

# 1 차원 Lumped 모델을 이용한 산업용 잉크젯 프린팅 헤드 토출 특성 해석

심원철\*, 박성준#, 김영재\*, 박창성\*, 유영석\*, 정재우\*, 오용수\*

## Performance Analysis of the Industrial Inkjet Printing Head Using 1D Lumped Model

Won Chul Sim\*, Sung-Jun Park#, Young Jae Kim\*, Chang Sung Park\*,  
Young Seuck Yoo\*, Jae Woo Joung\* and Yong Soo Oh\*

### ABSTRACT

Jettability analysis using one-dimensional(1D) lumped parameter model has been investigated to design the industrial inkjet head with proper drop velocity and drop volume. By simplifying the inkjet head system into an equivalent electrical circuit, lumped model has been developed. Performance of the lumped model is verified by the comparison between measured results of droplet velocity and ejection volume and predicted value. Also, the jetting performance of an inkjet head is characterized by varying the design parameter and driving condition. As a result, simulation results shows good agreement with the experimentally measured value. The developed lumped model enables to easily understand the effect of dimension change and predict the jetting performance.

**Key Words** : Inkjet head (잉크젯 헤드), Jetting performance (토출 성능) 1D Lumped model (1 차원 Lumped 모델)

### 1. 서론

기존의 포토리소그래피 방식을 이용한 PCB 제작 공정은 복잡하고 원료 이용 효율이 낮으며 환경 오염 유발이 심한 문제점이 있다. 이를 극복하고자 최근 잉크젯 프린팅 기술을 LCD, OLED, PDP 등의 평판 디스플레이 분야, 금속 배선, 저항, 캐패시터, 인덕터, 트랜지스터 등 PCB 분야에 적용하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다.<sup>1</sup> 이중 금속 배선의 기본적인 개념은 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 은 또는 구리와 같은 금속 미립자를 분산시

킨 메탈 잉크를 기판 위에 토출하고 이를 건조 후 소성하여 배선을 형성하는 방법이다. 따라서 금속 패턴을 선택적으로 형성할 수 있으므로, 보다 환경 친화적이며 원재료 활용 측면에서 장점이 있다. 또한, 공정이 대폭적으로 생략되기 때문에 제조 원가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 이러한 잉크젯 프린팅 방식을 이용한 패턴링 기술을 다양한 분야에 적용하기 위해서는 기능성 잉크와 함께 신뢰성 있는 잉크젯 헤드 개발이 필수적이다.<sup>2</sup>

현재까지 개발되어 상업적으로 사용되고 있는 잉크젯 헤드의 구동 방식은 크게 열(Thermal) 방식

접수일: 2007년 3월 5일; 게재승인일: 2007년 9월 3일

\* 삼성전기 중앙연구소 eMD Center

# 교신저자: 삼성전기 중앙연구소 eMD Center

E-mail: sung-jun.park@samsung.com Tel. (031) 210-2576

과 압전(Piezoelectric) 방식으로 나눌 수 있다. 이중 압전 방식은 액추에이터(Actuator)의 제어성이 우수할 뿐 아니라 열 방식에 비하여 수계, 유기 용제 및 monomer 를 이용한 잉크에 적용이 가능하고, 온도 상승에 따른 잉크 물성의 변화를 가져오지 않기 때문에 산업용 헤드는 대부분 압전 방식을 채택하고 있다. 따라서 본 연구에서는 압전 방식의 헤드 중에서 가장 일반적으로 사용하는 굽힘 모드(Bend mode)로 구동되는 잉크젯 헤드의 해석 모델을 수행하였다. 현재 잉크젯의 토출 성능 해석을 위해서는 상용 코드(code)를 사용하여 잉크젯 형상에 부합하는 3 차원 모델링 후 격자(Mesh)를 나누고 경계 조건을 입력하여 계산을 진행하는 방법을 사용하고 있다.<sup>3</sup> 그러나 잉크젯 형상의 특징상 노즐 직경은 수십  $\mu\text{m}$  정도로서 가늘지만 체임버는 수백  $\mu\text{m}$  ~ 수천  $\mu\text{m}$  로서 상대적으로 큰 체적을 가지고 있다. 따라서 이를 정확하게 해석하기 위해서 조밀한 격자(Fine mesh)가 필요하여 전체 토출 해석 진행을 위해서는 수 일 정도 소요하므로 신속하게 설계 인자를 찾아내고 이를 최적화하는데 오랜 시간이 걸린다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 잉크젯 헤드의 성능을 해석하기 위한 이론적 해석 tool 을 확보하는 동시에 빠른 시간 내에 성능을 평가하기 위하여 1 차원으로 단순화한 해석 모델을 개발하였으며 이를 이용하여 토출 성능을 예측하고 평가하였다.

잉크젯 헤드의 기본 구조는 Fig. 1 과 같이 압전 효과에 의해 인가된 전기적 에너지에 의해 기계적 변형을 발생하는 액추에이터, 액추에이터의 변형에 의해 압력이 발생하는 압력 챔버(Pressure chamber), 잉크가 공급되는 리스트릭터(Restrictor), 잉크가 토출되는 노즐(Nozzle), 잉크를 저장하는 리저버(Reservoir)로 나눌 수 있다. 다시 말해서 액추에이터는 인가된 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 주는 에너지 변환 요소인 동시에 진동판의 변형에 의한 탄성 에너지와 운동 에너지를 저장하는 역할을 한다. 체임버는 PZT 압축에 의한 탄성 에너지와 유동의 운동 에너지를 저장하는 요소이며, 리스트릭터, 노즐은 유동의 운동 에너지를 저장하는 역할을 한다. 리저버는 일정한 잉크 공급 압력을 제공하는 에너지 발생 요소이며 노즐의 메니스커스는 표면 장력에 의해서 압력을 발생시키는 에너지 발생 요소를 가지고 있다. 또한 체임버, 리스트릭터, 그리고 노즐은 에너지를 저장하는 요소뿐만 아니라 유체 저항에 의한 에너지 발산 요소도 포함되어 있다.

Table 1 Analogy between system modeling

	Mechanical system	Fluidic system	Electric system
Inertance	$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$	$P = I \frac{dQ}{dt}$	$V = L \frac{di}{dt}$
Compliance	$F = \frac{1}{C} x$	$P = \frac{1}{C} \int Q dt$	$V = \frac{1}{C} \int i dt$
Resistance	$F = c \frac{dx}{dt}$	$P = RQ$	$V = Ri$

2. 헤드 단순화

2.1 1 차원 Lumped model

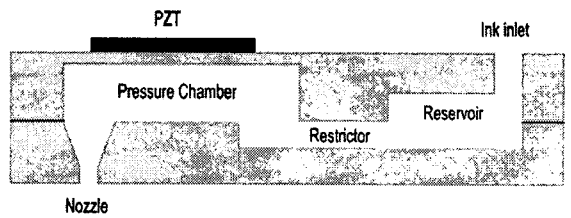


Fig. 1 Schematic diagram of inkjet printing head

위에서 설명한 바와 같이 잉크젯 헤드는 기계, 유체 전기 시스템이 결합된 복합 시스템이므로 시스템 방정식의 변수가 서로 다르다. 따라서 이를 일관된 법칙으로 모델링하기 위해서는 시스템을 대표하는 구성 요소들로 나누고 특성 상수들로 표현한 후, Table 1 과 같은 관계를 이용하여 등가화하는 Lumped 모델링 방법이 사용된다.<sup>4,5,6</sup> 탄성 에너지를 저장하는 요소를 컴플라이언스(Compliance)라고 정의하며 운동 에너지를 저장하는 요소를 이너턴스(Inertance), 에너지 발산 요소는 리지스텐스(Resistance)라고 한다.

2.2 등가 전기 회로

잉크젯 헤드를 구성 요소로 단순화시키고 특성

상수 수들로 표현한 후 Table 1의 관계를 이용하여 등가 전기 회로를 구성하면 Fig. 2와 같은 등가회로로 표현할 수 있다. 잉크젯 헤드에서 액추에이터의 이너턴스는 전체 시스템의 응답에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 회로 모델링에서는 제외하였고 체임버의 리지스턴스와 이너턴스는 노즐과 리스트릭터에 비하여 상대적으로 작은 값이므로 무시하기로 한다. 액추에이터에 가해지는 \$V\_a\$는 PZT에 전압이 인가되었을 때 발생하는 등가 압력을 나타내고 리저버 전압 \$V\_{res}\$는 부압, 메니스커스 전압 \$V\_m\$은 표면장력에 의한 차압을 나타낸다. 등가회로 모델을 이용하여 각 에너지에 대한 요소 방정식을 적용하면 아래와 같이 유량에 대한 방정식을 유도할 수 있다.

$$\dot{q}_r = \frac{1}{M_r} \left\{ R_r \dot{q}_r + \frac{1}{C_p + C_c} q_r + \frac{1}{C_p + C_c} q_n - \frac{C_p}{C_p + C_c} V_p + V_{res} \right\} \quad (1)$$

$$\dot{q}_n = \frac{1}{M_n} \left\{ R_n \dot{q}_n + \frac{1}{C_p + C_c} q_r + \frac{1}{C_p + C_c} q_n - \frac{C_p}{C_p + C_c} V_p + V_m \right\} \quad (2)$$

### 3.1 차원 Lumped 모델링

#### 3.1 액추에이터

##### 3.1.1 컴플라이언스(\$C\_a\$)

액추에이터의 컴플라이언스(\$C\_a\$) 계산을 위해서 상용 해석 프로그램인 CoventorWare™를 사용하였다. 액추에이터의 윗면에 100kPa의 압력을 가하고 이에 의한 각 절점(Node)의 변위를 계산하여 체적 변위를 구하고 이를 압력으로 나누어 액추에이터의 컴플라이언스를 구하는 방법을 택하였다.

$$C_a = \frac{v_p}{p} \quad (3)$$

여기서, \$p\$는 인가 압력, \$v\_p\$는 압력에 의한 체적 변위를 나타낸다.

##### 3.1.2 전압/압력 변환 계수(\$K\_{eq}\$)

액추에이터에 전압을 인가하면 PZT에 평면과 수평한 방향으로 압축 응력이 발생하고 이로 인해 체적 변위가 발생한다. 계산된 체적 변위를 컴플라이언스로 나누어 주면 인가한 전압에 대한 등가 발생 압력을 얻을 수 있다. 여기서 계산된 등가 발생 압력을 인가 전압으로 나누어 주면 단위 전압

당 발생하는 압력, 즉 전압/압력 변환 계수(\$K\_{eq}\$)를 구할 수 있다.

$$K_{eq} = \frac{\left( \frac{v_p}{C_a} \right)}{V} \quad (4)$$

여기서 \$V\$는 인가 전압, \$v\_p\$는 인가 전압에 의한 압전 구동기의 체적 변위를 나타낸다. Fig. 3은 구조해석을 통해 얻어진 인가 전압에 따른 압전 구동기의 변위를 나타낸 것이다.

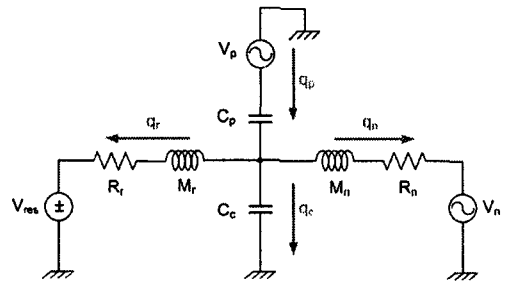


Fig. 2 Equivalent circuit of inkjet printing head

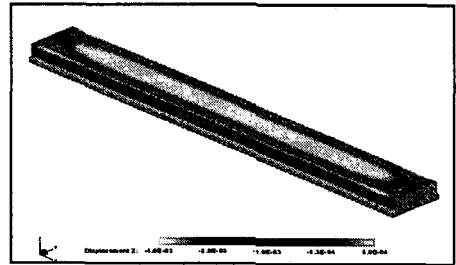


Fig. 3 Simulated displacement corresponding to an applied voltage for calculation of the compliance of vibrator and \$K\_{VtoP}\$ for lumped element analysis

### 3.2 유로계

#### 3.2.1 컴플라이언스(\$C\_c\$)

유로계의 컴플라이언스는 체임버에서 고려되며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_c = \frac{v_c}{\rho \alpha^2} \quad (5)$$

여기서 \$v\_c\$는 체임버 체적, \$\rho\$는 잉크 밀도, \$\alpha\$

는 잉크의 음속을 나타낸다.

### 3.2.2 리지스턴스( $R_c$ )

유로계의 리지스턴스는 리스트릭터, 노즐 그리고 체임버에서 고려된다. 그러나 체임버의 리지스턴스는 다른 요소들에 비해 상대적으로 아주 작은 값이므로 무시하였다. 잉크젯 헤드는 Fig. 4 와 같이 리스트릭터와 노즐부에서 단면적이 급격하게 변하는 구조로 되어있다. 다시 말해 체임버에서 리스트릭터와 노즐로 단면적이 축소되고 반대로 노즐과 리스트릭터로부터 체임버로 확대되는 형상을 가지고 있다. 따라서 유체 소자의 내부 저항과 함께 단면적이 급격한 확대, 축소에 의한 손실도 고려해야 한다. 따라서 유동 손실에 의한 유로의 압력 변화는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta P = R\dot{q} + R_{se}\dot{q}^2 + R_{sc}\dot{q}^2 \quad (6)$$

여기서  $\dot{q}$  는 유량,  $R$  은 유체 소자에 의한 리지스턴스,  $R_{se}$  와  $R_{sc}$  는 단면적이 확장 및 축소에 의한 손실을 나타낸다. 리스트릭터의 압력 손실은 식 (7)과 같이 그리고 노즐부의 압력은 유동 방향에 따라 식 (8)과 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\Delta P_{res} = R_r\dot{q}_i + R_{se}\dot{q}_i^2 + R_{sc}\dot{q}_i^2 \quad (7)$$

$$\Delta P_{nol\_in} = R_n\dot{q}_o + R_{se}\dot{q}_o^2 \quad (8)$$

$$\Delta P_{nol\_out} = R_n\dot{q}_o + R_{sc}\dot{q}_o^2 \quad (9)$$

여기서  $R_r$  은 리스트릭터의 저항을  $R_n$  은 노즐부의 저항이다.  $R_r$  과  $R_n$  은 각각 식 (10)과 식 (11)로 표현할 수 있다.

$$R_r = 128\mu \frac{L_r}{D_{eff\_r}^2} \quad (10)$$

$$R_n = 128\mu \frac{L_r}{\pi \cdot D_n^2} \quad (11)$$

그림 5 와 같이 단면적이 확대와 축소에 따른 손실에 의한 리지스턴스  $R_{se}$  와  $R_{sc}$  는 식 (12)와 식 (13)과 같이 표현된다.  $K_{se}$  는 단면적이 확장에 따른 손실 계수이며  $K_{sc}$  는 단면적 축소에 따른 손실 계수,  $A$  는 유로의 단면적이다.

$$R_{se} = \frac{\rho k_{se}}{2 \times A^2} \quad (12)$$

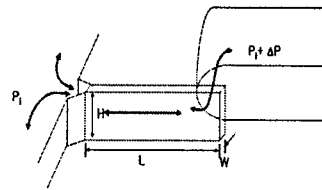
$$R_{sc} = \frac{\rho k_{sc}}{2 \times A^2} \quad (13)$$

### 3.2.3 이너턴스( $M_n$ )

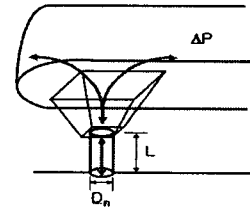
유로계의 이너턴스는 리스트릭터, 노즐에서 고려되며 형상에 따라 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M = \beta \cdot \rho \frac{L}{A} \quad (14)$$

여기서  $L$  은 유로의 길이,  $\beta$  는 경험적으로 얻어지는 상수이다.



(a) Flow from restrictor to chamber and vice versa



(b) Flow from nozzle to chamber and vice versa

Fig. 4 Flow in nozzle and restrictor parts

### 3.2.4 메니스커스(Meniscus)

노즐 내부의 메니스커스 압력은 표면 장력과 접촉각에 의해서 결정된다. 접촉각은 메니스커스가 진동하면서 계속 변하기 때문에 그 값을 정확히 계산하기 어렵다. 따라서 메니스커스 곡면이 식 (15)와 같은 포물선을 이룬다고 가정하고 Fig. 5 와 같은 메니스커스 형상에서 표면 장력( $\sigma$ )과의 힘 평형 관계식으로부터 메니스커스의 압력에 대한 식 (16)를 얻을 수 있다.

$$z = Z_{max} \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (15)$$

$$\Delta P = \frac{4\sigma}{D_n} \sqrt{\frac{16 \cdot Z_{max}^2}{16 \cdot Z_{max}^2 + D_n^2}} \quad (16)$$

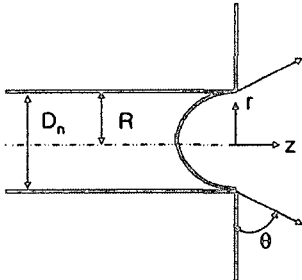


Fig. 5 Meniscus with circular orifice

#### 4. 1 차원 해석 프로그램

##### 4.1 압전 액추에이터 특성 상수

액추에이터는 Fig. 6 과 같이 PZT 와 멤브레인 (Membrane) 2 층으로 구성되어 있다. 멤브레인의 폭은 600 $\mu$ m, 길이는 3000 $\mu$ m 그리고 두께는 40 $\mu$ m 이다. PZT 의 폭은 540 $\mu$ m 이고 두께는 100 $\mu$ m 이다. Table 2 는 액추에이터의 컴플라이언스와 압전/압력 변환 상수를 해석하기 위해 사용된 재료의 물성치이다. 액추에이터의 컴플라이언스는 6.82 x 10<sup>-20</sup> [m<sup>5</sup>/N] 이고 전압/압력 변환 상수(K<sub>eq</sub>)는 2.36 x 10<sup>4</sup> [Pa/V] 이다.

##### 4.2 유체 소자 특성 상수

토출에 사용된 잉크의 밀도(Density)는 1000 kg/m<sup>3</sup> 이고 표면장력(Surface tension)은 0.025N/m, 점도(Viscosity)는 4.8cPs 이다. 잉크 내 음속을 1500 m/s 라 할때, 체임버의 컴플라이언스는 2.0 x 10<sup>-19</sup> [m<sup>5</sup>/N] 이다. 리스트릭터 길이는 2000 $\mu$ m, 폭은 50  $\mu$ m, 깊이는 130  $\mu$ m 로 선정하였으며 노즐은 직경이 30  $\mu$ m, 길이는 30  $\mu$ m 로 선정하였다. 식 (10), (11)로부터 얻어진 노즐의 리지스턴스(R<sub>n</sub>)는 5.86 x 10<sup>8</sup> 이고 리스트릭터의 리지스턴스(R<sub>r</sub>)는 4.25 x 10<sup>8</sup> 이다. 식 (14)을 통해 얻어진 노즐의 이너턴스(M<sub>n</sub>)는 5.86 x 10<sup>8</sup> Ns<sup>2</sup>/m<sup>5</sup> 이고 리스트릭터의 이너턴스(M<sub>r</sub>)는 4.25 x 10<sup>8</sup> Ns<sup>2</sup>/m<sup>5</sup> 이다.

##### 4.3 수치 해석

노즐의 메니스커스 속도 및 유량을 구하기 위해 계산된 액추에이터와 유체 소자의 특성 상수를

입력하고 구동 조건을 결정한다. 앞에서 얻어진 잉크젯 헤드의 시스템 방정식은 4 차 Runge-Kutta method 를 이용해서 수치 적분하고 이를 1 차 미분 방정식으로 변환하여 행렬 형태로 바꾸어 계산한다. 1 차원 해석 프로그램의 흐름도(Fig. 7)와 같이 1 차원 lumped 모델링을 이용하여 잉크젯 헤드 성능 해석을 위한 프로그램을 개발하였으며 이를 구동하기 위해 Matlab 을 사용하였다.

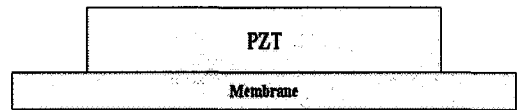


Fig. 6 Cross-section view of PZT actuator

Table 2 Material properties of actuator part

	E(GPa)	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Poisson's ratio
PZT	77	7800	0.3
Silicon	130	2330	0.22

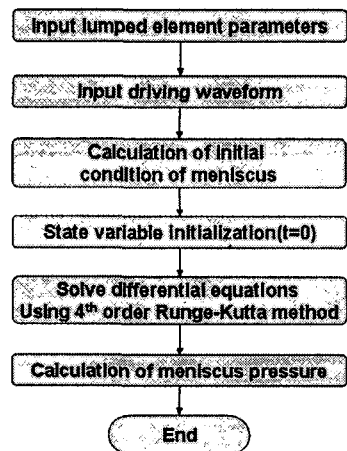


Fig. 7 Flow chart of 1D program

## 5. 해석 결과

### 5.1 해석 모델 검증

Fig. 8 과 같은 구동 파형(Wave form)으로 압전

액추에이터를 구동할 경우 1 차원 해석 프로그램의 해석 결과와 실제 제작된 헤드의 성능을 비교하였다.  $t_1$ 은 1.5  $\mu\text{sec}$ ,  $t_2$ 는 6.5  $\mu\text{sec}$ ,  $t_3$ 는 1.5  $\mu\text{sec}$ ,  $t_4$ 는 14.5  $\mu\text{sec}$ , 그리고  $t_5$ 는 1.5  $\mu\text{sec}$  이다. Table 1은 해석 결과와 실험 결과를 비교한 것으로 토출 체적은 12%, 토출 속도는 6% 오차를 각각 나타내었다.

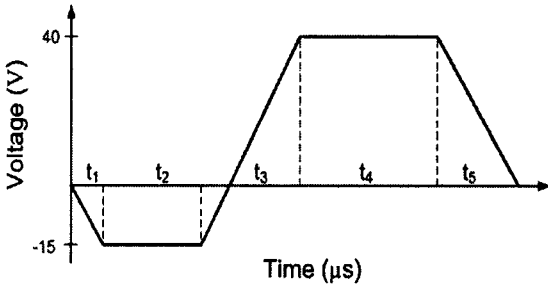


Fig. 8 Waveforms of the driving voltages signal applied to the inkjet head

### 5.2 토출 성능 해석

개발된 1 차원 해석 모델을 이용하여 잉크젯 헤드의 리스트릭터 깊이를 변화하면서 토출 성능을 해석하였다. Fig. 9 와 같이 리스트릭터의 깊이를 감소시키면서 노즐부의 유량을 관찰한 결과 노즐부의 유량은 점차 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 리스트릭터의 깊이가 줄어들면서 리지스텐스가 증가하므로 액추에이터 변형에 의해 발생하는 압력에 의한 유량이 리지스텐스가 큰 리스트릭터 보다는 노즐 쪽으로 더 많아지기 때문이다. 따라서 Fig. 10 과 같이 토출되는 액적 속도와 토출 체적이 증가하는 결과를 가져온다. 반대로 리스트릭터의 깊이가 줄어들게 되면 단면적이 축소되므로 단위 면적당 이동하는 잉크의 유량이 감소하게 된다. 따라서 잉크젯 헤드 시스템의 헬름홀츠 주파수(Helmholtz frequency)는 Fig. 11 와 같이 감소하게 된다. 이를 확인하기 위해 20KHz 까지 토출 주파수(Jetting frequency)를 증가하면서 액적 체적 변화를 관찰하였다(Fig. 12). 리스트릭터 깊이가 130 m 일때, 액적 체적은 토출 주파수 변화에 따라 거의 변하지 않지만 42 m 일때, 액적 체적이 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 잉크젯 헤드 시스템의 헬름홀츠 주파수의 감소에 의해 잉크 공급이 원활하지 않기 때문에 토출 주파수에 의해 토출 특성이 저하되게 된다.

Table 3 Comparison of measured roughness data

	해석결과	측정값	오차(%)
토출체적[pl]	24.2	27.5	12
토출속도[m/s]	3.6	3.8	6

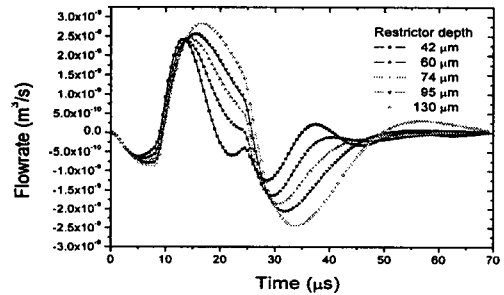


Fig. 9 Flow rate at nozzle with variation of restrictor depth

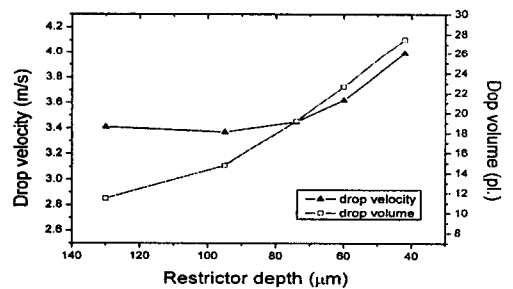


Fig. 10 Droplet volume and velocity with variation of restrictor depth

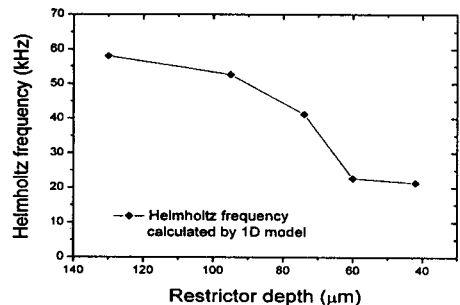


Fig. 11 Helmholtz resonance frequency change according to the variation of restrictor depth

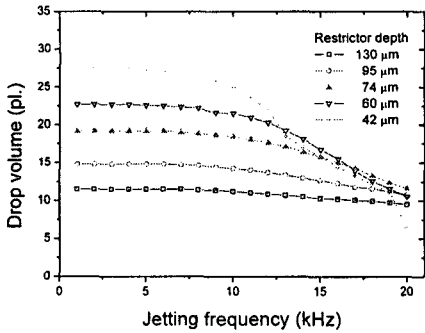


Fig. 12 Droplet volume change according to the variation of jetting frequency

## 6. 결론

1 차원 Lumped 모델을 이용하여 잉크젯 헤드의 성능을 시뮬레이션하고 인가된 구동 파형에 의한 액적 속도와 토출 체적을 실험치와 비교한 결과 10% 내외에서 일치하는 결과를 나타내어 개발된 모델의 정확성을 검증하였다. 하지만 해석 결과와 측정 결과에서 발생된 오차는 1 차원 Lumped 모델을 통해 계산된 이너턴스와 리지스턴스 값이 실제 노즐과 리스트릭터 형상을 완벽하게 반영하기 어렵기 때문에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 3 차원 해석 모델을 통한 유체 해석을 통하여 보다 정확한 이너턴스와 리지스턴스 상수 값을 얻는다면 1 차원 Lumped 모델의 정확성을 향상시킬 수 있을 것이다. 본 논문에서 개발된 1 차원 Lumped 모델을 통해 실험으로는 측정하기 어려운 챔버 내 압력 변화, 메니스커스의 움직임에 대한 정보를 통해 잉크젯 헤드의 거동 분석에 이용할 수 있을 뿐만 아니라 잉크젯 헤드를 구성하는 각 요소들의 파라미터 변화에 따른 민감도 해석을 통해 헤드 성능 최적화에 활용될 수 있다.

## 참고문헌

1. Peter, E., "Inkjet Printing in the Electronics Industry," DDP2001: Eye on the Future, Vol. 1, pp. 197-200, 2001.
2. Stephen, F., "Inkjet Technology and Product Development Strategies," Torrey Pines Research, pp. 198-201, 2000.
3. Liou, T., Shih, K., Chau, S. and Chen, S., "Three-

dimensional simulations of the Droplet Formation during the Inkjet Printing Process," International Communications in Heat and Mass Transfer., Vol. 29, No. 8, pp. 1109-1118, 2002.

4. Kyser, E., Collins, F. and Herbert, H., "Design of an Impulse Ink Jet," Journal of Applied Photographic Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 73-79, 1981.
5. Kyser, E. and Sears, B., "Method and apparatus for recording with writing fluids and drop projection means therefore," U.S. Patent 3,946,398, 1976.
6. Sim, W., Park, S., Park, C., Yoo, Y., Kim, Y., Joung, J., and Oh, Y., "Analysis of the Micro Droplet Ejection for the Application of Industrial Inkjet Printing Head," Technical Proceedings of the NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Vol. 2, pp. 528-533, 2006.