

## 셀프 센싱을 이용한 피에조 잉크젯의 파형 설계

### Waveform Design for Piezo Inkjet via Self-sensing Measurement

권 계 시† · 김 우 식\*

Kye-Si Kwon and Woosik Kim

(2007년 2월 6일 접수 ; 2007년 3월 22일 심사완료)

**Key Words** : Piezo Inkjet(피에조 잉크젯), Self-sensing Piezo(셀프 센싱 피에조), Inkjet Waveform(잉크젯 파형), Display Manufacturing Process(디스플레이 제조 공정)

#### ABSTRACT

Waveform design method for inkjet printing has been proposed by pressure wave measurement. The pressure wave inside the inkjet dispenser can be effectively measured by current measurement due to self-sensing capability of PZT. The pressure wave measured from current was verified by commercially available laser vibrometer. In order to obtain high speed inkjet droplets, two pulse waveform was designed such that the pressure wave after droplet formation can be minimized.

#### 1. 서 론

잉크젯 기술이 발전함에 따라서 사무실용 프린터로부터 디스플레이 제조 공정의 도구로서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다<sup>(1~7)</sup>. 잉크젯이 디스플레이 제조로 응용 범위를 넓혀감에 따라 잉크젯 공정의 신뢰성과 생산성을 극대화해야 한다. 따라서 다음과 같은 이슈들이 최근에 대두되고 있다.

(1) 높은 주파수 및 안정된 토출을 얻기 위한 인가 전압의 파형 최적화.

(2) 신뢰성을 얻기 위해서 토출 현상 모니터링.

잉크젯 내의 음향학적 압력파가 토출에 직접적으로 관련이 있는 것은 Bogy<sup>(8)</sup>의 실험적 및 이론적 검증을 통하여 밝혀진 이후 압력파를 이용한 파형의 최적화가 시도 되었다<sup>(8,9)</sup>. 그러나 압력파를 직접 측정하는 것은 어려워서 토출이 안되는 약한 전압을 이용하여 CCD 카메라와 strobe LED를 이용하여 메

니스커스(meniscus)의 모양을 관찰하여 압력파를 예측하였다<sup>(8)</sup>. 또한 파형 최적화를 위하여 잉크 액적이 떨어질 때 액적의 형상 혹은 속도를 strobe LED를 이용하여 관찰하면서 파형을 설계하는 연구가 주된 연구였다<sup>(10~12)</sup>. 그러나 실제 토출 후에도 압력파는 바로 감쇠가 되지 않고 어느 정도 계속하여 존재한다. 따라서 잔류 압력파가 남아 있을 때 다음 토출 신호를 인가하게 되면 토출 특성이 균일하게 되지 않고 산포가 생겨 품질에 문제가 될 수 있다. 한편으로는 잉크젯을 사용하여 디스플레이 제조에 응용할 때는 생산성을 증대시키기 위하여 빠른 주파수의 토출 특성이 필요하다. 이를 위해서는 효과적인 압력파를 측정하는 방법이 개발되어야 하고 이를 이용하여 토출 이후의 압력파를 빠르게 감쇠시킬 수 있는 파형의 설계가 필수적이라고 할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 이슈들의 해결책을 모색하기 위하여 실제로 구동 중에서 토출 상태를 측정 및 모니터링 하려고 한다. 기존의 잉크 토출을 모니터링 하기 위한 방법으로는 CCD카메라를 사용한 strobe-LED를 사용하여 직접 토출 되는 잉크 액적이나 meniscus를 관찰 하는 방법이 많이 사용되어

† 교신저자; 정회원, 순천향대학교 기계공학과

E-mail : kskwon@sch.ac.kr

Tel : (041) 530-1670, Fax : (041) 530-1550

\* 삼성종합기술원

왔다. 또 다른 방법은 piezo헤드의 각 노즐에 해당하는 부분의 헤드 외부 구조물의 진동을 레이저 진동계(laser vibrometer)를 사용하여 변형량을 측정하여 간접적으로 압력파를 알아내는 방법이다. 이 두 방법은 실제 거동에 많은 정보를 준다. 특히 레이저 진동 센서를 사용하여 압력파를 측정하면 각 노즐간의 상호 간섭(cross-talk)을 평가할 수 있을 뿐더러 간접적으로 meniscus진동을 예측하게 되어 파형 최적화에 활용을 할 수 있게 된다. 하지만 기존의 strobe LED를 사용하여 액적을 측정하거나 구조물의 진동을 직접 측정하는 것은 많은 노력이 필요하다. 특히 센서 또는 CCD카메라를 해당 노즐에 대해 기계적으로 정확하게 얼라인먼트하는 것이 필요하여 실제 프린팅하고 있는 동안 상태를 모니터링하는 것은 불가능하게 된다.

한편으로는 피에조 잉크젯 헤드는 피에조를 전압으로 구동하여 변형량을 얻어내는 방법으로 잉크를 토출 시킨다. 여기서 피에조는 변형량이 존재하면 반대로 전하를 발생시켜 셀프 센싱(self-sensing)이 가능한 소자이다. 따라서 피에조에 흐르는 전류와 인가하는 전압을 측정하면 역으로 변형량의 측정이 가능하다<sup>(13,14)</sup>. 최근에 피에조 잉크젯의 작동 중에 피에조의 임피던스 변화를 측정하여 토출 전·후의 압력파를 측정하려고 하였다<sup>(15,16)</sup>. 또한 토출 후에 잔류 압력파를 최소화하기 위하여 소위 iterative learning control이라는 알고리즘을 적용하여 입력 파형을 설계하였다. 이 연구는 피에조의 변형량으로부터 압력파를 간접적으로 측정하기 위하여 OP amp를 사용한 전류를 측정하는 방법을 사용하여 변형량 측정을 임피던스 측정 방법<sup>(16)</sup>에 비해 단순화시켰다. 또한 레이저 속도계를 사용하여 셀프 센싱으로 측정된 압력파를 검증하였다. 최종적으로는 셀프 센싱으로 측정된 잉크젯내의 압력파를 이용하여 입력 전압 파형 설계에 응용하였다. 이 연구에서는

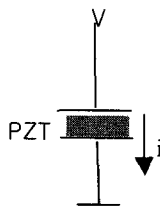


Fig. 1 Voltage and current in PZ

Wassink 등<sup>(15)</sup>이 제안한 파형 설계를 위한 복잡한 알고리즘 대신 비교적 단순한 2개의 펄스로 된 파형으로 상용화된 프린트 헤드 SX-128에 적용하여 토출 후의 압력파를 효과적으로 줄일 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

## 2. PZT의 전류 측정 방법

실제로 피에조에 흐르는 전류는 미세한 양이고 기계적 변형량에 의해 생긴 전류와 구동 전압에 대한 PZT의 정전 용량에 의한 전류의 양의 합이다.

$$i = i_q + i_c \tag{1}$$

여기서  $i_c = C_{PZT} \frac{dV}{dt}$  이고  $i_q = \frac{dq_p}{dt}$  이다.  $i_q$ 는 PZT 변형량에서 생기는 전류이다. 따라서 PZT의 전류  $i$ 를 측정할 후에 등가 콘덴서 정전 용량에 의한 전류  $i_c$ 를 빼면 PZT 변형량을 간접적으로 알 수 있게 된다.

전류를 측정하는 일반적인 방법은 Fig. 2와 같이 작은 값의 저항을 이용하여 저항  $R$ 의 양단 전압인  $V_2 = R \times i$ 를 측정하는 방법이다<sup>(16)</sup>. 그러나 전류가 작은 경우 작은 저항을 사용하면 측정되는 전압 역시 작게 되어 미소 전류를 측정하는 방법으로는 문제가 있다. 저항값이 큰 저항을 사용하면 PZT를 구동

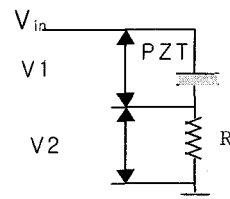


Fig. 2 Current measurement from resistance

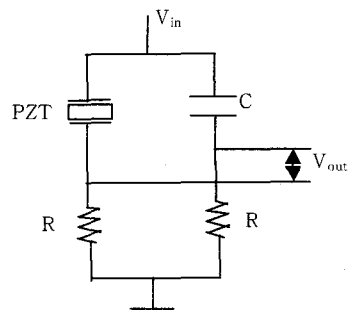


Fig. 3 Bridge circuit

하는  $V_1$ 의 크기가 입력전압  $V_{in}$ 과 많이 달라지는 문제점뿐만 아니라 PZT의 실질적인 입력 전압인  $V_1$ 은 주파수 특성을 가지게 된다. 또한 A/D 변환기 등을 이용하여 전압과 동시에 전류를 측정하여 변형량에 대한 값만을 계산해야 하는 추가적인 처리가 필요하다<sup>(16)</sup>.

미세한 전류로부터 변형량을 측정하는 방법으로서 Fig. 3과 같은 브리지(bridge)회로를 사용할 수 있다. 브리지회로를 사용하여 Fig. 3과 같이  $V_{out}$ 을 측정하면 정전 용량의 영향을 제거한 변형량 만의 전류의 영향을 얻을 수 있다. 여기서 C는 PZT와 등가의 정전 용량을 갖는 콘덴서이다. 하지만 저항 R에 의해 실질적인 PZT에 인가되는 전압이 낮아지게 되고 또한 실질적으로 PZT에 인가되는 전압 역시 주파수 특성을 가지게 되는 문제점이 있다. 한편으로 주파수 특성이 문제가 되기 때문에 저항 R대신 C를 사용할 수 있다. 그렇게 되면 주파수 특성의 영향을 이론적으로는 받지 않게 된다.

미세 전류를 측정하기 위해서는 Fig. 4와 같은 OP amp를 이용한 방법이 많이 사용된다<sup>(17)</sup>. 이 방법은 전원의 접지 대신에 OP amp의 가상접지(virtual ground)를 사용하여 측정에 대한 영향(loading effect)을 최소화하면서도 전류를 측정할 수 있는 방법이다. 전류 측정 범위는 OP amp의 구동할 수 있는 범위로 최대 수십~수백 mA까지 구동 가능하고 아주 미세한 전류값도 측정이 가능한 장점이 있다.

예를 들면 Fig. 4에서 저항값 R을 1 MΩ으로 사용하면 약 0.001 mA의 전류가 1 Volt의 출력 전압으로 얻을 수 있다. 여기서 저항값은 전류의 범위에 따라서 선정한다. 따라서 이 방법은 아주 작은 전류를 측정하는데 적합한 방법이다. 주파수 대역은 OP amp 사양에 의해 결정되는데 PZT잉크젯에 인가하는 전압 파형 및 주파수를 고려하여 OP amp를

선정해야 된다. 이때 출력되는 전압은  $V_{out}=i \times R$ 이 된다. 따라서 전류에 저항 R만큼의 상수가 곱해진 전압을 얻음으로서 작은 전류를 측정하는 것이 가능하다. 고주파 잡음이 심한 경우 작은 용량의 C\*를 추가 하여 저역 통과 필터(low pass filter)를 구성하여 잡음의 영향을 줄여주는 것을 고려할 수 있다.

### 3. 셀프 센싱 회로의 구성

잉크젯 헤드에서 PZT 변형량을 측정하기 위해서는 측정된 전류로부터 PZT의 정전 용량에 의한 영향을 제거해야 한다. 정전 용량에 의한 전류를 알기 위해서는 PZT의 정전 용량을 실험적으로 정확하게 구하는 것이 필요하다. 이를 위하여 Fig. 4의 회로를 사용하여 입력 전압과 출력 전압의 관계로부터 정전 용량의 값을 구하였다. 여기서 C\*은 사용하지 않았고, R은 500 kΩ를 사용하였다. 정전 용량에 의해 Fig. 4의 회로는 출력전압이 입력전압에 대해 미분 특성이 얻어지는 회로이다. 따라서 PZT의 정전 용량의 값을 C라고 할 때 전압의 입력과 출력의 크기는 다음과 같은 관계가 있다.

Table 1은 128개의 노즐 중 1번 노즐을 사용하여 실험한 결과이고, 다른 노즐로 실험을 하여도 수 퍼센트 이내의 편차로 약 91 pF의 정전 용량을 얻을 수 있다. 그러나, 출력전압  $V_{out}$ 에는 정전 용량에 의한 영향뿐만 아니라 변형량에 의한 영향도 포함되는

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = 2\pi fRC \quad (2)$$

Table 1 Capacitance calculation

Frequency	$V_{in}$	$V_{out}$	Phase	Capacitance
1,000	20	1.11	-90	8.96E-11
2,000	20	2.28	-90	9.20E-11
3,000	20	3.4	-91	9.15E-11
4,000	20	4.54	-91	9.16E-11
5,000	20	5.64	-91	9.10E-11
6,000	20	6.8	-91	9.15E-11
7,000	20	7.92	-91	9.13E-11
8,000	20	9.08	-92	9.16E-11
9,000	20	10.2	-92	9.15E-11
10,000	20	11.3	-92	9.12E-11

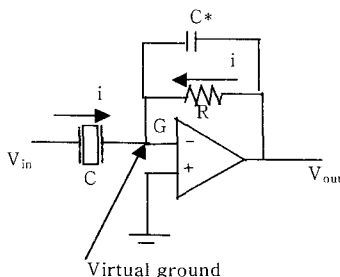


Fig. 4 Current to voltage converter

데 SX-128을 이용하여 측정한 결과 변형량에 의한 영향은  $V_{out}$ 의 전체 크기의 약 1/20~1/50이 됨을 알 수 있었다. 따라서 식(3)을 이용하여  $V_{in}$ 과  $V_{out}$ 을 측정하여 근사적으로 PZT의 정전용량을 측정하는 것이 가능하였다.

실제의 구동중의 변형량을 측정하기 위해서는 PZT의 정전용량에 의한 영향을 전류에서 빼야 된다. 그러나 상용 콘덴서 중에서 91 pF의 용량의 콘덴서를 구하기가 힘들다. 또한 일반적으로 고주파용으로 많이 쓰이는 세라믹 콘덴서의 내전압이 50 Volt 정도이나 실제 SX-128의 구동전압은 인크 점성에 따라서 100 Volt 이상이 될 수도 있다. 이러한 문제를

를 해결하기 위하여 3개의 세라믹 콘덴서를 Fig. 5와 같이 직렬로 사용하여 용량을 PZT에 해당하는 정전 용량을 근사적으로 맞추고 내전압 역시 만족시킬 수 있었다.

PZT 변형량을 얻기 위해서는 Fig. 6과 같은 회로를 구성하였다. 입력 전압  $V_{in}$ 을 인크젯 헤드와 등가 콘덴서에 인가 했을 때 Fig. 6(a)의 회로를 사용하여 각각의 전류에 해당하는  $V1$ 과  $V2$ 의 전압을 얻을 수 있다.  $V1$ 은 입력 전압에 대한 등가 콘덴서에 의한 전류이고  $V2$ 는 PZT의 정전 용량과 변형량에 의한 전류에 해당하는 값이다. 따라서 Fig. 6(b)의 차동 회로를 사용하여 변형량만의 신호를 얻을 수 있다. 여기서 사용된 세라믹 콘덴서로 구성된 등가 정전 용량값,  $C_{eq}$ 는 PZT의 정전 용량, CPZT와 다를 수 있기 때문에 Fig. 6(b)에서와 같이 가변 저항을 사용하여 게인을 조절하여 오차를 최소화해야 한다.

이 방법은 드라이브가 구동하는 것이 PZT와 등가 콘덴서뿐 이므로 실제 구동하는 전류는 PZT 단독에 비해서 2배 정도가 된다. PZT의 전류는 자기 때문에 측정에 의한 영향(loading effect)은 문제가 되지 않았다. 반면에 미세한 전류를 정밀하게 측정이 가능하기 때문에 PZT의 전류를 측정하는 데는 OP amp를 사용한 전류 측정 방법이 장점이 있다.

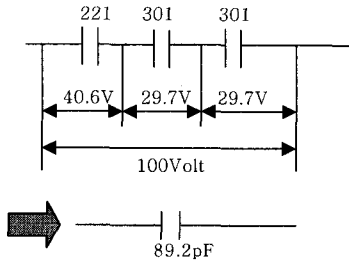
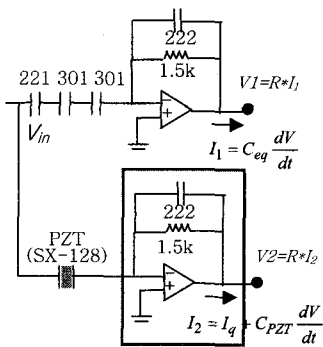
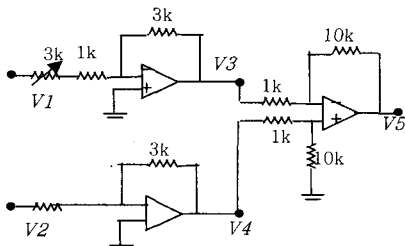


Fig. 5 Equivalent capacitor



(a) Current to voltage converter



(b) Differential amplifier

Fig. 6 Self-sensing circuit for SX-128

#### 4. 셀프 센싱 변형량 검증

셀프 센싱으로 변형량 얻기 위한 실험을 위하여 Fig. 7과 같이 장치를 구성하였다. 프린트 헤드로는 Dimatix사의 SX-128을 사용하였다. 이 실험에서 사용된 잉크는 유기 용제(solvent)를 사용한 녹색의 안료(pigment)잉크를 사용하였다. 잉크의 상온에서 점성은 약 9 cp이다. 잉크의 헤드로의 공급 압력을 조절 하기 위하여 잉크와 헤드의 높이를 이용한 수두를 이용하였다. 잉크젯을 구동하기 위한 전압 파형을 만들기 위하여 Agilent 33220A의 임의 파형 발생기 사용하였다. 사다리꼴의 파형을 만들기 위하여 Labview를 이용하여 데이터를 만들고 GPIB 통신을 사용하여 Agilent 33220A에서 최대전압이 0.6 Volt인 Fig. 9의 사다리꼴 파형이 나오도록 하였다. PZT를 구동하기 위하여 상용화된 TREK PZT drive PZD350을 사용하여 임의 파형 발생기에서 나온 신호 100배를 증폭하여 인크젯 헤드의 PZT를

구동하였다. 한편으로는 셀프 센싱으로 측정된 신호를 검증하기 위하여 레이저 속도계를 Fig. 8과 같이 구성하여 두 신호를 비교하였다.

Fig. 9로 정의된 사다리꼴 파형이  $V_{in}$ 으로 SX-128에 인가될 때 Fig. 6의 회로를 이용하여 PZT 변형량을 측정하였다. 여기서 Fig. 9는 SX-128을 구동하기 위한 일반적인 파형의 모양이고 실제 입력 전압의 크기와 dwelling 시간 등은 잉크의 특성인 음속, 점성 및 표면장력을 고려하여 달리 설계 될 수 있다. 한편으로는 실제 실험에서 사용한 TREK사의 PZD 350의 주파수 특성(large signal bandwidth DC-40 kHz)으로 인해 정확하게 사다리꼴 파형 모양으로 증폭되지는 않게 되었다.

PZT의 전류측정은 입력전압에 대해 정전 용량 때문에 미분 특성이 주로 나타나므로 입력 전압이 급격히 변했을 때 OP amp 전압의 발진 및 잡음을 막기 위하여 480 kHz의 1차 필터를 사용하였다.

PZT와 등가 콘덴서의 정전 용량은 근사적으로는 비슷하지만 정확히 같지는 않다. 따라서 Fig. 8과 같은 단일 파형(single waveform)을  $V_{in}$ 에 입력하였을 때 Fig. 6(a)의  $V1$ 과  $V2$ 에 측정된 전류는 Fig. 10과

같이 피크 부분에서 상당한 차이를 갖게 된다. 따라서 Fig. 6(b)와 같이 등가 콘덴서의 전류에 해당하는 부분의 gain을 가변저항으로 조정하였다. 최종적으로  $V3$ 와  $V4$ 의 전압은 그림 Fig. 10(b)와 같이 조정이 가능하였다.

최종 신호  $V5$ 는 PZT의 전류에서 등가 콘덴서에 의한 전류를 빼고 다시 10배를 증폭하였다. 최종적으로 Fig. 11(a)에서 볼 수 있듯이 점선으로 나타낸 입력전압이 주어질 때 실선의 변형량을 얻었다. 여기서 전류는 최종적으로 15,000배의 이득을 갖기 때문에 신호에 포함된 잡음이 문제가 될 수 있다. 또한 이득이 크기 때문에 등가 콘덴서와 PZT의 정전 용량의 미소한 차이가 크게 증폭이 된다.

셀프 센싱(self-sensing)으로 얻은 변형량을 검증하기 위하여 Fig. 8과 같이 Polytec사의 레이저 진동계(OFV 511, PFV 3001)를 사용하였다. 여기서 레이저 속도계의 계인은 1 Volt가 25 mm/s에 해당하고 절점주파수(low pass cut-off frequency)를 250 kHz로 설정하였다. 레이저 진동계로 측정한 결과와 셀프 센싱으로 얻은 신호를 Fig. 11에서 비교하였다. 변형량의 주파수가 약 80 kHz임을 감안하면

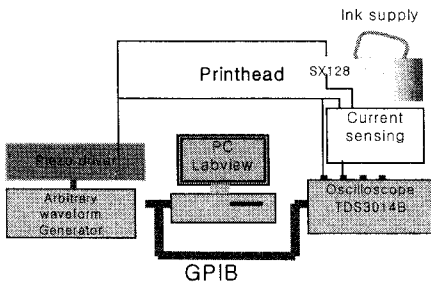


Fig. 7 Experimental setup

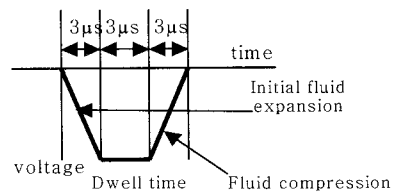


Fig. 9 Typical waveform for SX-128

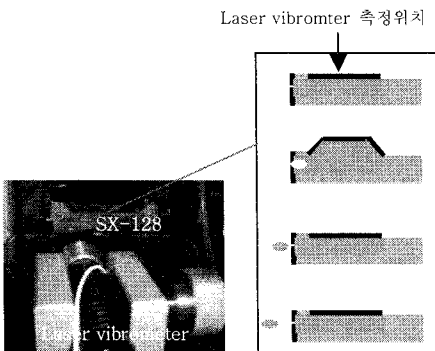
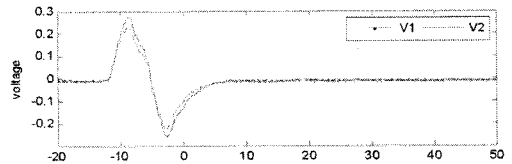
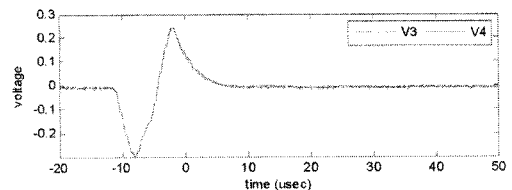


Fig. 8 Comparison with laser vibrometer



(a) Test point voltage at  $V1$  and  $V2$



(b) Test point voltage at  $V3$  and  $V4$

Fig. 10 Current from PZT and equivalent capacitance

약 15 nm정도의 진동이 측정됨을 알 수 있다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 셀프 센싱으로 측정된 신호인 경우 입력 전압이 존재하는 9  $\mu$ sec구간에서 가변 저항으로 조절한 게인에 따라서 크기가 민감하게 달라지는 문제점이 있고 게인만으로 완벽하게 PZT의 정전 용량에 의한 효과를 없애고 변형량만의 신호를 얻는 것에는 한계가 있었다. 따라서 입력 전압이 인가되는 부분에서의 정밀도는 떨어지는 문제가 있다. 그러나 전압의 인가 후에는 변형량은 레이저 변위계로 측정된것과 비교적 잘 일치 한다. 한편으로는 레이저 진동계(laser vibrometer) 신호는 인가전압에 대해 응답이 약 수  $\mu$ sec의 시간지연이 있었다. 입력 전압이 있는 9  $\mu$ sec부분에서는 변형량 추정에 정밀도가 떨어지는 문제가 있기 때문에 이 부분을 신호후분에서 제외하고 변형량과 진동 센서로부터 얻은 신호를 FFT분석하면 Fig.12와 같다.

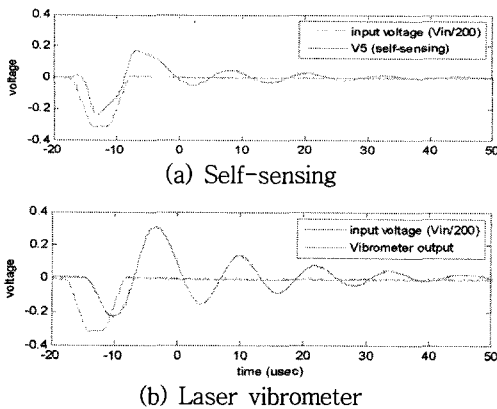


Fig. 11 Comparison with laser vibrometer

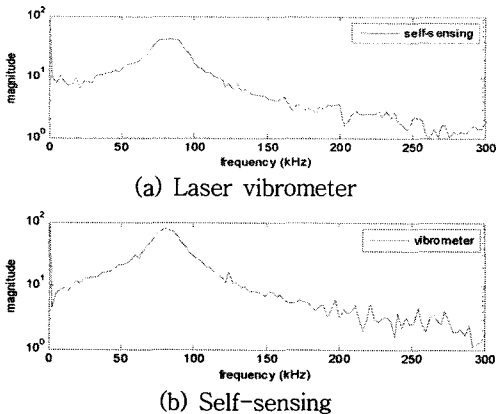


Fig. 12 FFT analysis

Fig. 12에서 알 수 있듯이 셀프 센싱으로 얻은 신호는 약 80 kHz로 진동함을 알 수 있었고 레이저 속도계로 얻은 신호와 잘 일치한다. 따라서 전류 측정을 통해서 레이저 속도계를 대신하여 잉크젯 헤드의 작동 특성의 하나인 변형량을 간접적으로 측정하여 판단 단하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

레이저 속도계는 토출 신호가 입력되는 노즐 부분 위치에 정밀하게 위치 시켜야 되는 단점이 존재하나 셀프 센싱은 헤드의 위치 관계없이 쉽게 전기적으로 측정이 가능한 장점이 있다.

### 5. 파형 설계

잉크젯 토출이 압력파와 관련이 있다는 것을 밝혀낸 이후에 이를 이용하여 파형을 설계하려는 노력이 진행되어 왔다<sup>(8)</sup>. 그러나 압력파를 직접 측정하기 어렵기 때문에 압력파를 측정하는 대신에 strobe LED를 이용하여 액적의 속도와 체적을 측정하여 파형을 설계하여 왔다<sup>(10~12)</sup>.

최근에 피에조 잉크젯 헤드의 작동 중에 피에조의 임피던스 변화를 측정<sup>(15,16)</sup>하여 토출 후의 압력파를 최소화 하여 높은 주파수의 토출이 가능하도록 하려는 연구가 진행되었다<sup>(15)</sup>. 또한 잔류 압력파를 최소화하기 위하여 소위 iterative learning control이라는 알고리즘을 적용하여 파형을 설계하였다<sup>(15)</sup>.

이 방법은 간단한 전류 측정만을 이용하여 잉크젯 디스펜서 내의 압력파를 간접적으로 측정하였으며, 이를 레이저 속도계를 이용하여 검증하였다. 이렇게 측정된 압력파를 이용하여 토출 후에 압력파가 효과적으로 감쇠 되도록 두개의 펄스를 갖는 파형을 실험적으로 설계하였다.

Fig. 9와 같이 정의된 파형을 인가하였을 때 Fig. 13과 같은 압력파가 진행된다. 파형의 음의 전압 방향으로 상승 부분인 팽창(expansion)파형 인가 시에는 두 개의 음의 압력이 반대방향으로 진행하고 반대로 파형의 0 Volt의 방향으로 하강 부분인 압축(contraction) 파형이 인가 시는 반대로 양의 압력이 PZT를 중심으로 양쪽으로 진행된다. 만일 잉크 공급부(supply)쪽에 압력파가 진행된다면 근사적으로 열림 조건이 되므로 반사되어 반대 방향 압력이 된다. 하지만 노즐쪽은 면적이 줄어들어 근사적으로 닫힘 조건이 되므로 압력파는 반사하여 같은 압력이 유지가 된다.

유체의 음속을  $C$ 라고 하고 잉크젯 디스펜서(dispenser)의 길이를  $L$ 이라고 하면 초기에 팽창 파형 입력 후  $L/C$ 시간 이후에는 압력파는 다시 가운데에서 만나게 된다. 따라서 Fig. 14와 같이  $t=L/C$ 에서 압축(contraction) 파형을 주는 것이 좋다. 그러면  $3L/2C$ 에서 잉크가 강한 압력으로 노즐쪽에서 잉크가 토출이 된다. 토출된 이후의 압력파는  $4L/C$ 의 주기를 갖고 진동하게 된다<sup>(8)</sup>. 이 연구에서 사용된 self-sensing 으로 측정된 압력파를 사용하여 dwell time을 설계하는 것이 가능하다. 압력파의 주기  $4(L/C)$ 는 약  $12.5\mu\text{sec}$ 이므로  $t=L/C$ 는 약  $3.1\mu\text{sec}$ 로 이 연구에서 사용된  $3.0\mu\text{sec}$ 의 dwell time은 최적 dwell time에 근접하게 설계됨을 알 수 있다. 하지만 PZT가 항상 디스펜서 정 가운데에 존재하는 것이 아니고 상용화된 잉크젯 헤드의 정확한 디스펜서의 길이( $L$ ) 역시 측정하기 어렵다. 또한 잉크의 음속값이 주어지지 않을 수도 있기 때문에 파형을 설계할 때는 실험적으로 dwelling time을 결정하는 경우가 많다. 이때 압력파를 직접 측정하는 것이 어렵기 때문에 strobe LED를 이용하여 액적의 모양 및 속도를 관찰 하여 waveform을 결정한다. Strobe LED는 액적 모양을 관찰 하는 것은 가능하지만 압력파를 직접 측정하는 것은 아니다. 따라서 strobe LED로 파형을 설계한다면 토출의 압력파의 정보 없이 파형이 설계될 수 있다. 토출 주파수가 낮을 때는 토출 후의 잔류 압력파가 충분히 감쇠된 후 다음 액적이 토출 되어 문제가 없으나 빠른 주파수로 토출시키기 위해서는 압력파의 측정과 고속 토출을 위한 입력 전압의 파형 설계가 필요하다. 이 연구에는

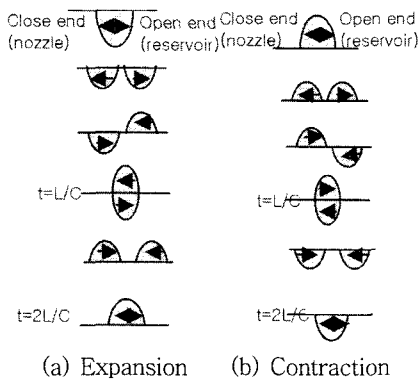


Fig. 13 Pressure wave propagation in a piezo-printhead

헤드 안의 유체의 압력파를 측정하기 위하여 PZT 변형량을 셀프 센싱을 이용하여 측정하였다.

한편으로는 이렇게 결정된 single pulse의 파형으로는 토출 된 후의 내부 압력파를 빨리 없애는데 한계가 있을 수 있기 때문에 이 연구에서는 Fig. 15와 같은 두 펄스의 파형을 고려하도록 한다.

압력파는 Fig. 13과 같이  $t_r=2L/C$ 시간 이후에는 음의 압력파는 양의 압력파가 되어 중심에서 양쪽으로 진행하고 양의 압력파는 음의 압력파가 되어 양쪽으로 진행하게 된다. 따라서 두 번째 파형은  $2L/C$ 의 같은 형태의 파형을 인가하면 첫 파형의 팽창에 의한 음의 압력이 양의 압력이 될 때 다시 음의 압력을 주게 되어  $2L/C$  이후의 압력파가 상쇄된다. 마찬가지로 첫 파형의 압축에 의한 양의 압력 역시 인가 후에  $2L/C$  이후에 정확히 음의 압력이 되므로 다시 압축파형을 인가하게 되어 압력파를 상쇄할 수 있게 된다. 여기서 압력파가 진행되면서 진폭이 감쇄가 된다. 진폭이 줄어드는 폭은 잉크 특성에 따라 다르게 되며 이를 고려하여야 한다. 이 연구에서는 실험적으로 두 번째 파형의 크기를 결정하였고, 첫

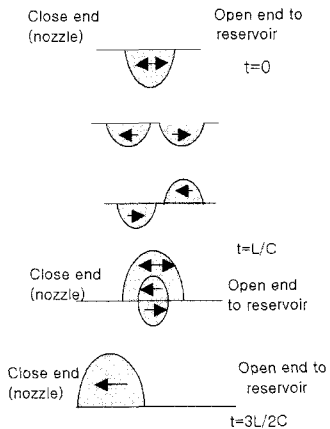


Fig. 14 Waveform design

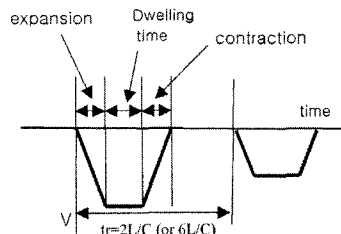


Fig. 15 Two pulse waveform

파형의 약 1/2의 크기로 두 번째 파형의 전압을 인가하는 것이 잔여 압력파를 효과적으로 줄일 수 있음을 실험적으로 알 수 있었다.

여기서 두 번째 파형이 시작 시간인  $tr=2L/C$ 을 결정하기 위하여 별도의 측정 센서를 사용하여 meniscus나 해당 노즐에 해당하는 구조의 진동을 측정하는 대신에 셀프 센싱을 이용하여 압력파를 간접적으로 측정하여 결정하였다. Fig. 12에서 압력파의 주파수는 약 80 kHz이고 이를 이용하여 계산한 압력파의 주기  $4(L/C)$ 는 약 12.5  $\mu\text{sec}$ 이다. 따라서 첫 번째 파형 후에 두 번째 파형의 인가하는 시간은  $tr=2L/C$  (6.25  $\mu\text{sec}$ )가 된다. 그러나 팽창을 위한 상승시간(rise time)과 압축을 위한 하강 시간 (falling time)을 고려한 파형의 총 인가 시간은 9  $\mu\text{sec}$ 가 되므로 두 번째 파형이  $tr=2L/C$ 에서 정의되지 못한다. 따라서 다음 주기를 고려한  $tr=6L/C$ 에 2번째 파형을 입력해야 함을 알 수 있다. 즉 압력파의 주기의 1.5배의 시간에 두 번째 파형을 인가하였다. 따라서  $tr=18.75 \mu\text{sec}$ 가 된다. 따라서 두 번째 파형을  $tr=18.75 \mu\text{sec}$ 에서 인가해주게 되면 두 번째 파형이 끝나는 27.75  $\mu\text{sec}$ 부터는 압력파가 상쇄되기 시작한다. 두 번째 파형은 단지 토출 후의 압력파의 진동을 없애주는 것이므로 단일파형과 비교했을 때 두 번째의 파형으로 토출이 되는 잉크 액적의 속도 혹은 체적에는 영향을 미치지 않고 토출 후의 내부적인 압력파만 상쇄시켜 주게 된다.

Fig. 16은 두 번째 파형의 시작되는 시간의 효과를 알아보기 위하여  $tr$ 을 변화시키면서 셀프 센싱

으로 측정된 압력파를 비교해 보았다.

Fig. 16에서 알 수 있듯이 단일 파형인 경우 압력파가 70~80  $\mu\text{sec}$ 까지 존재하여 이 사이에 전압을 인가하여 다음 액적을 토출시킨다면 토출 특성에 액적 체적 및 속도에 영향을 주게 되어 균일한 액적을 얻기가 어렵다. 따라서 단일 파형으로 사용한다면 최대 토출 주파수는 약 12 kHz가 된다. 그러나 두 펄스의 입력 파형을 사용하고  $tr=18.5 \mu\text{sec}$ 일 때 토출 후의 압력파가 상쇄되었고 압력파가 유지되는 시간은 약 30~40  $\mu\text{sec}$ 을 알 수 있었다. 이때 얻을 수 있는 토출 주파수는 약 30 kHz 정도로 단일 파형에 비해 3배정도 빠르게 되어 그만큼 생산성을 높이는 것이 가능하게 되었다. 그러나 두 번째 파형의  $tr$ 을 잘못 선정된 경우에는 단일 파형보다 오히려 토출 후의 압력파가 증폭되기도 하였다. 따라서  $tr$ 의 최적점이 존재함을 알 수 있었고, 그 시간은  $tr=2L/C$ 이나 그 때 두 번째 파형이 정의가 되지 않게 되는 경우  $tr=6L/C$ 가 됨을 알 수 있었다.

특히 디스플레이 제조 등에는 수많은 픽셀에 대한 균일한 특성이 얻어져야 하므로 토출 후에 압력파를 빠르게 상쇄시켜주는 파형의 설계가 필요하게 된다. 또한 토출후의 압력파형이 상쇄가 되면 다음 액적을 안정적으로 토출이 가능하기 때문에 고속 프린팅이 가능하여 생산성을 향상 시키는 장점도 있다. 따라서 균일하면서 빠른 토출이 필요할 때 압력파의 측정은 중요한 이슈가 된다. 따라서 이 방법이 제시한 셀프 센싱을 이용한다면 별도의 레이저 속도계 등의 설치 없이 바로 변형량을 측정을 통하여 압력파를 간접적으로 알 수 있는 장점이 있다. 또한 설치 공간등의 문제로 센서를 설치하기 어려운 곳도 쉽게 접근이 가능한 방법이다. 이 방법은 전기적인 신호를 이용하므로써 다른 센서를 사용할 때 필요한 정밀한 기계적인 얼라인먼트가 필요 없는 장점도 가지고 있다.

## 6. 토의 및 결론

잉크젯의 PZT에 흐르는 미세한 전류를 측정하기 위한 회로를 개발하여 작동 중에 발생하는 잉크젯 디스펜서의 압력파를 간접적으로 측정하였다. 셀프 센싱으로 간접적으로 측정된 압력파를 레이저 속도계를 이용하여 검증하였다. 토출후의 압력파의 주기

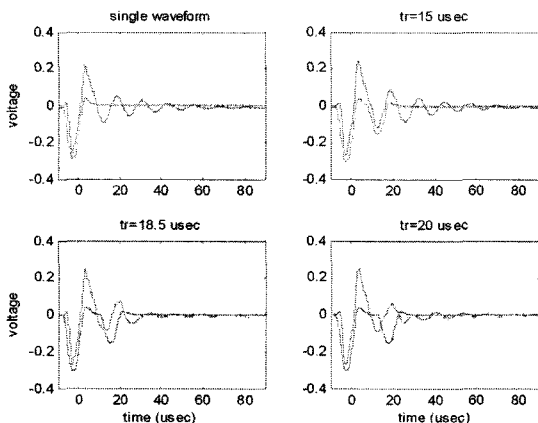


Fig. 16 Pressure wave propagation in a piezo-printinthead



를 측정하여 그 주기의 1.5배가 되는 시간에 모양은 같고 전압의 크기가 0.5배인 같은 모양의 파형을 인가함으로써 압력파의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 상용화 잉크젯 헤드인 SX-128을 사용하여 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 삼성종합기술원의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Kwon, K. S., Shin, S. J. and Kim, S. J., 2005, "The Opportunity of Printing Technology for Display Manufacturing Process", Proceedings of Colloquium on Micro/Nano Thermal Engineering, Seoul National University.

(2) Bale, M., et al, 2006, "Ink Jet Printing: The Route to Production of Full Color P-OLED Displays", Research Paper, Website: <http://www.cdtltd.co.uk>.

(3) Rhee, J., et al, 2006, "A 14.1-in Full-color Polymer-LED Display with a-Si TFT Backplane by Ink-jet Printing", SID (society for information display).

(4) Gohda, T., et al., 2006, "A 3.6-in 202-ppi Full-color AMPLED Display Fabricated by Ink-jet Method", SID.

(5) Koo, H. S. et al, 2006, "Fabrication and Chromatic Characteristics of the Greenish LCD Colour-filter Layer with Nano-particle Ink Using Inkjet Printing Technique", Displays, Vol. 27, pp. 124~129.

(6) Creagh, L. T. et al., 2004, "FPD Manufacturing Conference, Ink Jet Printhead as a precision deposition tool in manufacturing FPDs", SEMICON China.

(7) Albertalli, D., 2005, "Gen 7 FPD Inkjet Equipment Development status", SID.

(8) Bogy, D. B. and Talke, F. E., 1984, "Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-demand Ink Jet

Devices", IBM Journal of Research and Development, Vol. 28, No. 3, pp. 314~321.

(9) Microfab technote, 1999, "Drive Waveform Effects on Ink-jet Device Performance", 99-03.

(10) Molesa, S. E., 2006, "Ultra-low-cost Printed Electronics", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

(11) Dong, H. and Morris, J. F., 2006, "An Experimental Study of Drop-on-demand Drop Formation", AIP, Physics of fluids, Vo. 18, 072102.

(12) Szczech, J. B., Gamota, D. R., Zhang, J., 2002, "Fine-line Conductor Manufacturing Using Drop-on-demand PZT Printing Technology", IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 25, No. 1, pp. 26~33.

(13) Lee, C., Toshihiro, I. and Suga, T., 1999, "Self-excited Piezoelectric PZT Microcantilevers for Dynamic SFM with Inherent Sensing and Actuating Capabilities", Sensor and Actuators A, Vol. 72, pp. 179~188.

(14) Giurgiutiu, V. and Zagari A. N., 2002, "Embedded Self-sensing Piezoelectric Active Sensors for On-line Structural Identification", Journal of Vibration and Acoustics, ASME, Vol. 124, pp. 116~125.

(15) Wassink, M. B. G., Bosch, M. J. M., Bosgra, O. H. and Koekebakker, S., 2005, "Enabling Higher Jet Frequencies for an Inkjet Printhead Using Iterative Learning Control", Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada, Aug. 28-31.

(16) Groninger, M. A., Kruijt, P. G. M., Reinten, H., Schippers, R. H. and Simons, H. M. M., 2003, "A Method of Controlling an Inkjet Printhead, an Inkjet Printhead Suitable for Use of Said Method, and an Inkjet Printer Comprising Said Printhead", European patent, EP 1 378 360 A1.

(17) Horowitz, P. and Hill Windfield, 1989, "The Art of Electronics", Cambridge University Press.

(18) Website: <http://www.dimatix.com>