압전 잉크젯 헤드 모니터링 시스템

이병렬*† · 김상일

Piezo-driven inkjet printhead monitoring system

Byeung Leul Lee*† and Sang-il Kim

Abstract

For the industrial printing applications, the stability of the piezo-driven inkjet printhead is a major requirement. In this paper, we focused on the failure modes of the inkjet printhead and realized a method to detect and repair them at high speed. The printhead monitoring is performed by detecting the residual vibration of the actuating plate using the self-sensing capability of the piezoelectric material. To measure the channel acoustics and to identify the malfunctioning nozzle, we devised the bridge sensing circuitry and failure detection algorithm. The residual vibration signals can be affected by the boundary conditions of the channel acoustics, so it is possible to identify the failure causes by analyzing the monitoring signals. Therefore it is also possible to apply a proper restoring process to the defective printhead. The experimental results show that this method is effective in improving the reliability of the industrial printing.

Key Words : piezo-driven inkjet, industrial printing, self-sensing, inkjet head monitoring

1. 서 론

최근 들어 산업용 잉크젯을 이용한 대면적 인쇄방법이 생산 현장에서 널리 활용되고 있다. 대표적인 용도인 LCD 컬러 필터 공정의 경우 기존의 사진 공정법에 비해 재료의 손실이 적고, 공정 설비가 단순해지기 때문에 가격 경쟁력 측면에서 유망한 방법으로 인식되고 있다^[1].

산업용 잉크젯 프린팅 공정의 상용화를 위해선 압전 잉크젯 헤드의 장기 신뢰성 확보가 핵심적인 요건이다. 일반적으로 산업용 잉크젯의 경우 프린팅 중 잉크 토출 불량으로 인한 결함 가능성이 항상 존재한다. 따라서 토출 불량을 발견하는 즉시 프린팅 공정을 중단하고 헤드 복구 공정을 거친 뒤 적절한 보상 알고리즘을 적용하여 프린팅을 계속할 필요성이 있다^[2]. 이를 위해선 프린팅 중에 토출 불량을 실시간으로 검출하는 기

능이 필요한데, 일반적인 광학식 검출 방법은 생산 현장 공정에는 적용하기 어렵다. 따라서 프린팅 품질에 영향을 주지 않으면서 전기적인 신호만으로 복수의 노즐 상태를 실시간으로 확인하고 불량을 판별할 수 있는 알고리즘을 구현하는 것이 핵심적인 요소이다.

본 논문에서는 압전형 잉크젯 프린터 헤드의 구성과 전형적인 토출 불량의 원인을 살펴보고 이를 전기적으로 검출할 수 있는 회로 구성을 고안하였다. 또한 이를 이용한 전체 모니터링 시스템 구성을 제안하고, 이에 대한 실험 결과를 제시하였다. 본 논문에서 제시한 모니터링 방법은 산업용 잉크젯 프린팅 공정을 이용하는 생산 공정의 양산 신뢰성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1. 압전 잉크젯 헤드의 토출 불량 현상

실험에 사용한 잉크젯 헤드는 LCD의 칼라 필터 제조용으로 사용하는 복수 노즐을 갖는 압전 잉크젯 헤드로 개념도는 Fig. 1과 같다. 크게 수 mm크기의 유로와, 잉크를 토출하는 노즐, 그리고 압전 구동판으로 구성되는데 구동 전압에 따라 압전 물질이 변형을 하면

두산인프라코어(Doosan Infracore)

*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education)

†Corresponding author : blee@kut.ac.kr

(Received : January 12, 2010, Revised : February 22, March 2, 2010)

Accepted : March 9, 2010)

Fig. 1. Schematic drawing of the piezo-driven inkjet print-head.

Fig. 2. Color filter printing process.

서 노즐 영역에서 발생한 압력에 의해 액적이 토출되는 방식이다.

잉크젯을 이용한 대화면 프린팅 공정의 경우 다수의 노즐중 하나라도 이상 토출이 발생하면 전체 결과물이 불량일 발생한다. 특히 Fig. 2에 예시한 바와 같이 대형 유리 기판에 다수의 LCD 칼라 필터를 만드는 공정의 경우 인쇄 작업 중 하나의 노즐에서 이상 토출이 발생하면 이후 제작하는 많은 수의 제품이 모두 불량이 되기 때문에 토출 불량을 관리하는 것이 생산성 측면에서 매우 중요하다. 즉 토출 불량이 발생하면 일단 인

Fig. 3. Droplet images for various jetting modes (a) normal jetting, (b) bubble entrapment (c) nozzle clogging, (d), (e) unstable droplet, (f) wetted nozzle.

Fig. 4. Conceptual figure of the inkjet print-head operation.

쇄를 중단하고 잉크젯 헤드를 복구한 다음 후속 작업을 계속하도록 공정을 설계해야 할 것이다.

잉크젯 토출 메커니즘에서 발생 가능한 불량 요인은 여러 가지 인데 가장 대표적인 것이 채널 내부 유로에 기포가 형성되는 것이다^[2]. 이 외에도 잉크가 말라붙거나, 표면이 웨팅 되거나 다른 입자가 노즐을 막는 현상 등도 전형적인 원인으로 지적되고 있다. Fig. 3은 여러 형태의 불량원인에 의해 발생한 현상을 보인 것이다. 여기서 알 수 있듯이 토출 불량을 검출하는 가장 확실한 방법은 카메라를 이용하여 직접 관측하는 것이다. 그러나 실제 프린팅 공정 환경에서는 노즐과 프린팅 대상물과의 간극이 좁아서 적용할 수 없기 때문에 다른 검출수단이 필요하다.

2.2. 광학식 헤드 상태 검출

Fig. 4는 잉크젯 헤드의 거동을 개념적으로 도시한 것이다. 액적을 토출하기 위해 압전 구동판에 구형파 전압을 인가하면 압전판이 변형하면서 잉크를 토출하고 이후 원위치로 돌아오는 과정을 거친다. 이때 진동판이 감쇄 진동을 하면서 초기 위치로 복귀를 마치고 나면 다음 액적을 토출하기 위한 신호가 가해지는 방식이다^[3].

감쇄 진동은 노즐과 유로의 상태에 따라 달라지는 고유 진동수에 의해 결정되므로 잉크의 점성과 관성 질량 그리고 진동판의 강성에 따라 진동의 형태는 확

Fig. 5. LDV measurement of residual vibration of (a) normal jetting (b) abnormal jetting (bubble entrapment).

연히 달라진다. 이를 LDV(laser doppler vibrometer)를 이용하여 관측해보면 정상적인 토출과 불안정한 토출의 진동 특성에 확연히 다른 주파수 성분이 있음을 확인할 수 있다.

이처럼 카메라로 액적을 직접 관측하는 대신 LDV를 이용하여 간접적으로 토출상황을 점검할 수 있다. 그러나 이 방법은 복수의 노즐을 광학적으로 정밀하게 정렬해야 하며, 측정에 많은 시간이 소요되기 때문에 고속으로 공정이 진행되는 생산 현장에서 적용하는 것은 매우 어려운 문제이다.

2.3. 전기적 헤드 상태 검출

전술한 LDV를 이용하는 광학식 검출의 문제를 극복하기 위해 구동용 압전체를 진동 검출용으로 동시에 사용하는 자기 검출(self-sensing) 방법을 적용하였다. 일반적으로 압전체는 응력을 받으면 표면에 전하가 유기되어 전계가 발생하므로 전압 출력 신호로 응력을 측정할 수 있다¹⁴⁻¹⁶. Fig. 6은 압전 진동체의 잔류 진동을 전기적으로 검출하는 개념도를 보인 것이다. 이는 압전체를 구동하기 위한 전압 인가를 마친 직후부터 일정 시간 동안에 압전체를 감지부로 이용하는 방식이다.

잉크젯 헤드의 진동판에 붙어 있는 압전체는 유로의 일부인 채널에 가해지는 압력을 측정하는 데, 이 힘에 의해 압전체에 전하가 유기되므로 압전체 용량 성분 C_{pz1} 과 압력에 따라 변하는 전압원 V_{pz1} 가 직렬 연결된 것으로 모델링 할 수 있다.

Fig. 7은 전하 증폭기 방식으로 구성된 자기 검출 회

Fig. 6. Self-sensing scheme for the piezoelectric inkjet print-head.

Fig. 7. Charge amplifier type self-sensing circuit.

로를 도식한 것이다. 이 방식으로 검출 감도는 높일 수 있지만, 잉크젯 헤드의 공통 단자를 전하 증폭기의 가상 접지에 연결 해야만 한다. 따라서 최종 출력에는 복수 노즐의 신호가 섞여서 나타나므로, 각 노즐의 상태를 구분하기 어렵다.

$$Q_1 = C_{pz1} V_{pz1}$$

$$Q_2 = C_{pz2} V_{pz2}$$

Fig. 8. Bridge type self-sensing circuit.

Fig. 9. Measurement comparison between LDV measurement and self-sensing (a) normal jetting (b) abnormal jetting.

...

$$V_s = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{C_{ref}} \quad (1)$$

이 문제를 극복하기 위해 고안한 브리지 회로 방식의 자기 검출 회로를 Fig. 8에 도시하였다. 이 회로의 경우 전하 변화량만 검출할 수 있으므로, 순시적으로 작용하는 응력의 미분치를 측정할 수 있고 적절한 대역필터를 통과하면 압전 헤드의 잔류진동을 검출할 수 있다. 이 방법은 전하 증폭기 방식과 달리 복수 노즐을 갖는 잉크젯 헤드에서 각 노즐 간에 상호 간섭 없이 독립적으로 진동 특성을 모니터링 할 수 있다.

Fig 9는 제한한 자기 검출 회로를 이용하여 잔류 진동을 측정한 결과파형으로, 이를 LDV 측정치와 비교한 것이다. 광학식과 전기식 검출신호의 가장 큰 차이는 구동 전압이 인가되는 동안에 검출이 가능한지의 여부인데 전술한 바와 같이 우리가 관심을 갖는 구동이 완료된 직후 잔류 진동만을 놓고 보면 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 10. Typical measurement waveform by the print-head status.

Fig. 11. Signal spectral densities for (a) normal jetting, (b) bubble entrapment (c) nozzle clogging, (d) debris adhesion, (e) nozzle wetting.

3. 결과 및 고찰

3.1. 압전 잉크젯 헤드 잔류 진동 검출

앞서 설명한 검출 회로를 실제 프린팅 환경에 장착하여 복수의 노즐에 대해 측정을 실시하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 자기 검출 회로를 통한 전형적인 측정 파형을 비교한 것으로 각각의 불량 원인 별로 확인한 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 대표적인 불량 원인인 유로 내에 기포가 고착되는 경우, 이 기포 형성에 의해 잔류 진동체를 구성하는 유체의 질량이 감소하는 효과가 있으므로 정상 토출 시 보다 진동 주파수가 높아지는 것으로 해석할 수 있다. 이처럼 시간 영역에서 뿐만 아니라 주파수 영역에서도 고유한 차이를 보이기 때문

Fig. 12. Jetting failure detection algorithm.

Fig. 13. Print-head monitoring system block diagram.

에 검출신호를 분석하면 불량 원인을 파악 하는 데 적용이 가능하다.

생산 관리 측면에서 불량 노즐이 생긴 헤드 전체를 폐기하는 것 보다는 적절한 유지 보수를 통해 계속 사용하는 것이 유리하다. 이를 위해선 불량 원인 파악이 핵심인데, 이는 불량이라 판단되는 신호를 실험적으로 미리 파악된 신호와 크기, 주파수, 위상 비교 등을 통해 가능하다.

3.2. 헤드 모니터링 시스템

자기 검출 회로를 이용한 불량 검출 알고리즘은 여러 가지 방식으로 구현할 수 있는데, 본 실험에 사용 한

모니터링 시스템에서는 인식률과 판정 시간을 고려하여 실험을 통해 정상적인 토출 파형의 범위를 미리 정해두고 이를 검출 신호를 비교하는 방법을 사용하였다.

Fig. 13은 시험용 프린팅 장비와 연계시킨 잉크젯 헤드 모니터링 시스템의 블록 구성도와 모니터링 결과 화면을 보인 것이다. 모니터링 시스템을 구성하는 자기 검출 모듈은 프린팅 공정 제어기와 신호를 주고받으면서 동시에 불량을 판별하게 된다.

이 시스템에서 프린팅 작업 중 헤드 모니터링 시스템은 반복적으로 전체 노즐의 정상 작동 여부를 검사하고 불량이 발생하는 즉시 프린팅 제어부에 이를 알려준다. 불량이 확인 되면 프린팅 공정은 중단되고 불량 헤드는 검사 위치로 이동하여 보수를 한 다음 시험 토출을 거치고 나서 원래 프린팅 위치로 복귀하여 작업을 계속하는 방식이다.

4. 결 론

본 논문에서는 압전형 잉크젯 헤드의 고장 모드를 분석해서, 고속 동작 중에 불량을 검출하고 이를 보수할 수 있는 방법을 제안 하였다. 헤드의 고장 검출은 압전형 잉크젯 헤드의 구동부로 사용하는 압전 진동판을 잔류 진동을 검출할 수 있는 감지부로 적용함으로써 구현할 수 있었다.

잔류 진동은 압전 진동판의 경계 조건에 의해 달라지기 때문에 이를 이용해서 고장의 형태 즉 원인도 파악할 수 있다. 본 논문에서 제안한 방식을 이용하면 산업용 잉크젯 프린팅의 양산 신뢰성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국기술교육대학교 신임교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] K. Cheng, K.-H. Wu, T.-Y. Yang, and J. Chen, "A novel application of ink-jet printing technology on manufacturing color filter for LCD", *NIP* 17, pp. 739-743, 2001.
- [2] Jos de Jong and Gerrit de Bruin, "Air entrapment in piezo-driven inkjet printheads", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 120, no. 3, pp. 1257-1265, 2006.
- [3] M.B.Groot Wassink, N.J.M. Bosch, O.H. Bosgra, and Koekebakker, "Enabling higher jet frequencies

for an inkjet printhead using iterative learning control”, *Proceeding of the IEEE Conf. on Control Applications*, pp. 791-796, 2005.

- [4] Chengkuo Lee, Toshihiro Itho, and Tadatomo Suga, “Self-excited piezoelectric PZT microcantilevers for dynamic SFM with inherent sensing and actuating capabilities”, *Sensor and Actuators A*, vol. 72, pp. 179-188, 1999.
- [5] Victor Giurgiutiu and Andrei N. Zagrai, “Embedded

Self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification”, *Journal of vibration and acoustics*, ASME, vol. 124, pp. 116-125, 2002.

- [6] Matthieu Guirardel and Liviu Nicu, “On-chip self-sensing function of 4×4 matrix micromachined resonating piezoelectric membranes for mass applications”, *Proceeding of the IEEE Conf. on International Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control*, pp. 317-320, 2004.

이 병 렬

- 1989년 한양대학교 전자공학과 학사
- 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
- 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 1991년 3월~2008년 2월 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2008년 3월~현재 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 조교수
- 주관심분야: MEMS, Micro-system, micro sensors

김 상 일

- 1998년 한양대학교 전기공학과 학사
- 2000년 한양대학교 전기공학과 석사
- 2000년 2월~2005년 2월 포스콘 기술연구소 선임연구원
- 2005년 3월~2008년 10월 삼성전자 종합기술원 전문연구원
- 2008년 11월~현재 두산인프라코어 기술원 선임연구원
- 주관심분야: Hybrid system, power electronics