

피에조 잉크젯의 셀프 센싱 검출 및 응용

Self-sensing measurement of piezo inkjet and its Applications

권계시† · 김우식* · 김상일* · 신승주* · 김성진*

Kye-Si Kwon, Wousik Kim, Sang-Il Kim, Seung-Joo Shin and Seongjin Kim

Key Words : piezo inkjet, self-sensing, waveform design, condition monitoring

ABSTRACT

Self-sensing measurement of piezo inkjet and its application are discussed. The pressure wave inside the inkjet dispenser was measured by current measurement due to self-sensing capability of PZT. The pressure wave measured from current was verified by commercially available laser vibrometer. Here, two applications using self-sensing signal were discussed: waveform design for high speed jetting and condition monitoring. For waveform design, two pulse waveform was designed based on self-sensing signal such that the pressure wave after droplet formation can be minimized. For condition monitoring, self-sensing signal was shown to be effective in detecting air bubble trapped in inkjet printhead.

1. 서 론

잉크젯 기술이 발전함에 따라서 사무실용 프린터로부터 디스플레이 제조 공정의 도구로서 응용 범위가 점차 넓어지고 있다[1-7]. 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[8]의 실험적 및 이론적 검증을 통하여 밝혀진 이후 압력파를 이용한 파형의 최적화가 시도 되었다[8,9]. 그러나 압력파를 직접 측정하는 것은 어려워서 토출이 안되는 약한 전압을 이용하여 CCD 카메라와 strobe LED 를 이용하여 메니스커스(meniscus)의 모양을 관찰하여 압력파를 예측하였다[8]. 또한 파형 최적화를 위하여 잉크 액적이 떨어질 때 액적의 형상 혹은 속도를 strobe LED 를 이용하여 관찰하면서 파형을 설계하는 연구가 주된 연구였다[10-12]. 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 증대 시키기 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. 또한 잉크젯을 제조 장비로 사용하기 위해서는 잉크젯의 작동을 보다 쉽게 진단하여 신뢰성을 증가 시켜야 된다.

본 연구에서는 이러한 이슈들의 해결책을 모색하기 위하여 실제로 구동 중에서 토출 상태를 측정 및 모니터링 하려고 한다. 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 [13,14].

최근에 피에조 잉크젯의 작동중에 피에조의 임피던스 변화를 측정하여 토출 전 후의 압력파를 측정하려고 하였다 [15,16]. 또한 토출 후에 잔류 압력파를 최소화하기 위하여 소위 Iterative Learning Control 이라는 알고리즘을 적용하여 입력 파형을 설계하였다.

본 연구는 피에조의 변형량으로부터 압력파를 간접적으로 측정하기 위하여 OP amp 를 사용한 전류를 측정하는 방법을 사용하여 변형량 측정을 임피던스 측정 방법[16]에 비해 단순화 시켰다. 또한 레이저 속도계를 사용하여 셀프 센싱으로 측정된 압력파를 검증하였다. 최종적으로는 셀프 센싱으로 측정된 잉크젯내의 압력파를 이용하여 입력 전압 파형 설계에 응용하였다. 본 연구에서는 Wassink et al [15]이 제안한

† 책임저자; 순천향대학교 기계공학과
E-mail : kskwon@sch.ac.kr
Tel : (041) 530-1670, Fax : (041) 530-1550

* 삼성종합기술원

파형설계를 위한 복잡한 알고리즘 대신 비교적 단순한 2 개의 펄스로 된 파형으로 상용화된 프린트 헤드 SX-128 에 적용하여 토출 후의 압력파를 효과적으로 줄일 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

또한 본 연구에서는 잉크젯 헤드가 구동 되고 있을 때 잉크젯 헤드 내의 PZT 의 변형량으로 부터 압력파를 간접적으로 측정하고 이것을 잉크젯의 작동 상태를 평가하고 모니터링 하는 방법에 대하여 논의 하려고 한다. 특히 실험결과를 통하여 공기가 헤드에 차 있을 때 셀프 센싱 신호를 이용하여 이를 검출 하는 것이 가능함을 보였다. 본 방법은 전기적 신호 처리를 이용하므로 strobe LED 또는 진동센서를 사용할 때와 같이 해당 노즐에 대한 정밀한 기계적인 얼라인먼트 (alignment) 등이 필요 없이 간편하게 토출 상태 진단이 가능한 장점을 지닌다.

2. PZT 의 셀프 센싱 측정

피에조 잉크젯 헤드는 셀프 센싱이 가능한 PZT 를 액추에이터로 사용하므로 구동중의 PZT 의 전류를 측정함으로써 작동 상태를 파악하는 것이 가능하다. 일반적으로 PZT 에 흐르는 전류의 양은 미세하여 일반적인 전류 센서나 전류 probe 등으로 측정이 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 전류를 정확히 측정할 수 있는 전기 회로를 구현하고 이를 통해 변형량을 간접적으로 측정하여 잉크젯의 작동 상태를 진단하고 이를 이용하여 파형 설계등에 응용하는 것에 목적이 있다.

피에조에 흐르는 전류는 식 (1)과 같이 기계적 변형량에 의해 생긴 전류와 인가된 입력전압에 의해 흐르는 전류의 양이 합이다.

$$i = i_q + i_c \quad (1)$$

여기서 $i_c = C_{PZT} \frac{dv}{dt}$ 이고 $i_q = \frac{dq_p}{dt}$ 이다. i_q 는 PZT 의 변형량에서 생기는 전류이므로 전체 측정된 전류, i , 에서 인가 전압에 의한 전류의 양 i_c 를 뺀 것이 실제 변형량에 의해 발생하는 전류가 된다. C_{PZT} 는 PZT 의 정전용량이고, v 는 인가되는 전압, q_p 는 PZT 변형량에 의해 발생하는 전하량이다.

전류 측정으로부터 변형량을 측정하기 위해 사용된 잉크젯 헤드로는 dimatix 사의 SX-128 (spectra SX-128)이다. SX-128 은 128 개의 독립

적인 nozzle 을 가지고 있으며 각각 독립적인 파형을 인가할 수 있다. 미세한 잉크의 양을 제어할 수 있는 장점이 있어서 전자 재료를 토출하는데 적합한 프린트 헤드이다[6,18]. SX-128 의 각 노즐은 약 90pF 의 정전 용량을 가지고 있다.

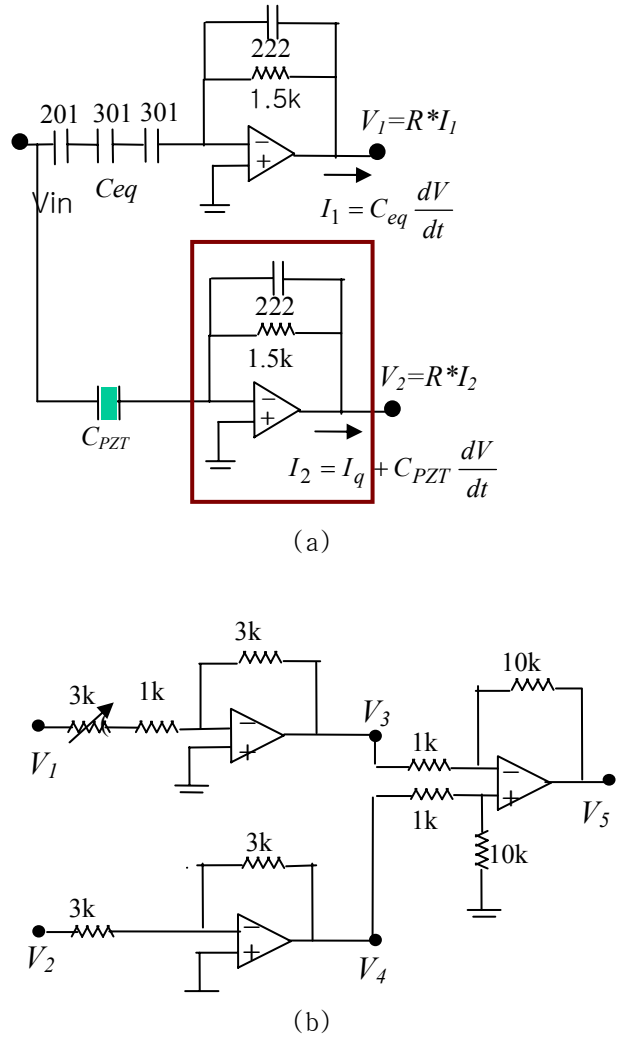


Fig. 1 circuit for self-sensing

잉크젯 구동시 전류로부터 변형량을 얻기 위하여 Fig. 1 과 같은 회로를 구성하였다. Fig. 1 (a)와 같은 OP amp 를 사용한 전류 측정 방법은 전원의 접지(ground) 대신에 OP amp 의 가상접지(virtual ground)를 사용하여 측정의 loading effect 를 최소화하면서도 전류를 측정할 수 있는 방법이다 [17]. 전류 측정의 작동 범위는 OP amp 의 구동할 수 있는 전류의 범위로 최대 수십~수백 mA 까지 측정이 가능하고 아주 미세한 전류값도 측정이 가능한 장점이 있다. 본 방법은 각 drive 가 구동하는 것이 PZT 와 등가 콘덴서 뿐이므로 실제 구동하는 전류는 PZT 단독에 비해서 2 배 정도가

된다. 일반적으로 PZT의 전류는 작기 때문에 전류 측정을 위한 드라이브의 추가 구동 전류는 문제가 되지 않았다.

입력 전압, V_{in} ,을 잉크젯 헤드와 3개의 세라믹 콘덴서로 구성된 89pF의 등가 콘덴서에 인가했을 때 Fig. 1(a)의 회로를 사용하여 각각의 전류에 해당하는 V1과 V2의 전압을 얻을 수 있다. V1은 등가 콘덴서의 정전 용량에 의한 전류이고 V2는 잉크젯 헤드의 인가전압에 의한 PZT의 정전 용량과 기계적인 변형량에 의한 전류의 합에 해당하는 값이다. 따라서 Fig. 1(b)의 차동 회로를 사용하여 변형량만의 신호를 얻을 수 있다. 여기서 사용된 등가 콘덴서의 정전 용량 C_{eq} 값은 PZT의 정전 용량, C_{PZT} ,와 다를 수 있기 때문에 가변 저항을 이 오차를 조절해야 한다.

여기서 전류는 최종적으로 15000배의 이득을 갖기 때문에 신호에 잡음 등이 문제가 될 수 있다. 특히 SX-128의 경우 1개의 헤드가 128개의 노즐로 되어 있고 각각의 채널의 입력 전압을 위한 각각의 드라이버(DPN, driver per nozzle)를 사용하기 때문에 노이즈에 대한 문제를 고려한 전원 및 드라이브 설계가 더욱 필요하다.

3. Waveform 과 압력파

잉크젯 토출이 압력파와 관련이 있다는 것을 밝혀낸 이후에 이를 이용하여 파형을 설계하려는 노력이 진행되어 왔다[8].

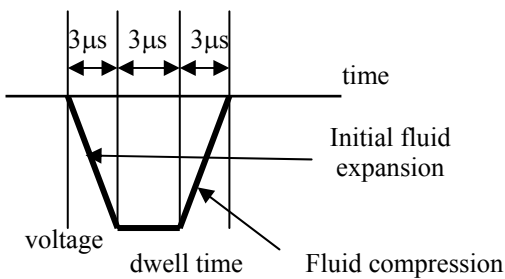


Fig. 2 Typical waveform for SX-128

Fig. 2와 같이 정의된 파형을 인가하였을 때 Fig. 3과 같은 압력파가 헤드 내부에서 진행된다. 팽창(expansion)파형 인가시에는 두 개의 음의 압력이 반대방향으로 진행하고 반대로 압축(compression)파형이 인가시는 반대로 양의 압력이 PZT를 중심에서 양쪽으로 진행한다.

일반적인 압력파, p ,는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$p(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad (2)$$

여기서 f 는 양의 x 방향으로 진행되고, g 는 음의 방향으로 진행되는 압력파를 나타낸다. 이러한 압력파는 진행 조건에 따라서 일부는 반사하고 일부는 진행하게 된다.

잉크젯 헤드는 간단한 경계조건으로 해석이 가능하며, 잉크가 토출되는 노즐 쪽은 튜브(tube)의 단면적이 아주 작아지기 때문에 근사적으로 닫힌 조건으로 해석이 가능하고 반대쪽의 잉크 공급 부분은 열림 조건으로 해석이 가능하다.

따라서 만일 잉크 supply 쪽에 파형이 진행된다면 반사하여 반대의 압력이 된다. 하지만 노즐 쪽 방향의 압력파는 반사하여 같은 압력이 유지가 된다 [8].

만일 유체의 음속을 C 라고 하고 잉크젯 디스펜서(dispenser)의 길이를 L 이라고 하면 팽창 파형의 인가 후 $t=L/C$ 시간이 되면 압력파는 다시 가운데에서 만나게 된다. 따라서 Fig. 3과 같이 L/C 에서 압축 파형을 주는 것이 좋다. 그러면 압력파는 합쳐져서 $t=3L/2C$ 에서 노즐 쪽으로 큰 압력으로 토출을 시킬 수 있다. 토출 후에도 이러한 압력파는 일정시간 동안 계속해서 진동하게 된다. 이러한 진동하는 주기와 상태는 잉크젯 내의 유체 조건에 따라서 달라지게 된다. 따라서 압력파는 잉크젯 내의 상태를 측정하는데 좋은 정보가 된다.

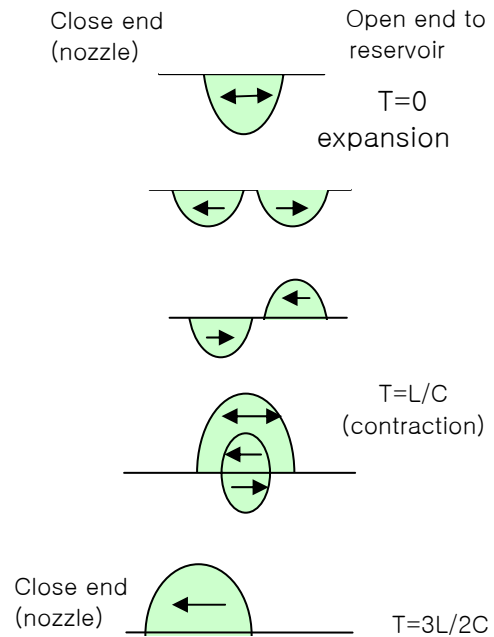


Fig. 3 waveform design

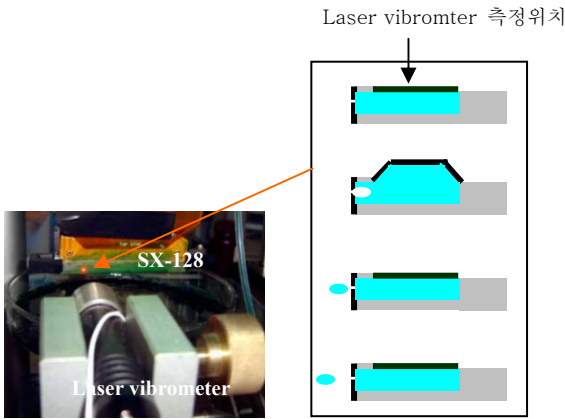


Fig. 4 comparison with Laser vibrometer

4. 고속 프린팅을 위한 파형설계

셀프 센싱으로 변형량 얻기 위한 실험을 위하여 Fig. 4 과 같이 장치를 구성하였다. 프린트 헤드로는 Dimatix 사의 SX-128 을 사용하였다. 본 실험에서 사용된 잉크는 유기 용제(solvent)를 사용한 녹색의 안료 (pigment)잉크를 사용하였다. 잉크의 상온에서 점성은 약 9cp 이다. 잉크젯을 구동하기 위한 전압 파형을 만들기 위하여 Agilent 33220A 의 임의 파형 발생기 사용하였다. 사다리꼴의 파형을 만들기 위하여 위하여 Labview 를 이용하여 데이터를 만들고 GPIB 통신을 사용하여 Agilent 33220A 에서 최대전압이 0.6volt 인 Fig. 2 의 사다리꼴 파형이 나오도록 하였다. PZT 를 구동하기 위하여 상용화된 TREK PZT drive PZD350 을 사용하여 임의 파형 발생기에서 나온 신호를 100 배를 증폭하여 잉크젯 헤드의 PZT 를 구동하였다.

셀프 센싱(self-sensing)으로 얻은 변형량을 검증하기 위하여 Fig. 4 과 같이 Polytec 사의 Laser vibrometer (OFV 511,PFV 3001)를 사용하였다. 여기서 레이저 속도계의 계인은 1volt 가 25mm/s 에 해당하고 절점주파수 (low pass cut-off frequency)를 250kHz 로 설정하였다. 레이저 진동계로 측정된 결과와 셀프 센싱으로 얻은 신호를 Fig. 5 에서 비교하였다. 변형량의 주파수가 약 80kHz 임을 감안하면 약 15nm 정도의 진동이 측정됨을 알 수 있다.

Fig. 5 에서 알 수 있듯이 셀프센싱으로 측정된 신호는 입력부의 초기부분에서 신호가 약간의 왜곡이 있었지만 레이저 속도계의 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 토출 후에도 압력파는 일정정도 시간동안 계속 존재한다. 이러한 압력파는 다음 파형이 입력되었을 때 영향을 미치게 된다.

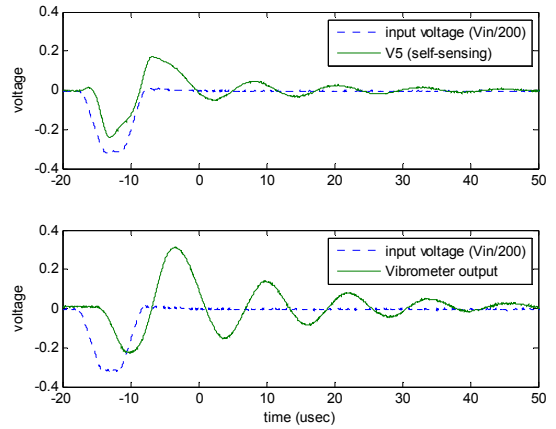


Fig. 5 Comparison with laser vibrometer
(a) self-sensing (b) Laser vibrometer

한편으로는 이렇게 결정된 single pulse 의 파형으로는 토출 된 후의 내부 압력파를 빨리 없애는데 한계가 있을 수 있기 때문에 본 연구에서는 Fig 6 과 같은 두 펄스의 파형을 고려하도록 한다.

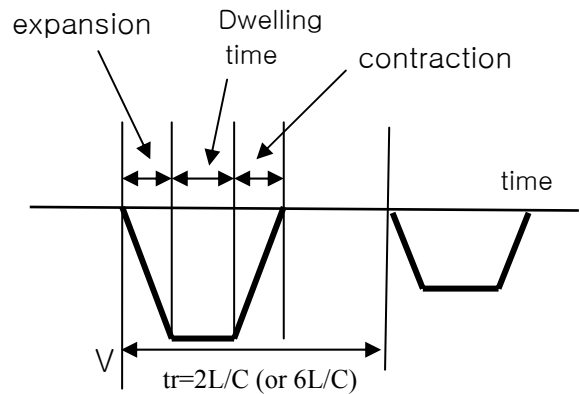


Fig. 6 Two pulse waveform

압력파는 주기가 $4L/C$ 로 알려져 있다 [8]. 따라서 $tr=2L/C$ 시간 이후에는 음의 압력파는 양의 압력파가 되어 중심에서 양쪽으로 진행하고 양의 압력파는 음의 압력파가 되어 양쪽으로 진행하게 된다. 따라서 두번째 파형은 $2L/C$ 의 같은 형태의 파형을 인가하면 첫파형의 팽창에 의한 음의 압력이 양의 압력이 될 때 다시 음의 압력을 주게 되어 $2L/C$ 이후의 압력파가 상쇄된다. 마찬가지로 첫파형의 압축에 의한 양의 압력 역시 인가후에 $2L/C$ 이후에 정확히 음의 압력이 되므로 다시 압축파형을 인가하게 되어 압력파를 상쇄 할 수 있게 된다. 여기서 압력파가 진행되면서 진폭이 감쇄가 되어 줄어 들게 된다. 진폭이 줄어는 폭은 잉크 특성에 따라 다르게 되며 이를

고려하여야 한다. 본 연구에서는 실험적으로 두번째 파형의 크기를 결정하였고, 첫파형의 약 1/2의 크기로 두 번째 파형의 전압을 인가하는 것이 잔여 압력파를 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

여기서 두번째 파형이 시작 시간인 $tr=2L/C$ 을 결정하기 위하여 별도의 측정 센서를 사용하여 mensicus 나 해당 노즐에 해당하는 구조의 진동을 측정하는 대신에 셀프 센싱을 이용하여 압력파를 간접적으로 측정하여 결정하였다. Fig. 5 에서 알 수 있듯이 압력파의 주기 $4(L/C)$ 는 약 12.5 μsec 이다. 따라서 첫번째 파형후에 두번째 파형의 인가하는 시간은 $tr=2L/C$ (6.25 μsec)가 된다. 그러나 팽창을 위한 상승시간(rise time)과 압축을 위한 하강 시간 (falling time)을 고려한 파형의 총 인가 시간은 9 μsec 가 되므로 두 번째 파형이 $tr=2L/C$ 에서 정의 되지 못한다. 따라서 다음 주기를 고려한 $tr=6L/C$ 에 2 번째 파형을 입력해야 함을 알 수 있다. 즉 압력파의 주기의 1.5 배의 시간에 두번째 파형을 인가하였다. 따라서 $tr=18.75 \mu\text{sec}$ 가 된다. 따라서 두번째 파형을 $tr=18.75 \mu\text{sec}$ 에서 인가해주게 되면 두번째 파형이 끝나는 27.75 μsec 부터는 압력파가 상쇄되기 시작한다. 두번째 파형은 단지 토출 후의 압력파의 진동을 없애주는 것이므로 단일파형과 비교했을 때 2 번째의 파형으로 토출이 되는 잉크 액적의 속도 혹은 체적에는 영향을 미치지 않고 토출 후의 내부적인 압력파만 상쇄시켜 주게 된다.

그림 Fig. 16 는 두번째 파형의 시작되는 시간의 효과를 알아 보기 위하여 tr 을 변화시키면서 셀프 센싱으로 측정된 압력파를 비교해 보았다.

Fig. 7 에서 알 수 있듯이 단일 파형인 경우 압력파가 70~80 μsec 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 12KHz 가 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 μsec 을 알 수 있었다. 이때 얻을 수 있는 토출 주파수는 약 30kHz 정도로 단일 파형에 비해 3 배정도 빠르게 되어 그만큼 생산성을 높이는 것이 가능하게 되었다. 그러나 두번째 파형의 tr 을 잘못 선정한 경우에는 단일 파형보다 오히려 토출 후의 압력파가 증폭 되기도 하였다. 따라서 tr 의 최적점이 존재함을 알 수 있었고, 그 시간은 $tr=2L/C$ 이나 그 때 2 번째 파형이 정의가 되지 않게 되는 경우 $tr=6L/C$ 가 됨을 알 수 있었다.

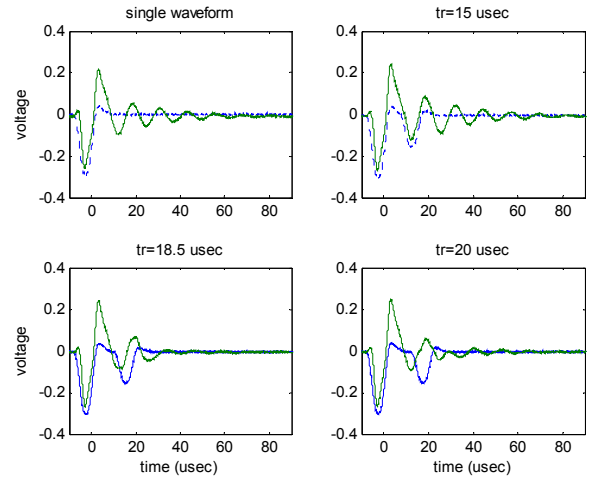


Fig. 7 Pressure wave propagation in a piezo-printhead

디스플레이 제조 등에는 수많은 픽셀에 대한 균일한 특성이 얻어져야 하므로 토출후에 압력파를 빠르게 상쇄시켜주는 파형의 설계가 필요하게 된다. 또한 토출후의 압력파형이 상쇄가 되면 다음 액적을 안정적으로 토출이 가능하기 때문에 고속 프린팅이 가능하여 생산성을 향상시키는 장점도 있다. 따라서 균일하면서 빠른 토출이 필요할 때 압력파의 측정은 중요한 이슈가 된다. 따라서 본 방법이 제시한 셀프 센싱을 이용한다면 별도의 레이저 속도계등의 설치없이 바로 변형량을 측정을 통하여 압력파를 간접적으로 알 수 있는 장점이 있다. 또한 설치 공간등의 문제로 센서를 설치하기 어려운 곳도 쉽게 접근이 가능한 방법이다.

5. 잉크젯 작동 특성 진단

잉크 토출시 구동 파형이 최적화가 안되어 있거나 혹은 초기에 잉크를 채울 때 (initial filling) 문제가 있으면 잉크젯 헤드 내에 공기가 유입되거나 생길 수 있다. 따라서 채널에 공기가 있으면 토출이 되지 않거나 또는 비정상 토출이 될 수 있으므로 적절한 메인テナンス(maintenance)를 통해 제거 해주어야 한다. 실제로 토출이 안되는 경우 공기가 있는지 혹은 먼지 및 불순물에 의해 노즐이 막혔는지에 메인テナンス 방법이 달라질 수 있다. 따라서 이를 신속히 진단할 수 있는 방법을 개발하는 필요성이 대두 되고 있다. 잉크젯 피에조의 변형량과 관계가 있는 헤드 내의 압력파

를 간접적으로 측정하면 잉크 및 잉크젯의 작동 상태를 간접적으로 알 수 있게 되어 작동 상태의 모니터링이 가능하다.

작동상태 모니터링을 위하여 각각의 채널의 입력 전압을 위한 각각의 드라이버 (DPN, driver per nozzle)를 사용한 Fig. 8 의 실험 장치를 사용하였다. 따라서 이때에는 측정된 셀프 센싱 신호의 노이즈가 더 민감해지기 때문에 이를 고려한 전원 및 드라이브 설계가 더욱 필요하다.

헤드내의 공기가 유입되었을때의 효과를 알기 위하여 Air-gun 을 사용하여 공기를 강제로 유입시키고 정상 상태와 비교하여 셀프센싱 신호를 측정하여 Fig. 9 의 결과를 얻었다. 이때의 파형은 Fig.2 의 것을 사용하였고 전압의 크기는 50volt 로 하였다.

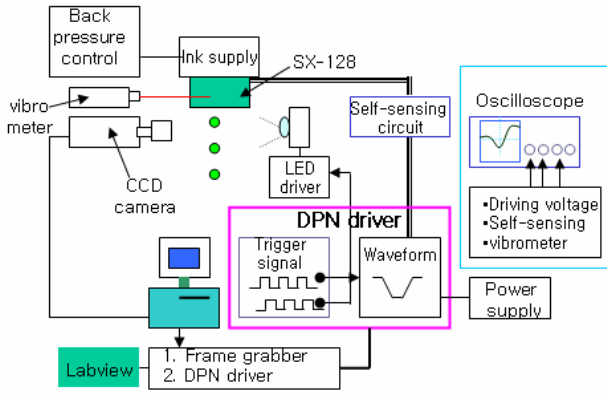


Fig.8 Schematic of experimental setup

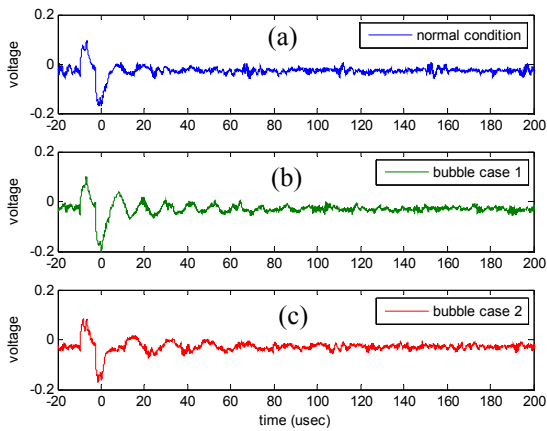


Fig.9 diagnosis results using self-sensing (50volt)

Fig. 9 (b), (c)에서 알 수 있듯이 헤드 내의

공기가 존재하면 헤드내의 공기의 효과에 의해 감쇠 줄어들어서 파형이 제거된 후의 변형량의 진폭이 공기가 없는 헤드에 비해 커지게 된다. 또한 헤드내의 공기로 인해 압력파의 주파수와 진폭이 달라지게 된다. 위 두가지 현상은 같은 노즐을 그리고 여러 노즐을 사용하여 반복 실험을 통하여 확인하였다.

위의 결과를 FFT 분석을 통하여 Fig. 10 과 같이 공기의 효과를 효과적으로 알 수 있었다. 여기서 파형의 인가되는 9 μ sec 의 부분은 오차가 존재할 수 있으므로 이 부분을 제외한 나머지 부분의 FFT 분석을 수행하였다. Fig. 10 에서와 같이 알 수 있듯이 셀프 센싱으로 얻은 데이터로 헤드내에 공기가 있을 때의 특성인 주파수의 변화 또는 감쇠의 변화등에 의한 진동 특성을 이용하면 잉크젯 토출 현상을 진단하고 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

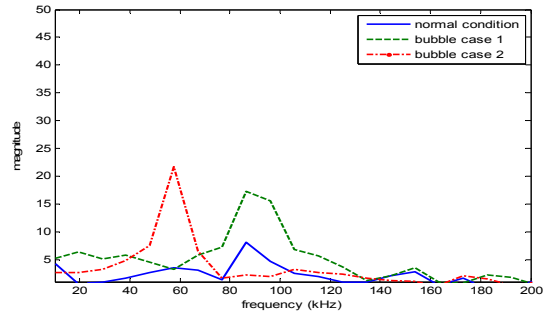


Fig.10 FFT analysis of self-sensing signal

결론

셀프 센싱으로 통해 토출시 잉크젯 헤드내의 압력파를 간접적으로 측정이 가능하였으며 이러한 압력파를 이용하여 고속 프린팅이 가능한 파형을 설계를 하였으며, 헤드내의 공기의 존재 여부에 대한 잉크젯 작동의 이상 여부를 진단할 수 있음을 보였다.

후기

본 연구는 삼성종합기술원의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) K.S. Kwon, S.J. Shin and S.J. Kim, 2005, "The opportunity of printing technology for display manufacturing process," Proceedings of colloquium on micro/nano thermal engineering, August 17-19, Seoul National University.
- (2) M.Bale, et al, 2006, "Ink jet printing: The route to production of full color P-OLED Displays", research paper, website: www.cdtltd.co.uk
- (3) Jungsoo Rhee 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) 2006
- (4) Tadashi Gohda et al., 2006, A 3.6-in 202-ppi Full-color AMOLED Display Fabricated by Ink-jet method, SID 2006
- (5) H.S. Koo et al, 2006, Displays 27 (2006) 124-129, "Fabrication and chromatic characteristics of the greenish LCD colour-filter layer with nano-particle ink using inkjet printing technique
- (6) Linda T. Creagh, et al., 2004, "FPD Manufacturing Conference, Ink Jet Printhead as a precision deposition tool in manufacturing FPDs", SEMICON China 2004.
- (7) David Albertalli, 2005, "Gen 7 FPD inkjet Equipment -Development status", SID 2005
- (8) D.B. Bogy and F.E. Talke, 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) Steven Edward Molesa, 2006, "Ultra-Low-Cost printed electronics", Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- (11) Hongming Dong and Jeffrey F. Morris, 2006, "An experimental study of drop-on-demand drop formation", AIP, Physics of fluids, 18, 072102.
- (12) John B. Szczech, Daniel R. Gamota, Jie Zhang, 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) Chengkuo Lee, Toshihiro Itho and Tadatomo Suga, 1999, "Self-excited piezoelectric PZT microcantilevers for dynamic SFM with inherent sensing and actuating capabilities", Sensor and Actuators A, 72, pp. 179-188.
- (14) Victor Giurgiutiu and Andrei N. Zagrai, 2002, "Embedded Self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification", Journal of vibration and acoustics, ASME, vol 124, pp. 116-125.
- (15) M.B. Groot Wassink, M.J.M Bosch, O.H. Bosgra and S. Koekebakker, 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, Mark A. Kruijt, Pierter G.M. Reinten, Hans, Schippers, Ronald H., Simons, Hohannes 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) P. Horowitz, W. Hill, The art of electronics, Cambridge university press, 1980.
- (18) website: www.dimatix.com