잉크젯 압력파 측정을 위한 브리지 회로 개발

Development of Bridge Circuit for Measuring Pressure Wave in Inkjet Head

권 계 시*, 명 재 환, 주 영 철, 이 상 욱, 김 국 원
(Kye-Si Kwon, Jae-Hwan Myung, Young-cheol Joo, Sang-Wook Lee, and Kug-Weon Kim)

Abstract : Bridge circuit was developed such that the pressure wave in the inkjet can be measured. In order to test the circuit, the microfab single ejector was used. For the experiment, the head was filled with nano silver ink (20wt%). In order to generate waveform voltage for jetting signal, the Agilent 33120 was used in order to generate arbitrary waveform. For the driver, PZD 350 from TREK was used in order to amplify the waveform. Experimental results show that the designed circuit can effectively detect the pressure wave in the inkjet head.

Keywords : inkjet, bridge circuit

I. 서론

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 높은 주파수 및 안정된 토출을 얻기 위한 인가 전압의 파형 최적화와 신뢰성을 얻기 위해서 토출 현상 모니터링을 하는 것이 최근의 기술적 이슈가 되고 있다.

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 여렵기 때문에 토출이 안되는 약한 전압을 이용하여 CCD 카메라와 strobe LED를 이용하여 메니스커스(meniscus)의 모양을 관찰하여 압력파를 예측하였다[8]. 또한 파형 최적화를 위하여 잉크 액적이 떨어질 때 액적의 형상 혹은 속도를 strobe LED를 이용하여 관찰하면서 파형을 설계하는 연구가 기존의 주된 연구였다[10-12].

기존의 잉크 토출을 모니터링 하기 위한 방법으로는 CCD 카메라를 사용한 strobe-LED를 사용하여 직접 토출 되는 잉크 액적이나 meniscus를 관찰 하는 방법이 많이 사용되어 왔다. 또 다른 방법은 piezo헤드의 각 노즐에 해당하는 부분의 헤드 외부 구조물의 진동을 레이저 진동계(laser vibrometer)를 사용하여 변형량을 측정하여 간접적으로 압력파를 알아 내는 방법이다. 이 두 방법은 실제 거동에 많은 정보를 준다. 특히 레이저 진동 센서를 사용하여 압력파를 측정하면 각 노즐간의 cross-talk을 평가 할 수 있을 뿐더러 간접적으로 meniscus진동을 예측하게 되어 파형 최적화에 활용을 할 수 있게 된다. 하지만 기존의 stroke 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.

또 다른 방법으로 피에조 잉크젯 헤드는 피에조를 전압으로 구동하여 변형량을 얻어내는 식으로 잉크를 토출 시킨다. 여기서 피에조는 변형량이 존재하면 반대로 전하를 발생시켜 셀프센싱(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[15-17].

이러한 압력파 측정 방법은 측정하려고 하는 헤드에 따라서 바뀔 수 있다. 일반적으로 셀프센싱 신호는 아주 작아서 특별한 회로 설계가 필요하다. 이러한 미세 전류를 통해 셀프센싱 회로를 만들기 위하여 OP amp를 사용한 미세 전류 측정회로가 개발 되기도 하였다 [17]. 그러나 헤드의 정전용량이 커지면 OP amp로 전류를 drive하기가 어렵기 때문에 다른 회로 설계가 필요하다. 본 방법에서는 압력파를 측정하기 위한 브리지 회로 디자인 하였으며 이를 microfab의 헤드에 적용하였다.

II. 압력파와 토출 파형

전자 재료 토출을 위한 잉크젯 헤드로는 피에조 방식을 많이 사용하고 있다. 피에조 방식의 잉크젯 헤드에는 토출 특성을 제어 위하여 적절한 입력 파형을 제어를 해주어야 한다[8]. 그림 1은 이와 같은 파형을 만들어 주기 위하여 개발된 소프트웨어이다. 일반적으로 사용하고 있는 파형은 사다리꼴 모양으로 rising/falling time 과 dwell time으로 이루어져 있으며 잉크의 특성에 따라서 적당한 파형으로 인가 시켜야 한다[8]. 일반적으로 rising falling time은 수 μsec이고 dwelling time은 잉크에 따라서 많이 달라지며 수 μsec에서 수십 μsec의 범위가 된다.

그림 1과 같이 정의 된 파형을 인가 하였을 때 그림 2와 같은 압력파가 헤드 내부에서 진행한다. 팽창(expansion)파형

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2008. 1. 31., 채택확정 : 2008. 2. 24.
권계시, 명재환, 주영철, 이상욱, 김국원 : 순천향대학교 기계공학과
(kskwon@sch.ac.kr/jaehwan@sch.ac.kr/ychjoo@sch.ac.kr/swlee@sch.ac.kr/kimkug1@sch.ac.kr)

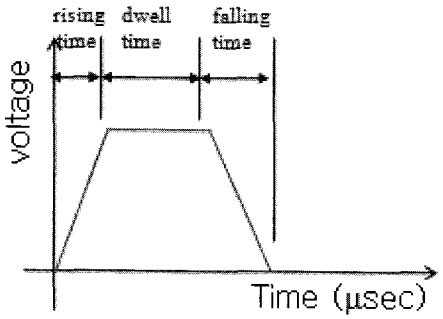


그림 1. 잉크젯 헤드 구동을 위한 파형.
Fig. 1. Waveform for piezo head.

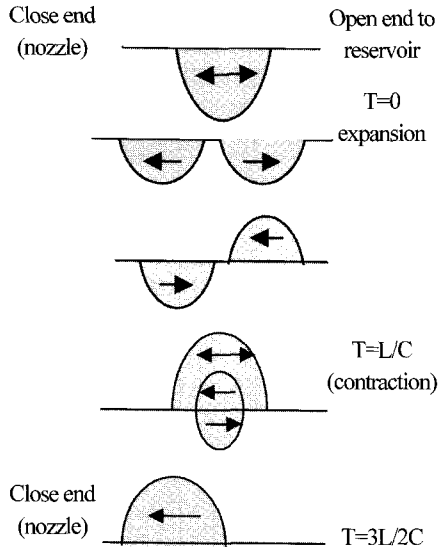


그림 2. 파형 설계.
Fig. 2. Waveform design.

인가시에는 두 개의 음의 압력이 반대방향으로 진행하고 반대로 압축(compression) 파형이 인가시는 반대로 양의 압력이 PZT를 중심에서 양쪽으로 진행한다[8].

일반적인 압력파p는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$p(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \tag{1}$$

여기서 f는 양의 x의 양의 방향으로 진행되고g는 음의 방향으로 진행되는 압력파를 나타낸다. 이러한 압력파는 진행 조건에 따라서 일부는 반사하고 일부는 진행하게 된다.

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 supply쪽에 파형이 진행된다면 반사하여 반대의 압력이 된다. 하지만 노즐쪽 방향의 압력파는 반사하여 같은 압력이 유지가 된다[8].

만일 유체의 음속을 C라고 하고 잉크젯 디스펜서 (dispenser)의 길이를 L이라고 하면 팽창 파형의 인가 후 T=L/C시간이 되면 압력파는 다시 가운데에서 만나게 된다. 따라서 그림 2와 같이L/C에서 압축 파형을 주는 것이 좋다. 그러면 압력파는 합쳐져서T=3L/2C에서 노즐 쪽으로 큰 압력으로 토출을 시킬 수 있다. 토출 후에도 이러한 압력파는 일정시간 동안 계속해서 진동하게 된다. 여기서 진동하는 압력파의 주기는 T=4(L/C)가 된다[8]. 이러한 진동하는 주기와 상태는 잉크젯 내의 유체 조건에 따라서 달라지게 된다. 따라서 압력파는 잉크젯 내의 상태를 측정하는데 좋은 정보가 된다.

III. 압력파 측정을 위한 브리지 회로

본 연구에서 사용된 단일 노즐의 Microfab사의 피에조 잉크젯 헤드를 보여준다.

그림 4에서 실제로 피에조 (PZT)에 흐르는 전류는 미세한 양이고 기계적 변형량에 의해 생긴 전류 iq와 구동 전압 V_{in}에 대한 피에조의 정전 용량 C_{PZT}에 의한 전류 i_c의 양의 합이다.

$$i = i_q + i_c \tag{2}$$

여기서 $i_c = C_{PZT}\frac{dV}{dt}$ 이고 $i_q = \frac{dq_p}{dt}$ 이다. i_q는 피에조의 변형량에서 생기는 전류이다. 따라서 헤드의 전류i를 측정한 후에 등가 콘덴서 정전 용량에 의한 전류ic를 빼면 피에조의 변형량을 간접적으로 알 수 있게 된다.

전류를 측정하는 일반적인 방법은 그림 5와 같이 작은 값의 저항을 이용하여 저항R의 양단 전압인 (R×i)를 측정하는 방법이다[16]. 그러나 전류가 작은 경우 작은 저항을 사용하면 측정되는 전압 역시 작게 되어 미소 전류를 측정하는데 어려움이 있다. 또한 저항-콘덴서 필터 (RC)필터가 되어 인가 되는 전압의 주파수에 따른 변화가 생기는 문제도 있다. 또한 정전 용량에 의한 전류 i_c 를 전체 전류 i에서 빼줘야하는 추가적인 노력도 필요하게 된다.

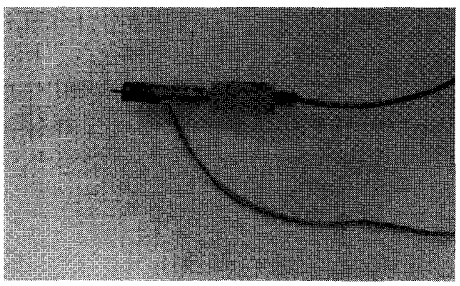


그림 3. 실험에 사용된 프린트 헤드.
Fig. 3. Microfab head.

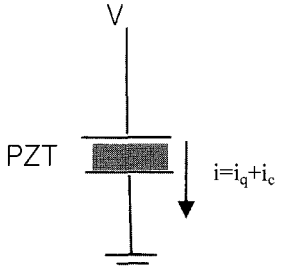


그림 4. 잉크젯 헤드의 전류와 전압.
Fig. 4. Voltage and current in inkjet head.

미세한 전류로부터 변형량을 측정하는 방법으로 그림 6과 같은 브리지(bridge)회로를 사용할 수 있다. 브리지 회로를 사용하여 그림 6과 같이 Vout을 측정하면 정전 용량의 영향을 제거한 변형량 만의 전류의 영향을 얻을 수 있다. 여기서 Ceq는 피에조와 등가의 정전 용량을 갖는 콘덴서이다. 여기서 한편으로 잉크젯 헤드를 드라이브 하기 위한 전압의 주파

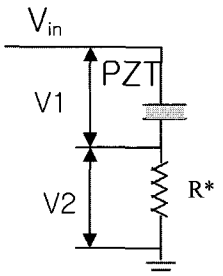


그림 5. 저항을 이요한 전류의 측정.
Fig. 5. Current measurement using a sensing resistor.

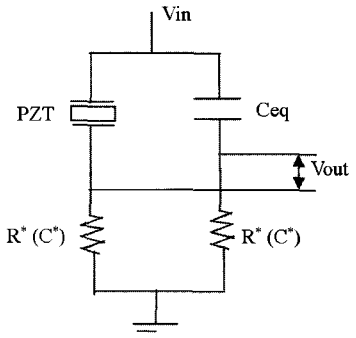


그림 6. 브리지 회로.
Fig. 6. Bridge circuit.

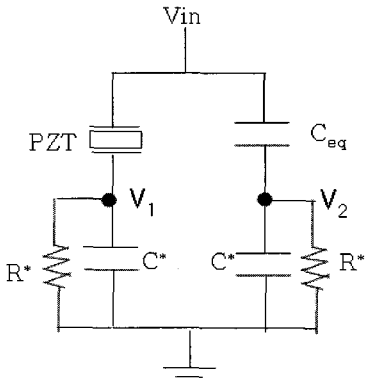


그림 7. 수정된 브리지 회로.
Fig. 7. Modified bridge circuit.

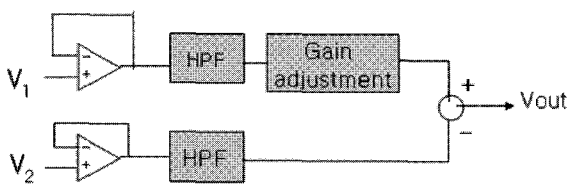


그림 8. 압력파 측정을 위한 회로 구성.
Fig. 8. Schematic of pressure wave detection circuit.

수 특성이 문제가 되기 때문에 전류측정을 위하여 저항 R^* 대신 콘덴서 C^*를 사용할 수 있다. 그렇게 되면 주파수 특성의 영향을 이론적으로는 받지 않게 된다. 그러나 콘덴서만를 사용하게 되면 검출되는 전압의 저주파의 드리프트(drift)등이 문제가 생겼다. 따라서 본 연구에서는 콘덴서, C*와 병렬로 큰 저항 (1MΩ), R*을 연결한 그림과 같은 회로를 그림 7과 같이 구성하였다. 저항이 커서 저항으로 흐르는 전류를 무시한다면 검출 되는 전압은 근사적으로 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{C_{PZT}}{C^* + C_{PZT}} V_{in},\ V_2 = \frac{C_{eq}}{C^* + C_{eq}} V_{in} \tag{3}$$

이러한 압력파 검출을 위한 C^*는 실제로 헤드를 구동하는 전압에 영향을 주게 된며 토출과 관련있는 전압, V_{PZT}은 다음과 같다.

$$V_{PZT} = V_{in} - V_1 \tag{4}$$

여기서 V_{PZT}와 Vin이 차이가 적어야 입력된 전압, Vin으로 잉크를 토출 시킬 수가 있다. 한편으로는 V_1이 적당이 커야 압력파 신호를 검출이 잘된다. 따라서 이를 고려하여 V_1=0.1V_{in}이 되도록 C*를 설계하였다.

브리지 회로에서 검출된 신호는 그림 8과 같은 회로를 거쳐서 압력파에 의한 신호를 검출 하게 된다. 이러한 압력파의 신호는 주파수가 수십 kHz이고 이를 검출 하기 위한 회로이고 V_1과 V_2의 저주파 노이즈 및 드리프트는 신호와 관련이 없기 때문에 고주파 통과 필터 (high pass filter)를 통하여 없애 주었다. 또한 피에조의 정전용량과 등가 정전용량의 미세한 차이등에 의한 효과를 없애기 위한 게인을 조절하고 두 신호를 빼는 회로를 Fig. 8.과 같이 제작하면 압력파에 의한 신호를 얻는 것이 가능하였다.

IV. 실험

1. 잉크젯 헤드 입력 파형

전자 재료 토출을 위한 잉크젯 헤드로는 피에조 방식을 많이 사용하고 있다. 피에조 방식의 잉크젯 헤드에는 토출 특성을 제어 위하여 적절한 입력 파형을 제어를 해주어야 한다 [8]. 그림 9는 이와 같은 파형을 만들어 주기 위하여 개발된 소프트웨어이다. 파형을 만들기 위하여 Agilent 33120A을 사용하였다. Agilent 33120A는 1 μsec내에 최대 15개까지의 데이터를 만들 수 있으므로 잉크젯 헤드를 드라이브하는 파형을

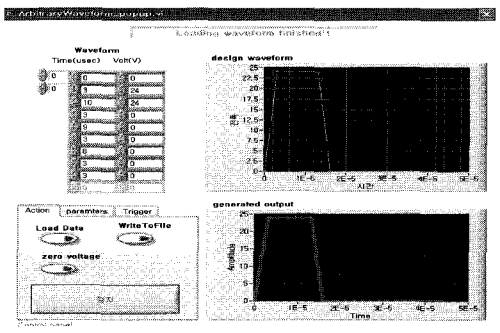


그림 9. 파형 설계를 위한 소프트웨어.
Fig. 9. Waveform editor.

만들 수 있다. 이러한 파형은 소프트웨어에서 사용자가 쉽게 만들 수 있게 하고 데이터로 변환 후에 GPIB통신을 사용하여 Agilent 33120A로 보내었다. 이 파형은 외부 트리거 신호를 기다리고 있다가 트리거 신호에 의해 발생된다. 이 발생된 파형은 피에조 드라이브 (TREK PZD 350)를 통해 증폭하여 헤드 구동전압, Vin이 된다.

2. 회로 실험

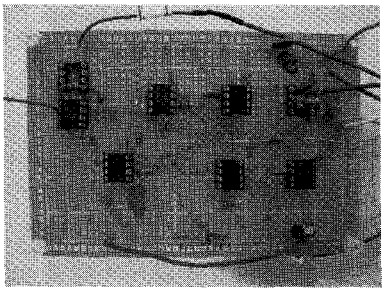
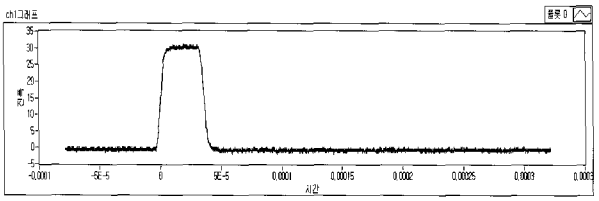
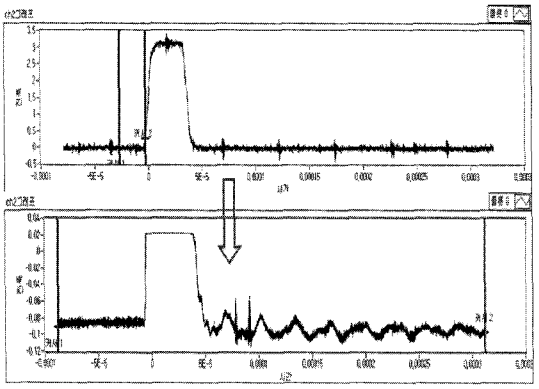


그림 10. 압력파측정을 위한 회로.

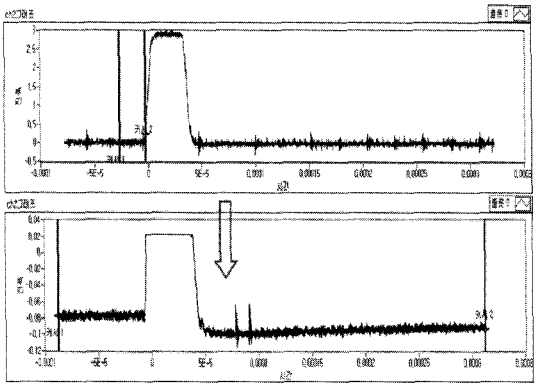
Fig. 10. Circuit for measuring pressure wave.



(a) V_{in}



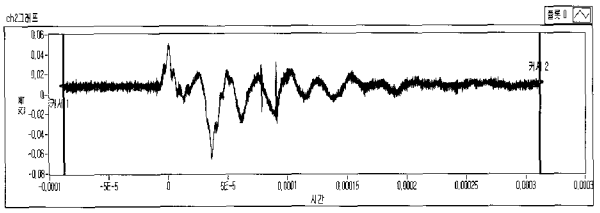
(b) V_1



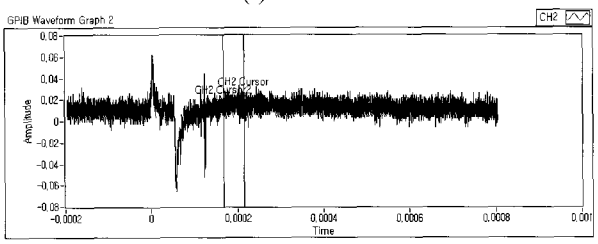
(c) V_2

그림 11. 측정된 전압.

Fig. 11. Measured voltage.



(a) With ink



(b) Without ink

그림 12. 압력파 신호.

Fig. 12. Pressure wave signal.

압력파는 헤드의 구조 및 잉크의 특성에 따라서 변화한다. 본 연구에서는 나노 실버 잉크 (20%wt)를 사용하였다. V_{PZT}를 0.9Vin으로 하였다. 본 실험에서 사용한 microfab 헤드를 LCR 미터를 사용하여 측정한 정전용량은 1.6nF이었다. 따라서 근사적인 Ceq를 만들기 위하여 세라믹 컨덴서 332 (3.3nF) 를 직렬 연결하여 1.65 nF로 만들어 사용하였다. 이와 같이 구성한 압력파를 측정하기 위한 회로는 그림 10과 같다.

그림 11(a)은 헤드의 입력 파형을 위하여 생성한 사다리꼴 dwell time을 30μsec으로 하고 30V의 사다리꼴 파형을 보여준다. 이때의 그림 7에서의 브리지 회로 양단 전압을 측정한 그림은 그림 11(b)와 (c)와 같다. 그림 11(b)의 V_1에서는 잉크의 압력파에 의한 성분이 피에조의 셀프 센싱에 의해서 검출되고 있음을 알 수 있다. 이 때 검출 되는 전압은 측정된 전압의 약 1/1000 정도로 아주 작기 때문에 노이즈 등에 민감하였다. 한편으로는 그림 11(c)의 등가 콘덴서에서의 검출된 전압 V_2에서는 이러한 성분이 없다. 그러나 잉크젯 헤드의 콘덴서 용량과 거의 같은 등가 콘덴서를 사용하였기 때문에 V_1전압과 차이를 구하면 헤드내의 잉크의 압력파 신호를 쉽게 얻을 수 있었다. 이를 구현하기 위하여 그림 8과 같은 회로를 구성하였으며, 최종적으로 그림 12(a)와 같은 압력파 신호를 얻었다.

그림 12(a)에서와 알 수 있듯이 압력파의 주파수는 약 30kHz정도 였다. 이는 압력파의 주기 4(L/C)의 역수가 된다. 이렇게 측정한 압력파를 이용하면 파형 설계 및 잉크의 특성 측정등이 가능하고 토출 작동 상태를 알 수 있다[17]. 한편으로는 반면에 잉크를 제거 한 후에는 측정된 결과는 그림 12(b)와 같고 그림에서 알 수 있듯이 잉크가 없으므로 압력파 신호가 검출 되지 않음을 알 수 있었다.

V. 결론 및 토의

잉크젯 헤드내의 압력파를 측정하기 위한 브리지 회로를 제작하였다. 압력파를 측정한 결과 실험에 사용된 잉크의 압력파의 주파수는 약 30kHz였다. 이것은 헤드의 길이 L과 잉크의 음속 C에 관련된 신호이고, 잉크를 제거 하였을 때 때

는 압력파 신호가 나오지 않음을 확인 할 수 있었다. 본 회로를 이용하여 파형 설계 및 잉크젯 헤드의 작동 상태를 진단을 위한 연구는 현재 진행 중이다.

참고문헌

[1] K. S. Kwon, S. J. Shin, and S. J. Kim, "The opportunity of printing technology for display manufacturing process," Proceedings of colloquium on micro/nano thermal engineering, 17-19, August 2005, Seoul National University.

[2] M. Bale, et al, "Ink jet printing: The route to production of full color P-OLED displays," research paper, 2006, website: www.cdtltd.co.uk.

[3] J. S. Rhee et al., "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] T. Gohda et al., "Full-color AMPLED display fabricated by ink-jet method," SID 2006, A 3.6-in 202-ppi, 2006.

[5] H. S. Koo et al., "Fabrication and chromatic characteristics of the greenish LCD colour-filter layer with nano-particle ink using inkjet printing technique," Displays 27 (2006) 124-129, 2006.

[6] L. T. Creagh, et al., "FPD manufacturing conference, Ink Jet printhead as a precision deposition tool in manufacturing FPDs," SEMICON China 2004.

[7] D. Albertalli, "Gen 7 FPD inkjet Equipment-Development status," SID 2005.

[8] D. B. Bogy and F. E. Talke, "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, 1984.

[9] "Drive waveform effects on ink-jet device performance," *Microfab technote*, 99-03, 1999.

[10] S. E. Molesa, "Ultra-Low-Cost printed electronics," Ph.D. dissertation, 2006, University of California, Berkeley.

[11] H. M. Dong and J. F. Morris "An experimental study of drop-on-demand drop formation," AIP, Physics of fluids, 18, 072102, 2006.

[12] J. B. Szczech, D. R. Gamota, J. Zhang, "Fine-line Conductor Manufacturing using drop-on-demand PZT printing technology," *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing*, vol. 25, no. 1, pp. 26-33, 2002.

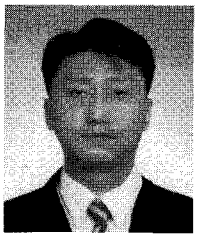
[13] C. K. Lee, T. Itho, and T. Suga, "Self-excited piezoelectric PZT microcantilevers for dynamic SFM with inherent sensing and actuating capabilities," *Sensor and Actuators A*, 72, pp. 179-188, 1999.

[14] V. Giurgiutiu and A. N. Zagrai, "Embedded Self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification," *Journal of vibration and acoustics*, vol. 124, pp. 116-125, 2002, ASME.

[15] M. B. G. Wassink, M. J. M. Bosch, O. H. Bosgra, and S. Koekebakker, "Enabling higher jet frequencies for an inkjet printhead using Iterative Learning Control," *Proceedings of the 2005 IEEE conference on control applications*, Toronto, Canada, 28-31, Aug. 2005.

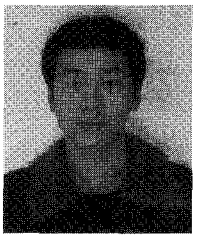
[16] Groninger, M. A. Kruijt, P. G. M. Reinten, Hans, Schippers, H. Ronald, Simons, M.M. Hohannes, "A method of controlling an inkjet printhead, an inkjet printhead suitable for use of said method, and an inkjet printer comprising said printhead," European patent, EP 1 378 360 A1, 2003.

[17] 권계시, 김병헌, 김상일, 신승주, 김성진, "잉크젯 작동 상태 진단 및 모니터링," 대한기계학회 춘계학술 대회, 455-460, 2007.



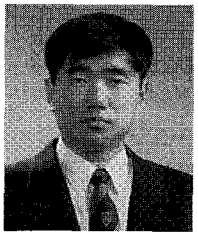
권 계 시

1992년 연세대학교 기계공학과(공학사). 1994년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1999년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2006년~현재 순천향대학교 기계공학과 조교수. 관심분야는 잉크젯, 진동.



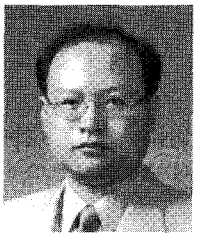
명 재 환

2007년 순천향대학교 기계공학과(공학사). 2007년 순천향대학교 기계공학과(석사과정). 관심분야는 잉크젯, 진동, 회전체 동역학.



주 영 철

1983년 한양대학교 기계공학과(공학사). 1986년 학국과학기술원 기계공학과(공학석사). 1994년 University of California, Los Angeles 기계공학과(공학박사). 1999년~현재 순천향대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 열전달, MEMS, 디스플레이 장비.



이 상 욱

1986년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1988년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사). 1998년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2000년~현재 순천향대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 소성가공, 전산역학, 연료전지.

김 국 원

1988년 서울대학교 기계설계학과(공학사). 1990년 서울대학교 기계설계학과(공학석사). 1995년 서울대학교 기계설계학과(공학박사). 2001년~현재 순천향대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 정밀가공, 전산역학, 제품설계.