

〈 논문 〉

열 잉크젯 프린트헤드의 채널간 간섭현상의 모델링

이유섭[†] · 손동기^{*} · 김민수^{*} · 국 건^{*}

(2006년 8월 9일 접수, 2006년 11월 30일 심사완료)

Modeling of Crosstalk Behaviors in Thermal Inkjet Print Heads

You-Seop Lee, Dong Ki Sohn, Min Soo Kim and Keon Kuk

Key Words : Crosstalk(상호간섭 현상), Thermal Inkjet Print Head(열 잉크젯 프린트헤드), Numerical Simulation(수치 모사), Lumped Modeling(집중질량 모델링), Equivalent Electric Circuit(전기등가회로), Drop Ejection(액적 분사)

Abstract

This paper presents a lumped model to predict crosstalk characteristics of thermally driven inkjet print heads. Using the lumped R-C model, heating characteristics of the head are predicted to be in agreement with IR temperature measurements. The inter-channel crosstalk is simulated using the lumped R-L network. The values of viscous flow resistance, R and flow inductance, L of connecting channels are adjusted to accord with the 3-D numerical simulation results of three adjacent jets. The crosstalk behaviors of a back shooter head as well as a top shooter head have been investigated. Predictions of the proposed lumped model on the meniscus oscillations are consistent with numerical simulation results. Comparison of the lumped model with experimental results identifies that abnormal two-drop ejection phenomena are related to the increased meniscus oscillations because of the more severe crosstalk effects at higher printing speeds. The degree of crosstalk has been quantified using cross-correlations between neighboring channels and a critical channel dimension for acceptable crosstalk has been proposed and validated with the numerical simulations. Our model can be used as a design tool for a better design of thermal inkjet print heads to minimize crosstalk effects.

———— 기호설명 ————	
A	: 집중질량요소의 단면적
C	: 열 커패시턴스
C_f^{xy}	: 교차 상관계수
C_p	: 비열
d	: 유로 직경
D_f	: 유동 저항
f	: 미니스커스 상대 위치
K	: 손실 계수
Q	: 유량
R	: 열 저항
R_f	: 점성 저항
T	: 온도
T_b	: 핵 비등 온도

———— 하첨자 ————	
1	: 노즐 절점
2	: 접합 절점
3	: 챔버 절점
4	: 입구 절점
———— 그리스 문자 ————	
κ	: 열전도도
λ	: 지수
μ	: 점성
ρ	: 밀도
θ	: 접촉각
σ	: 표면장력
τ	: 감쇠 시정수

1. 서론

잉크젯 프린트헤드의 인쇄 속도와 해상도를 높이기 위해 제트(jet) 채널의 개수는 점차 증대되고

[†] 책임저자, 회원, 삼성종합기술원 Micro Systems Lab

E-mail : yslee3@samsung.com

TEL : (031)280-8338 FAX : (031)280-6879

^{*} 삼성종합기술원 Micro Systems Lab

있다. 이로 인해 인접한 채널간에 유동의 상호간섭(crosstalk)이 심해진다. 지나친 채널간 상호간섭은 인쇄 품질 저하의 원인이 되기 때문에 유로구조를 최적 설계함으로써 감소시킬 필요가 있다. 잉크를 분사하는 역할을 하는 프린트헤드는 히터 박막과 잉크 챔버, 노즐, 입구(restrictor) 등으로 구성된다. 열 잉크젯 헤드는 일반적으로 버블과 액적의 비행방향이 동일한 것을 탑슈터(top shooter), 반대방향인 것을 백슈터(back shooter)라고 한다. Fig. 1(a)는 돔(Dome)형상의 실리콘 챔버와 폴리실리콘 히터로 구성된 백슈터 방식의 돔젯 헤드⁽¹⁾를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 히터가 챔버 바닥에 형성된 탑슈터 형 헤드를 보여주고 있는데, HP와 Canon 등이 이 방식을 채용하고 있다.

잉크젯 프린트헤드 내의 잉크의 토출 특성 중 채널간 간섭현상에 관해 많은 연구가 이루어져왔다. IBM의 Poon and Lee⁽²⁾는 탑슈터 형 헤드에 대해 채널간 거리와 입구의 면적 변화가 간섭현상에 미치는 영향을 액적 크기 측정 및 속도 측정, 미니스커스 진동 측정을 통해 연구하였다. 그들은 액적 체적의 변동은 채널간 간섭현상에 의한 미니스커스의 진동과 관련이 있음을 실험적으로 관찰하였다. Seitz와 Heinzl⁽³⁾은 피에조 헤드에서의 채널간 간섭현상에 대한 수치해석 및 집중질량 모델링을 수행하였다. 하지만 여전히 채널간 상호간섭현상에 대한 연구, 특히 돔젯 헤드와 같은 백슈터 형 헤드에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 본 연구에서는 수치해석 및 집중질량 모델링 방법⁽⁴⁾을 통해 채널간 상호간섭을 억제하는 유로구조를 설계하고자 하였다.

열 개 정도의 복수 채널이 동시에 구동될 때, 프린트헤드의 과열 정도를 예측하기 위해 백슈터 형 돔젯 헤드에 대해 집중질량 열 모델 해석을 수행하였다. 이를 검증하기 위해 자체 제작한 돔젯 헤드에 대해 적외선 센서를 이용한 온도측정 실험을 수행하고 해석결과와 서로 비교하였다. 그리고 탑슈터 형 및 백슈터 형 헤드에 대한 3차원 수치해석을 통해 두 개의 채널간 상호간섭으로 인해 비구동 노즐에서 미니스커스가 진동하는 것을 관찰하고, 집중질량 유동 모델 결과와 서로 비교하였다. 복수의 채널 분사성능에 채널간 구동 시간 간격이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 돔젯 헤드의 열 개의 채널에 대해 액적 분사 가시화 실험을 수행하고, 집중질량 유동 모델 결과와 비교하였다. 그리고 상호간섭 저감설계의 일환으로 유로구조 중 입구 직경을 선정하는 방법을 제시하였다.

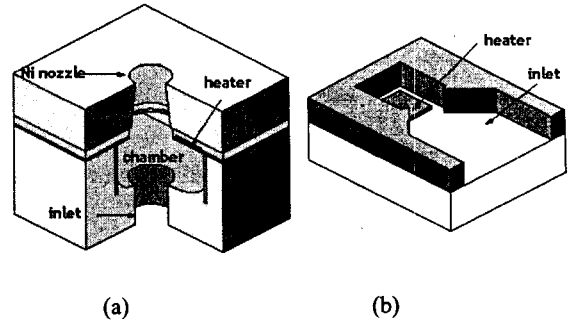


Fig. 1 (a) Schematic diagram of a back shooter thermal inkjet print head, (b) a top shooter head

2. 연구방법

2.1 액적 분사 및 온도 가시화 실험

액적의 분사과정을 관찰하기 위해 가시화 실험을 수행하였다. Fig. 2는 가시화 샘플과 함께 현미경 가시화 시스템을 나타내고 있다. 가시화를 위해 유사영사법(pseudo-cinematographic technique)⁽⁵⁾을 사용하였다. 통상 30 Hz로 영상을 획득하는 CCD 카메라에 토출 주기와 동일한 주기로 광원을 조사하여 가시화 실험을 수행하였다. 약 50 μs 정도의 시간 간격을 갖고 영상을 획득하면 액적의 위치 변화로부터 액적 속도를 측정할 수 있다. 구동 조건으로는 실제 헤드에 가해지는 11 V 전압에 1.5 μs 주기의 신호를 가하였다. 작동유체로는 탈염수와 노랑색 잉크(InkTec, Korea)를 사용하였다. 박막 히터의 온도를 측정하기 위해 적외선 온도 측정법을 사용하였다. 실리콘은 적외선에 투명하므로 히터 표면 온도는 방사율 데이터로부터 알 수 있었다. 복수의 채널이 구동될 때 정상상태의 온도 분포를 통해 전체 프린트헤드의 과열특성을 알 수 있기 때문에, 실제의 교류신호 대신에 직류신호를 히터에 가하였다. 직류신호의 전압은 실제의 교류 구동 조건에 상응하도록 정했다. 온도 가시화 측정은 적외선 온도 측정의 해상도를 높이기 위해 샘플을 65 $^{\circ}\text{C}$ 까지 예열한 후 수행하였다.

2.2 집중질량 열 모델링

복수의 히터를 가열할 경우 과열 특성을 예측하기 위해 집중질량 열 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 복잡한 형상의 히터구조 전체의 온도장을 해석하는 대신, 보다 단순화된 집중질량 열전달 해석방법을 사용하였다. 버블은 2 μs 이내의 짧은 시간 안에 발생하기 때문에 잉크 대류의 영향은 고려하지 않으며, 식 (1)과 같이 순수한 열전도 방정식만을 고려하였다.

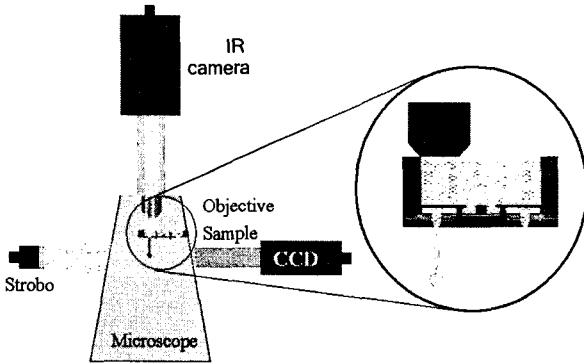


Fig. 2 A microscopic visualization system for the observation of droplet ejection and IR temperature measurements

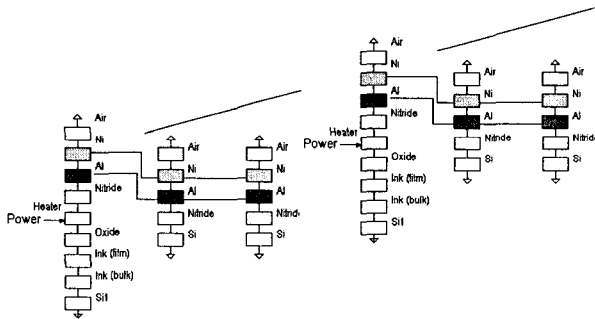


Fig. 3 A schematic diagram of thermal lumped model of inkjet print head

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

단위 채널의 히터구조를 19 개의 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.⁽⁴⁾ R 과 C 는 유한요소의 형상 (육면체, 원기둥 등)과 물성치 (열전도도, κ 와 비열, C_p)에 의해 결정된다[식 (2)]. 열해석의 경계조건은 다음과 같다. 실리콘의 하부는 상온 25°C 로 유지된다고 가정하였다. 공기와 접촉되는 부위는 공기의 자연대류로 인한 열 저항을 고려하였다. 본 연구에서는 위의 모델을 MATLAB 의 Simulink 와 회로 시뮬레이션 프로그램인 PLECS⁽⁶⁾를 이용하여 온도장을 해석하였다.

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

히터 구조의 주요 열전달 경로는 직사각형의 히터박막으로부터 금속 커버를 거쳐 실리콘 기판으로 이어진다. 복수의 채널의 온도분포를 예측하기 위해서 Fig. 3 과 같이 단위 채널의 열 네트워크를 복수의 채널로 확장하였다. 각 채널간의 열 출입은 대부분 열 저항이 가장 작은 Al 과 Ni 의 금속층을 통해 이루어지므로, 각 채널의 금속층을 연결해줌으로써 복수의 채널의 열 네트워크를 구성하였다. 정상상태의 온도 분포를 구하기 위해서는 모든 C 의 값을 0 으로 두면 된다.

Runge⁽⁷⁾는 높은 열유속 조건에서는 핵생성 온도가 히터 표면에서의 온도구배와 선형적인 상관관계가 있음을 실험적으로 관찰하고 아래의 경험식 (3)을 제안하였다. z 좌표는 Fig. 3 의 수직방향이다. 이로부터 핵 비등온도를 미리 가정할 필요가 없이, 히터 박막에 접하는 잉크 필름에서의 온도와 온도구배의 변화로부터 핵생성 온도를 구할 수 있다. 온도구배를 구하기 위해 벌크 잉크와 필름 잉크로 나누었다. 격자 세밀화와 같은 개념으로 히터와 맞닿는 잉크 계면 근처에 위치시킨 필름 잉크를 다시 10 개의 서브 열적 집중질량요소로 나누어 온도구배를 구하였다.

$$T_b = 230 + 1.6 \cdot 10^{-7} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

Asai⁽⁸⁾는 프린트헤드의 버블 생성과 성장에 관한 실험을 통해 히터 표면에 생성되는 버블의 압력변화가 일차 지수함수로 감소한다고 가정하고 식 (4)를 제안하였다.

$$P = (P_b(T_b) - P_s(T_{amb})) \exp\left(-\left(\frac{t-t_b}{\tau}\right)^\lambda\right) + P_s(T_{amb}) \quad (4)$$

t_b 는 핵생성 시점을 나타내며, τ 는 감쇠 시정수를 나타낸다. λ 는 0.5 에서 1.5 의 범위에 있다고 알려져 있으며,⁽⁸⁾ 본 연구에서는 실제 히터 위에서의 버블 생성과 소멸 가시화 실험을 바탕으로 0.5 의 값을 선정하였다. 시정수, τ 값 역시 버블 가시화 실험과 수치해석 결과의 비교로부터 구할 수 있다. 수치해석 결과를 회귀분석을 통해 잉크

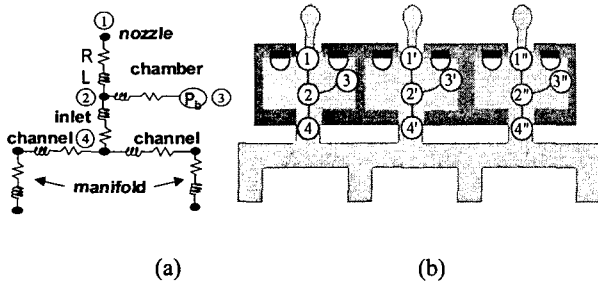


Fig. 4 (a) A lumped flow model of a unit channel: 1 denotes the nozzle, 2, junction point, 3, chamber, and 4, inlet, (b) a sketch of the flow network of a back-shooter thermal inkjet head

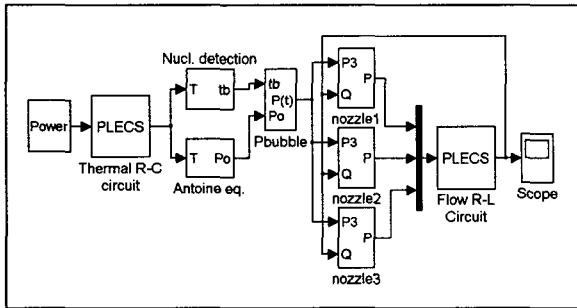


Fig. 5 A Simulink model of thermal inkjet print head consisting of three channels

액적 토출 운동량은 τ 와 이차 함수관계가 있음을 확인하였다. 회귀 식과 액적 운동량 측정 실험값을 비교하여 τ 값을 선정하였으며, $0.05 \mu s$ 정도의 값을 가졌다. 핵생성 온도로부터 버블의 압력을 구하기 위해 액체의 과열한계 근처에서의 압력과 온도의 경험적인 상관관계인 Antoine 방정식, 식 (5)를 사용하였다. 물에 해당하는 Antoine 상수⁽⁹⁾는 다음과 같다. $(A, B, C) = (7.94916, 1657.46, 227.02)$. 이 식에서 압력과 온도의 단위는 각각 mmHg 와 $^{\circ}C$ 이다.

$$\log_{10} P_b = A - \frac{B}{T_b + C} \quad (5)$$

2.3 유동 모델링

잉크의 분사특성을 예측하기 위해서는 버블 동역학 및 자유계면유동을 해석해야 하나, 이는 매우 복잡하고 어렵다. Beasley⁽¹⁰⁾와 Kyser et al.⁽¹¹⁾은 피에조 구동 방식의 잉크젯헤드 내 유동을 해석할 때, 등가질량과 등가점성 개념을 도입한 집중질량 선형 유압 모델을 제시하였다. 이들 연구의 기본

가정은 식 (6)처럼 유동의 관성력은 점성 마찰력과 압력차와 균형을 이룬다는 것이다. 돛셋 헤드와 같이 입구 유로 및 노즐이 짧고, 버블 팽창 방향과 잉크 분사 방향이 서로 반대방향인 경우에는 점성 저항 뿐만 아니라, 유동 저항의 영향이 증대되어 이를 고려해줄 필요가 있다. 식 (6)의 D_f 는 유동 저항을 나타낸다. 유동관성 L 과 점성 저항 R_f 는 유체밀도 및 점성계수와 유로의 기하학적 형상에 의해 결정된다. $A(x)$ 는 Poissuille 유동 방향 x 에 따른 유로 단면적의 변화이며, $G(x)$ 는 유로 단면형상의 변화를 나타낸다. Poissuille의 법칙을 유로에 적용하여 점성 저항과 관성항의 동등 계수를 유도할 때 나오는 계수들이다. 단면이 원형인 경우 $G(x)=8\pi$ 이며, 폭과 두께의 중형비가 α 인 사각 단면의 경우는 $G(x) = 12[0.33+1.02(\alpha+\alpha^{-1})]$ 이다.⁽¹¹⁾ 식 (6)에서는 원기둥 형상의 유로에 대해 L 과 R_f 값을 나타내었다. Fig. 4(b)에서 노즐의 경우 d 는 노즐 직경, l 은 노즐 길이에 해당한다. 유동 저항의 영향은 식 (6)에서 K 값으로 대변되며, 그 값은 수치해석 또는 실험에서 구해야 한다. 잉크젯 헤드의 노즐에서의 속도와 그에 상응하는 레이놀즈 수 범위를 감안하여 $K=1.0$ 의 값을 가정하고 유동을 계산하였다.⁽¹²⁾

$$L \frac{dQ}{dt} + (R_f + D_f |Q|)Q = \Delta P \quad (6)$$

$$L = \rho \int \frac{dx}{A(x)} = \frac{4\rho l}{\pi d^2}$$

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

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

돛셋 헤드 내의 유동을 모사하기 위해 아래와 같이 4개의 절점을 갖는 유동 집중질량 모델(Fig. 4)의 지배 방정식 (7)-(10)을 제안하였다. Q_1, Q_3, Q_4 는 노즐과 챔버, 입구를 지나는 유량을 나타낸다. 식 (10)은 버블 팽창에 의해 챔버에 발생한 유량 Q_3 은 Q_1 과 Q_4 로 나누어지며 보존됨을 의미하는 연속방정식이다. 노즐에서는 R_f 와 L 의 값은 미니스커스의 위치의 함수이다. 식 (7)에서 f 는 노즐에서의 미니스커스의 상대적 위치를 나타낸다. P_2 는 접합점 (2) 위치에서의 압력이다. P_b 는 챔버 (3)

$$fL_1 \frac{dQ_1}{dt} + (fR_{f_1} + D_{f_1}|Q_1|)Q_1 = P_2 - P_1, \quad (7)$$

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

$$L_3 \frac{dQ_3}{dt} + (R_{f_3} + D_{f_3}|Q_3|)Q_3 = P_b - P_2 \quad (8)$$

$$L_4 \frac{dQ_4}{dt} + (R_{f_4} + D_{f_4}|Q_4|)Q_4 = P_2 - P_4 \quad (9)$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_4 \quad (10)$$

위치에서의 압력이며, 실제로는 버블 내의 압력을 의미한다. 노즐에서는 R_f 와 L 의 값은 미니스커스의 위치의 함수이다. 식 (7)에서 f 는 노즐에서의 미니스커스의 상대적 위치를 나타낸다. P_2 는 접합점 (2) 위치에서의 압력이다. P_b 는 챔버 (3) 위치에서의 압력이며, 실제로는 버블 내의 압력을 의미한다. P_4 는 Fig. 4(a)의 전기 등가 회로에서는 절점 4에서의 압력 또는 전압에 해당한다. 따라서 절점 1과 3 및 매니폴드 끝점에서의 압력들이 경계 조건으로 정의되면 P_4 는 Kirchoff의 법칙에 의해 결정된다. P_{ejt} 는 제트 분사에 의한 압력 손실이며, 그 값은 $\rho V_j^2/2$ 이다. P_{capil} 은 노즐 출구에 형성되는 미니스커스의 모세관 압력으로, 그 값은 $4\sigma \cos\theta/d$ 이다. 접촉각은 얇은 방울 (sessile drop) 방법을 이용해 노즐 부위와 동일한 조건의 표면에서 잉크의 정적인 접촉각을 측정하여 사용하였으며, 그 값은 약 10° 이다. 미니스커스가 노즐 가장 자리에 형성될 때 모세관 압력은 미니스커스의 체적 V_m 의 함수이다. 이를 고려하기 위해 Brescia and Sartori⁽¹³⁾가 제안한 간단한 식 (11)을 사용하였는데, 이는 실제 모세관 압력과는 2% 이내의 오차범위 안에서 정확하다. 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.

$$P_{capil} = 2 \frac{\sigma}{r} \tanh \frac{4V}{\pi r^3} m \quad (11)$$

Fig. 5는 잉크젯 헤드의 열전달 모델과 유동 모델을 Asai의 버블압력 모델과 Runge의 핵생성 발

생시점에 관한 경험식과 Antoine 방정식을 결합해 만든 잉크젯 헤드 열-유동 해석을 위한 Simulink 모델의 개념도이다. 세 개의 채널만을 표시하였지만, 더 많은 채널로의 확장은 비교적 간단하게 이루어진다. Simulink 모델은 크게 두 개의 전기회로 모듈로 구성된다. 하나는 R-C 열 회로이고, 다른 하나는 R-L 유동 모듈이다. 복수의 채널간의 열적 상호간섭은 R-C 열 회로에서 해석이 되며, 유동 상호간섭은 R-L 유동회로에서 해석이 되어진다. 집중질량 R-L 회로는 선형시스템에만 국한되기 때문에, 비선형 영향은 전류에 제어되는 전압 스스로 모델링을 하였다. 하지만 유로 입구에서의 비선형성은 무시하였는데, 이는 인접한 채널과 연결된 입구에 전압 소스를 부가하기 힘들었기 때문이다.

이 개념도에 따르면 복수의 히터에 동시 또는 시간 간격을 갖고 순차적으로 전기신호를 인가하면 열 모듈에서는 전기등가회로를 해석해 각 채널마다 히터와 잉크 계면에서의 온도와 온도구배를 계산한다. 그리고 Runge의 식으로부터 핵생성 시점과 온도를 결정한다. 핵생성 온도로부터 Antoine 방정식을 이용해 버블의 초기 압력을 계산한다. 이 버블압력은 Asai의 경험식에 사용되고, 유동해석 모듈의 입력 값으로 사용된다. 각 노즐에서의 시간에 따른 유량변화를 적분하여 체적 변화를 구한다. 이로부터 반구 형상으로 가정된 미니스커스의 위치 변화를 추정하여 모세관 압력변화를 결정한다. 매니폴드 입구에서의 압력은 상압으로 유지된다고 가정하였다.

집중질량 유동 모델을 검증하기 위하여 Flow3D (Flow Science Inc.)를 이용한 3차원 수치해석도 수행하였다. 챔버 내에 위치한 히터 위치에 초기에 일정 두께 $1 \mu\text{m}$ 의 버블이 초기에 생성되어 있다고 가정하고, 이 버블의 압력조건으로 Asai의 경험식 (4)를 Flow3D의 사용자 서브루틴에 첨가해 사용하였다. 버블과 잉크 사이에는 운동량은 서로 전달되나, 열과 물질의 전달은 일어나지 않는다고 가정하였다. 노즐 밖의 외부 공기 유동은 해석하지 않았다. 사용한 격자는 정렬격자이며, 백슈터 헤드는 약 23만개, 탑슈터 헤드는 약 48만개의 격자에서 해석을 수행하였다. 3개의 채널에서 중심축에서 좌우 대칭이므로 1과 1/2 모델만을 사용하고 대칭 경계조건을 사용하였다. 매니폴드 부분은 상압으로 유지되는 조건을 부가하고, 노즐 상단의 토출 영역의 경계는 모든 유동변수의 구배가 없는 연속조건을 부여하였다.

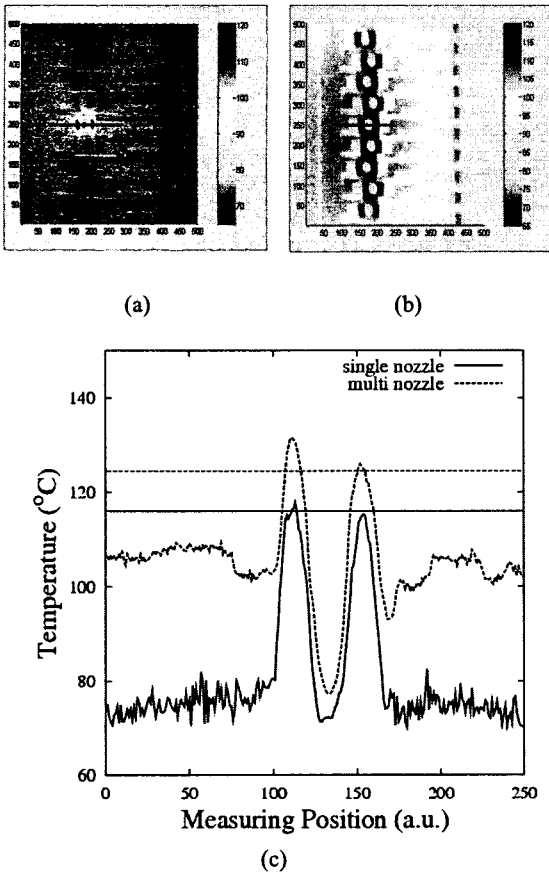


Fig. 6 IR images of a back shooter thermal inkjet print head, (a) single nozzle firing, (b) multiple nozzle firings, (c) comparison of the IR temperature measurements with the lumped model results (straight lines)

3. 결과 및 토의

3.1 온도측정 결과와 집중질량 열 모델링

복수의 채널에 전기신호를 가할 때 잉크젯 프린트헤드 내의 히터 박막 부위의 평균온도의 상승을 적외선 센서를 이용 측정하였다. Fig. 2와 같이 가시화 샘플을 위치시켜 상부에 위치한 IR 카메라를 이용하여 챔버 밑 쪽으로부터 IR 영상을 획득하였다. 복수의 채널이 일정 주파수로 지속적으로 구동될 때의 헤드의 평균 온도의 상승을 측정하기 위해, 실제의 펄스 신호 대신에 약 2.0 V의 직류 전압을 히터에 가하였다. 이 전압 값은 20 kHz의 주파수로 구동할 경우에 해당한다. 이 전압 값은 20 kHz의 주파수로 구동할 경우에 해당한다. Fig. 6(a)는 단위채널만을 구동할 때의 히터 부위의 IR

영상을 보여준다. 단위 채널의 챔버 벽면에 위치한 두 개의 직사각형 히터가 가열되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6(b)는 모두 9개의 채널을 구동할 때의 히터 부위의 IR 영상을 보여준다. 이러한 IR 영상의 방사율 데이터로부터 박막 히터의 정상상태 온도분포를 구하여 그림에 표시된 위치에서의 온도 프로파일을 Fig. 6(c)에 나타내었다. 열 집중질량 모델로부터 얻은 히터 박막의 온도는 Fig. 6(c)에 직선으로 표시하여 실험과 비교하였다. 단일 채널만을 구동할 때 히터 주위의 평균 온도는 약 75 °C이며, 이는 적외선 센서의 정확성을 높이기 위해 가시화 샘플을 65 °C까지 예열한 상태에서 측정한 값이다. 9개의 채널을 동시에 구동하면 히터 주위 평균 온도는 100 °C 이상이 된다. 9개의 채널이 동시에 구동될 때 집중질량 열 모델은 단위 채널 구동에 비해 약 8.5 °C의 온도 증가를 예측하였는데, 이는 적외선 센서 측정 결과와 잘 일치하였다.

3.2 탑슈터 형 헤드의 채널간 간섭현상

기포 성장방향과 액적 분사방향이 같은 탑슈터 형 헤드[Fig. 1(b)]의 채널간 간섭 현상을 R_f - L 네트워크를 구성하여 해석하였다. 집중질량 유동 모델을 검증하기 위하여 Flow3D를 이용한 3차원 수치해석도 수행하였다. Fig. 7은 왼쪽의 노즐에서의 버블 팽창유동의 영향으로 인접한 오른쪽 노즐의 미니스커스가 상승하는 모습을 보여주고 있다. 채널의 입구는 인접 채널의 입구와 연결 채널과 매니폴드를 통해 연결되어 있으므로(Fig. 4), 채널간 간섭현상을 정확히 예측하기 위해서는 연결 채널과 매니폴드의 R_f 와 L 값들을 정확히 산정하여야 한다. 이를 위해 연결 채널과 매니폴드의 R_f - L 값을 입구의 직경을 이용하여 우선 계산한 뒤, 3차원 수치해석 결과와 비교하여 그 값을 보정하였다.

채널간 간섭현상은 인접한 노즐에서의 미니스커스의 궤적을 추적하여 살펴볼 수 있다. 미니스커스의 위치는 미니스커스의 최대 또는 최소 위치를 의미한다. 표면 응답법을 이용해 집중질량 모델의 결과가 3차원 수치해석 결과와 일치하도록 R_f - L 의 최적 값을 찾았다. R_f 의 경우는 입구 직경을 이용해 얻은 값보다 약 1/100 정도 감소시켰는데, 이는 채널과 매니폴드에는 입구처럼 점성 저항이 그다지 크게 작용하지 않기 때문이다. 유동 관성 L 은 약 1/20 정도로 감소시켰다. 3차원 수치해석 결과와 비교하여 보정하는 정도가 이렇게 상당히 큰 이유는 집중질량 모델에서는 Fig. 4와 같이 매우 적은 수의 요소로 모델링을 하였기 때문이다.

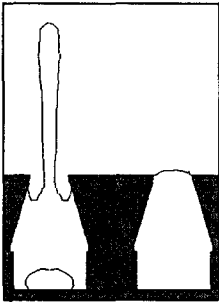


Fig. 7 Meniscus motion simulated by using Flow3D

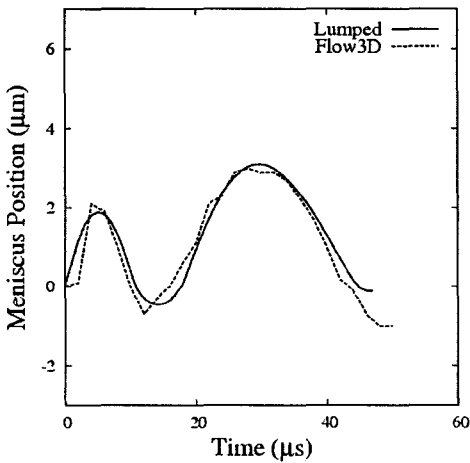


Fig. 8 Meniscus oscillations of the adjacent nozzle due to the crosstalk of a top shooter thermal inkjet print head

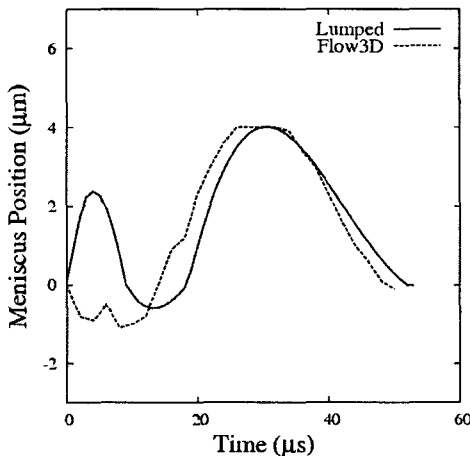


Fig. 9 Meniscus oscillations of the adjacent nozzle due to the crosstalk of a back shooter thermal inkjet print head

요소의 수를 늘리면 보정하는 차이를 줄일 수 있을 것이다. 하지만 비록 적은 수의 요소로 모델링을 했어도, 그 요소의 등가 점성계수 및 등가 관성계수인 R_fL 값을 Poisuille 의 이론이나 실험 값 또는 3 차원 수치해석 결과와 비교하여 정확히 보정을 한다면 물리적으로 의미가 있는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 매니폴드와 연결 채널의 R_fL 값들을 보정한 결과, Fig. 8 에 나타냈듯이 집중질량 유동 모델 결과는 수치해석 결과를 잘 재현하였다. 미니스커스의 진동에서 두 개의 봉우리가 존재하였다. 두 번째의 미니스커스 진동 정점이 첫 번째의 정점보다 높았다.

3.3 백슈터 형 헤드의 채널간 간섭현상

기포 성장방향과 액적 분사방향이 반대인 백슈터 형 헤드[Fig. 1(a)]의 채널간 간섭 현상을 R_fL 네트워크를 구성하여 해석하였다. 연결 채널과 매니폴드의 R_fL 값을 보정한 뒤 집중질량 유동 모델은 Fig. 9 에서 비교적 3 차원 해석결과를 비교적 잘 재현하지만, 미니스커스 거동의 첫 번째 봉우리는 과대 예측하였다. 이러한 미니스커스 진동의 첫 번째 봉우리는 3 차원 수치해석에서는 관찰되지는 않았다. 이러한 집중질량 유동 모델과 3 차원 해석결과와의 차이는 집중질량 모델에서 입구 유로에서의 비선형 유동 저항을 무시한 점에 기인한 것으로 판단된다. 백슈터 형 헤드에서는 매우 좁은 입구 유로가 존재하기 때문에, 단면 수축과 단면 확장에 따른 비선형 유동 저항 성분이 존재할 가능성이 크다. 이러한 비선형 유동 저항이 채널간 상호간섭 작용을 방해하여, 초기의 미니스커스의 진동 성분이 감소되는 것으로 보인다. 위의 유로 입구에서의 단면 수축 및 확장에 의한 유동 저항성분은 집중질량 모델에서는 고려하지 않았는데, 본 연구에서는 식 (7)~(10)을 푸는 대신, 선형 회로 시뮬레이터 PLECS 를 이용해 해를 구하였기 때문이다.

유동 저항 영향의 고려 유무가 해석 결과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 단위 채널의 유동을 전기회로 시뮬레이터를 사용하지 않고 식 (7)~(10)을 직접 풀어 살펴보았다. Fig. 10 은 압력손실계수 K_{inlet} 의 값에 따른 입구를 지나는 유량의 변화를 나타내고 있다. 일반적으로 K_{inlet} 은 위치에 따라 변하고 레이놀즈 수의 함수지만, 본 잉크젯 헤드에서의 대표적인 값으로 1.0 을 사용하였다. $K_{inlet} = 1.0$ 일 때 분사 시점에서 입구를 지나는 유량의 최대치는 $K_{inlet} = 0$ 일 때에 비해 13%가 감소하고, 리필 시점에서는 38% 감소하였다. 이러한 입구를 지나는 유량의 감소로 인해 인근 노즐의 미니스커스의 진동의 첫 번째 봉우리 출현을 지연시키는

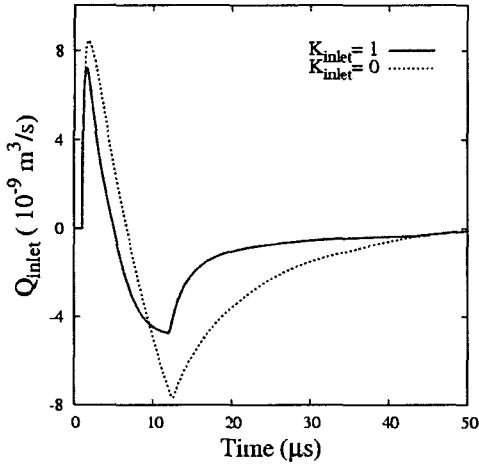


Fig. 10 Effects of the pressure loss coefficient of the inlet, K_{inlet} on the flow rate through the inlet

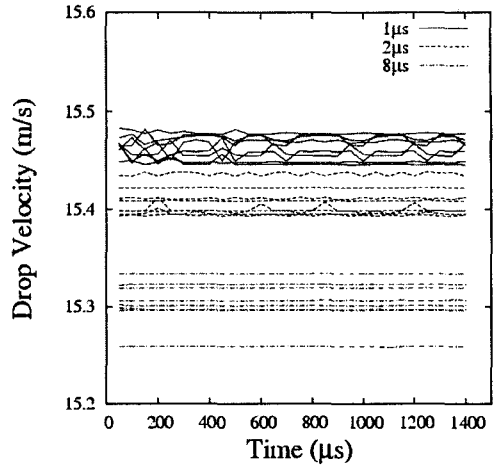


Fig. 12 Variations of the velocities of drop ejection for three different time delays from lumped model results

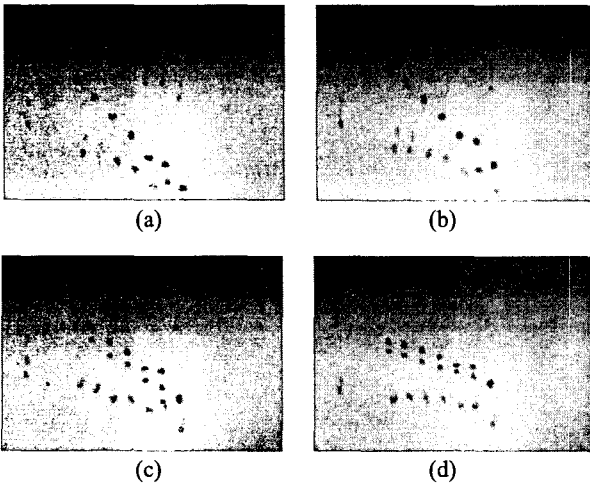


Fig. 11 Photographs showing droplets ejected from the ten nozzles; (a) time delay between successive firings is $8 \mu s$, (b) $7 \mu s$, (c) $5 \mu s$, (d) $2 \mu s$

것으로 판단된다. 이러한 결과는 백슈터 헤드의 미니스커스 진동의 첫 번째 봉우리에 대한 잘못된 예측이 입구에서의 유동 저항 성분의 무시에서 기인한다는 사실을 뒷받침한다. 입구가 비교적 넓은 탭슈터 헤드의 경우, 이러한 입구에서의 유동 저항 성분이 작기 때문에 집중질량 유동 모델이 3 차원 수치해석 결과를 잘 예측하게 된다. 본 연구에서는 선형 전기동기회로만을 고려하였는데, 가변저항과 같은 비선형 요소도 해석 가능한 전기회로 시뮬레이터를 사용하여 비선형 유동 저항 영향

을 제대로 반영할 필요가 있다.

3.4 액적 분사 가시화 실험결과

Fig. 2의 액적 분사 가시화 실험장치와 직접 제작한 백슈터 형 돛젯 헤드 가시화 샘플을 사용하여 열 개의 채널에서 일정 시간 간격을 갖고 순차적으로 분사되는 액적들의 거동을 관찰하였다. 각 채널은 10 kHz 의 주파수로 연속적으로 구동하였다. Fig. 11은 열 개의 채널에서 연속적으로 액적이 분사되는 순간을 보여주고 있다. 연속적인 분사 사이의 시간 간격이 $8 \mu s$ 정도로 충분히 길 경우, 액적 형상이 선명하게 분간되는 정상적인 분사가 관찰되었다[Fig. 11(a)]. 빠른 속도의 인쇄를 위해서는 채널간 구동 시간 간격은 점차 짧아져야 한다. 시간 간격을 $5 \mu s$ 로 감소시키면, 액적 분사 속도의 과도적 비균일 특성으로 인해 두 개의 액적으로 보이는 비정상적인 분사 현상이 관찰되었다[Fig. 11(c)]. 시간 간격을 $2 \mu s$ 로 더 줄이면 비정상적인 두 개의 액적 분사 모드는 더욱 심해진다. 이러한 현상은 빠른 구동 속도에서 채널 간 유동 간섭현상에 심해져 미니스커스의 진동이 증대되었기 때문에 나타난다고 판단된다. 이러한 액적 분사 속도가 일정하지 않아 액적이 두 개로 나타나는 불안정한 양태는 결국 인쇄 품질 저하의 원인이 될 수 있다. 빠른 인쇄속도, 즉 채널간 구동 신호 사이의 시간 간격이 작아짐에 따라 비정상적으로 두 개의 액적이 형성되는 현상을 개선하기 위해서는 이의 원인을 명확히 파악하여야 한다. 이러한 구동 시간 간격이 액적 분사성능에 미치는

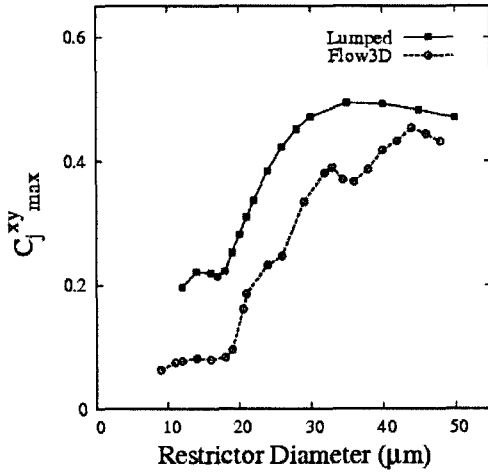


Fig. 13 Cross-correlation versus the restrictor diameter

영향을 3 차원 수치해석을 통해 규명하기는 힘들므로, 집중질량 유동 모델을 이용해 10 개의 채널을 연속적으로 분사할 때의 시간 간격의 영향을 살펴보았다.

Fig. 12 는 연속적으로 분사될 때 액적 속도의 변화를 각기 다른 시간 간격에 대해 보여주고 있다. 속도 값은 10 개의 채널을 일정 시간 간격을 갖고 순차적으로 구동시키면서, 각 채널의 노즐에서의 액적의 위치를 액적의 분리를 고려하지 않은 채 계산하여 액적의 최대 위치와 그에 도달하는 시간으로부터 구하였다. 시간 간격이 8 μs 정도로 충분히 길 경우, 노즐마다 분사속도는 0.1 m/s 정도의 편차는 있었지만 모든 노즐에서의 속도는 시간에 대해서는 거의 일정하게 유지되었다. 따라서 정상적인 액적의 분사를 예상할 수 있다. 시간차를 2 μs 로 감소시켰을 때, 분사 속도가 시간에 따라 변하는 것이 관찰되었다. 이러한 분사 속도의 과도적 변화는 채널간 간섭현상의 증대와 미니스커스 진동의 증대에 기인한다고 여겨진다. 시간 간격이 1 μs 처럼 더욱 짧아질 경우, 속도의 변화는 더욱 급격히 증대하였다. 따라서 실험에서 관찰된 비정상적으로 두 개의 액적으로 보이는 현상은 이러한 채널간 간섭현상의 증대로 인한 미니스커스의 진동 심화현상과 관련된다고 볼 수 있다. 시간 간격이 감소할수록 액적의 분사 속도가 다소 증가하는 데, 이는 분사 가시화 실험에서도 관찰되었다.

3.5 간섭현상의 정량화 및 저감 설계

제안된 집중질량 모델을 활용하여 복수의 채널

이 구동되는 경우에 프린트헤드의 상호간섭을 최소화하는 유로구조를 설계하고자 하였다. 이를 위해 우선은 상호간섭 정도를 정량화할 필요가 있다. 이 상호간섭의 정도는 식 (12)에서 정의된 표준화된 교차 상관계수의 값으로 정량화가 가능하다.

$$C_j^{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i y_{i+j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m y_i^2}} \quad (12)$$

인접한 두 개의 채널의 노즐에서의 속도 x, y 로부터 지연시간 j 에서의 교차 상관계수를 구하고, 표준화시킨 뒤 그 최대값을 구하였다. 주요 유로구조 중에서도 입구의 면적에 따라 상호간섭이 큰 영향을 받은 Poon and Lee⁽²⁾에 의해 실험적으로 관찰되었다. 본 연구에서는 입구의 길이는 고정시킨 채, 실린더 형 입구의 직경에 따라 상호간섭의 정도가 어떻게 변하는지 관찰하였다. Fig. 13 은 Flow3D 를 이용한 3 차원 수치해석과 집중질량 모델 결과들로부터 입구 직경의 변화에 따른 교차 상관계수의 최대값의 변화를 보여주고 있다. 3 차원 수치해석 결과에서는 두 개의 인접 채널의 노즐 부위의 중심 위치에서 측정된 z -방향 속도 성분을 이용하여 교차 상관계수를 구하였다. 영차원 모델인 집중질량 모델에서는 특정위치에서의 속도 정보를 구할 수는 없고, 노즐 질점에서의 평균 분사 속도를 서로 인접한 두 개의 노즐에서 각각 구하고, 이를 이용하여 교차 상관계수를 계산하였다. 따라서 표준화된 교차 상관계수의 최대치의 값은 3 차원 수치해석과 집중질량 모델 결과들에서 일정 정도 차이가 존재하였다.

Fig. 13 의 집중질량 모델 결과의 경우, 입구 직경이 약 19 μm 보다 작을 때 교차 상관계수가 0.2 정도로 낮게 유지되었다. 입구 직경이 이 값보다 커지게 되면 교차 상관계수의 값이 급격히 증가하다가 입구 직경이 35 μm 정도에서 0.5 정도로 포화되다가 약간 감소하는 경향을 보여주고 있다. 3 차원 수치해석 결과도 교차 상관계수의 절대값은 집중질량 모델과는 일정 정도 차이가 있으나, 어느 일정한 값에서 교차 상관계수가 급격히 증가하는 현상을 그대로 잘 예측해주고 있다. 입구 직경의 변화에 따라 채널간 상호간섭이 허용할만한 수준에서 급격히 증가하는 시점에 임계치가 존재함을 알 수 있다. 바람직하지 않은 채널간 상호간섭을 피하기 위해서는 입구 직경은 19 μm 보다 작

을 필요가 있다. 하지만 입구 직경을 지나치게 줄이면 잉크의 리필이 방해되어 프린트헤드의 구동 주파수가 저하되는 단점이 있다. 따라서 입구 직경은 잉크의 토출 속도 유지, 채널간 간섭현상 억제, 리필 속도 유지 등을 감안해 최적의 값을 선정하여야 한다. 가능하면 임계 치수 가까이 입구 직경을 선정할 필요가 있다.

교차 상관계수에 대한 3 차원 수치해석 결과와 집중질량 모델 예측의 차이는 교차 상관계수를 구할 때 사용한 속도 데이터의 취득 방법의 차이, 집중질량 모델에서 입구 쪽에서의 비선형 유동 저항 무시의 영향에도 기인한다고 여겨진다. 그럼에도 불구하고 집중질량 모델은 입구 직경이 어느 임계치를 지나면 상호간섭 현상이 급격히 심해지는 현상을 비교적 정확히 예측함으로써, 허용 가능한 상호간섭에 해당하는 유로 구조의 임계치를 결정하는 데 유효한 수단임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

열 잉크젯 헤드의 채널간 간섭현상을 예측할 수 있는 집중질량 모델을 제안하였다. 집중질량 열 모델을 이용하여 복수의 채널이 구동되는 경우에 프린트헤드의 과열 특성을 예측하였고, 이를 적외선 센서를 이용한 온도측정실험과 비교하여 검증하였다. 집중질량 유동 모델을 이용하여 상호간섭에 의해 노즐에서 잉크의 미니스커스가 진동하는 현상을 예측하였다. 미니스커스 진동에 대한 3 차원 수치해석 결과와의 비교를 통해 채널 사이의 연결 유로에서의 점성 저항과 유동관성의 정확한 값을 구하였다. 그리고 순차적으로 복수의 채널을 구동할 때 채널간 구동 시간 간격이 액적의 분사의 불안정성에 미치는 영향을 집중질량 모델을 이용 관찰하였다. 이를 통해 액적 분사 가시화 실험에서 나타난 작은 시간 간격에서의 두 개의 액적이 나타나는 현상이 상호간섭 심화에 따른 미니스커스 진동 및 분사 속도의 시간에 따른 변동에 기인함을 확인하였다.

3 차원 수치해석과 집중질량 유동 모델해석을 통해 입구의 크기 감소에 따른 채널간 유동간섭현상의 억제를 관찰하였다. 집중질량 유동 모델은 입구 크기가 어느 임계치를 지나면 채널간 상호간섭이 급격히 심해지는 현상을 예측함을 확인하였다. 집중질량 모델은 계산 시간이 수 분 이내로 매우 짧음에도 불구하고, 복수의 채널이 동시 구동될 때의 과열 특성, 채널간의 상호간섭 현상을 예측하는 매우 효율적인 설계 도구임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 열적 상호간섭과 유동의 상호간섭을 따

로 살펴보았는데, 이는 열전달과 유동장을 포함한 복합장을 계산하기가 무척 힘들기 때문이다. 열, 물질 전달을 고려한 채널간 상호간섭을 정확히 해석하는 것은 추후의 과제가 될 것이다.

후 기

잉크젯 헤드를 실제 제작하고, 본 논문 관련 실험에 많은 도움을 주신 잉크젯 탐원 전체와 오용수, 신승주 박사님께 감사드립니다.

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) Poon, C. C. and Lee, F. C., 1996, "Crosstalk Study of Thermal Inkjet Print Head from Real-Time Drop Size and Velocity Measurements," *Recent Progress in Ink-Jet Technologies I*, pp. 210~214.
- (3) Seitz, H. and Heinzl, J., 2004, "Modelling of a Microfluidic Device with Piezoelectric Actuators," *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 1140~1147.
- (4) Lee, Y.-S., 2006, "Lumped Modeling of Thermal Inkjet Print Head," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 10, pp. 942~949.
- (5) Rembe, C., aus der Wiesche, S. and Hofer, E. P., 2000, "Thermal Ink Jet Dynamics: Modeling, Simulation, and Testing," *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, No. 3, pp. 525~532.
- (6) www.plexim.com
- (7) 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.
- (8) Asai, A., 1991, "Bubble Dynamics in Boiling Under High Heat Flux Pulse Heating," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 973~979.
- (9) The Society of Chemical Engineers Japan, 1988, *Chemical Engineers' Handbook 5th Edition*, Maruzen.
- (10) Beasley, J. D., 1977, "Model for Fluid Ejection and Refill in an Impulse Drive Jet," *Photographic Science and Engineering*, Vol. 21, pp. 78~82.
- (11) Kyser, E. L., Collins, L. F. and Herbert, N., 1981, "Design of an Impulse Ink Jet," *Journal of Applied Photographic Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 73~79.
- (12) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- (13) Brescia, R. and Sartori, A., 1989, "Piezo Ink Jet Simulations in the Frequency and Time Domains," *Journal of Imaging Technology*, Vol. 15, No. 5, pp. 219~223.