

압전 프린트헤드의 잉크드롭 최적형성을 위한 각 노즐제어

최근수*, 윤신용*, 백수현**, 김용**

* (주)디지아이 기술연구소, ** 동국대학교 전기공학과

Each Nozzle Control for Optimum Formation of Ink Drop of Piezoelectric Printing Head

Geun-Soo Choi*, Shin-Yong Youn*, Baek-Soo Hyun**, Kim Yong**

*DGI Corp. Institute of Technology Research, **Dongguk University Electrical Engineering

Abstract - 본 논문에서는 잉크젯 프린팅 기술을 이용한 산업용 FPCB의 패턴형성을 위한 잉크드롭의 최적형성을 연구 목적으로 하였다. 이를 위하여 압전헤드에 대한 구조특성을 해석하였으며 드롭형성을 위한 전압파형의 크기, 펄스폭, 기울기(감속)조정을 통하여 잉크드롭을 최적으로 형성하도록 제어기(FPGA)를 구성하였으며 실험결과를 통하여 잉크의 최적형성과정을 확인할 수 있었으며 잉크 드롭시 1[mm]에 ±10[um]의 드롭오차량 ±2[um]까지 감소시켜 50[um]패턴을 프린트하였다.

1. 서 론

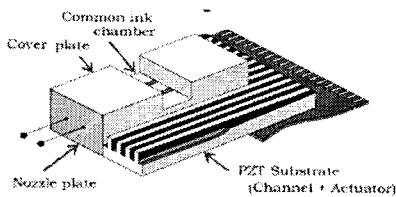
정보통신기술의 발전과 더불어 정보출력 기술이 발전함에 따라 인쇄기술이 비약적으로 발전하였다. 현재의 대표적인 인쇄기기는 잉크젯 프린터가 있다. 1990년대 중반까지 잉크젯 기술은 OA용 컬러 프린터가 주 적용분야였지만 최근에는 산업용 잉크젯 플로터로부터 IT 및 NT, BT 분야의 마이크로 패턴닝(patterning) 공정에 응용이 활발히 접도되고 있다. 잉크젯 기술의 적용이 가능한 대표적인 응용분야는 LCD, OLED, PDP 등의 평판디스플레이 분야, 금속배선, 저항, 커패시터, 인덕터, 트랜지스터 등 PCB분야 등에 선진국을 중심으로 초기개발 단계에 있다. 본 연구에서는 FPCB(Flexible PCB)등에 적용 가능한 잉크 분사제어 기술을 다루고자 한다.

잉크젯 헤드는 열 전사방식과 압전 피에조방식이 있지만 본 연구에서는 후자를 적용하며, 압전세라믹 프린트헤드에 잉크 분사구멍을 구동방식에 의해 잉크를 최적으로 형성하여 분사하는 것을 연구 목적으로 하였다. 실험결과 잉크드롭 최적형성을 알 수 있었으며 이를 적용하여 고 정밀 미크론 단위의 FPCB 프린팅 패턴을 형성하였다.

2. 본 론

2.1 압전헤드의 구동원리

그림 1은 잉크 분사용 압전(piezoelectric) 세라믹 프린트 헤드의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1의 압전 헤드 힘 변형은 Shear mode 방식에 의해 응력을 발생하며 이로부터 잉크를 분사한다.



Schematic diagram of printhead

그림 1 압전세라믹 프린트헤드

여기서 잉크를 분사하는 홈을 노즐이라고 하며 전면에 노즐 면을 접착하고, 채널 내에 잉크를 충전한다.

Actuator movement

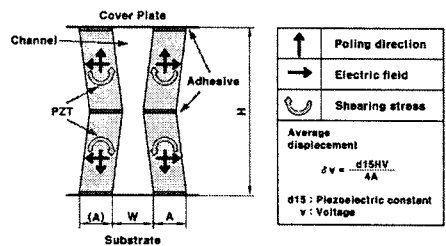


그림 2 전단모드의 압전 변형(응력)

그림 2는 Actuator의 채널을 유로 방향과 직각으로 절단한 단면도를 나타낸 것이다. 이것은 전단모드로서 PZT(Piezoelectric)의 분극방향에 직교하는 방향으로 전계를 가하는 것에 의해 굴곡변형을 주어, 채널내의 잉크를 가압한다. 채널 내에 발생한 압력이 노즐, 잉크공급실과의 각각의 경계에서 반사하여, 공진하는 것에 의해 노즐에 가해지는 압력이 시간변화하고, 이로부터 잉크액적이 분사되어진다.

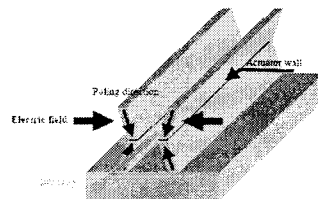


그림 3 압전 액추에이터 채널

그림 3은 액추에이터의 채널 부분을 확대한 구성도이다. 잉크 채널의 측면의 전극에 전압을 인가함으로써 측면에는 전단 변형이 발생하고 그로인하여 잉크 채널 내부에 충전되어있는 액체에 음향파의 공진이 전달됨으로 잉크를 사출하게 된다.

2.2 압전헤드 내부의 유체흐름

잉크젯 압전 세라믹 헤드의 노즐 내부에서 유체 유동해석을 위한 유체 특성은 다음 식 1로 부터 유도된다.

$$-\oint j dA = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

여기서 j : 질량 흐름 밀도, A : 시스템의 표면적

식 2는 채널 벽의 이동으로 인한 채널 부피에 변화를 나타 낸 것이다.

$$-\Phi = \frac{dV_{wall}(b, U)}{dt} \quad (2)$$

여기서 Φ : 채널 속으로 전체 잉크의 흐름, $V_{wall}(b, U)$: 채널 벽에 공급된 전압 U 와 채널 내에서 잉크에 의해서 발생된

압력 p 벽의 부피변화 사이의 결합을 나타냄.

노즐 내부의 압력의 변화는 식 3과 같다.

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{\Phi + \frac{dV_{vall}}{dt} \Big|_p \frac{dU}{dt}}{\frac{dV_{vall}}{dp} \Big|_U} \quad (3)$$

잉크의 흐름 Φ 는 드롭 속도 (V)와 표면적 (A)의 곱으로 잉크가 분사되며 식 4와 같다.

$$\Phi = V_{nozzle(p)} \cdot A_{nozzle(p)} + V_{rear(p)} \cdot A_{rear(p)} \quad (4)$$

여기서 드롭속도는 압력의 함수, 실제 잉크 분사 직경 $A_{nozzle(p)}$ 는 노즐 단면적보다 약간 작은 직경, 이유는 잉크와 노즐사이의 표면장력은 효과적인 노즐분사를 제한한다.

2.3 압전세라믹의 구조방정식

전압에 의해 압전이 용력을 발생하는 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다. 압전 동작에 대한 결과를 발생하는 관계는 선형이며 이때 계수는 일정하다고 가정한다. 압전 재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (5)$$

$$S = s^E T + dE \quad (6)$$

식 5와 식 6을 간소화 하면 식 7과 식 8과 같다.

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (7)$$

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (8)$$

여기서, $i = 1, 2, 3$ $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$,

D : 변위계(Electric Field), T : 공급력(Stress), S : 변형된 용력(Strain), E : 공급된 전계

식 9는 구조방정식인 Hooke's Law이다.

압전 세라믹은 전기적인 성질이 중요하기 때문에 전기적인 면에서 구조방정식으로 표현하면 다음식과 같다.

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j$$

탄성관계를 나타내는 외력에 의한 흡인력 다음 식과 같다.

$$S_i = s_{ij} T_j, \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (9)$$

여기서 ϵ 는 유전율, s : 탄성력

2.4 전단모드 변위(Shear mode displacement)

압전세라믹의 복잡한 전기-기계적 동작은 행렬로 나타낼 수 있으며 이는 다음식과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12} & s_{22} & s_{13} & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & \epsilon_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

본 압전 세라믹 구조의 경우 전계는 벽(압전) 전극 사이의 방향(2)에서 공급된다. 식 6을 이용하여 해석한 결과, 벽에서 S_4 의 전단용력 결과를 발생함을 알 수 있었다. 본 압전세라믹 구조에서는 외부용력이 압전세라믹에 공급되지 않았을 경우 식 10은 다음 식과 같이 간소화 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow S_4 = d_{15} \cdot E_2 \quad (11)$$

S_4 는 방향 2에서 공급된 전계에 의해서 발생된 축(1) 주위의 전단용력을 나타낸다.

그림 4는 막대로 된 특성을 나타내는 압전세라믹의 직각 좌표 구조이며 여기서 z 축은 폴링방향 3으로 나타낸다.

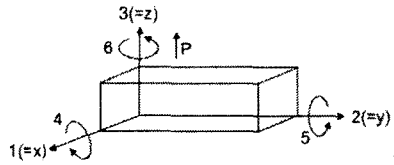


그림 4 막대구조의 압전세라믹

2.5 압전 벽두께의 영향

압전 벽에 공급된 전압은 벽에 수직으로 전계를 발생하며 이로부터 차례로 압전 전극결과로 인해 벽에 용력을 발생시키며 용력은 식 11로 나타낼 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{y(x)}{x} = d_{15} \cdot \frac{U}{b} \quad (11)$$

여기서 d_{15} :전단모드(Shear mode)에 대한 압전계수를 나타내며, $b, y(x), \alpha$ 는 그림 5와 같다.

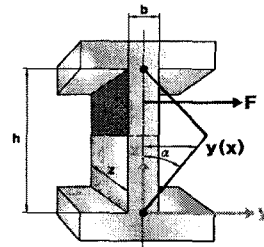


그림 5 벽의 단면적

발생된 부피 변위 L_V 는 압전 벽이 약간 이동한다고 가정할 경우 다음 식 12로 나타낼 수 있다.

$$L_V = 2z \int_0^{h/2} y(x) dx = \frac{d_{15} z h^2}{4b} \cdot U \quad (12)$$

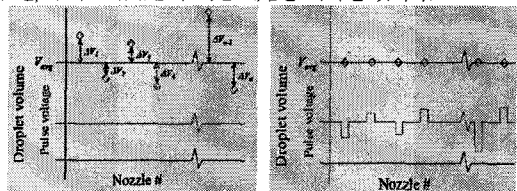
$$\text{여기서 } d_{15} = \frac{\pi f_s}{2 f} \tan\left(\frac{\pi f_p - f_s}{f_p}\right)$$

잉크가 비 압축상태라고 가정할 경우, 분사된 잉크의 양은 부피 변위만큼 커야 된다. 잉크가 노즐에서 양 채널 분출구를 통하여 분사되기 때문에, 다기관에서 분사된 드롭 부피는 노즐을 통하여 분사된 부피와 동일하여야 하며 채널의 양 개방 R_{nozzle} 와 R_{rear} 의 액체 저항에 영향을 받는다. 분사채널의 벽은 첫 번째로 밖으로 굽어지며 그 다음은 안으로 굽어지므로 전체 V_{nozzle} 은 2로 곱해진다.

$$L_{V_{max}} = 2 \frac{R_{rear}}{R_{nozzle} + R_{rear}} \cdot V \quad (13)$$

2.6 잉크드롭의 제어기법

본 연구에서는 잉크젯 분사시 잉크 드롭량의 크기를 일정하게 조절할 수 있도록 잉크젯 분사 압전헤드의 각 노즐을 제어할 수 있는 DPN(Drive Per Nozzle) 제어를 실현하였다. 그림 6는 압전헤드의 각 노즐을 전압펄스 파형에 의해 제어하기 전, 후의 드롭볼륨에 대한 개념을 나타낸 것이다.



(a) DPN 적용 전

(b) DPN 적용 후

그림 6 DPN제어 적용 전, 후의 드롭 비교

그림 6(a)는 일정 펄스전압 V_{avg} 을 각 노즐에 인가시 불규칙한 드롭량의 분포를 나타낸 것이다. 이러한 헤드를 적용하여서는 고정밀 드롭제어를 구현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 그림 5(a)의 드롭량 변화를 DPN제어를 적용하여 각 노즐의 전압을 ΔV 만큼 제어하여 원하는 드롭량을 제어하였다.

이를 위해서는 잉크의 점도 및 표면장력을 고려하여 인가전압 파형 데이터인 전압크기(Voltage value(a)), 전압폭(Pulse width(b)), 감속시간(Falling time(c))를 제어하여 원하는 잉크 드롭을 형성할 수 있었다. 이를 위한 3가지 방법은 다음 그림 7과 같으며 DPN 제어의 우선순위는 전압크기(1), 펄스폭(2), 감속시간(기울기) 순으로 제어하여야 한다.

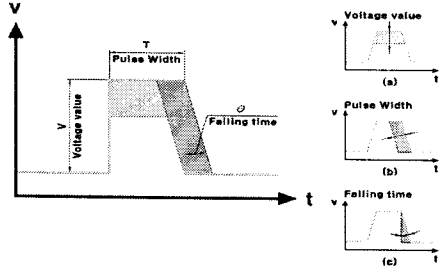


그림 7 각 노즐제어를 위한 전압펄스 조정기법

인간의 눈은 $\pm 3\%$ 의 밝기 변화를 감지할 수 있으며 이는 $\pm 4\%$ 층 두께 변화에 대응한다. 드롭의 볼륨은 정확한 범위내로 조절되는 것이 필요하다. 본 연구에서는 노즐 대 노즐의 드롭변화 크기는 $\pm 10\%$ 오차가 있지만 $\pm 2\%$ 의 범위내로 제어하고자 한다. 이를 위한 측정 장치로서 Drop watcher 스트로브 비전 시스템을 이용함으로써 표면에 드롭분사를 측정할 수 있었다

3. 실험결과

그림 8은 PC에서 전압파형 데이터를 제어기(FPGA)에 다운로드 하여 압전헤드에 인가한 전압데이터를 나타낸 것이다. 여기서 전압파형 데이터는 헤드의 사양전압 이상으로 70~110V까지로 설정하였다.

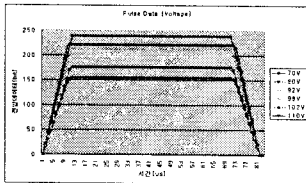


그림 8 전압펄스크기의 가변데이터

그림 9(a)~(c)는 전압파형의 데이터 조정에 의한 잉크분사 압파형과 잉크드롭의 형성과정을 나타낸 것이다

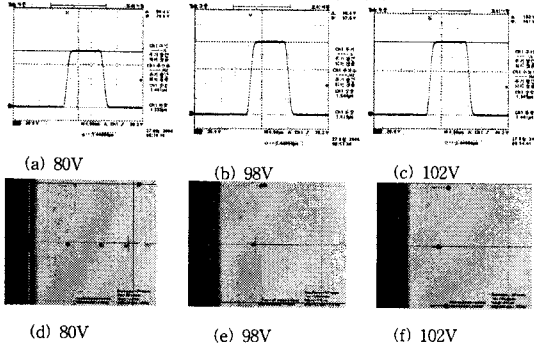


그림 9 전압펄스크기 가변시 측정결과

이러한 실험결과 80V에서는 드롭이 날리는 부적합 현상이 발생하였으며, 92~98V까지는 적합한 드롭을 분사함을 알 수 있었다. 그러나 102V, 110V에서는 Satellite가 발생할 수 있는 파

형이 분사됨을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 안정한 드롭 분사전압 이상의 102V에서 적합한 드롭을 분사할 수 있도록 펄스폭을 조절하여 이를 개선하려고 한다.

그림 10(a),(b)는 일정 분사전압 102V에서 펄스폭 변조와 기울기 전압펄스 입력데이터를 나타낸 것이다.

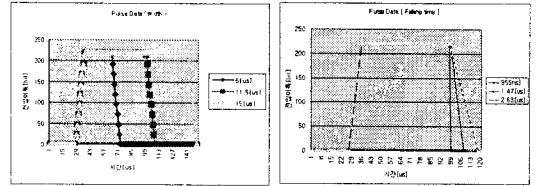


그림 10 전압 펄스폭 및 감속시간 가변데이터

그림 11(a),(b)는 그림 10(a)의 펄스폭 가변시 압전헤드의 출력전압과 드롭형성 과정을 나타낸 것이며, 그림 11 (c),(d)는 그림 10(b)의 펄스폭 가변시 압전헤드의 출력전압과 드롭형성 과정을 나타낸 것이다.

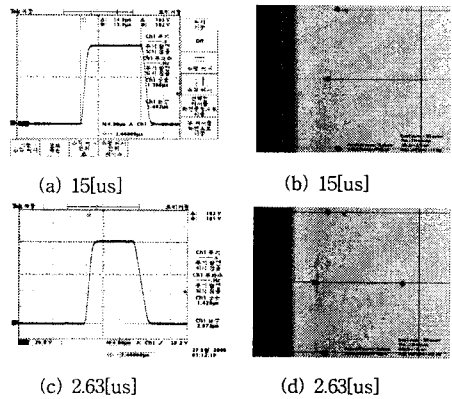


그림 11 펄스폭 및 감속시간 가변시 측정결과

그림 12는 DPN 제어에 의해 FPCB 절연지에 전도성 잉크를 프린팅 출력력을 나타낸 것이다.

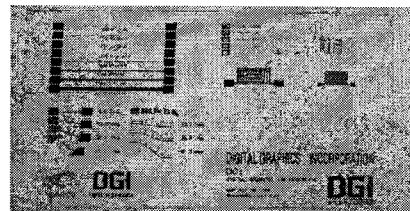


그림 12 전도성 잉크로 프린트한 FPCB 패턴

4. 결 론

본 연구에서는 압전세라믹에 의한 각 노즐의 고정밀 잉크드롭 제어를 이용하여 FPCB에 전도성 잉크를 프린트하는 패턴을 실현하였다. 이를 위하여 먼저 적용대상 압전세라믹 프린트헤드의 구동특성을 분석하였으며, DPN에 의한 전압펄스 파형 데이터의 제어로부터 각 노즐의 안정된 액적분사제어를 실현하였다. 실험 결과를 통하여 패턴 폭 50[μ m] 이하의 안정된 프린팅을 실현하였다.

[참 고 문 헌]

[1] T. W. Shield, D. B. Bogy, F. E. Talke, "Drop formation by DOD ink-jet nozzles : A comparison of experiment and numerical simulation," pp 96-110, 1986
 [2] C. M. Hong, S. Wagner "Inkjet Printed Copper Source/Drain Metallization for Amorphous Silicon Thin-Film Transistors", IEEE Electron Device, Vol.21, pp.384-386, No.8, August 2000.