표면에 접촉하는 경향이 약해져서 체적과 속도는 증가한다.

(4) Ohnesorge 수의 역수가 1.0 이하가 되면 분리시간과 분리거리가 급격하게 증가하여 메니스커스의 안정화에 불리하므로 1.0 이상을 가지도록 작동유체의 물성과 노즐 직경을 조절해야 한다.

참고문헌

- (1) Rayleigh, F. R. S., 1878, "On the Instability of Jets," *Proc. London Math. Soc.*, Vol. 10, No. 4, pp. 4~13.
- (2) Meinhart, C. D. and Zhang, H., 2000, "The Flow Structure Inside a Microfabricated Inkjet Printhead," *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 1, pp. 67~75.
- (3) Tekin, E., de Gans, B. J. and Schubert, U. S., 2004, "Ink-Jet Printing of Polymers - from Single Dots to Thin Film Libraries," *J. Materials Chemistry*, Vol. 14, pp. 2627~2632.
- (4) de Gans, B. J., Duinevald, P. C. and Schubert, U. S., 2004, "Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments," *Advanced Materials*, Vol. 16, No. 3, pp. 203~213.
- (5) Shore, H. J. and Harrison, G. M., 2005, "The Effect of Added Polymers on the Formation of Drops Ejected from a Nozzle," *Physics of Fluids*, Vol. 17, pp. 033104-1~033104-7.
- (6) Furbank, R. J. and Morris, J. F., 2004, "An Experimental Study of Particle Effects on Drop Formation," *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 5, pp. 1777~1790.
- (7) Feng, J. Q., 2002, "A General Fluid Dynamic Analysis of Drop Ejection in Drop-on-Demand Ink Jet Devices," *J. Imaging Science and Technology*, Vol. 46, No. 5, pp. 398~408.
- (8) Wu, H. C., Hwang, W. S. and Lin, H. J., 2004, "Development of a Three-Dimensional Simulation System for Micro-Inkjet and Its Experimental Verification," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 373, pp. 268~278.
- (9) 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.

- (10) Yang, A. S., Yang, J. C. and Hong, M. C., 2006, "Droplet Ejection Study of a Picojet Printhead," *J. Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 180~188.
- (11) CFD-ACE(U)TM 2004 User's Manual, ESI-CFD Inc., Huntsville, AL, 2004, Web site: www.cfdrc.com.
- (12) Dijkman, J. F., 1999, "Hydro-Acoustics of Piezoelectrically Driven Ink-Jet Print Heads," *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 61, pp. 211~237.
- (13) Derby, B. and Reis N., 2003, "Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions," *MRS Bulletin*, November, pp. 816~818.
- (14) Pan, F., Kubby, J. and Chen, J., 2002, "Numerical Simulation of Fluid-Structure Interaction in a MEMS Diaphragm Drop Ejector," *J. Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 70~76.