

# 잉크젯을 이용한 TFT LCD 컬러필터 제작에 있어 잉크액적 부피 편차에 대한 이론적 해석

신동윤<sup>†</sup> · 이택민\* · 김충환\*

Theoretical analysis of one possible cause of the droplet volume variation for the fabrication of a TFT LCD color filter with the piezo DOD inkjet printing technology

Dong-Youn Shin, Taik-Min Lee, and Chung-Hwan Kim

**Key Words :** Inkjet (잉크젯), color filter(컬러필터)

## Abstract

TFT LCD industries have endeavored to adopt the piezo Drop-On-Demand (DOD) inkjet printing technology to production lines of TFT LCD color filters and these efforts have significantly been based on experimental works. Because the degree of complexity in the piezo DOD inkjet printing technology results in too many combination of parameters, the matrix experimental method to investigate all possible sets of parameters becomes ineffective and hence the basic understanding of the piezo Drop-On-Demand inkjet print technology becomes important. In this study, one possible cause of the droplet volume variation across nozzles, which might cause visible swathe marks on an inkjet patterned TFT LCD color filter, is theoretically investigated and new R&D directions are suggested.

### 기호설명

$t_r$  = 구동전압 상승시간 ( $\mu s$ )  
 $t_p$  = 구동전압 유지시간 ( $\mu s$ )  
 $t_f$  = 구동전압 하강시간 ( $\mu s$ )  
 $\mu$  = 동점성도 ( $Pa \cdot s$ )  
 $\rho$  = 밀도 ( $kgm^{-3}$ )  
 $c$  = 잉크의 음파전달 속도 ( $ms^{-1}$ )  
 $\sigma$  = 표면장력 ( $Nm^{-1}$ )

## 1. 서론

피에조 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 수십 마이크로미터 스케일의 패턴을 직접 행하기 위한 연구개발이 세계 각국, 특히 TFT LCD 산업이 집

중되어 있는 한국, 일본 그리고 대만의 극동아시아 3개국에서 활발히 진행되어 왔다.

일본의 경우, Seiko Epson, Canon, Konica Minolta, Richo 와 같은 잉크젯 프린트 헤드 제조업체들, Sanyo, Mikuni, Toyo 와 같은 잉크 소재업체, 그리고 Dai Nippon Printing, Toppan Printing, Sharp 등과 같은 TFT LCD 관련업체들이 포진하고 있으며, Future Vision 정부사업을 통하여 TFT LCD 의 컬러필터를 잉크젯으로 제작하기 위한 연구개발을 수행하여 왔다.

유럽의 경우 고분자 OLED 의 원천기술 소유업체인 Cambridge Display Technology, AVECIA 와 Covion 과 같은 잉크소재 업체들과 Philips Research 등의 협력을 통해 고분자 OLED 를 이용한 디스플레이의 연구개발을 진행해 왔었다.

국내에서는 삼성종합기술원, 삼성전자 LCD 총괄, 삼성전자 생산기술연구소, LG Philips LCD, LG 전자 생산기술원, 그리고 LG 화학에서 잉크젯 응용 TFT LCD 컬러필터 제작에 대한 연구개발을 수행하고 있다.

---

<sup>†</sup> 한국기계연구원 정보장비연구센터  
E-mail : dongyoun.shin@gmail.com  
TEL : (042)868-7378 FAX : (042)868-7176

\* 한국기계연구원 정보장비연구센터

---

그러나, 잉크젯으로 TFT LCD의 컬러필터를 제작할 시에 나타나는 색특성의 불균일성이 가장 큰 문제점으로 대두되었으며, 이러한 색특성 불균일은 잉크젯 노즐로부터 토출되는 잉크액적의 미세한 부피편차가 원인이라고 알려져 있으며, 부피편차의 원인은 주로 hydraulic crosstalk 현상이 원인이라고 알려져 있다<sup>(1)</sup>.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 노즐별로 구동전압을 달리하여 미세한 부피조절을 수행할 수 있도록 ‘Drive-Per-Nozzle’ 기능이 고안되었으나, 대략  $\pm 2\%$  내의 부피편차를 충족시키는 것은 매우 난이도가 높은 기술적 도전과제이다.

그러나, 잉크액적의 부피편차 원인은 주로 거론되는 hydraulic crosstalk 외에도 다양한 원인들에 기인하는 것으로 보이며, 잉크젯 프린트 헤드만을 놓고서도 (1) 기계적/전기적 오차에 의한 신뢰성 문제, (2) 피에조 압전소자로 제작된 액츄에이터의 신뢰성 문제, (3) 구조학적/구동학적 crosstalk, (4) 전자기학적 crosstalk 등을 들 수 있으며, 기타 잉크젯 프린트 헤드 외적인 요인들도 작용하는 것으로 추정된다.

이러한 요인들은 상호영향을 끼치고 있으므로, 각기 요소들을 개별적으로 분리하여 실험을 통해 데이터를 추출해내는 것은 극히 어렵다. 따라서, 수치해석적 기법을 이용한 변수실험을 통해 이상적 상황에서 개별 요인들에 대한 잉크액적 부피편차에 대한 중요성을 판단하는 것이 유효한 방법이라고 본다.

본 논문에서는 각 노즐로부터 토출되는 잉크액적의 부피편차의 원인에 대해 기존의 hydraulic crosstalk 현상 이외의 원인들 중 하나인 기계적 오차, 즉 노즐 자체의 가공오차에 기인하는 잉크액적의 속도와 부피오차에 대해 수학적 모델링을 통해 수치해석을 행하여 그 영향을 평가하도록 한다.

## 2. 해석

### 2.1 해석대상

해석될 잉크젯 프린트 헤드는 실제 상용 잉크젯 프린트 헤드를 해석하는 것이 가장 적합하나, 상용 잉크젯 프린트 헤드의 치수, 구조, 재질 등에 대한 정보는 공식적으로 공개되어있지 않으므로, 본 논문에서는 Fig. 1 에 보인 바와 같이, 연구용 싱글노즐 잉크젯 프린트 헤드인 MicroFab 사 (Plano, Tx, USA)의 잉크젯 프린트 헤드에 대한 해석을 수행하였으며, 자세한 치수는 Fig. 2 에 도시되어 있다.

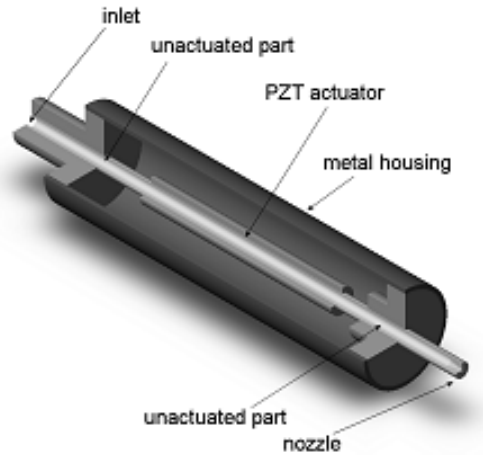


Fig. 1 Illustration of a single nozzle piezo DOD inkjet print head by MicroFab

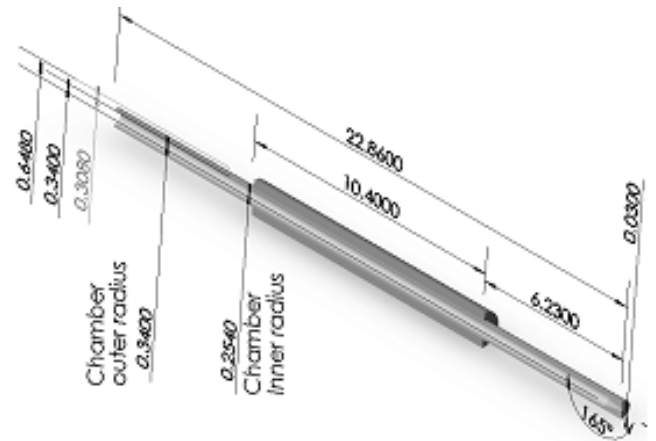


Fig. 2 Dimensions of MicroFab's single nozzle piezo DOD inkjet print head

피에조 압전소자는 Morgan Electro Ceramics 사의 PZT 5H 가 사용되었으며, 노즐과 압력챔버 등을 구성하는 유리세관의 Young's modulus 와 Poisson's ratio 는 각기 46 GPa, 0.245 로 설정하였다.

해석을 위해 사용된 잉크는 에틸렌 글리콜로써, 점도, 밀도, 음속과 표면장력은 각기 20 mPa·s, 1113 kgm<sup>-3</sup>, 1680 ms<sup>-1</sup>, 그리고 50 mNm<sup>-1</sup>로 설정하였다.

### 2.2 해석방법

잉크젯 프린트 헤드의 해석은 일반적으로 유한요소법, 유한차분법과 같은 수치해석적 기법이 많이 이용되어왔으나, 전체 잉크젯 프린트 헤드를 수치해석법을 통해 해석하는 것은 막대한 시간비용을 요구한다. 따라서, 본 논문에서는 잉크젯 프린트 헤드는 수학적 모델링을 통해 해석해를 도출하여 계산을 하도록 하였다<sup>(2,3)</sup>.

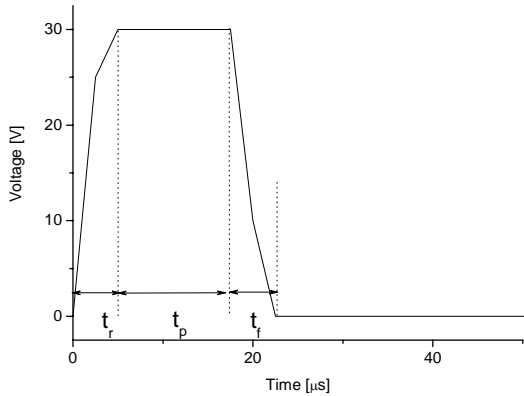


Fig. 3 Monopolar driving voltage waveform

잉크액적 형성에 대해서는 1 차원으로 단순화된 유한차분법을 통해 잉크액적의 속도와 부피를 계산하도록 하였다. 수학적 해석해와 1 차원 유한차분법의 하이브리드 해석에 대한 자세한 사항과 장점과 단점에 대해서는 필자의 논문을 참조하기 바란다<sup>(3)</sup>.

#### 구동조건

피에조 DOD 잉크젯 프린트 헤드에 인가되는 가장 기본적인 구동파형은 모노폴라 혹은 사다리꼴 구동파형으로써, 전압상승기  $t_r$ , 전압유지기  $t_p$ , 전압강하기  $t_f$  로 구분할 수 있다.

전압상승기  $t_r$ 과 전압강하기  $t_f$ 는 동일할 필요는 없으나, 변수의 증가를 회피하기 위해서 일반적으로 동일하게 설정한다. 만약  $t_r$ ,  $t_p$  그리고  $t_f$ 의 시간 변수 세가지, 그리고 전압변수를 포함하여 총 네 가지의 변수들을 매트릭스 실험을 해야할 경우, 조합의 수는 급격히 늘어나게 된다. 이와 같이, 잉크젯의 경우 전압구동조건만으로도 기존의 스피코팅의 기술적 복잡도를 넘어서게 된다. 이와 같은 이유로 대부분의, 모노폴라 구동조건에서는  $t_r$ 를  $t_f$ 과 동일하게 셋팅하고, 전압과  $t_p$ 값만을 이용하여 잉크젯팅 조건을 찾는 것이 일반적이다. 본 논문에서는  $t_r = t_f = 3 \mu s$ ,  $t_p = 15 \mu s$ , 구동전압은 30 V로 놓고 해석을 수행하였다.

### 3. 수치해석 결과

노즐의 직경이 30  $\mu m$ 와 50  $\mu m$ 이며 가공오차가  $\pm 2 \mu m$ 인 경우를 상정하여 수치해석을 실시하였으며, 그 결과를 Figs. 4 와 5 에 도시하였다. 잉크액적의 속도와 부피에 대한 허용오차는  $\pm 2\%$ 를 선정하였다<sup>(4)</sup>.

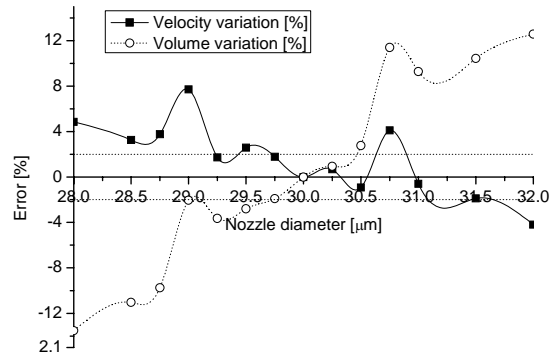


Fig. 4 Comparison of relative errors of ink droplet in terms of average axial velocity and volume (Nominal nozzle diameter = 30  $\mu m$ )

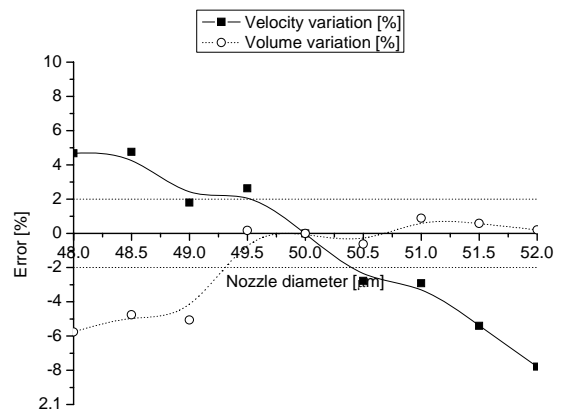


Fig. 5 Comparison of relative errors of ink droplet in terms of average axial velocity and volume (Nominal nozzle diameter = 50  $\mu m$ )

그러나, 허용오차는 절대적인 기준이 아니며, 응용분야, 잉크 잔막울(부피분율 기준)에 대한 제조사의 관리기준 등에 따라 달라진다.

Figs. 4 와 5 에 보인 바와 같이, 주어진 구동조건 하에서 노즐의 가공오차가 커질수록 잉크액적의 토출속도는 감소하는 반면 부피는 증가하는 일반적인 경향을 보임을 알 수 있다.

그러나,  $\pm 2\%$ 의 잉크액적 부피오차를 허용하는 노즐가공 오차는 노즐직경이 30  $\mu m$  일 때보다 50  $\mu m$  일때가 좀더 유연함을 알 수 있다. 노즐직경이 30  $\mu m$  일 때는 주어진 구동조건 하에서의 허용 노즐직경이 29.73  $\mu m$  ~ 30.46  $\mu m$  로써 0.73  $\mu m$ 의 허용치를 보이나, 노즐직경이 50  $\mu m$  일 경우에는 49.3  $\mu m$  ~ 52  $\mu m$  로써 2.7  $\mu m$ 의 허용오차를 가

진다.

또한 각 노즐들에 있어서 잉크액적의 속도변화량을 살펴보면, 30  $\mu\text{m}$  노즐직경 보다 50  $\mu\text{m}$  노즐직경에서 주어진 가공오차에서 더 큰 잉크액적 속도변화가 있음을 알 수 있다. 이는 잉크액적을 비전으로 관찰할 시에 50  $\mu\text{m}$  노즐직경의 경우 훨씬 민감하게 잉크액적 부피편차를 검출할 수 있음을 의미한다.

#### 4. 결론

지금까지 30  $\mu\text{m}$  와 50  $\mu\text{m}$  의 노즐직경과 주어진 구동조건에 있어서 노즐허용오차에 따른 잉크액적의 속도와 부피영향성을 수치해석을 통하여 살펴 보았다.

일반적인 인식과는 달리, 작은 노즐직경의 잉크젯 프린트 헤드보다는 큰 노즐직경을 가지는 잉크젯 프린트 헤드가 오히려 잉크액적의 부피편차를 줄이는데 긍정적인 역할을 함을 알 수 있었다.

대면적 디스플레이에 있어서 현재 가장 중요한 기술적 이슈를 색특성의 불균일성 해결이라고 할 때, 동일한 가공오차에서는 더 큰 노즐직경, 더 작은 노즐직경일 경우에는 더 향상된 가공오차를 가지는 방향으로 잉크젯 프린트 헤드의 기술방향을 선정해야함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Seith, H., 2003, "Modelling and Numerical Simulation of the Crosstalk Behavior of a DOD Print Head," International Conference on Digital Printing Technologies, New Orleans, pp. 343-347.
- (2) Dijkman, J. F., 1984, "Hydrodynamics of Small Tubular Pumps," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 139, pp. 173-191.
- (3) 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.
- (4) Creagh, L. T., 2003, "Advances in Precision Deposition of Electronic Materials via Ink Jet," 2<sup>nd</sup> Annual Digital Electronic Materials Deposition Conference, Arizona, USA.