

< 논문 >

열 잉크젯 프린트헤드의 집중질량 모델링

이 유 섭*

(2006년 1월 19일 접수, 2006년 8월 8일 심사완료)

Lumped Modeling of Thermal Inkjet Print Head

You-Seop Lee

Key Words : Thermal Inkjet Print Head(열 잉크젯 프린트헤드), Lumped Model(집중질량 모델), Equivalent Electric Circuit(전기등가회로), Drop Ejection(액적 분사)

Abstract

A lumped model is proposed to predict liquid ejection characteristics of a thermally driven inkjet print head. The model is based on a two-dimensional heat conduction equation, an empirical pressure-temperature equation and a nonlinear hydraulic flow-pressure equation. It has been simulated through the construction of an equivalent R-C circuit, and subsequently analyzed using SIMULINK and a circuit simulation tool, PLECS. Using the model, heating and cooling characteristics of the head are predicted to be in agreement with the IR temperature measurements. The effects of the head geometry on the drop ejection are also analyzed using the nonlinear hydraulic model. The present model can be used as a design tool for a better design of thermal inkjet print heads.

기호설명	
A	: 집중질량요소의 단면적
C	: 열 커패시턴스
C_p	: 비열
d	: 유로 직경
D_f	: 유동 저항
f	: 미니스커스 상대 위치
K	: 손실 계수
l	: 집중질량요소의 길이
L	: 유동 관성
P	: 압력
P_b	: 버블 압력
P_{capil}	: 모세관 압력
P_{ejt}	: 제트 분사 손실압력
P_s	: 포화 증기압
Q	: 유량
R	: 열 저항
R_f	: 점성 저항
T	: 온도
T_b	: 핵생성 온도

그리스 문자	
κ	: 열전도도
λ	: 지수
μ	: 점성
ρ	: 밀도
θ	: 접촉각
σ	: 표면장력
τ	: 감쇠 시정수

하첨자	
1	: 노즐 절점
2	: 집합 절점
3	: 챔버 절점
4	: 입구 절점

1. 서론

열 잉크젯 프린팅방식은 전기신호를 가하여 히터를 가열하면 주위의 잉크로부터 버블이 발생하여 팽창함으로써, 노즐을 통하여 잉크가 분사되는 원리를 이용한다. 팽창한 버블이 다시 소멸하는

* 회원, 삼성종합기술원 Micro Systems Lab
E-mail : ysllee3@samsung.com
TEL : (031)280-8338 FAX : (031)280-6879

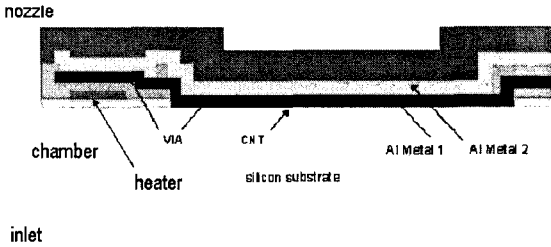


Fig. 1 A schematic diagram of thermal inkjet print head

동안, 잉크의 미니스커스는 노즐 안으로 유입되었다가 표면장력에 의해 다시 원래의 위치로 돌아간다. 이런 과정이 수 kHz 이상의 주파수로 반복된다. 잉크를 분사하는 역할을 하는 프린트헤드는 히터 박막과 잉크 챔버, 노즐, 입구 등으로 구성된다. 열 잉크젯 헤드는 일반적으로 버블과 액적의 비행방향이 동일한 것을 탑슈터(top shooter), 직각인 것을 사이드슈터(side shooter), 반대방향인 것을 백슈터(back shooter)라고 한다. Fig. 1은 돔(Dome)형상의 실리콘 챔버와 폴리실리콘 히터로 구성된 백슈터 방식의 돔젯 헤드⁽¹⁾의 반쪽 단면도를 보여주고 있다. 이러한 잉크젯 헤드를 실제 제작하고 테스트하기 위해서는 막대한 비용과 시간이 든다. 이를 절감하기 위해서는 히터의 구조, 챔버의 기하학적 형상, 구동조건 등, 주요 설계변수들의 변화가 잉크젯 헤드의 주요 성능인 액적의 부피, 액적의 분사속도, 최대 구동주파수 등에 미치는 영향을 미리 예측하는 모델링 도구의 개발은 필수적이다.

1979년 HP와 Cannon에 의해 열 잉크젯 프린터가 개발된 이후, 프린트헤드 내의 버블의 발생과 잉크의 분사특성에 관한 많은 연구가 이루어졌다. Asai *et al.*⁽²⁾은 사이드슈터형 헤드에서 버블의 성장과 유동을 예측하기 위한 일차원 선형 유압 모델을 제안하였다. Chen *et al.*⁽³⁾은 탑슈터형 헤드에서 잉크의 분사과정을 모델링 하였다. 하지만 돔젯 헤드와 같은 백슈터형 헤드에 대한 이론 및 수치 해석적 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 잉크젯 헤드에서 잉크 분사성능을 예측할 수 있는 집중질량 모델을 제안하고, 이를 3차원 수치해석과 실험 결과와 상호 비교하였다.

2. 해석방법

2.1 헤드의 열해석

잉크의 분사특성을 예측하기 위해서는 우선 히터에 전기펄스를 가할 때 히터구조와 인접한 잉크

의 열적 조건을 알 필요가 있다. 이를 통해 언제 어느 온도에서 핵생성이 발생하는지를 결정할 수 있다. 히터의 온도를 구하기 위해서는 히터 내 전기장 분포를 구한 뒤 주울 가열량을 구하고, 비정상 에너지 보존식, 식 (1)을 풀어야 한다. Fig. 1과 같이 복잡한 형상 특히 큰 편차의 서로 다른 두께를 갖는 히터 주위의 여러 층들이 존재하는 경우, 온도 분포를 계산하기 위해서는 매우 세밀한 격자가 필요하고 이에 따라 계산 시간도 오래 걸린다. Asai *et al.*,⁽²⁾ Chen *et al.*,^(3,4) Rembe⁽⁵⁾ 등은 일차원 비정상 열전도를 가정하고 온도장을 구하였다. Fig. 1의 돔젯 헤드처럼 히터를 냉각하기 위해 히터 위에 위치한 금속 커버를 통해 반경방향으로 열이 빠져나가는 구조인 경우, 일차원 열전달로 가정하기가 힘들므로 적어도 이차원 이상의 열전도 방정식을 풀어야 한다.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + S \quad (1)$$

본 연구에서는 복잡한 형상의 히터구조 전체의 온도장을 해석하는 대신, 보다 단순화된 집중질량 열전달 해석방법을 사용하였다. 집중질량 모델에서는 변수의 공간적 변동은 무시하고 집중질량 요소 덩어리 전체가 상수 값을 갖는다고 가정한다. 예로 들면, 고체의 온도는 주어진 시간에서 공간적으로 균일하다고 가정한다. 이는 고체 내부에서의 열전도 저항이 고체와 그 주위 환경과의 대류 열전달 저항보다 상대적으로 작다면 성립된다. 히터구조를 19개의 열적 집중질량 요소로 나누고, 이를 열 저항, R 과 열 커패시턴스, C 로 이루어진 전기 등가회로로 변환시켰다. 그리고 히터 및 이에 인접한 잉크의 온도변화를 해석하였다(Fig. 2). Mudd⁽⁶⁾도 열량계를 설계할 때, 이와 같은 방법을 이용하여 열량계를 R - C 등가회로로 변환한 뒤, SPICE를 이용하여 해석하였다. R 과 C 는 유한요소의 형상(육면체, 원기둥, 환형 등)과 물성치(열전도도, κ 와 비열 C_p)에 의해 결정된다[식 (2)].

$$R = \frac{l}{\kappa A}, C = \rho C_p A l \quad (2)$$

본 헤드의 주요 열전달 경로는 히터로부터 금속 커버를 거쳐 실리콘 기판으로 이어진다. 형상이 오메가(Ω)와 유사한 형상인 히터를 환형으로 가정하고, 금속층 또한 환형인 축대칭 구조로 가정하여 이차원적인 열 저항으로 모델링을 하였다

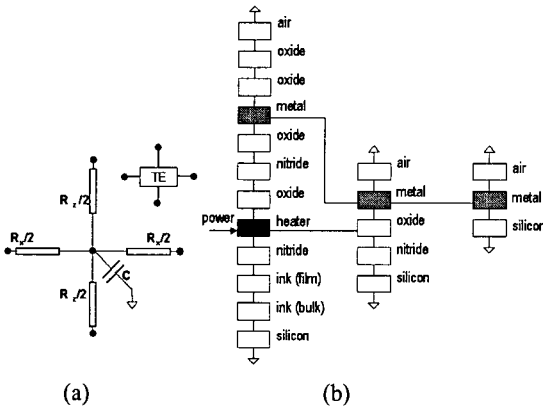


Fig. 2 (a) An equivalent R-C model of a thermal element, (b) a schematic diagram of thermal lumped model of inkjet print head

그 외는 일차원적으로 해석하였다. 핵생성 발생 시점과 온도를 알기 위해서는 히터 구조와 잉크 계면의 온도 조건을 정확히 알 필요가 있다. 이를 위해 잉크를 벌크 잉크와 필름 잉크로 나누었고, 격자 세밀화와 같은 개념으로 필름 잉크 요소를 다시 10 개의 서브 필름 잉크 요소로 나누어 해석하였다. 버블은 2 μ s 이내의 짧은 시간 안에 발생하기 때문에 잉크 대류의 영향은 고려하지 않았다. 버블 발생 이후 잉크의 대류 유동의 영향은 잉크의 유효 열전도도를 조정함으로써 고려할 수 있다. 하지만 잉크의 대류 열 저항보다는 단열재 역할을 하는 버블의 열 저항이 매우 크게 된다. 따라서 상대적으로 잉크에 의한 대류의 효과는 미미하리라 판단되어 잉크의 대류의 영향은 고려하지 않았다. 열해석의 경계조건은 다음과 같다. 실리콘의 하부는 상온 25 $^{\circ}$ C로 유지된다고 가정하였다. 공기와 접촉되는 부위는 공기의 자연대류로 인한 열 저항을 고려하였다. 본 연구에서는 위의 모델을 MATLAB 과 회로 시뮬레이션 프로그램인 PLECS⁽⁷⁾를 이용하여 온도장을 해석하였다.

2.2 유동 모델링

잉크의 분사특성을 예측하기 위해서는 버블 동역학 및 자유계면유동을 해석해야 하나, 이는 매우 복잡하고 어렵다. Beasley⁽⁸⁾와 Kyser et al.⁽⁹⁾은 피에조 구동 방식의 잉크젯 헤드 내의 유동을 해석할 때, 등가질량과 등가점성 개념을 도입한 집중질량 선형 유압모델을 제시하였다. 유동 집중질량 모델에서는 유량과 압력은 공간적으로 상수 값을 갖는다고 가정한다. 열 잉크젯 헤드 내의 유동해석에도 이와 같은 유압모델이 적용된 많은 연구가

있었다.^(2-5,11) 이들 연구의 기본 가정은 식 (3)처럼 유동의 관성력은 점성 마찰력과 압력차와 균형을 이룬다는 것이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이, 유동 관성 L 과 점성 저항 R_f 는 유체밀도 및 점성계수와 유로의 기하학적 형상에 의해 결정된다. $A(x)$ 는 유로 단면적이며, $G(x)$ 는 단면 형상의 함수이다. 이러한 가정은 유로의 길이가 아주 긴 송유관 내의 유동을 예측하는 데는 매우 유용하며, 피에조 헤드나 탑슈터 또는 사이드슈터 방식의 열방식 프린트헤드 내의 유동에서도 유효하다.

$$L \frac{dQ}{dt} + R_f Q = \Delta P \tag{3}$$

$$L = \rho \int \frac{dx}{A(x)} = \frac{4\rho l}{\pi d^4} \tag{4}$$

$$R_f = \mu \int \frac{G(x)dx}{A^2(x)} = \frac{128\mu l}{\pi d^4}$$

하지만 돛젯 헤드와 같이 입구 유로 및 노즐이 짧고, 버블 팽창 방향과 잉크 분사 방향이 서로 반대방향인 경우에는 이러한 선형적인 유압모델 적용은 한계가 있다. 점성 저항 뿐만 아니라, 유동 저항의 영향이 증대되어 이를 고려해줄 필요가 있기 때문이다. 이러한 유동 저항의 영향은 식 (5)에서 K 값으로 대변되며, 식 (6)의 D_f 는 유동 저항을 나타낸다. 이 유동 저항을 고려한 비선형 유압 모델이 식 (7)이다. K 값은 수치해석 또는 실험에서 구해야 하는 값이며, 본 연구에서는 버블 팽창시의 속도장에 해당하는 레이놀즈 수 100 정도의 파이프 유동에서의 압력 손실에 해당하는 $K=1.4$ 의 값을 가정하고 유동을 계산하였다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{2\nabla p}{\rho u^2} = \frac{64x}{Re_D} + K \Rightarrow \nabla p = R_f Q + D_f |Q|Q \tag{5}$$

$$D_f = \frac{8\rho K}{\pi^2 d^4} \tag{6}$$

$$L \frac{dQ}{dt} + (R_f + D_f |Q|)Q = \Delta P \tag{7}$$

돛젯 헤드 내의 유동을 모사하기 위해 아래와 같이 4개의 절점을 갖는 유동 집중질량 모델을 제안하였다(Fig. 3). 지배방정식은 유동 방정식과 연

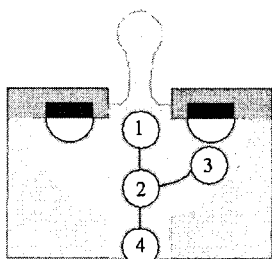


Fig. 3 A schematic diagram of a lumped flow model of inkjet print head: 1 denotes the nozzle, 2, junction point, 3, chamber, and 4, inlet

속방정식, 식 (8)~(11)이다. P_2 는 접합점 (2) 위치에서의 압력이다. P_b 는 챔버 (3) 위치에서의 압력이며, 실제로는 버블 내의 압력을 의미한다. P_{capil} 은 노즐 출구에 형성되는 미니스커스의 모세관 압력으로, 그 값은 $\frac{4\sigma\cos\theta}{d}$ 이다. P_{ejt} 는 제트 분사에 의한 압력손실이며, 속도의 함수이다. 챔버 쪽에서 버블이 소멸한 뒤 잉크가 재충전될 때는 챔버 쪽 (3)이 막혀있다고 가정할 수 있는데, 이를 위해 재충전 동안에는 챔버의 마찰 저항을 인위적으로 증가시켜 이를 고려하였다. 본 연구에서는 위 식들을 MATLAB 을 이용하여 풀었다.

$$fL_1 \frac{dQ_1}{dt} + (fR_{f_1} + D_{f_1}|Q_1|)Q_1 = P_2 - P_1, \quad (8)$$

$$P_1 = P_{capil} + P_{ejt} + P_{atm}$$

$$L_3 \frac{dQ_3}{dt} + (R_{f_3} + D_{f_3}|Q_3|)Q_3 = P_b - P_2 \quad (9)$$

$$L_4 \frac{dQ_4}{dt} + (R_{f_4} + D_{f_4}|Q_4|)Q_4 = P_2 - P_4 \quad (10)$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_4 \quad (11)$$

2.3 열-유동 모델링

열 잉크젯 헤드에 히터에 가해진 전기펄스에 의해 잉크가 분사되는 원리에 기초한 만큼, 열 잉크젯 헤드의 성능을 예측하기 위해서는 온도장 해석과 유동장 해석을 결합시켜야 한다. 이를 위해서는 온도장 해석결과로부터 언제 핵생성이 발생하는지를 결정하고, 핵생성 이후 버블의 압력변화를 예측해야 한다. 이로부터 잉크분사 특성을 예측할 수 있다. Asai *et al.*⁽¹¹⁾은 프린트헤드의 버블 생성과 성장에 관한 실험을 통해 히터 표면에 생성되는 버블의 압력변화가 일차 지수함수로 감소한다고 가정하고 식 (12)를 제안하였다.

$$P = (P_b(T_b) - P_s(T_{amb})) \exp\left(-\left(\frac{t-t_b}{\tau}\right)^\lambda\right) + P_s(T_{amb}) \quad (12)$$

t_b 는 핵생성 시점을 나타내며, τ 는 감쇠 시정수를 나타낸다. λ 는 0.5에서 1.5의 범위에 있다고 알려져 있다.⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 실제 히터 위에서의 버블 생성과 소멸 가시화 실험을 바탕으로 0.5의 값을 선정하였다. 시정수, τ 값 역시 버블 가시화 실험 또는 수치해석 결과로부터 구할 수 있다. 핵 생성 시점을 정확히 예측하는 이론은 아직까지 존재하지 않는다. 이는 액체의 과열한계를 계산하는 이론적인 접근만으로는 열 잉크젯 헤드에서 발생하는 핵생성 현상을 설명하기 힘들기 때문이다. Runge⁽¹²⁾는 물에 대해 핵생성 가시화 실험과 일차원 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 이를 통해 높은 열유속 조건에서는 핵생성 온도가 히터 표면에서의 온도구배와 선형적인 상관관계가 있음을 관찰하고 아래의 경험식 (13)을 제안하였다. 이 식은 히터에 인접한 물의 온도구배가 14 K/ μm 이상일 때 적용된다. Avedisian *et al.*⁽¹³⁾도 핵 생성 온도는 히터의 가열률에 비례하여 증가한다고 보고하였다. Runge의 경험식을 이용하면 핵생성 온도를 미리 가정할 필요가 없이, 히터 박막에 접하는 잉크 필름에서의 온도와 온도구배의 변화로부터 핵생성 온도를 구할 수 있다.

$$T_b = 230 \text{ }^\circ\text{C} + 1.6 \cdot 10^{-7} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (13)$$

이 핵생성 온도로부터 버블의 압력을 구하기 위해 액체의 과열한계 근처에서의 압력과 온도의 경험적인 상관관계인 Antoine 방정식, 식 (14)를 사용하였다. 물에 해당하는 Antoine 상수⁽¹⁴⁾는 다음과 같다. (A, B, C) = (7.94916, 1657.46, 227.02). 그리고 이 식에서 압력과 온도의 단위는 각각 mmHg 와 $^\circ\text{C}$ 이다.

$$\log_{10} P_b = A - \frac{B}{T_b + C} \quad (14)$$

Fig. 4는 잉크젯 헤드의 열전달 모델과 유동 모델을 Asai의 버블압력 모델과 Runge의 핵생성 발생시점에 관한 경험식과 Antoine 방정식을 결

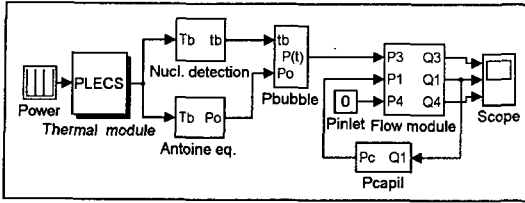


Fig. 4 A Simulink model of the thermal inkjet print head

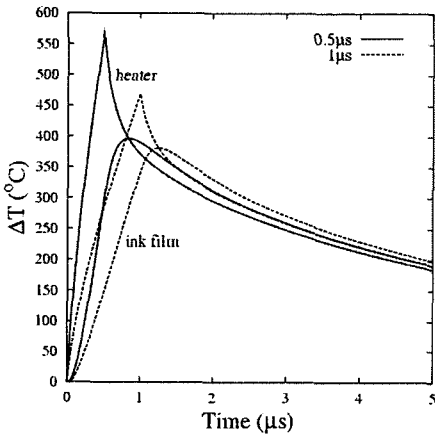


Fig. 5 The temperature increase of the heater and the ink film for the two different pulse widths of an electric pulse of 2.4 μJ

합해 만든, 잉크젯 헤드 열-유동 해석을 위한 SIMULINK 모델의 개념도이다. 개념도에 따르면 전기신호를 히터에 인가하면 PLECS 모듈에서는 전기동가회로를 해석해 히터와 잉크 계면에서의 온도와 온도구배를 계산해 Runge 의 식으로부터 핵생성 시점과 온도를 결정한다. 핵생성 온도로부터 Antoine 방정식을 이용해 버블의 초기 압력을 계산한다. 이 버블압력은 Asai 의 경험식에 사용되어 유동해석 모델의 입력 값으로 사용된다. 버블의 압력변화에 의해 노즐에서의 잉크 분사속도와 체적이 결정된다. 노즐에서의 유량변화로부터 잉크의 미니스커스 변화를 추적해 모세관 압력변화를 결정하고, 이를 노즐출구에서의 압력 경계조건으로 사용한다. 유로입구에서의 압력은 상압으로 유지된다고 가정하였다.

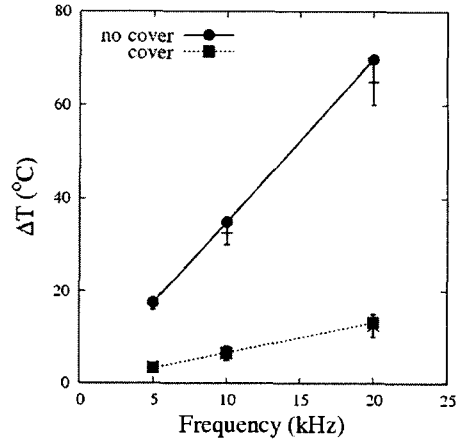


Fig. 6 The temperature increase of the upper side of the heater depending on the frequencies of the electric pulse of 2.4 μJ

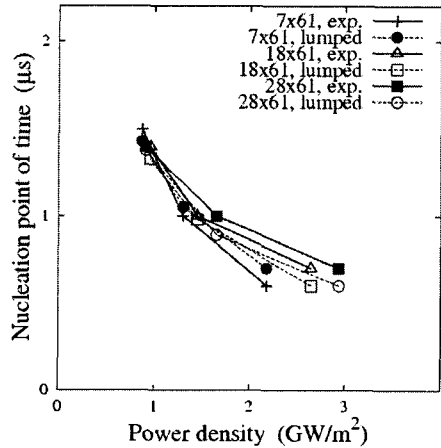


Fig. 7 Prediction of the time of nucleation for the rectangular heaters of different sizes (in μm) and comparison with experimental visualization results

3. 결과 및 토의

Fig. 5 는 폴리실리콘 히터에 두개의 다른 펄스 주기를 갖는 전기신호를 인가했을 때, 히터와 히터 밑의 잉크 필름의 온도를 집중질량 모델해석을 통해 얻은 결과를 보여주고 있다. 이 온도변화와 히터와 잉크의 경계사이의 온도구배 정보를 갖고 Runge 의 경험식을 바탕으로 핵생성 발생시점을 결정하게 된다. 이러한 단순화한 집중질량 열전달 해석결과를 검증하기 위해서 금속 커버가 히터 위에 존재하여 냉각 효율을 개선한 헤드와 커버가 존재하지 않는 헤드를 실제로 제작하여 적외선 카

메라를 이용하여 헤드의 상부의 온도를 측정하여 이를 집중질량 모델 해석결과와 비교하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 금속 커버가 있을 경우에는 금속층이 열전달 경로로 작용해 인가 주파수를 증가시켜도 과열이 그다지 크지 않다. 실험결과와 집중질량 열전달 해석결과는 비교적 잘 일치하였다. 금속 커버가 없는 경우에는 오차가 상대적으로 커진다. 이는 금속 커버가 있는 경우에는 열의 전달경로가 축대칭적인 가정에 크게 벗어나지 않는 반면, 커버가 없는 경우에는 열의 전달 경로가 3차원적으로 되어 집중질량 모델의 정확성이 떨어지는 것으로 파악된다. 금속 커버가 없는 경우, 열전달 특성의 보다 정확한 예측을 위해서는 지면에 수직인 방향의 열전달도 고려하여 해석할 필요가 있다.

서로 다른 크기를 갖는 직사각형 히터에 일정 파워를 가해 언제 버블이 발생하는 지를 가시화 실험을 통해 관찰하고, Runge 식 (13)을 이용한 핵생성 시점 예측 결과를 비교하였다. Fig. 7은 0.15 μm 두께의 히터에 가해진 구동펄스의 파워밀도가 변할 때, 핵생성 시점 변화를 보여주고 있다. 파워밀도가 비교적 낮은 1 GW/m^2 영역에서는 Runge 식이 비교적 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면에 파워 밀도가 커지면 약간의 불일치가 나타난다. 이는 Runge의 경험식이 비교적 낮은 파워밀도 영역에서 얻어졌기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 제안한 열전달 해석모델과 유동모델을 결합시킴으로써, 히터의 구조, 챔버의 기하학적 형상, 구동조건의 변화가 잉크젯 헤드의 주요 성능인 액적의 부피, 액적의 분사 속도, 구동 주파수 등에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 이러한 집중질량 모델 해석결과를 검증하기 위해 실제로 잉크젯 헤드를 제작하여 액적분사 실험을 수행하였다. 또한, VOF (volume of fluid)에 기초한 상용 수치해석 프로그램인 Flow3D를 이용한 등온조건에서의 잉크 분사과정에 대한 수치해석도 수행하였다(Fig. 8). 액적의 분사속도를 Flow3D와 집중질량 모델을 이용해 예측한 결과를 Fig. 9에서 비교해 보여주고 있다. 식 (5)에서의 유동 저항 변수인 K 의 영향을 고려하지 않았을 경우, 집중질량 모델은 액적의 분사속도를 Flow3D 결과보다 과대 예측하였다. $K=1.4$ 일 때, 모델은 Flow3D의 액적분사 속도 결과를 잘 예측함을 알 수 있는데, 돛젯 헤드와 같이 유로 구조가 곡관, 단면 수축, 단면 팽창이 있는 백슈터 헤드인 경우에는 반드시 유동 저항의 영향을 고려하여야 함을 알 수 있다. 마이

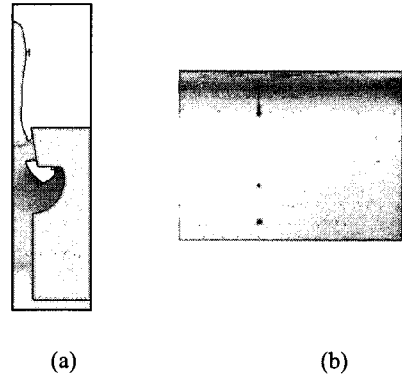


Fig. 8 Droplet ejection simulated by using Flow3D without considering heat transfer (a) and a photograph showing droplets ejected from the nozzle (b)

크로 스케일의 잉크젯 헤드에서는 중력보다는 점성과 표면장력의 영향이 유동을 지배한다. 집중질량 모델에서는 중력의 영향은 고려하지 않았는데, Flow3D를 이용한 액적분사 해석에서 액적의 분사 속도와 체적은 중력영향의 유무에 따라 0.1% 이내의 변동만을 보여주었기 때문이다. Fig. 10은 시간에 따른 버블의 체적변화를 보여주고 있다. 유동 저항을 고려함으로써 Flow3D를 이용해서 구한 버블체적변화를 집중질량 모델에서 잘 예측함을 확인할 수 있다. Flow3D에서는 히터 아래에 약 1 μm 두께의 버블이 초기에 생성된다고 가정하였고, Asai의 압력 변화식 (12)에 의해 버블의 체적변화를 예측하였다.

이와 같이 수치해석결과에 의해 검증된 집중질량 모델을 이용해 노즐 길이의 변화가 분사되는 액적의 운동량 (액적의 무게와 속도의 곱)에 미치는 영향을 관찰하였다. Fig. 11은 가시화 실험 및 3차원 수치해석, 그리고 집중질량 모델링을 통해 얻은 결과를 서로 비교해 보여주고 있다. 이때 인가된 전기 펄스의 주기는 1.1 μs 이고 파워는 5 W였다. 노즐의 길이가 늘어나면 노즐 부위의 마찰 저항이 증가해 운동량이 감소하는 경향을 잘 예측함을 알 수 있다. 노즐 길이가 짧을수록 Flow3D 해석결과와 집중질량 모델링 결과의 오차가 큰데, 이는 유동 저항 성분이 노즐 길이가 짧을수록 작아져 $K=1.4$ 에 해당하는 유동 저항 성분이 지나치게 크기 때문이라고 여겨진다. 보다 더 정확한 집중질량 모델을 위해서는 K 값 역시 유로 구조의 함수로 정의되어야 하나, 본 연구에서는 K 값은 입구, 챔버, 노즐에서 각각 일정한 값으로 유지된다고 가정하였다.

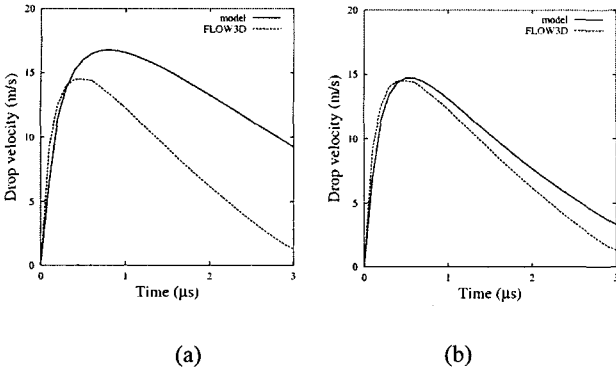


Fig. 9 Time history of the drop ejection velocity: (a) $K=0$, (b) $K=1.4$

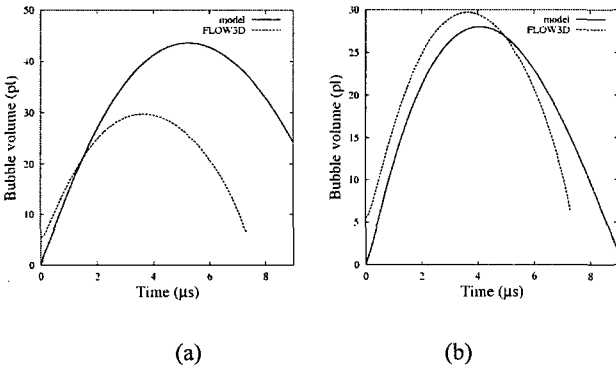


Fig. 10 Time history of the bubble volume: (a) $K=0$, (b) $K=1.4$

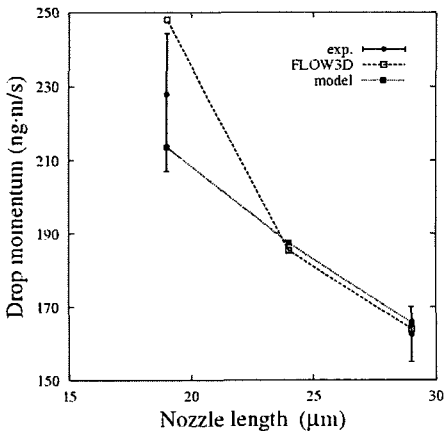


Fig. 11 Variation of the drop ejection momentum depending on the length of the nozzle

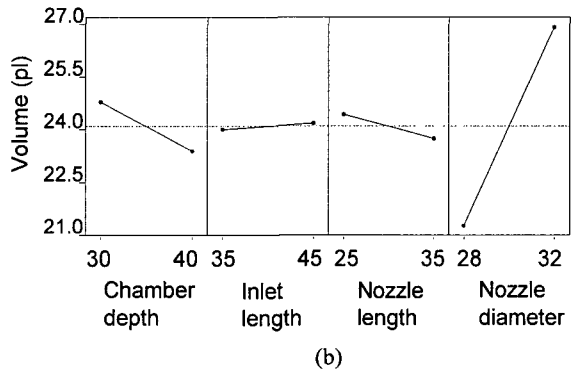
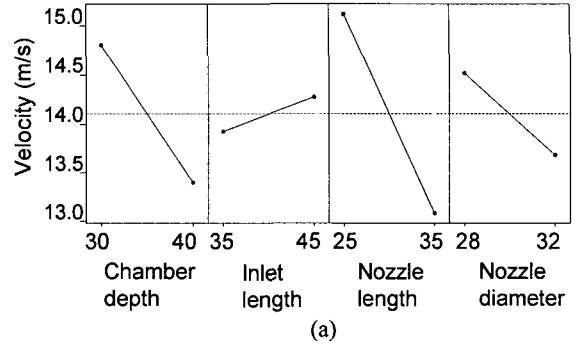


Fig. 12 Variation of the drop ejection velocity (a) and volume (b) depending on the geometrical change of the print head from the lumped model results. Units are in μm

원하는 액적 속도와 체적을 얻기 위해서는 유로 구조의 변화가 액적 분사특성에 미치는 영향을 파악하는 과정이 선행될 필요가 있다. 집중질량 모델을 이용한 실험계획법 해석을 수행하여 액적의 분사성능을 결정하는데 가장 민감한 유로구조 변수를 파악하였다. 다양한 유로구조 변수 중에서 액적 속도와 체적에 영향을 미치는 주요 인자로서 챔버의 깊이, 입구의 길이, 노즐의 길이, 노즐의 직경이 액적의 속도와 체적에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타내었다. 입구 폭의 영향도 중요하나 입구 길이의 영향을 파악하기 위해 일정 값으로 고정시켰다. 수행한 실험계획법으로부터 액적의 속도는 노즐의 길이에 큰 영향을 받고, 액적의 체적은 노즐의 직경에 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 이는 원하는 체적의 액적을 얻기 위해서는 실리콘 미세 가공공정에서 노즐 직경의 공차를 최대한 엄격히 관리해야 함을 의미한다. 액적의 분사 속도는 노즐 길이를 적절히 변화시킴으로써 원하는 값을 얻을 수 있었다.

4. 결론

열 잉크젯 헤드의 잉크 분사성능을 예측할 수 있는 집중질량 모델링 방법을 제안하였다. 이 모델링 방법을 이용하면 히터의 구조, 챔버의 기하학적 형상, 구동 조건 등, 주요 설계 변수들의 변화가 잉크젯 헤드의 주요 성능인 액적의 부피, 액적의 비행 속도 등에 미치는 영향을 예측할 수 있음을 실험과 수치해석을 통해 검증하였다. 본 연구에서 제안한 열 잉크젯 헤드의 집중질량 모델링 방법은 열 잉크젯 헤드의 성능을 예측하고, 설계하는 도구로 효과적으로 사용될 수 있다. 집중질량 모델은 본 연구에서처럼 단일 채널의 분사성능을 예측하는 데서 나아가 복수의 채널이 동시에 구동될 때의 과열 특성, 채널간의 상호간섭 현상을 예측하는 데도 활용될 수 있다. 본 연구에서는 선형 전기등가회로만을 고려하였는데, 가변저항과 같은 비선형 요소도 해석 가능한 전기회로 시뮬레이터를 사용하여 비선형 유동 저항 영향을 제대로 반영함으로써 집중질량 모델의 정확성을 제고할 수 있으리라 기대한다.

후 기

잉크젯 헤드를 실제 제작하고, 본 논문 관련 실험에 많은 도움을 주신 잉크젯 팀원 전체와 오용수, 국건, 신승주 박사님께 감사사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, S.-W., Kim, H.-C., Kuk, K. and Oh, Y.-S., 2001, "A Monolithic Inkjet Print Head: DomeJet," *Proceedings of IEEE, MEMS 2001, The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 515~518.
- (2) Asai, A., Hara, T. and Endo, I., 1987, "One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 26, pp. 1794~1801.
- (3) Chen, P. H., Chen, W. C. and Chang, S. H., 1997, "Bubble Growth and Ink Ejection Process of a Thermal Ink Jet Printhead," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 39, pp. 683~695.
- (4) Chen, P. H., Chen, W. C., Ding, P. P. and Chang, S. H., 1998, "Droplet Formation of a Thermal Sideshooter Ink Jet Printhead," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 19, pp. 382~390.
- (5) Rembe, C., Wiesche, S. and Hofer, E. P., 2000, "Thermal Ink Jet Dynamics: Modeling, Simulation, and Testing," *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, pp. 525~532.
- (6) Mudd, C., 1999, "Evaluation of Phase Transition Errors in Heat Capacity Calorimeters Using SPICE Simulated RC Models," *J. Biochem. Biophys. Methods*, Vol. 39, pp. 7~38.
- (7) <http://www.plexim.com>
- (8) Beasley, J. D., 1977, "Model for Fluid Ejection and Refill in an Impulse Drive Jet," *Photographic Science and Engineering*, Vol. 21, pp. 78~82.
- (9) Kyser, E. L., Collins, L. F. and Herbert, N., 1981, "Design of Impulse Ink Jet," *Journal of Applied Photographic Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 73~79.
- (10) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- (11) Asai, A., 1991, "Bubble Dynamics in Boiling Under High Heat Flux Pulse Heating," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 973~979.
- (12) Runge, W., 1992, "Nucleation in Thermal Ink-Jet Printers," *IS&T's 8th International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies*, pp. 299~302.
- (13) Avedisian, C. T., Osborne, W. S., McLeod, F. D. and Curley, C. M., 1991, "Measuring Bubble Nucleation Temperature on the Surface of a Rapidly Heated Thermal Ink-Jet Heater Immersed in a Pool of Water," *Proc. R. Soc. London A*, Vol. 455, pp. 3875~3899.
- (14) *Chemical Engineers' Handbook 5th Edition*, 1988, The Society of Chemical Engineers Japan, Maruzen.