

잉크젯 작동 상태 진단 및 모니터링

권계시[†] · 김병현* · 김상일* · 신승주* · 김성진*

Diagnosis and monitoring of inkjet operating conditions

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

Key Words : Piezo inkjet (피에조 잉크젯), Display manufacturing process (디스플레이 제조 공정), Diagnosis (진단), Monitoring(모니터링)

Abstract

A self-sensing circuit for piezo inkjet has been designed in order to monitor the operating condition during printing. In order to verify the circuit, both ink droplet images from strobe LED and vibration signals from the laser vibrometer were measured and compared with self-sensing signal. Experimental results show that self-sensing signal was effective in detecting the pressure wave change due to the bubble trapped in inkjet printhead.

1. 서론

잉크젯 기술이 발전함에 따라서 사무실용에서부터 디스플레이 제조로의 응용 범위가 넓어지고 있다. 잉크젯은 마이크로 미터 단위의 위치 정밀도로 피코 리터 단위의 정확한 양을 토출시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 디스플레이 공정에 적용되었을 때 재료비를 혁신적으로 줄일 수 있고, 공정수를 줄일 수 있어서 생산성을 향상 시키는 것이 가능하게 된다[1]. 또한 기존의 장치에 비해 기관의 대형화에 용이하게 대응이 되고 만들고자 하는 제품의 디자인 변경 등에 쉽게 대응하기 쉬운 것도 장점이다. 따라서 많은 기업에서는 잉크젯을 사용한 공정개발을 위해 본격적인 연구가 진행되고 있다[1].

잉크젯은 크게 열을 이용한 버블젯 방식과 피에조 방식으로 나눌 수 있다. 버블젯 방식은 유기 용제를 사용한 디스플레이용 잉크에는 적합하지 않기 때문에 산업용에서는 주로 피에조 잉크젯 헤드가 사용되어 오고 있다.

잉크젯 공정을 위해서는 정밀한 스테이지(stage), 잉크젯 헤드, 잉크 및 재료, 기관(substrate)이 중요한 요소가 되고 있다[1]. 그 중에서 잉크를 직접 토출하는 헤드의 특성이 생산성과 신뢰성을 위하여 가장 중요한 요소가 된다. 디스플레이 공정의 도구로서 잉크젯의 신뢰성과 생산성을 높이기 위하여 다음 이슈들이 최근에 대두되고 있다.

1. 신뢰성을 얻기 위해서 토출 현상 모니터링
2. 유체 및 구조로 인한 노즐간의 상호 간섭(cross-talk)의 평가
3. 피에조 헤드내의 공기 유입(bubble)등에 의한 비정상 토출 현상 모니터링

기존의 잉크 토출을 모니터링 하기 위한 방법으로는 CCD 카메라를 이용한 스트로브 LED(strobe-LED)로 직접 토출 되는 잉크 액적(droplet)이나 메니스커스(meniscus)를 관찰 하는 방법이 많이 사용되어 왔다[2-4]. 또 다른 방법은

[†] 회원, 순천향대학교 기계공학과

E-mail : kskwon@sch.ac.kr

TEL : (041)530-1670 FAX : (041)530-1550

* 삼성종합기술원, Display Device & Processing Lab.

피에조(piezo)헤드의 각 노즐에 해당하는 부분의 헤드 외부 구조물의 진동을 측정하여 간접적으로 압력파를 측정하는 방법이다. 이 두 방법은 실제 거동에 많은 정보를 준다. 특히 압력파를 측정하면 각 노즐간의 cross-talk 을 평가 할 수 있을 뿐더러 간접적으로 메니스커스 진동을 예측하여 작동 상태를 판단 할 수 있게 된다. 하지만 기존의 strobe LED 를 사용하여 잉크 액적을 측정하거나 구조물의 진동을 직접 측정하는 것은 많은 노력이 필요하다. 특히 레이저 진동 센서 혹은 카메라 설치가 필요하며, 정확한 노즐 위치에 대한 기계적인 얼라인먼트(alignment)가 필수적이다. 따라서 프린팅 시스템에서 실제 프린팅하고 있는 동안 상태를 관찰하는 것은 불가능하게 된다.

한편으로는 피에조 잉크젯 헤드는 피에조를 전압으로 구동하여 변형량을 얻어내는 액추에이터이다. 또한 피에조는 반대로 변형량이 존재하면 전하를 발생시켜 셀프 센싱(self-sensing)이 가능한 소자이다. 따라서 피에조에 흐르는 전류와 인가하는 전압을 측정하면 역으로 변형량을 계산이 가능하다. 최근 잉크젯 PZT 의 임피던스의 변화를 이용하여 프린트 헤드의 작동 상태를 알려고 하는 방법이 제시 되었다[5,6]. 그러나 실제로 변형량의 변화에 따른 임피던스의 변화는 아주 작은 값이 되고 또한 입력 전압이 영인 경우 임피던스 측정이 어려운 문제가 있다.

본 연구에서는 피에조의 전류를 측정하여 피에조의 기계적인 변형량을 얻어 내려고 한다. 이를 이용하여 실제 잉크젯 헤드가 구동 되고 있을 때 잉크젯 헤드 내의 PZT 의 변형량으로 부터 압력파를 간접적으로 측정하고 이것을 잉크젯의 작동 상태를 평가하고 모니터링 하는 방법을 개발 하려고 한다. 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 측

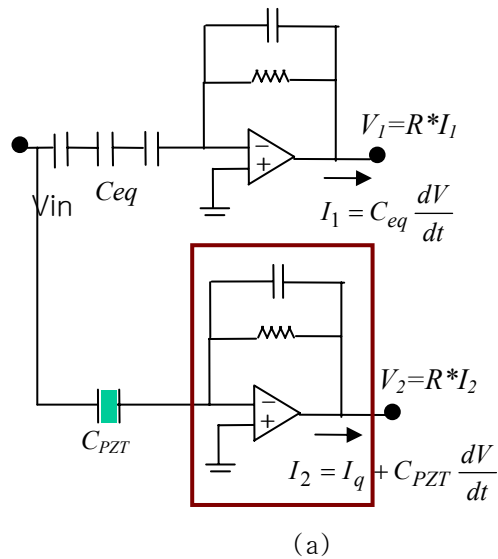
정하여 잉크젯의 작동 상태를 진단하는 것에 목적이 있다.

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



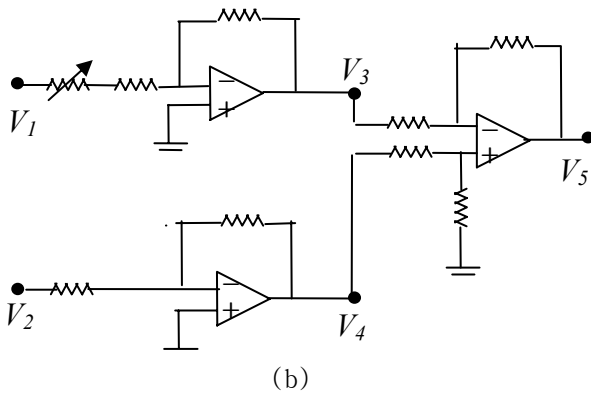


Fig. 1 circuit for self-sensing

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[7]. 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 PZT 의 전류는 작기 때문에 전류 측정을 위한 드라이브의 추가 구동 전류는 문제가 되지 않았다.

입력 전압 V_{in} 을 잉크젯 헤드와 3 개의 세라믹 콘덴서로 구성된 89pF 의 등가 콘덴서에 인가했을 때 Fig. 1 (a)의 회로를 사용하여 각각의 전류에 해당하는 V_1 과 V_2 의 전압을 얻을 수 있다. V_1 은 등가 콘덴서의 정전 용량에 의한 전류이고 V_2 는 잉크젯 헤드의 인가전압에 의한 PZT 의 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 PZT 의 정전 용량, C_{PZT} , 와 다를 수 있기 때문에 가변 저항을 이 오차를 조절 해야 한다.

여기서 전류는 최종적으로 15000 배의 이득을 갖게 되었다. 따라서 신호의 잡음도 같이 증폭이 되어 문제가 될 수 있다. 특히 SX-128 의 경우 1 개의 헤드가 128 개의 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 압력과 관련이 있다는 것을 밝혀낸 이후에 이를 이용하여 파형을 설계하려는 노력이 진행되어 왔다[2,3].

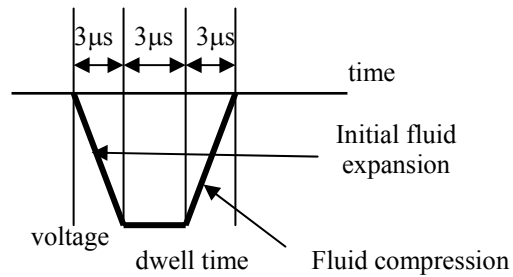


Fig. 2 Typical waveform for SX-128

Fig. 2 와 같이 정의 된 파형을 인가 하였을 때 Fig. 3 과 같은 압력파가 헤드 내부에서 진행된다. 팽창(expansion)파형 인가시에는 두 개의 음의 압력이 반대방향으로 진행하고 반대로 압축(compression) 파형이 인가시는 반대로 양의 압력이 PZT 를 중심에서 양쪽으로 진행한다.

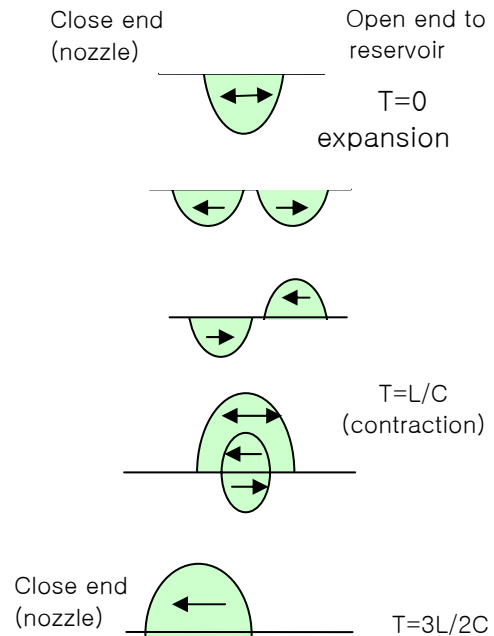


Fig. 3 waveform design

잉크젯 헤드는 간단한 경계조건으로 해석이 가능하며, 잉크가 토출 되는 노즐 쪽은 튜브 (tube)의 단면적이 아주 작아지기 때문에

근사적으로 닫힘 조건으로 해석이 가능하고 반대쪽의 잉크 공급 부분은 열림 조건으로 해석이 가능하다.

따라서 만일 잉크 supply 쪽에 파형이 진행된다면 반사하여 반대의 압력이 된다. 하지만 노즐쪽 방향의 압력과는 반사하여 같은 압력이 유지가 된다[2].

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

본 연구에서는 Fig.2 의 가장 단순한 파형을 사용하고 전압의 크기만을 조정하여 실험하였다.

4. 실험 장치의 구성

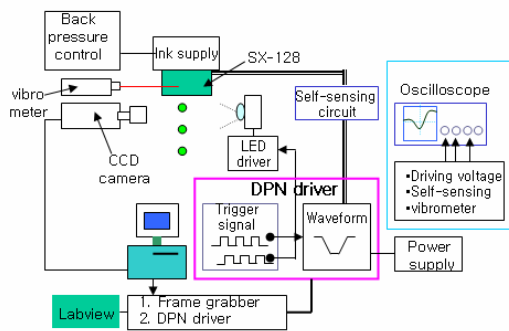


Fig.4 Schematic of experimental setup

셀프 센싱으로 측정된 결과를 이용하여 신뢰성이 있는 진단결과를 얻을 수 있는지 검증하기 위하여 Fig. 4 와 같은 실험 장치를 구성하였다. 실제로 토출되는 잉크 액적(droplet)을 관찰하기 위하여 CCD 카메라를 사용하였다. 여기서 토출 신호가 인가하고 있는 신호와 시간 지연을 이용한 LED 의 조명을 통해서 액적이 떨어지는 과정을 CCD 카메라로 모니터링 할 수 있게 된다. 128 개의 각각의 노즐에 각각 다른 파형의 전압이 가능할 수 있도록 각각의 노즐에 다른 드라이브를 가지고 있는 DPN (Driver per nozzle)을 사용하여 구동하였다. DPN 을 사용하여 헤드 간의 잉크 액적의 속도 또는 부피

편차를 줄이는 것은 본 논문의 외의 영역이기 때문에 다루지는 않는다. Self-sensing 으로 얻은 변형량을 검증하기 위하여 Polytec 사의 Laser vibrometer (OFV 511,PFV 3001)으로 측정된 진동 신호와 동시에 비교를 하였다. 측정상의 문제로 동시에 같은 위치에서 CCD 카메라와 레이저 진동계로 잉크젯 상태를 모니터링하는 것은 현실적으로 어렵다. 또한 카메라와 레이저 진동계는 측정을 위하여 해당 노즐을 찾는 정밀한 얼라인먼트 (alignment)가 필수적이다. 반면에 셀프 센싱은 특별한 기구적 조정이 필요하지 않는 간단한 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 달라 질 수 있다. 따라서 이를 신속히 진단할 수 있는 방법을 개발하는 필요성이 대두 되고 있다. 이때에는 strobe LED 로는 이 두 가지의 다른점을 구별해 낼 수 없다. 한편으로는 같은 전압을 인가하였을 때 PZT 의 변형량은 잉크젯의 작동 상태에 따라서 달라지게 된다. 또한 PZT 의 변형량과 관계가 있는 헤드 내의 압력과는 잉크의 물성인 점성 및 음속등과도 밀접한 관계가 있기 때문에 물성의 변화 역시 감지하여 모니터링하는 것이 가능하다. 따라서 셀프 센싱을 이용하여 압력과는 간접적으로 측정하면 잉크 및 잉크젯의 작동 상태를 간접적으로 알 수 있게 되어 작동 상태의 모니터링이 가능하다.

본 연구에서는 유기 용제를 기본으로 한 디스플레이 제조용으로 제작된 녹색의 안료 (pigment)잉크를 사용하여 실험을 하였다. 잉크는 상온에서 점성은 약 9cp 이다.

Fig. 5-6 은 Fig. 2 에서 정의된 파형을 이용하여 각각 30volt 과 50volt 의 전압을 헤드에 인가한 후 CCD 카메라로 액적을 관찰한 후에 레이저 속도계와 셀프 센싱으로 헤드내의 압력과는 동시에 측정하였다.

Fig.5-6 에서 레이저 속도계와 비교를 통해 알 수 있듯이 PZT 의 정전용량과 등가 capacitance 의 정전용량의 차이 등으로 인해 실제 전압이 인

가 하는 9 μ sec 부분은 변형량의 신호를 정확하게 얻는 것은 어려웠으나, 전압인가 이후의 압력파는 비교적 정확하게 간접적으로 측정하는 것이 가능하였다. 여기서 레이저 속도계가 25mm/s의 속도가 1volt의 게인(gain)을 갖고 있고 압력파의 주파수가 약 80kHz를 감안하면 헤드 외부의 변형량은 약 5 nm 정도의 범위가 됨을 알 수 있다.

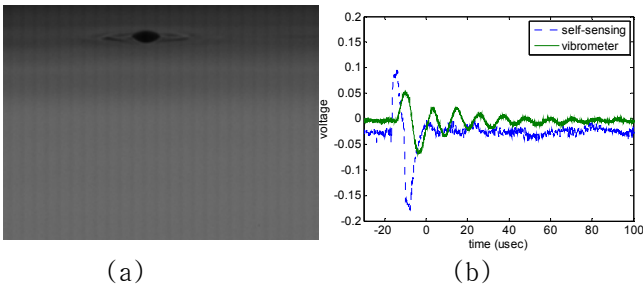


Fig.5 Normal condition (30volt)
(a) strobe LED
(b) vibrometer vs self-sensing

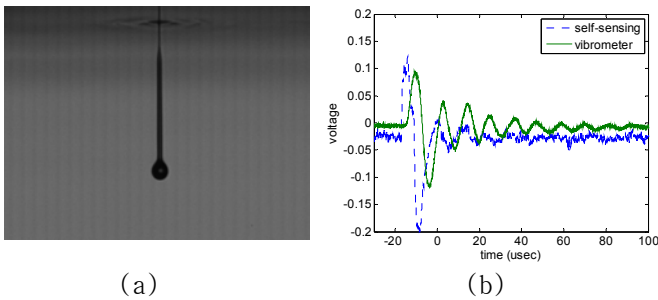


Fig.6 Normal condition (50volt)
(c) strobe LED
(d) vibrometer vs self-sensing

Fig.5-6(a)는 Fig.2에서 정의된 파형으로 전압을 30volt부터 10volt씩 증가시키면서 인가시켰을 때 128개 중 4번째 노즐에서 CCD 카메라를 이용하여 관찰한 액적의 모양이다. LED의 발광시점을 잉크의 토출을 위한 입력 파형이 인가되는 신호보다 50 μ sec 늦게 발광하여 잉크 토출 모양을 관찰하였다. 여기서 화면에 보이는 이미지의 실제 물리적인 크기는 약 1mm이다. 변형량을 측정하기 위하여 레이저 속도계로 해당 노즐의 변형량과 셀프 센싱으로 측정된 결과를 Fig. 5-6 (b)에서 비교하였다. 실험 결과는 노즐에 따라 약 수 %의 차이는 있지만 SX-128의 128개의 전 노즐에서 비슷한 작동 특성을 보인다. 여기서 알 수 있듯이 전압을 키우면 액적의 속도가 빨라지고 더불어 PZT의 변형량도 비례하여 커짐을 알 수 있다. 헤드의 내부에 이상이 없

을 때 전압의 세기에 의한 토출의 여부가 셀프 센싱에 어떤 영향이 있는지 알아보기 위해 Fig. 5과 Fig. 6을 비교하였다. 전압이 낮아서 토출이 안되고 있는 30volt의 압력파에 의한 변형량의 파형과 잉크 토출이 되고 있는 50volt의 변형량의 형태는 비슷하고 크기만 약간 증가됨을 알 수 있다. 따라서 헤드내의 잉크 filling 상태가 정상이면 압력파만을 측정하여 토출의 여부를 알아내는 것은 어렵다. 만약 같은 입력 파형에서 압력파가 정상 상태와 비교하여 달라진다면 잉크의 디스펜서(dispenser)에 채워진 잉크 상태 또는 물성의 변화가 있는 것이다. 한편으로는 정상적으로 토출이 되던 노즐이 갑자기 토출이 안되는 경우 변형량을 측정하여 정상과 같다면 잉크 채워진 상태나 물성의 변화가 아닌 미세 먼지 등에 의하여 nozzle이 막혔을 가능성이 크다. 이것은 Fig. 3에서와 같이 노즐 부분을 막힘 경계 조건으로 사용한 Bogy[2]의 가정이 잘 맞음을 보여준다.

한편으로는 bubble이 존재하는 경우 압력파에 의한 변형이 어떻게 되는지 알아보기 위하여 토출을 시키면서 Air gun을 이용하여 공기를 nozzle속으로 삽입시켰다. 그 후에 strobe LED를 사용하여 토출이 안되는 것을 확인하고 이 때 같은 waveform을 입력하였을 때 압력파를 간접적으로 측정하여 Fig. 7과 같이 변화를 관찰하였다.

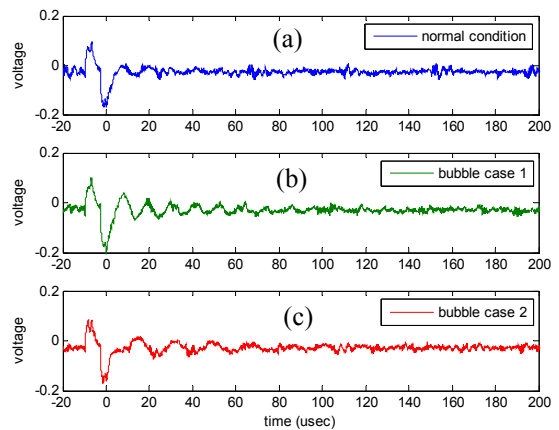


Fig.7 Self-sensing signal(50volt)
(a) normal condition; (b), (c) abnormal condition

Fig. 7 (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 결과는 Fig. 8 과 같이 FFT 분석을 통하여 보다 효과적으로 알 수 있었다. 여기서 과형의 인가되는 9usec 의 부분은 오차가 존재 할 수 있으므로 이 부분을 제외한 나머지 부분의 FFT 분석을 수행하였다. Fig. 8 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.

셀프 센싱 방법은 토출이 안되는 작은 전압에서도 마찬가지로 잉크젯 토출 현상을 진단하고 평가 할 수 있다. 이것은 프린팅 하는 도중에 모니터링을 위하여 측정 센서위치 또는 토출을 위한 특정 위치로 헤드를 이동 할 필요 없이 잉크젯 상태를 진단 할 수 있는 장점이 된다. 또한 전기적인 상태와 신호처리를 이용하므로 정밀한 기계적인 얼라인먼트 없이 신속하게 진단이 가능한 장점을 지닌다.

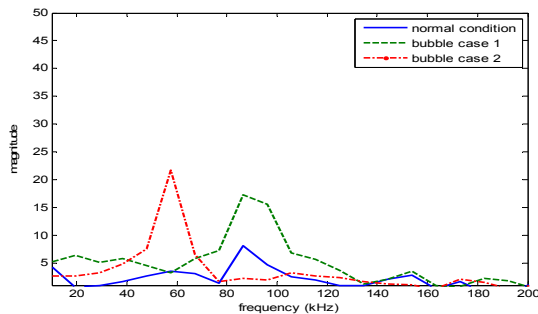


Fig.8 FFT analysis of self-sensing signal

6. 결론 및 토의

잉크젯 헤드의 작동 상태를 측정하기 위하여 셀프 센싱 아날로그 회로를 제작하였다. 이 셀프 센싱 회로로부터 얻은 PZT 의 변형량을 검증하기 위하여 레이저 속도계를 사용하여 얻은 진동 신호와 비교하였다. 셀프 센싱으로 통해 토출시 잉크젯 헤드내의 압력파를 간접적으로 측정이 가능하였으며 이러한 압력파를 이용하여 헤드내의 공기의 존재 여부에 대한 잉크젯 작동의 이상 여부를 진단 할 수 있음을 보였다. 헤드내의 공기가 있는 경우 관찰된 현상은 다음과 같다. 셀프 센싱으로 측정된 압력파의 주파수가 바뀌거나 감쇠율이 바뀌게

되었다. 이 방법은 카메라와 레이저 진동계는 측정을 위하여 해당 노즐을 찾는 정밀한 얼라인먼트 (alignment)등의 기구적 조정이 필요하지 않은 편리한 방법이다.

후기

본 연구는 삼성종합기술원의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

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) 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.
- (3) Steven Edward Molesa, 2006, "Ultra-Low-Cost printed electronics", Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- (4) Hongming Dong and Jeffrey F. Morris, 2006, "An experimental study of drop-on-demand drop formation," *AIP, Physics of fluids*, 18, 072102.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) P. Horowitz and W. Hill, 1980, *The art of electronics*, Cambridge university press.