

구동파형에 따른 잉크액적 형성 실험 및 해석

신동윤[†]

Experiments and analysis of droplet formation influenced by driving waveform

Dong-Youn Shin

Key Words : Inkjet (잉크젯), driving waveform (구동파형), satellite droplet (위성액적)

Abstract

In the fields of electronics and displays where inkjet printing has demonstrated its capability to fabricate colorant subpixels of thin film transistor liquid crystal(TFT LCD) color filters and organic light emitting diode (OLED) displays, conducting tracks and TFTs, the production of satellite droplets is one of primary things to eliminate because they generally deteriorate the pattern quality. To understand the production mechanism of satellite droplets in this paper, driving waveforms such as monopolar and bipolar were employed and the influence of the pulse duration time were investigated in both experimental and numerical aspects.

1. 서 론

종래의 포토리소그래피를 대신하여, 피에조 잉크젯 프린트 헤드를 이용하여 전자소자 및 디스플레이 소자에 대한 패턴을 수행하고자 하는 시도가 지속되고 있으며, 가시적인 성과들이 도출되고 있다.

Seiko Epson 은 2005 년 중반부터 TFT LCD 의 배향막 형성에 잉크젯을 적용하기 시작하였으며,⁽¹⁾ Dai Nippon Printing 은 2010 년 3 월 완공을 목표로 435 억엔을 투자하여 월 3 만 5 천장을 생산할 수 있는 10 세대 잉크젯 컬러필터 라인을 오사카 사카이에 건설 중이다.⁽²⁾

잉크젯은 재료와 잉크젯 프린트 헤드라는 단위 요소부품, 그리고 시스템의 3 요소로 이루어진 패턴 방식으로써, 각 요소들이 유기적으로 결합되어

있다.

특히, 패턴품질에 있어서 재료로서의 잉크뿐만 아니라, 동일한 잉크를 사용하더라도 구동파형에 따라 다수의 잉크액적이 형성될 경우 패턴품질이 저하되므로, 잉크젯 프린트 헤드의 구동 최적화도 중요한 고려사항이 된다.

본 연구에서는 수식해를 통해 압력경계조건을 도출하고, 도출된 압력경계조건을 이용한 수치해석을 수행하고, 그 결과를 실험결과와 비교하였으며, 이를 통해 위성액적 발생을 최소화하기 위한 잉크젯 프린트 헤드 구동조건을 최적화하기 위한 모델링 기법에서의 문제점을 논의하도록 한다.

해석 잉크젯 프린트 헤드는 Fig. 1 에 보인 바와 같이 MicroFab Technologies (Plano, TX, USA)의 MJ-AT-01-30 을 기준모델로 설정하였으며, 잉크는 isopropyl alcohol 과 ethylene glycol 을 선정하였다.

2. 모델링

2.1 수식해

피에조 압전소자와 같이 기계적인 변위를 이용하여 잉크액적을 토출하는 잉크젯 프린트 헤드의 작동 메커니즘은 유체의 제한적 압축 특성을 바탕

[†] 한국기계연구원 나노기계연구본부

E-mail : dongyoun.shin@gmail.com

TEL : (042)868-7378 FAX : (042)868-7176

으로 한다. 피에조 압전소자의 구동에 의해 발생한 압력파는 압력 챔버로부터 잉크 유입부와 잉크 토출부, 즉 노즐로 전파되고, 양 끝단부에서 압력파의 반사는 경계조건에 따라 위상 등이 바뀌며, 소멸되지 않은 잔존 압력파와 상호간섭을 일으키게 된다. 이러한 복잡한 상호간섭효과로 인해 최적 구동펄스가 존재한다.⁽³⁾

수치해석과 실험에 사용된 잉크젯 프린트 헤드의 구동부는 피에조 압전소자와 모세 유리관이 에폭시를 통해 접합된 구조물로 형성되어 있으며, 전압을 인가하여 변위가 발생한 피에조 압전소자의 운동은 모세 유리관 내부의 잉크에 압력을 인가하며, 이로 인해 노즐에서 잉크액적이 형성된다.

MicroFab Technologies 잉크젯 프린트 헤드를 수학적 모델링함에 있어 Dijkman의 수학적 모델을 기초로 하였으나,⁽⁴⁾ Dijkman의 모델에서 다음과 같은 사항들이 개선되었다.

첫째, 피에조 압전소자-모세 유리관 구조물과 압력파는 상호간섭을 일으키므로 유체-구조물간의 상호작용이 고려되었다.

둘째, 튜브의 두께와 평균반경 비율이 0.1 이하일 경우 thin shell theory를 적용하기 힘들기 때문에 이를 보정하도록 하였다.

셋째, 테이퍼 노즐을 유한한 개수의 불연속적인 실린더형 튜브들의 집합으로 치환하는 대신, 테이퍼를 가진 튜브 자체의 수학적 해를 식 (1)과 (2)의 형태로 제시하였다.⁽⁵⁾

$$P(z) = C_1 + C_2 \cdot \int_{z_1}^z \exp\left(-\int_{z_1}^{\xi} F_3(\xi) d\xi\right) d\xi \quad (1)$$

$$V_z(r, z) = \frac{1}{-\rho_f i \omega} \left(1 - \frac{J_0(\lambda r)}{J_0(\lambda \cdot R(z))} \right) \cdot \left(C_2 \exp\left(-\int_{z_1}^z F_3(\xi) d\xi\right) \right) \quad (2)$$

넷째, 피에조 잉크젯 프린트 헤드의 잉크 유입부와 토출부에 대한 압력 경계조건을 식 (3)과 (4)와 같이 semi-infinite tube와 멤브레인 형태로 설정하였다.⁽⁶⁾

$$P(z) = C \cdot \exp(\nu z) + \gamma \quad (3)$$

$$\Delta P = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} r \left\{ -\sigma_f \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \eta}{\partial r} \right) + 2\mu_f \frac{\partial V_z}{\partial z} \right\} dr \quad (4)$$

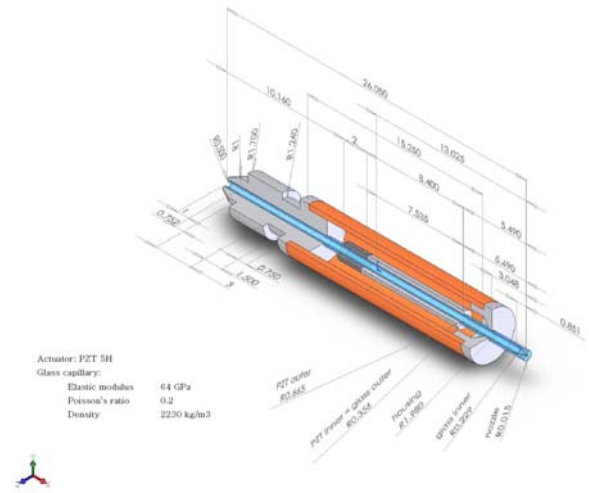


Fig. 1 MJ-AT-01-30 piezo inkjet print head (MicroFab Technologies, Inc., Plano, TX, USA)

2.2 수치해석

본 연구에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이, FLOW 3D (Flow Science, Inc., Los Alamos, NM, USA)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. Computational domain은 2차원 축대칭이며, 반경방향 r 및 축방향 z 축으로 각각 65.3 μm 및 1000 μm의 공간을 해석영역으로 설정하였다. 노즐부위는 노즐팁으로부터 200 μm 내측까지 해석영역으로 설정하였으며, 수식해를 통해 도출된 노즐부 압력경계조건을 적용하였다. 전체 셀 밀도는 r 및 z 축으로 각각 51×783으로 구성되었으며, 공칭 셀 종횡비는 1을 유지하도록 하였다.

3. 결과

3.1 구동파형

피에조 잉크젯 프린트 헤드에 인가되는 가장 기본적인 구동파형은 모노폴라 구동파형이다. 모노폴라 구동파형은 전압 상승기, t_r , 전압 유지기, t_p , 전압 강하기, t_f 로 구분될 수 있다. 구동파형을 정확히 모사하기 위해서 Fig. 3에 보인 바와 같이, 오실로스코프로 측정된 파형을 직접 수학모델에 대입하여 FLOW 3D를 위한 압력경계조건을 계산하도록 하였다.

바이폴라 구동파형은 Fig. 4에 나타난 바와 같이, 전압 상승기, t_r , 제 1 전압 유지기, t_{p1} , 전압 강하기, t_f , 제 2 전압 유지기, t_{p2} , 최종전압 상승기 t_{rf} 로 구분할 수 있다. 모노폴라 구동파형과 마찬가지로, 계산의 정확성을 위하여 오실로스코프로 측정된 파형을 직접 수학모델에 대입하여 FLOW 3D를 위한 압력경계조건을 계산하도록 하였다.

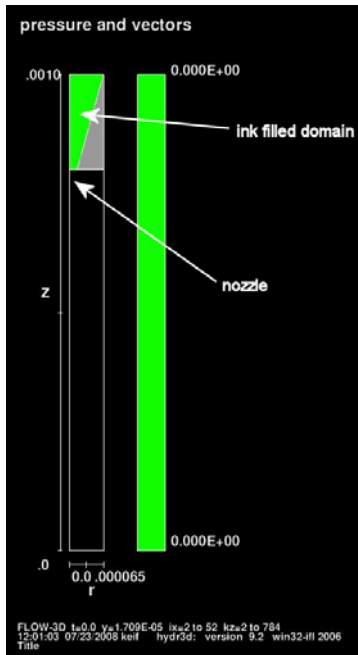


Fig. 2 Computational domain set for FLOW 3D (Flow Science, Inc., Los Alamos, NM, USA)

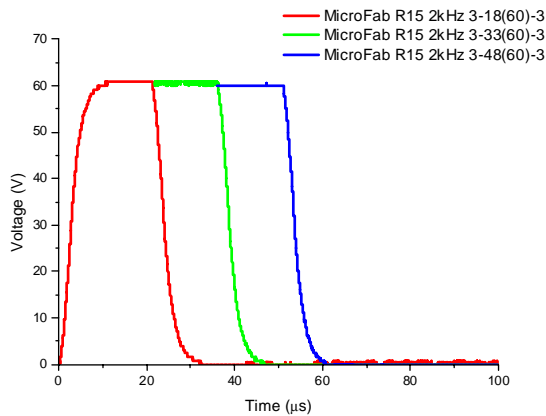


Fig. 3 Monopolar driving waveform with isopropyl alcohol

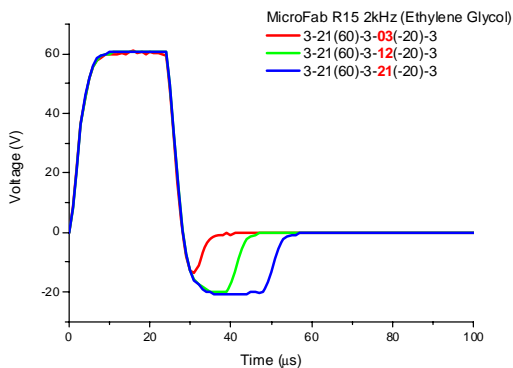


Fig. 4 Bipolar driving waveform with ethylene glycol

3.2 실험결과

모노폴라 구동파형에 따른 isopropyl alcohol 의 수치해석 및 실험결과에 대한 비교는 Fig. 5 에, 바이폴라 구동파형에 따른 ethylene glycol 의 수치해석 및 실험결과에 대한 비교를 Fig. 6 에 도시하였다.

Figure 5 와 Fig. 6 에 보인 바와 같이, 수치해와 수치해석을 통한 잉크액적 생성결과는 실험결과와 정성적으로 만족할만한 합치성을 보이고 있다.

그러나, 해석 모델링과 실제 잉크젯 프린트 헤드와의 끝단 테이퍼 불일치, 피에조 압전소자와 내부 모세 유리관 사이 에폭시 분당의 불확실성, 피에조 압전소자의 비선형성 등은 본 수치모델링에 포함되어 있지 않으므로, 불확정 교정계수를 도입하여 정량분석을 수행하여야 했다. 불확정 교정계수는 임의의 구동조건에서 1 회 실험을 실시한 뒤, 그 결과값을 수치해석값과 비교하여 결정하도록 하며, 대략 0.3~0.5 정도의 값을 가진다.

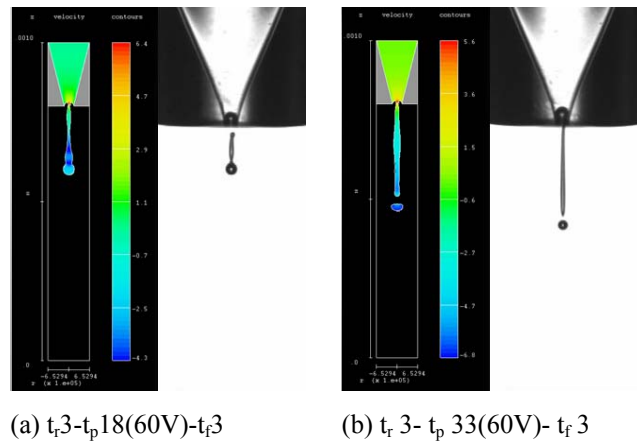


Fig. 5 Comparison of simulated and experimental results with isopropyl alcohol

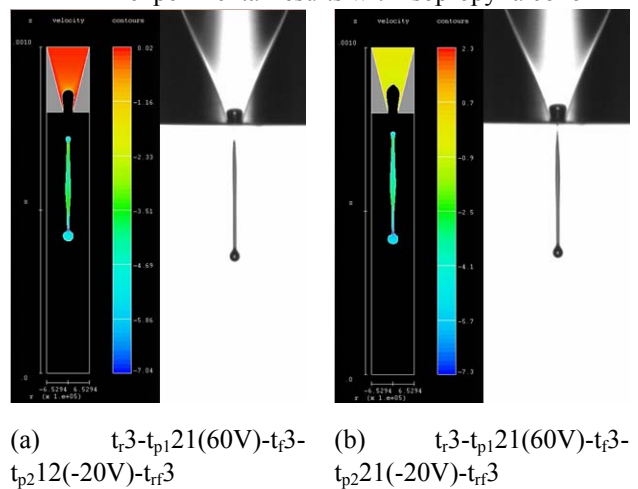


Fig. 6 Comparison of simulated and experimental results with ethylene glycol

실험과 이론간의 오차의 가장 중요한 원인으로써 잉크젯 프린트 헤드의 내재적 불확실성, 특히 피에조 압전소자의 비선형 응답특성이 주요한 원인으로 추정된다. 저주파수에서는 인가된 전압에 비례한 응답을 보이나, 주파수가 높아질 수록 인가된 전압과 응답간에 위상차가 발생하며, 최대 변형도 저주파수에서의 최대변형과 다르다고 추정할 수 있다.

Richter et al.에 따르면, (1) 피에조 압전소자의 응답은 인가전압에 비례하지 않으며, (2) 인가전압에 따라 피에조 압전소자 내부의 다이폴이 재정렬됨으로써 크리프 현상이 발생하며, (3) 일정 주파수 이상에서 심각한 히스테릭 효과가 나타남을 발견하였다.⁽⁷⁾

본 연구의 수학적 모델링에 사용된 ANSI/IEEE 표준은 피에조의 동적 비선형성을 모델링하기에 적합하지 않으며, 피에조 압전소자의 인가전압과 주파수에 따른 응답특성을 레이저 도플러 측정기를 사용하여 측정한 데이터로 점탄성 모델을 도입하는 것이 좀더 이론과 실험간의 오차를 줄이는데 도움이 될 것으로 추정한다.

4. 결론

본 연구에서 잉크젯 프린트 헤드에 인가되는 구동 전압과형에 따른 노즐 유동과 잉크액적 형성에 대한 수학적 모델을 정립하였다. 그리고, 잉크젯 프린트 헤드에 내재하는 불확실성을 상쇄하기 위한 교정계수의 도입과, 그에 따른 이론값과 실험값을 비교하였으며, 이론값이 실험값을 추종함을 보였다.

본 연구에서 소개된 모델링 방법은 잉크액적 생성 메커니즘에 대한 통찰력을 제공하며, 습득된 기반지식을 위성액적의 생성을 억제할 수 있는 최적 구동전압 설계에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) <http://www.bcsd.org.tw>
- (2) <http://www.dnp.co.jp>
- (3) Bogy, D.B., and Talke, F.E., 1984, "Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-Demand Ink Jet Devices," *IBM. J. Res. Develop.*, Vol. 28, No. 3, pp. 314~321.

- (4) Dijkman, J. F., 1984, "Hydrodynamics of Small Tubular Pumps," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 139, pp. 173-191.
- (5) Shin, D. Y., Grassia, P. and Derby, B., 2005, "Oscillatory Incompressible Fluid Flow in a Tapered Tube With a Free Surface in an Inkjet Print Head," *J. Fluid. Eng. - T. ASME.*, Vol. 127, pp. 98~109.
- (6) Shin, D. Y., Grassia, P. and Derby, B., 2004, "Numerical and experimental comparisons of mass transport rate in a piezoelectric drop-on-demand inkjet print head," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 46, pp. 181~199.
- (7) Richter, H., Misawa, E. A., Lucca, D. A. and Lu, H., 2001, "Modeling Nonlinear Behavior in a Piezoelectric Actuator," *Precis. Eng.*, Vol. 25, pp. 128~137.