

The Effects of Driving Waveform for Piezoelectric Drop On Demand Industrial Inkjet Head

金永財<sup>†</sup> · 劉永錫<sup>\*</sup> · 沈原徹<sup>\*\*</sup> · 朴啟聖<sup>\*\*\*</sup> · 鄭在祐<sup>§</sup> · 吳龍洙<sup>§§</sup>

(Youngjae Kim · Youngseuck Yoo · Wonchul Sim · Changsung Park · Jaewoo Jung · Yongsoo Oh)

**Abstract** - This paper presents the effect of driving waveform for piezoelectric bend mode inkjet printhead with optimized mechanical design. Experimental and theoretical studies on the applied driving waveform versus jetting characteristics were performed. The inkjet head has been designed to maximize the droplet velocity, minimize voltage response of the actuator and optimize the firing frequency to eject ink droplet. The head design was carried out by using mechanical simulation. The printhead has been fabricated with Si(100) and SOI wafers by MEMS process and silicon direct bonding method. To investigate how performance of the piezoelectric ceramic actuator influences on droplet diameter and droplet velocity, the method of stroboscopy was used. Also we observed the movement characteristics of PZT actuator with LDV(Laser Doppler Vibrometer) system, oscilloscope and dynamic signal analyzer. Missing nozzles caused by bubbles in chamber were monitored by their resonance frequency. Using the water based ink of viscosity of 4.8 cps and surface tension of 0.025 N/m, it is possible to eject stable droplets up to 20 kHz, 4.4 m/s and above 8 pl at the different applied driving waveforms.

**Key Words** : Inkjet, Piezoelectric, MEMS, Waveform, Droplet

1. 서 론

최근 들어 압전 특성을 갖는 재료의 압전/역압전 및 공진 특성을 이용한 소자 및 박막의 특성에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 특히 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 공정을 이용한 마이크로 센서 및 마이크로 액추에이터에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 압전재료를 이용한 마이크로 액추에이터는 낮은 구동 전압과 빠른 응답속도를 가짐과 동시에 큰 구동력을 얻을 수 있다. 액추에이터에 있어서 압전 후막 기술은 박막기술에 비해 경제적이며 신뢰성이 높고 간단한 제조공정 때문에 다양한 디바이스 개발이 가능하여 전자산업 부분에 있어서 그 응용범위가 확대되고 있다. 이러한 압전 액추에이터를 이용한 잉크젯 기술은 최근 몇 년 전부터 지금까지 매우 중요한 기술로 이슈화되고 있다. 최근 들어 잉크젯 프린팅 기술은 LCD 패널, 컬러필터, DNA 프린팅과 같은 생명과학 기술에서 점점 더 많이 요구 되어지고 있다. 노광, 식각, 증착에 들어가는 막대한 비용을 절감하기 위해 이러한 공정을 대체할 수 있는 새로운 기술이 개발되어야 하는 실

정이다. 이러한 잉크젯 프린팅 기술은 1) 액적 크기의 감소 2) 헤드의 노즐 집적도 증가 3) 잉크 토출 속도의 증가 4) 채널간의 크로스토크 문제[2][3]와 세틀라이트 문제의 감소를 통한 프린팅 품질과 프린팅 속도의 개선에 초점이 맞춰지고 있다[4]. 또한 산업용 잉크젯 헤드는 10 pl 이하의 액적과 생산성을 위해 5 m/s 이상의 속도, 5 kHz 이상의 주파수에서 안정적인 토출이 요구되어 진다. 이 논문에서는 산업용 압전 잉크젯 헤드의 구동과정과 공진주파수 특성을 이용한 안정적인 미세한 액적 토출에 관해 연구되었다.

2. 설계 및 제작

잉크젯 헤드의 액추에이터 특성은 상용 시뮬레이션 tool 인 CoventorWare에 의해 수행 되었다. 또한 노즐과 리스트릭터 사이의 저항비를 적절하게 유지시키는 것이 매우 중요하다. 이러한 계산은 CFD-ACE를 통해 그림 1과 같이 이루어졌다.

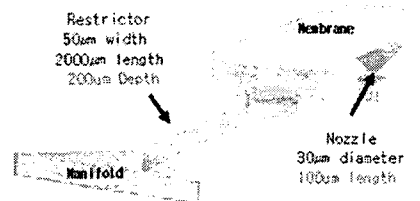


그림 1. 액적토출 시뮬레이션을 위한 3차원 구조  
Fig 1. Three dimensional structure for droplet jetting simulation

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 삼성電機 中央研究所 先任研究員

E-mail : young\_jae.kim@samsung.com

<sup>\*</sup> 正會員 : 삼성電機 中央研究所 責任研究員

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 삼성電機 中央研究所 先任研究員

<sup>\*\*\*</sup> 正會員 : 삼성電機 中央研究所 主任研究員

<sup>§</sup> 正會員 : 삼성電機 中央研究所 首席研究員

<sup>§§</sup> 正會員 : 삼성電機 中央研究所 eMD Lab長

接受日字 : 2006年 4月 27日

最終完了 : 2006年 6月 20日

전체적인 제작 공정도는 그림. 2에 나타내었다. 그림. 2에서와 같이 상판은 Si 40 μm, SiO<sub>2</sub> 2 μm, Si 310 μm의 층으로 형성된 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼를 사용하여 제작하였다.(그림 2(a)) 잉크 주입부를 형성하기 위해 20m μm의 Si 층을, 잉크 챔버를 형성하기 위해 310 μm의 Si층을 ICP-RIE를 사용하여 건식 에칭하였다.(그림.2 (b)(c)) 하판 제작을 위해 한쪽 면에 30 μm 직경의 노즐부를 ICP-RIE를 이용하여 형성하고 반대쪽 면에는 깔때기 모양을 형성하기 위해 90℃의 TMAH용액을 이용하여 습식 에칭하였다..이렇게 제작된 상하판은 Silicon Direct Bonding 방법을 통해 접합하였다.(그림. 2 (d)(e)(f)(g)) 제작된 헤드에 액추에이터를 형성하기 위해 스퍼터를 이용해 Au 전극을 DC magnetron sputter를 이용하여 형성하고 100 μm의 PZT를 2 μm이하의 접착제를 도포하여 접착하였으며 각 부분의 dimension은 표 1에 나타내었으며 액추에이터 한개의 정전용량은 950 pF 이다.

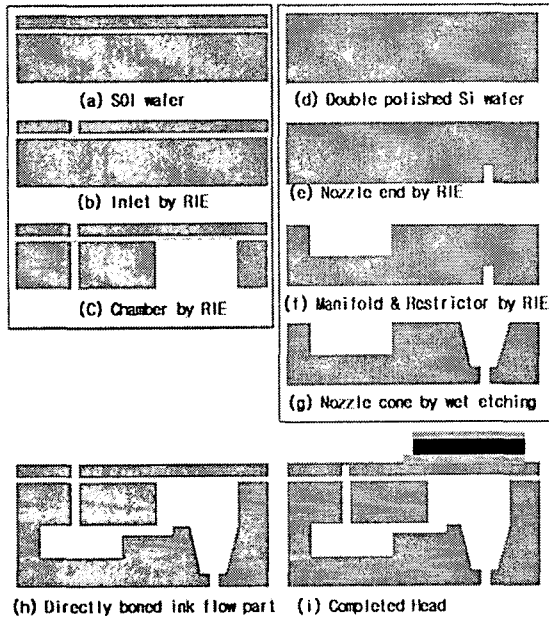


그림 2. 잉크젯 헤드 제작 공정도

Fig 2. The fabrication process of piezoelectric inkjet head.

표 1. 헤드 각부분의 dimension

Table 1. Dimensions of inkjet head

nozzle length	100 μm
nozzle diameter	30 μm
chamber width	600 μm
chamber depth	250 μm
chamber length	2700 μm
membrane width	600 μm
membrane thickness	40 μm
PZT width	540 μm
PZT thickness	60 μm
restrictor width	50 μm
restrictor depth	200 μm
restrictor length	2000 μm
cone width	400 μm(117 μm)

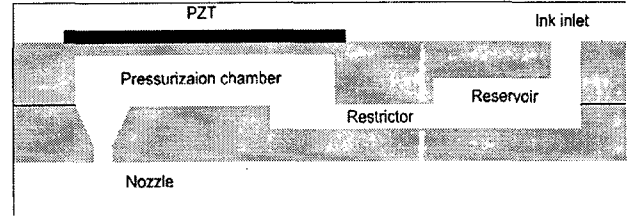


그림 3. 압전잉크젯 헤드의 개략도

Fig 3. Schematic structure of inkjet head.

### 3. 1차원 Lumped 모델

압전체에 의해 구동되는 잉크젯 헤드의 개략도를 그림 3.에 나타내었다. 잉크젯 헤드는 잉크를 포함하고 있는 리저버, 리스트릭터, 리저버로부터 리스트릭터를 통해 잉크를 공급 받는 압력챔버, 압전 액추에이터 그리고 압력챔버의 압력에 의해 잉크를 토출하는 노즐로 구성되어 있다. 압력챔버는 챔버벽과 압전체가 접합된 진동판 구조를 가지고 있다. 압전체에 전기장이 가해지게 되면 압전체는 변형이 되며 압력챔버의 벽과 강하게 접합이 되어 있기 때문에 밴딩이 일어나게 된다. 이러한 밴딩현상은 압력챔버의 압력을 높여서 노즐을 통해 잉크 액적이 토출되는 것을 가능하게 한다.

위에서 언급한 것과 같이 잉크젯 헤드는 전기적, 기계적 구조와 유체역학이 포함된 시스템이다. 이렇게 복잡한 시스템을 간소화 하기 위해 lumped 모델을 적용하였다. 또한 잉크젯 헤드의 성능을 예측하기 위한 복잡한 수학적 계산은 전기적 등가회로를 도입하여 간소화 하였다[5][6]. 압전 액추에이터의 변위와 잉크의 흐름 등은 그림 4.의 회로에서와 같이 C, M, R, 즉, 커패시턴스, 이너턴스 그리고 레지스턴스로 각각 표현된다. 압력챔버 내의 유체 압축성은 커패시턴스 C로 표현되며, 또한 압전액추에이터의 탄성변형도 커패시턴스로 표현될 수 있다. 가속된 잉크가 얇은 통로를 흐를때 잉크의 질량은 이너턴스와 같이 나타내게 된다. 따라서 잉크젯 프린팅 헤드는 그림 4.에서와 같이 전기적인 회로로 나타낼 수 있다. 각각의 첨자 p는 압전 액추에이터, c는 압력챔버, r은 리스트릭터, n은 노즐, res는 리저버, m은 매니스커스를 나타낸다. 잉크젯 프린팅 헤드의 lumped 모델링에 의해 다음과 같이 식 (1)과 식(2)가 유도된다.

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

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

여기서  $q_r$ 은 리스트릭터에서의 유량을  $q_n$ 은 노즐에서의 유량은 나타내며  $\ddot{q}_r$ 와  $\ddot{q}_n$ 는 각각 리스트릭터와 노즐에서의 flow rate를 나타낸다. 그림 4는 잉크젯 프린팅 헤드의 등가 회로를 보여준다. 노즐과 리스트릭터의 이너턴스와 레지스턴스에 비해  $M_c$ 와  $R_c$ 는 매우 작기 때문에 무시한다.

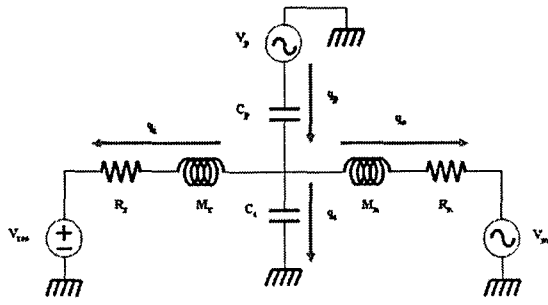


그림 4. 압전 잉크젯 헤드를 표현하는 전기적 등가회로  
 Fig 4. Equivalent circuit representing a piezoelectric inkjet system.

3.1 압전 액추에이터

교류전압  $V_p$ 는 압전 액추에이터가 효과적으로 압력챔버에 진동을 전달할 수 있도록 가해진다. 따라서 유체와 전기적인 conversion ratio [ $K_{VtoP}$ ]가 필요하게 된다.  $K_{VtoP}$ 는 압력에 의해 발생된 변위와 전압에 의해 발생된 변위의 비교에 의해 계산된다. 압전 액추에이터 컴플라이언스의  $K_{VtoP}$ 를 얻기 위해 상용 FEM 패키지인 CoventorWare로 분석을 수행하였다. 압전액추에이터의 3차원 모델이 개발되었으며 이것은 시뮬레이션된 압전액추에이터와 전압 및 변위와의 관계가 아래의 식 (3), (4)와 같음을 보여준다.

$$C_p = \frac{V_a}{P} \tag{3}$$

$$K_{VtoP} = \frac{\left(\frac{V_v}{C_p}\right)}{v} \tag{4}$$

여기서  $V_a$ 는 압력에 의한 체적의 변화,  $P$ 는 가해진 압력,  $V_v$ 는 전압에 의한 체적의 변화 그리고  $v$ 는 가해진 전압을 나타낸다.

2.2 잉크의 유로 부분

압력챔버의 유체 압축성은 컴플라이언스로 표현되며 아래와 같은 식으로 나타내어 진다.

$$C_c = \frac{V_c}{\rho \alpha^2} \tag{5}$$

여기서  $V_c$ 는 압력챔버의 체적을  $\rho$ 는 잉크의 밀도를  $\alpha$ 는 잉크에서의 음속을 표현하며  $\alpha$ 는 대략 1500m/s의 값을 갖는다. 잉크가 그림 5.에서와 같이 얇은 통로를 통과할 때 잉크의 관성은 이너턴스에 의해 표현되며 아래와 같은 식으로 나타내어진다.

$$M = \beta \cdot \rho \frac{L}{A} \tag{6}$$

여기서  $\beta$ 는 실험적 계수이며  $A$ 는 통로의 단면적을 나타

낸다. 압전 액추에이터의 등가회로에서 압력챔버의 공진주파수  $f_c$ 와 공진주기가 위의 식에서 계산되어지며 그 값은 각각 52.3 kHz 와 19.1  $\mu$ s이며 아래 표 2와 같이 표현된다.

표 2. 계산된 컴플라이언스, 이너턴스 그리고  $T_c$   
 Table 2. The calculated compliance, inertance and  $T_c$

Sonic velocity [m/s]	$M_n$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$M_r$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$C_c$ [m <sup>3</sup> /N]	$\frac{M_n \cdot M_r}{M_n + M_r}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$T_c$ [s]	$f_c$ [Hz]
1500	5.8E+07	4.2E+08	1.8E-19	4.8E+08	1.9E-05	5.2E+04

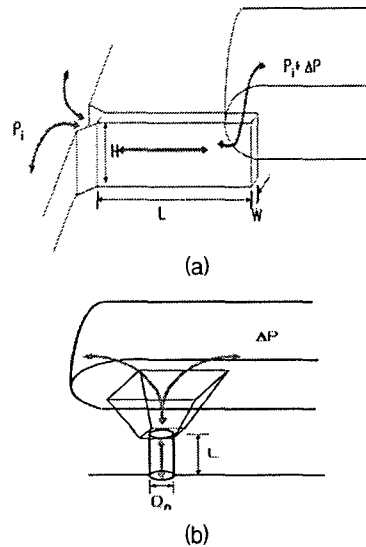


그림 5. (a) 리스트릭터와 압력챔버에서의 잉크의 흐름  
 (b) 압력챔버와 노즐에서의 잉크의 흐름  
 Fig 5. (a) Flow from restrictor to chamber and vice versa  
 (b)Flow from nozzle to chamber and vice versa

LC 공진회로에서와 같이 공진주파수와 공진주기는 식 (7)과 식(8)에서 유도된다. 이러한 식을 이용하여 식(9)를 유도하였으며 이를 압력챔버의 공진주기  $T_c$ 라 표현한다. 계산된  $T_c$  와  $f_c$ 는 각각 1.9E-5 s 와 52 kHz 이다.

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{7}$$

$$T_n = 2\pi\sqrt{LC} \tag{8}$$

$$T_c = 2\pi\sqrt{\frac{M_n \cdot M_r}{M_n + M_r} C_c} \tag{9}$$

2.3 액추에이터의 공진 주파수

압전 액추에이터의 공진 주파수는 LDV(Laser Doppler Vibrometer) 시스템과 dynamic signal analyzer를 통해 측정되었으며,  $f_a$  와  $T_a$ 의 측정값은 그림 6. 에서와 같이 각각 685.94 kHz 와 1.45  $\mu$ s였다.

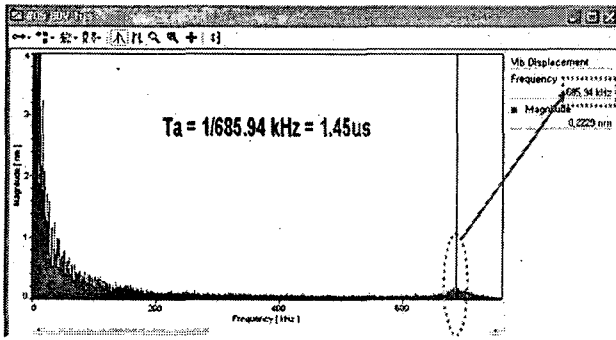


그림.6 LDV system에 의해 측정된 압전 액츄에이터의 공진 주파수.

Fig 6. Natural frequency of piezoelectric actuator measured by LDV system.

4. 결과 및 고찰

그림 7.에서와 같이 구동파형은 A, B, C, D 와 E부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분인 A구간은 전압을 음의 전압으로 내리는 구간이며 B구간은 음의 전압을 유지하는 구간이며, C 구간은 전압을 급격하게 올리는 구간이며 D구간은 양의 전압을 유지하는 구간이며 E구간은 양의 전압을 0V로 내리는 구간이다. 따라서 구동파형 A가 액츄에이터에 가해지면 정상 상태에 있던 액츄에이터가 위쪽 방향으로 휘게 되고 압력챔버가 팽창하게 된다. 구동파형 B가 액츄에이터에 가해지면 액츄에이터는 휘어져 있게 되며 압력챔버의 팽창상태를 그대로 유지하게 된다. 구동파형 C가 가해지면 위쪽으로 휘어져 있던 액츄에이터가 급격하게 아래쪽으로 휘게 되며 압력챔버의 체적이 급격하게 줄어들게 된다. 따라서 압력챔버내의 잉크 압력이 높아져서 노즐을 통해 액적이 토출되게 된다. 구동파형 E가 가해지면 액츄에이터는 정상상태로 돌아가게 된다.

공진주기  $T_c$ 가 액적의 속도와 크기에 미치는 효과를 증명하기 위해 T1 구간을 1.5  $\mu$ s로, T3 구간을 1.5  $\mu$ s로, T4구간을 14.5  $\mu$ s로, T5 구간을 1.5  $\mu$ s로 고정하였다. A, C 와 E구간을 액츄에이터의 공진주파수와 조화시킨 것은 액츄에이터의 안정성을 유지켜 액츄에이터의 공진이 잉크의 토출에 영향을 미치지 않게 하기 위함이다. 만약 이 구간이 액츄에이터의 공진주기인  $T_a$ 보다 작으면 각각 구간의 전압변화를 따라가지 못하며  $T_a$ 보다 길게 되면 액츄에이터가 느리게 움직이게 되어 토출되는 액적의 속도가 줄어들게 된다. 구동파형 전체구간의 길이는 이론적으로 계산된 압력챔버의 공진주기인  $T_c$ 에 맞추었다.

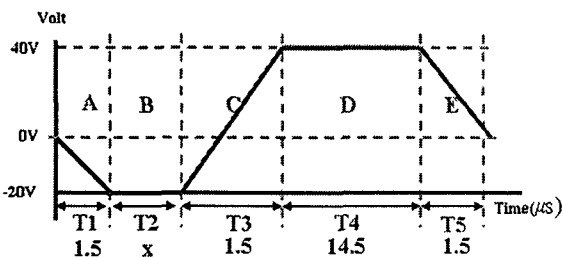


그림 7. 인가되는 구동파형의 구조

Fig 7. Structure of basic applied waveform

토출되는 액적의 이미지는 스트로보스코프 시스템을 이용하여 촬영하였으며 각각의 delay time은 85  $\mu$ s 이다. T2 구간이 1  $\mu$ s에서 38  $\mu$ s 까지 변화하면서 액적의 속도가 주기적으로 변화하는 것이 관찰되었다. 그 주기는 약 20  $\mu$ s 이며 이것은 이론적으로 계산된 압력챔버의 공진 주기인  $T_c$ 와 일치하였다.

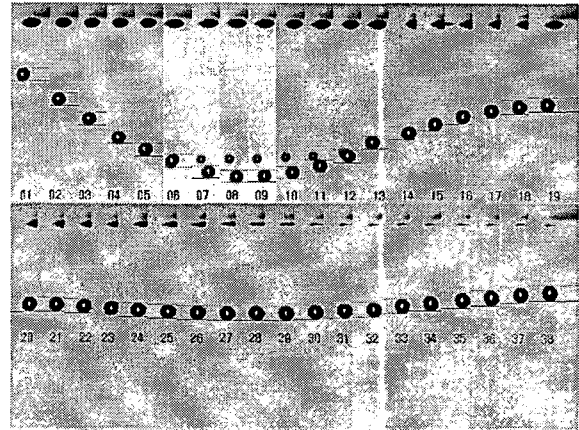


그림 8. T2 구간의 증가에 따른 액적 토출 이미지

Fig 8. Sequence of snapshots at different time of T2 obtained by stroboscope system.

T2 구간이 7, 8, 9, 10, 11  $\mu$ s 일 때 액적의 속도가 가장 빨랐으며 세틀라이트가 발생하였다. T2 구간이 18, 19, 20, 21, 22  $\mu$ s 일 때 액적의 속도가 가장 느렸다. 이러한 액적속도의 변화는 챔버 공진 주기인  $T_c$ 와 잘 일치한다. 또한 T2 구간의 증가에 따라 액적크기의 변화는 거의 없었다.

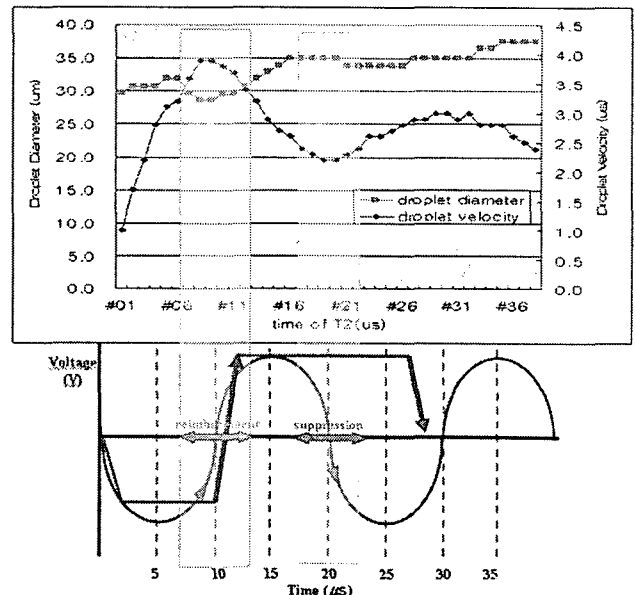


그림 9. 보강과 상쇄 간섭구간에서의 액적속도 변화

Fig 9. Changes of droplet velocity at reinforcement and suppression region.

그림 9.에서와 같이 T3 구간이  $T_c$ 와 보강간섭을 일으키는 구간에서 시작되면 같은 구동 전압에서도 액적의 토출속도

가 증가하게 된다. T3구간이  $T_c$ 와 상쇄간섭을 일으키는 구간에서 시작되면 토출되는 액적속도는 줄어들게 된다. 이것은 같은 구동 전압에서 액적의 속도를 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 높은 구동 전압을 가하면 액적의 크기가 커지기 때문에 구동전압을 높이지 않고 액적속도를 조절할 수 있다는 것은 산업용 잉크젯 헤드의 특성에 있어서 매우 중요하다. 따라서 안정되고 미세한 액적을 토출시키기 위해 챔버의 공진주기 즉  $T_c$ 와의 관계를 이용하여 그림 10과 같이 T1부터 T9까지 9개의 구간으로 이루어진 구동파형을 적용하였다. 액적이 노즐을 통해 토출될 때 세틀라이트의 원인이 되는 테일이 생기게 된다. 이러한 세틀라이트는 액적의 크기가 증가하는 원인이 되며 미세패턴을 제작하는 산업용 잉크젯의 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 첫 번째 토출에서 발생하는 테일을 잡아서 노즐로 다시 들어가는 두 번째 토출을 일으키는 구동파형을 개발하였다.

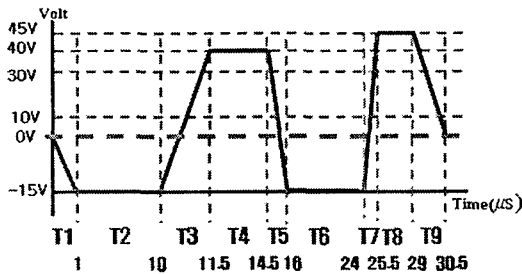


그림 10. 개선된 구동파형

Fig 10. Improved waveform of the driving signal applied to the inkjet head.

그림 11.에서와 같이 첫 번째 토출이 10  $\mu s$  일 때 T3구간이 시작되어 챔버의 공진주기와 보강간섭을 일으키며 이루어지고 테일이 18~14  $\mu s$ 에서 발생한다. 두 번째 토출이 24  $\mu s$ 에서 T7 구간이 시작되어 이루어지나 첫 번째 토출되는 액적의 테일을 잡아서 노즐 쪽으로 잡아당기지 못하고 오히려 토출이 되어 액적크기가 증가하게 된다. 이것은 두 번째 토출파형의 T7의 시작점이  $T_c$ 와 상쇄 간섭을 정확하게 이루지 못해 미세액적 토출을 위한 역할을 하지 못하고 토출이 되었다.

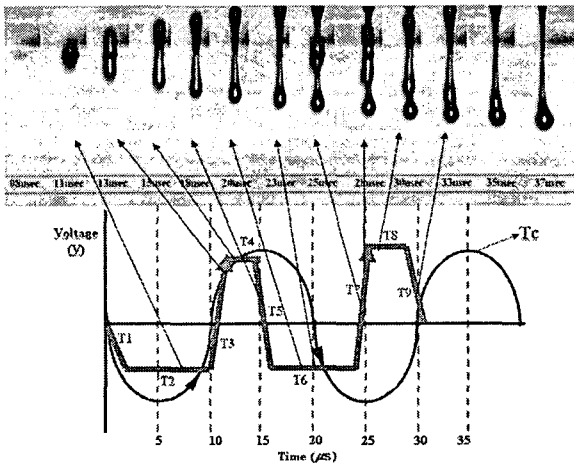


그림 11. T7에 의해 두 번째 액적이 토출되는 구동파형  
Fig 11. Double jetting waveform with second droplet.

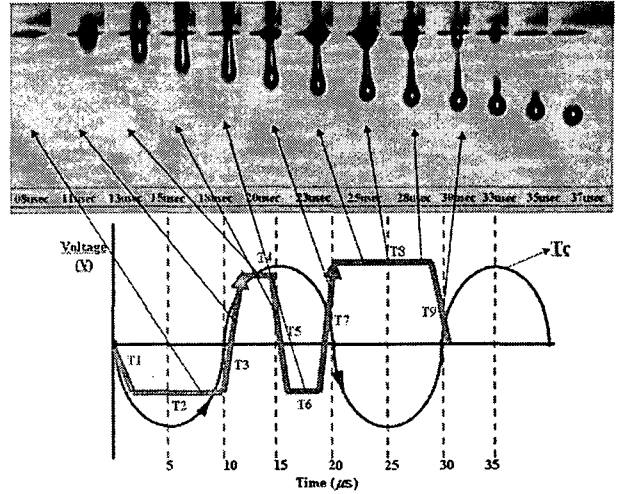


그림 12. T7에 의해 두 번째 액적이 토출되지 않는 구동파형  
Fig 12. Double jetting waveform without second droplet.

그림 12.에서와 같이 T2와 T6의 전압은 -15V를 유지하고 액적의 최대속도를 유지하기 위해 T2구간을  $(T_c/2) - T1$ 으로 정하였다. T4와 T8 구간은 액추에이터 특성 확보를 위해  $T_a$ 와 일치시켰다. 첫 번째 토출은 T5 구간에서 멈추게 되며 테일이 발생하게 된다. 이러한 테일을 제거하기 위해 T7 구간을  $T_c$ 와 연관하여 적절하게 위치시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 T7 구간을 20  $\mu s$ 에서 시작되게 하여  $T_c$ 와 상쇄간섭을 일으키게 하였다. 이러한 원리에 의해 T7의해 토출은 이루어지지 않으며 첫 번째 토출에 의해 생성된 테일을 잡아서 노즐로 들어가게 된다. 이러한 현상을 이용하여 4.4 m/s의 속도와 8 pl의 액적을 토출할 수 있었다. 또한 T9 구간을  $T_c$ 와 상쇄간섭을 일으키게 위치시켜 챔버의 댐핑효과를 극대화시켜 고주파 토출에서의 안정성도 확보하였다.

#### 4. 결 론

MEMS 공정을 통해 미세배선을 형성할 수 있는 산업용 압전 잉크젯헤드를 제작하였다. 압력챔버의 공진주기인  $T_c$ 는 1D lumped 모델과 전기적 등가회로를 구성하여 계산하였으며, 압전 액추에이터의 공진주파수  $T_a$ 는 LDV system에 의해 측정되었다. 이렇게 계산된  $T_c$  값은 스트로보스코프 시스템을 이용한 실험에서 확인되었다. 점도 4.8 cps, 표면장력 0.025 N/m의 수계잉크를 사용하여 10 kHz의 구동주파수, 4.4 m/s의 속도, 8 pl의 부피를 갖는 액적을 챔버의 공진주파수  $T_c$ 와의 상쇄간섭을 일으키는 구간에서 두 번째 토출을 시키는 구동파형을 이용하여 토출하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits," ACM/IEE Design Automation Conf., pp. 253-259, 1992.

[2] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits," IEEE Trans. on VLSI Systems, pp. 446-455, Dec. 1994.

[3] J. Monteiro, S. Devadas, and B. Lin, "A Methodology for Efficient Estimation of Switching Activity in Sequential Logic Circuits," ACM/IEEE Design Automation Conf., pp. 12-17, 1994.

[4] R. Burch, F. N. Najm, P. Yang, and T. N. Trick, "A Monte Carlo Approach for Power Estimation," IEEE Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, March 1993.

[5] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 3rd Edition, New York: McGraw-Hill, 1991.

저 자 소 개



**김영재 (金永財)**

1974년 4월 17일생. 2000년 한양대학교 재료금속공학부 졸업. 2002년 동 대학원 재료공학부 졸업(석사), 2002년~현재 삼성전기 중앙연구소 재직

Tel : 031-300-7755  
 Fax : 031-700-3900(3453)  
 E-mail : young\_jae.kim@samsung.com



**유영석 (劉永錫)**

1969년 5월 21일생. 1993년 한양대 재료학과 졸업. 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1997년~현재 삼성전기 중앙연구소 재직

Tel : 031-210-3766  
 Fax : 031-300-7900(4940)  
 E-mail : youngs.yoo@samsung.com



**심원철 (沈原徹)**

1974년 2월 26일생. 1999년 중앙대 대 기계공학과 졸업. 2001년 서강대 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2002년~현재 삼성전기 중앙연구소 재직

Tel : 031-210-3916  
 Fax : 031-300-7900(3567)  
 E-mail : wc.sim@samsung.com



**박창성 (朴敼聖)**

1977년 11월 5일생. 2003년 연세대 재료공학과 졸업. 2003년~현재 삼성전기 중앙연구소 재직

Tel : 031-210-6643  
 Fax : 031-300-7900(8888)  
 E-mail : cs1105.park@samsung.com



**정재우 (鄭在祐)**

1968년 2월 26일생. 1996년 한양대학교 재료금속공학과 졸업(박사). 1997년~현재 삼성전기 중앙연구소 재직(수석연구원)

Tel : 031-210-6679  
 Fax : 031-300-7900(6679)  
 E-mail : jwjoung@samsung.com



**오용수 (吳龍洙)**

1959년 02월 04일생. 1993년 일본 나카가와대 전자재료공학과 졸업(박사). ~현재 삼성전기 중앙연구소 eMD Lab장.

Tel : 031-210-5440  
 Fax : 031-300-7900(5440)  
 E-mail : youngsoo.oh@samsung.com