

< 논문 >

4-bit 디지털 미소분사기의 설계변수와 토출성능간의 영향분석에 관한 실험적 연구

강 태 구* · 조 영 호†
(2004년 6월 21일 접수, 2004년 12월 23일 심사완료)

Design Parameters and Experimental Performance Evaluation of 4-bit Digital Multi-heater Microinjector

Tae Goo Kang and Young-Ho Cho

Key Words: Thermal Microfluid Injector(가열방식미소분사기), Microheater Array(미소저항열), Droplet Volume Adjustment(분사액적 크기조절), Inkjet Printer(잉크젯 프린터)

Abstract

We present the design, fabrication and experimental results of 4-bit digital microinjectors, whose ejected droplet volumes are adjusted by the digital operation of a 4-bit microheater array. We design the reference microinjectors as well as its comparative test structures. In the fabrication process, we use a five-mask micromachining process and the total chip size of the fabricated microinjector is $7,640\mu\text{m} \times 5,260\mu\text{m}$. We measure the ejected droplet volumes and velocities, which are adjusted from $12.1 \pm 1.0 \sim 55.6 \pm 4.7\text{pl}$ and $2.3 \pm 0.1 \sim 15.7 \pm 0.8\text{m/s}$, respectively, depending on the 15 possible combinations of 4-bit microheater array. We also experimentally characterize the effect of geometric variation including the microheater size, inter-microheater gap, microchannel width and sequential operation of microheater array on the ejected droplet volume and velocity. Among these parameters, we find that the microheater size is the most dominant parameter affected to the ejected droplet volumes and velocities. Thus, the present microinjector has a potential for application to the high-resolution inkjet printers with multiple gray levels or high-precision fluid injectors with variable volume control.

1. 서 론

최근 들어 칼라 이미지나 사진 등의 저가 인쇄를 위한 사무실 또는 가정용 고해상도 잉크젯 프린터에 관한 관심이 증대되고 있다. 잉크젯 프린터헤드의 성능을 좌우하는 가장 기본적인 두 가지 요소는 해상도(인쇄품질)와 인쇄 속도이다. 잉크젯 프린터헤드에 관한 기존의 연구는 미소위성 분사액적 (microsatellite droplet)⁽¹⁾을 제거하거나

또는, 분사액적 크기를 균일하게 유지⁽²⁾하도록 하는 등 주로 인쇄된 이미지의 품질 향상에 집중되어 왔고, 잉크젯 프린터의 인쇄 속도 향상을 위한 심도 있는 연구는 미비한 실정이다.

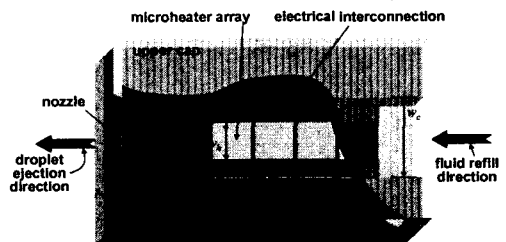


Fig. 1 Perspective view of the multi-heater microinjectors

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690

* 한국과학기술원, 디지털나노구동연구단

실제 압전형 잉크젯 프린터 헤드는 이미 입력 전기 신호의 수를 조절하는 방법을 사용하여 토출 액적의 부피를 조절함으로써 인쇄 속도 및 인쇄 품질의 향상을 꾀하고 있으나,⁽³⁾ 가열방식 잉크젯프린터 헤드의 경우 이러한 입력 신호 조절에 의한 토출액적의 부피조절에는 한계가 있다. 즉, 가열방식 잉크젯 프린터 헤드는 입력 신호를 사용하여 토출액적의 부피를 조절하는 경우 액적을 토출하기 위한 입력신호의 최소 크기와 마이크로 히터가 손상되지 않도록 하는 입력신호의 최대 크기 사이의 폭에 의해 토출액적의 부피가 조절되는 제한이 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 가열방식 잉크젯 프린터의 한계를 극복하기 위하여 디지털 동작방식의 고해상도 잉크젯 프린터헤드용 미소저항열 구조의 디지털 미소분사기^(4,5) (Fig. 1)를 제안한다. 또한, 본 연구에서는 제안한 디지털 미소분사기의 주요 설계변수들과 분사액적 크기 간의 상관관계를 실험적으로 분석하기 위하여, 4-bit 디지털 미소분사기(Fig. 2)의 기본모델과 이로부터 미소히터 크기, 미소히터 간격 및 미소채널 폭 등 주요 설계변수들이 변화된 형태의 시제품들을 새로이 설계, 제작하고 이들의 토출시험을 통해 설계변수들이 분사액적 크기 및 성능에 미치는 영향을 실험적으로 제시한다.

2. 설계 및 이론적 성능 예측

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 총 4개의 미소저항열로 구성된 미소저항열을 가지는 미소분사기의 개념도이다. 동작원리를 살펴보면, Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 미소채널 내에 구성되어 있는 미소저항열의 한 개[Fig. 2(a)] 또는 여러 개[Fig. 2(b)]에 각각 동일한 입력 전기신호를 디지털방식으로 가하여 주면, 입력 전기신호가 가하여진 미소저항열의 개수 및 그 조합에 따라 분사되는 분사액적의 크기가 달라지도록 설계되어 있다.

이러한 미소저항열 구조를 가지는 미소분사기의 성능을 이론적으로 예측하기 위하여 본 논문에서는 버블(bubble)의 성장과 미소채널 내에서의 잉크 유동에 관한 기존의 잉크젯 프린터헤드의 이론적 모델⁽⁶⁾을 바탕으로 미소저항열을 사용하는 경우에 추가적으로 고려하여야 할 부분들을 개선하여 미소저항이 미소저항열의 구조를 가질

때에도 적용할 수 있도록 하였다. 일반적으로 발열방식의 잉크젯 프린터 헤드의 작동 주기는 크게 3단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계는 미소버블이 발생될 때 까지 미소저항이 열을 발생시키는 단계이며, 두 번째 단계는 미소저항의 발열로 인해 미소버블이 성장 및 소멸하여 분사액적을 형성하는 단계이며, 마지막 단계는 표면장력에 의해 잉크가 다시 채워지는 단계이다.

먼저, 첫 번째 단계는 미소저항에 흐르는 전류로 인해 발생하는 열이 미소저항으로부터 잉크와 바닥으로 전도되는 과정으로서, 본 논문에서는 이러한 열전달 과정을 1차원 열전도현상으로서 해석하였다. 가열면적에 비해 미소저항의 두께와 가열시간(~1μsec)동안 열이 전도되어 가는 거리가 매우 짧기 때문에 1차원 열전도현상으로 가정할 수 있으며, 물질 상수들의 온도에 따른 변화와 대류에 의한 효과는 무시하였다.

이러한 경우, 미소저항에서의 단위 부피당 열 발생율은 다음과 같다.

$$q = \left(\frac{V_{op}^2}{R_H} \right) \frac{1}{S_H d_H} \quad (1)$$

여기서, V_{op} 는 동작 전압을, R_H 는 미소저항의 저항값을, S_H 는 미소저항의 발열 면적을, 그리고 d_H 는 미소저항의 두께를 각각 나타낸다. 경계조건으로는 잉크 층의 최상단과 바닥 실리콘의 최하단에 등온조건을 적용하였으며, 식 (1)과 경계조건을사용하여 1차원 열전도현상을 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 시간에 따른 온도분포를 계산하였다.

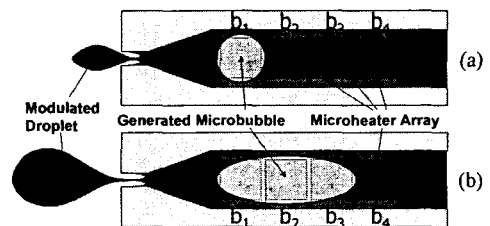


Fig. 2 4-bit digital operation of multi-heater microinjector (Fig. 1) for droplet volume modulation: (a) 4-bit digital operation mode of $(b_1, b_2, b_3, b_4) = (1, 0, 0, 0)$; (b) 4-bit digital operation mode of $(b_1, b_2, b_3, b_4) = (1, 1, 1, 0)$

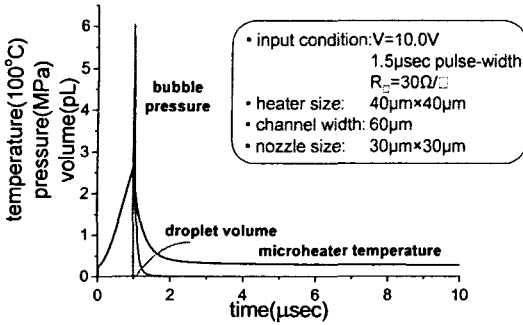


Fig. 3 Theoretical estimation of the microheater temperature, the bubble pressure and the droplet volume for the operation mode of (1000)

일반적으로, 잉크젯 프린터헤드에서는 매우 높은 열속(heat flux, $10^7 \sim 10^8 \text{W/m}^2$)이 매우 짧은 시간($\sim 1 \mu\text{sec}$)동안 가해지는데, 이러한 경우 일반적으로 액체가 끓기 시작하는 온도인 비등점보다 훨씬 높은 온도인 약 270°C ⁽⁶⁾에서 미소버블이 생성되기 시작한다. 즉, 앞서의 식 (1)을 사용하여 미소저항의 표면온도가 270°C 에 도달하게 되면, 미소저항의 표면에서 미소버블이 발생하는 것으로 간주하여 미소저항 표면의 경계조건을 단열조건으로 변경하고, 입력전압을 제거하였다. 이 때부터 미소저항의 온도는 감소하기 시작하며, 이상과 같이 하여 미소저항의 표면온도를 시간에 따라 구할 수 있다.

두 번째 단계는 미소버블의 압력을 예측하는 것이다. 미소버블의 압력은 미소버블 내의 온도 (T_v)와 압력(P_v)이 균일하다고 가정하면 Clapeyron-Clausius의 식⁽⁶⁾으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$P_v = P_{atm} \exp \left[\frac{wQ_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_v} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, P_{atm} 은 대기압(101.3kPa)을, R 은 기체상수(gas constant, $8.3148\text{J/mol}\cdot\text{K}$)를, T_b 는 잉크의 비등점을, 그리고, w 와 Q_{vap} 및 v 는 미소버블의 분자량(molecular weight)과 잠열(heat of vaporization) 및 밀도를 각각 나타낸다. 물의 경우 비등점에서의 $T_b=100^\circ\text{C}$, $w=18 \times 10^{-3}\text{kg/mol}$, $Q_{vap}=2.26 \times 10^6\text{J/kg}$ 을 각각 이용하였다. 식 (2)와 앞서 계산한 시간에 따른 온도변화를 이용하여 시간에 따른 미소버블내의 압력을 예측할 수 있다.

Table 1 Dimensions of the reference test structure (R) in Fig. 1

Microheater Size ($l_h \times w_h \times t_h$)	$40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m} \times 100\text{nm}$
Inter-Microheater Gap	$3\mu\text{m}$
Channel Width (w_c)	$60\mu\text{m}$
Channel Length (l_c)	$250\mu\text{m}$
Channel Depth	$30\mu\text{m}$
Length from Microheater to Nozzle (l_{hn})	$50\mu\text{m}$
Nozzle Length (l_n)	$30\mu\text{m}$
Nozzle Width (w_n)	$30\mu\text{m}$

Table 2 Design variations of comparative test structures*

Test Structures	Heater Size, ($l_h \times w_h$)
H1	$30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
H2	$50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
Test Structures	Inter-Microheater Gap (d)
G1	$5\mu\text{m}$
G2	$10\mu\text{m}$
Test Structures	Channel Width (w_c)
W1	$80\mu\text{m}$
W2	$100\mu\text{m}$

* All Dimensions unless specified are identical with the dimensions of reference test structure in Table 1.

다음으로 이상과 같이 예측된 미소버블의 압력을 채널 단면에서의 등가압력으로 전환한다. 유체의 점성 마찰(viscous friction)이 없다고 가정하면, 미소채널의 끝단면에서의 등가압력은 다음과 같다.

$$P_c = \frac{1}{2} \frac{A_b}{A_c} P_v \quad (3)$$

여기서, P_c 는 채널단면에서의 등가압력을, 그리고, A_b 와 A_c 는 미소버블의 면적과 채널의 단면적을 각각 나타낸다.

마지막으로, 이상과 같이 구하여진 채널단면에서의 등가압력과 아래의 식 (4)를 이용하여 미소노즐로부터 분사되는 액적의 부피를 예측⁽⁷⁾한다.

$$\rho A \frac{d^2 V}{dt^2} + \eta B \frac{dV}{dt} = P_c - P_{atm} \quad (4)$$

여기서, ρ 와 η 는 각각 물의 밀도와 점성계수를 나타내며, V 는 노즐끝단을 향해 이동한 잉크

의 부피(volume displacement)를 나타낸다. 또한, 식 (4)의 A 와 B 는 각각 식(5)와 식(6)에 나타낸 바와 같고⁽⁷⁾, 여기서, l 은 히터의 중심에서 노즐까지의 길이를 나타내며, $a(x)$ 및 $b(x)$ 는 채널의 폭과 높이를 각각 나타낸다.

$$A = \int_0^l \frac{1}{a(x)b(x)} dx \quad (5)$$

$$B = \int_0^l \frac{G(x)}{\{a(x)b(x)\}^2} dx \quad (6)$$

한편, 식(6)의 $G(x)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$G(x) \approx 12 \left[0.33 + 1.02 \left\{ \frac{a(x)}{b(x)} + \frac{b(x)}{a(x)} \right\} \right] \quad (7)$$

여기서, 잉크의 수축성(compressibility)과 잉크와 공기면 사이 및 잉크와 미소버블 사이의 표면장력(surface tension)은 무시하였다.

이상과 같은 이론적 해석을 바탕으로 본 논문에서는 동작하는 미소저항의 개수 및 그 조합에 따른 미소저항열의 온도와 미소버블내의 압력 및 토출되는 미소액적의 부피를 이론적으로 예측하여 그 결과로부터 미소분사기의 치수를 설계하였다. Fig. 3은 (1000) mode에 대한 해석결과를 나타낸다.

또한, 본 연구에서는 미소분사기의 성능을 결정하는 설계변수 중 미소히터 크기, 미소히터 간격 및 미소채널 폭 등 주요 설계변수들이 분사액적 크기 및 성능에 미치는 영향을 시험적으로 분석하기 위하여 Table 1의 기본형 분사기(reference injector, R)와 이를 기준으로 미소히터 크기, 미소히터 간격 및 미소채널 폭의 변화를 준 3종의 비

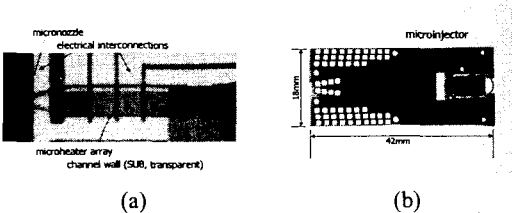


Fig. 4 Photographs of the fabricated microinjector: (a) top view of the microheater array and micronozzle; (b) microinjector attached to FPC (Flexible Printed Circuit)

교형 시험분사기 (Table 2) 등 총 4종의 미소분사기를 각각 설계, 제작하고 이들로부터 분사액적의 크기와 토출 속도를 측정하여 그 결과를 상호 비교 분석한다.

3. 제 작

본 연구에서 미소분사기를 제작함에 있어 개발한 바 있는 제작공정^(4,5) 중 절연공정 및 채널형성 공정을 수정/보완하였다. 히터의 전기적 절연을 위하여 실리콘질화막(두께 2000Å)을 증착하였으며, 채널상관의 재료 및 공정을 기존의 Pyrex유리를 epoxy접합하여 형성하던 것을 제작의 재현성 향상을 위해 30µm 두께의 negative type DFR (Dry Film PhotoResist, "KG5100", Kolon사)을 사용하여 형성하였다. Fig. 4(a)는 제작된 미소분사기의 상면 사진으로 미소히터열과 미소노즐을 나타내고 있으며, 전체 소자의 크기가 7,640µm×5,260µm로 제작된 미소분사기를 Fig. 4(b)와 같이 FPC Board (Flexible Printed Circuit Board)에 접합하여 성능시험을 수행하였다.

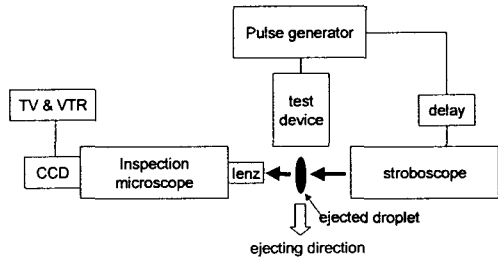


Fig. 5 Test apparatus for measuring droplet ejection

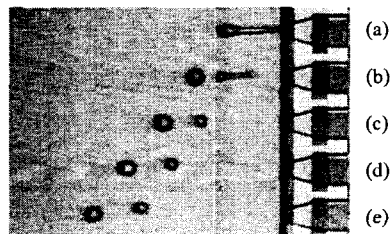


Fig. 6 Ejected droplet trajectory images for the digital operation mode of (1000) of the test structure G3: taken time of the trajectory images are after (a) 10sec; (b) 20sec; (c) 30sec; (d) 40sec; (e) 50sec after turn on the microheater

4. 시험결과 및 고찰

Fig. 5는 미소분사기의 분사액적의 크기(부피)와 속도를 측정하기 위한 성능시험 장치를 나타내며, 제작된 총 4종의 미소분사기는 동일한 전기신호(10V, 1.5 μ sec펄스폭의 1kHz 사각파형)를 사용하여 토출성능을 시험하였다.

토출성능 시험 결과 중 Fig. 6은 4-bit 미소분사기 G3(Table 2)의 (1000) mode 동작 시 토출된 분사액적의 궤도를 촬영한 것으로, 전기신호를 인가한 순간부터 10 μ sec에서 50 μ sec이후까지의 분사액적의 궤적을 10 μ sec 간격으로 촬영한 사진을 시간별로 나열한 것이다. 동일한 방법으로 총 4종의 미소분사기(Table 1, 2)에 대해 디지털 작동 mode별 동작 시 촬영한 토출사진을 분석하여 각각의 분사액적의 부피와 속도를 측정하였다.

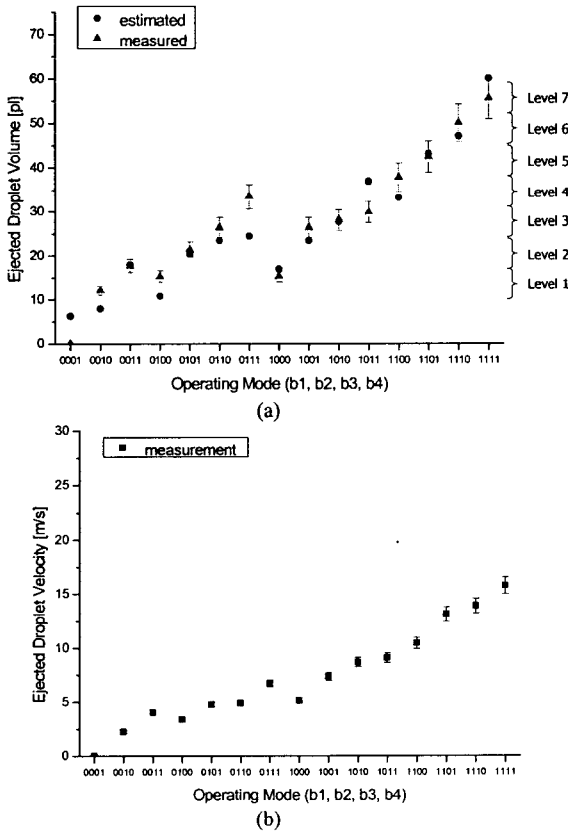


Fig. 7 Droplet volume and velocity measured from all 15 possible operation modes of the 4-bit digital operation: (a) droplet volume; (b) droplet velocity

Fig. 7은 기본형 미소분사기의 총 15가지 디지털 작동 mode에서 측정된 분사액적의 부피와 속도를 나타낸다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, 기본형 미소분사기의 경우, 총 15가지의 서로 다른 디지털 작동 동작을 통해 동일한 미소분사기에서 분사액적의 부피는 12.1 \pm 1.0~55.6 \pm 4.7pl까지,

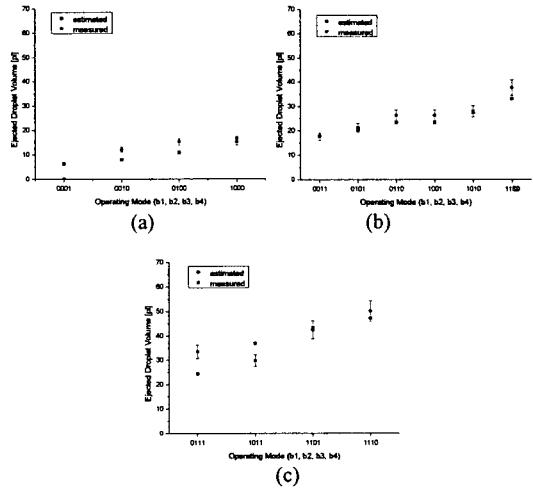


Fig. 8 Droplet volume classified by the number of active microheaters from all 15 possible operation mode of 4-bit digital operation of Fig. 6: (a) possible operation mode of one active microheater; (b) two active microheaters; (c) three active microheaters

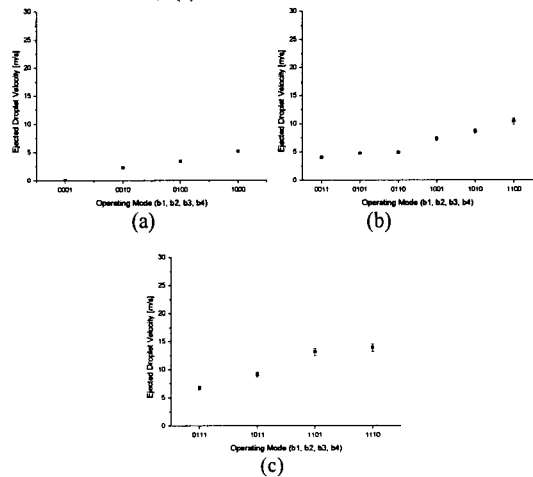


Fig. 9 Droplet velocity classified by the number of active microheaters from all 15 possible operation mode of 4-bit digital operation of Fig. 6: (a) possible operation mode of one active microheater; (b) two active microheaters; (c) three active microheaters

분사액적의 속도는 $2.3 \pm 0.1 \text{ m/s} \sim 15.7 \pm 0.8 \text{ m/s}$ 까지 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

이러한 분사액적의 부피 변화는 욱안으로 식별 가능한 크기(7pf)⁽³⁾를 기준으로 총 7 단계의 분사액적 크기 조절이 가능함을 뜻한다. 또한, Fig. 8과 Fig. 9는 각각 Fig. 7의 결과를 전기신호가 인가되는 미소히터의 개수에 따라 정리한 것으로, 이로부터 작동되는 미소히터의 개수가 같을 경우 작동되는 미소히터 위치가 노즐출구에 가까운 경우 분사되는 액적의 부피 및 속도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10에서 12까지는 앞서 기술한 설계변수인 미소히터의 크기(Test H, 표 2), 미소히터사이의 간격 (Test G) 및 미소채널의 폭(Test W) 변화에 따른 시험결과를 정리한 것이다. 먼저, Test H에서는 분사액적의 부피 및 속도가 모두 미소히터 크기에 비례하였으며, 이는 미소히터 크기가 히터표면에서 발생하는 미소버블 크기에 직접적인 영향을 미치기 때문으로 분석할 수 있다. 또한, Test G의 시험결과로부터 분사액적 부피는 미소히터 간격이 좁을수록, 분사액적 토출속도는 미소히터 간격이 넓을수록 증가하는 현상을 관찰하

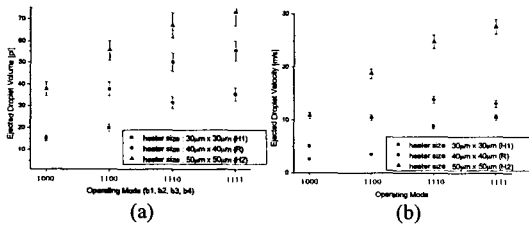


Fig. 10 Effect of the microheater size on the ejected droplet volume and velocity measured from the selected 4-bit digital operation of (1000), (1100), (1110), and (1111): (a) droplet volume; (b) droplet velocity

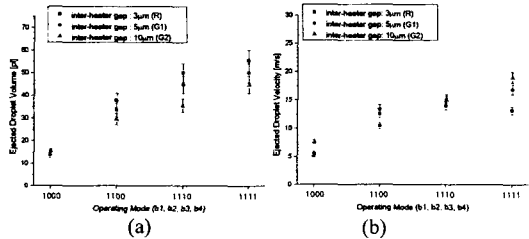


Fig. 11 Effect of the inter-microheater gap on the ejected droplet volume and velocity measured from the selected 4-bit digital operation of (1000), (1100), (1110), and (1111): (a) droplet volume; (b) droplet velocity

였으며, Test W에서는 분사액적의 부피 및 속도가 미소채널 폭에 반비례하는 결과를 얻었다. 또한, Fig. 10에서 12까지의 결과를 표 3에 정리한 결과, 본 연구에서 고려한 미소분사기의 3가지 주요 설계변수 중 미소히터 크기가 분사액적의 부피 및 토출속도에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 13은 미소히터 열을 구성하는 4개의 미소히터 각각에 입력 신호를 서로 0, 1.3, 2.3, 3.4μsec의 시간차를 두고 가하여 준 경우에 대한 분사액적의 부피 및 속도를 측정된 결과이다. Fig. 13에서 알 수 있는 바와 같이 분사액적의 크기 및 속도는 지연시간(delay time)이 증가할수록 줄어드는데, 그 이유는 미소버블이 각 미소히터 위에서 일정 시차를 두고 순차적으로 발생함으로 인해 유동교란이 발생하여 분사액적의 크기 및 속도가 줄어드는 것으로 판단된다.

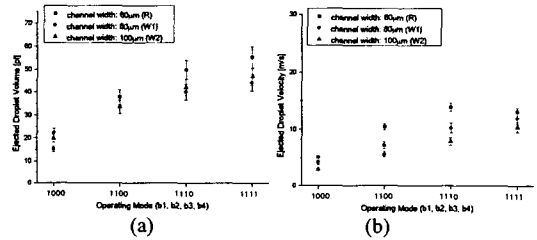


Fig. 12 Effect of the microchannel width on the ejected droplet volume and velocity measured from the selected 4-bit digital operation of (1000), (1100), (1110), and (1111): (a) droplet volume; (b) droplet velocity

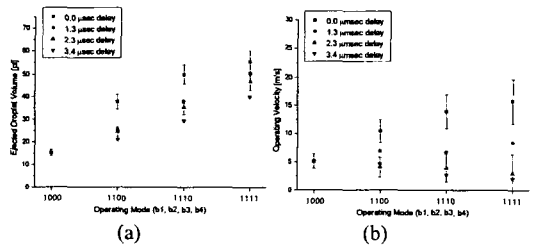


Fig. 13 Effect of the sequential operation of the microheater array on the ejected droplet volume and velocity measured from the selected 4-bit digital operation of (1000), (1100), (1110), and (1111) for the test structure of R: (a) droplet volume; (b) droplet velocity

Table 3 Comparison of the droplet volume and velocity measured from each test structures

Test Classification	H (microheater size)		G (inter-heater gap)		W (channel width)	
	H1	H2	G1	G2	W1	W2
Test Structure						
Geometry Changes (%) [*]	-25 ^{***}	+25	+67	+233	+33	+67
Changes of the Droplet Volume (%)	-1 ~ -48	+31 ~ +147	-10 ~ -11	-1 ~ -29	-11 ~ -20	-11 ~ -15
Changes of the Droplet Velocity (%)	-24 ~ -195	-162 ~ -427	+7 ~ +29	+9 ~ +48	-10 ~ -30	-20 ~ -45

* % geometry deviations to the reference geometries: for H, reference geometry is heater length; for G, inter-microheater gap, for W, microchannel width.

** % droplet volume deviations to the droplet volume measured from the reference test structures.

*** The '+' or '-' sign means increase or decrease of each quantity with respect to the reference values.

5. 결론

본 논문에서는 단일채널 내 4개 히터열의 4-bit 디지털 구동을 통하여 분사액적의 크기를 $12.1 \pm 1.0 \text{pl}$ 에서 $55.6 \pm 4.7 \text{pl}$ 까지 7단계이상으로 조절할 수 있는 디지털 미소분사기를 설계, 제작하고 그 성능을 시험적으로 분석하였다. 이론적 연구에 있어서 기존의 단일 히터를 사용하는 모델을 수정/보완하여 다수개의 히터를 사용하는 미소분사기에 적용 가능하도록 하였으며, 이를 바탕으로 4개의 히터가 단일 채널 내에 집적된 형태의 디지털 미소분사기를 설계하였다. 시험적 연구에 있어서, 이러한 4-bit 디지털 미소분사기의 토출액적의 부피와 토출 속도를 측정하여, 미소히터 크기, 미소히터 간격 및 미소채널 폭 등 3가지의 주요 설계변수들이 미소분사기의 토출액적 및 속도에 미치는 영향을 시험적으로 분석하여, 이상의 설계 변수 중 토출 성능에 가장 민감한 변수는 미소히터의 크기임을 밝혔다. 또한, 미소히터열의 순차적 작동이 토출액적 및 속도에 미치는 영향을 시험적으로 분석하였다. 이상의 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안하는 미소분사기 구조를 향후 고해상도 잉크젯 프린터에 적용할 경우 인쇄 속도 향상 및 인쇄품질 개선을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동 기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Tseng, F.-G., Kim, C.-J. and Ho, C.-M., 1998, "A Novel Microinjector with Virtual Chamber Neck," *Proc. MicroElectroMechanical Systems Workshop (MEMS'99)*, Heidelberg, Germany, pp. 57-62.
- (2) Lee, S.-W., Kim, H.-C., Kuk, K. K. and Oh, Y.-S., 2001, "A Monolithic Inkjet Print Head: DomeJet," *Proc. Proc. MicroElectroMechanical Systems Workshop (MEMS2001)*, Interlaken, Switzerland, pp. 515-518.
- (3) Temple, S., 1999, "Advances in Piezo Ink Jet Greyscale Technology," *Proc. 7th Annual European Ink Jet Printing Conference*, Barcelona, Spain.
- (4) Kang, T. G. and Cho, Y.-H., 2003, "Droplet Volume Adjustable Microinjectors Using a Microheater Array," *Proc. MicroElectroMechanical Systems Workshop (MEMS 2003)*, Kyoto, Japan, pp. 690-693.
- (5) Kang, T. G. and Cho, Y.-H., 2003, "Droplet Volume Adjustable Digital Microinjectors Using a Microheater Array," *Proc. 5th Korean MEMS Conference (KMEMS 2003)*, Jeju, Korea, pp. 271-276.
- (6) 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, No. 10, pp. 1794-1801.
- (7) Beasley, J. D., 1977, "Model for fluid ejection and refill in an impulse drive jet," *Photographic Science Engineering*, Vol. 21 pp. 78-82.