

유한요소법을 이용한 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드의 특성해석

*백수현, *김 용, **최근수, **윤신용
*동국대학교 전기공학과, **(주)디자인이 기술연구소

Characteristics Analysis of Piezoelectric Inkjet Print Head using FEM

*Baek S. H, *Kim Y, **Choi G. S, **Yoon S. Y.
*Dongguk University Electrical Engineering, **(Com.) DGI Technical Institute,

Abstract - 본 논문에서는 FEM (Finite Element Method)을 이용한 압전세라믹의 특성해석을 통하여 잉크젯 프린트헤드를 설계, 제작하였다. 압전세라믹의 물질특성과 잉크유체 특성을 고려한 굽힘 모드방식의 구동원리와 이론정립을 하였다. 압전방정식은 압전구조에 의한 공진주파수로 압전 파라미터를 구할 수 있고, 실험을 통하여 이러한 측정값을 얻을 수 있었다. 제작된 압전세라믹 프린트헤드의 잉크드롭 실험결과 통하여 이에 대한 특성을 알 수 있었다. 이때 잉크유체의 음파와 압전 공진주파수 범위 내에서 압전세라믹 응력(변형)의 이득을 발생시킬 수 있음을 제작한 128노즐의 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드로부터 알 수 있었다.

입력된 신호가 ASIC을 통하여 전극에 전기를 입력한다. ASIC 주변에는 전극제어를 위한 패턴회로가 구성되어 있다. 펄스전압 인가에 의해 압전세라믹은 굽힘(Bending)동작을 발생하며 잉크압력에 의해 압전 노즐 밀면을 통하여 잉크드롭을 분사하는 구조이다.

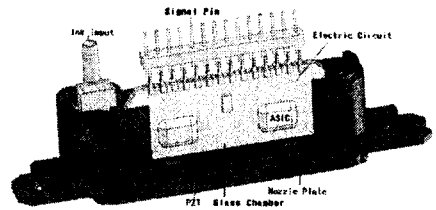


그림 1. 잉크젯 프린트헤드 구조

1. 서 론

컴퓨터에 의한 디지털 기술로 정보화 및 고도화는 더욱 빠르게 발전하고 있으며 이에 따라 프린트기는 정보기기의 기본필수품이 되었다. 1995년대 이후 선진국을 중심으로 잉크젯 기술은 산업용 응용기기로 까지 발전하기 시작하여 현재는 다양한 분야로 응용이 확대되고 있다. 그 동안 수작업으로 그리던 이미지를 현재는 잉크젯 프린팅 시스템에 의해 이미지 파일이 있으면 곧 바로 그림 출력이 가능하다. 응용분야는 옥내/외 광고시장(옥외간판, 현수막, 지하철광고, 인테리어 등), 디지털 섬유 텍스타일, LCD, 태양전지 셀, 연료전지, 3차원 모형 프린팅 시스템(RPS), 바이오, OLED RFID, FPCB, 디바이스, 센서소자, 전자페이퍼 등에 다양하게 적용되고 있다.

압전특성은 재료내의 전기적인 쌍극자(electric dipole)들이 외부로부터의 전계나 응력에 의해 내부에 쌍극자 모멘트를 발생시킴으로서 나타나게 된다. 잉크분사 헤드는 열 분사방식과 압전 분사방식으로 분류할 수 있으며 본 연구에서 압전 분사방식을 이용한다. 이를 위하여 본 논문에서는 압전세라믹 프린트헤드의 물질특성, 구동원리, 압전 변형(응력)이 발생하는 과정, 잉크의 유체압력을 고려하여 설계이론을 도출하고 유한요소법(FEM)의 해석에 의해 이를 해석하며 제작된 128노즐의 압전헤드 실험결과를 통하여 이를 확인 할 수 있었다.

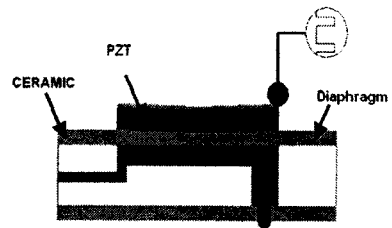
2. 본 론

2.1 압전세라믹 프린트헤드의 구조

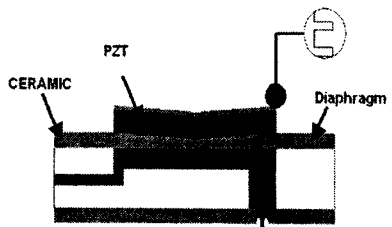
그림 1은 설계한 압전세라믹 잉크젯 프린트헤드의 형상을 나타낸 것이다. 내부는 압전재료인 PZT(티탄산지르콘산납)와 챔버인 유리사각에 의해 잉크경로(channel)를 만들고 이를 에폭시로 접착한 후 일정온도로 세라믹하여 제작한다. 이후 압전에 전극부착과 챔버의 에폭시 접착으로 프린트헤드를 제작한다. 잉크는 왼쪽 부분의 주 흡으로 입력되어 128개의 각 잉크채널로 공급된 후 압전소자의 응력만큼 아래로 잉크 드롭을 형성하게 된다. 기판 윗면에는 전극이 부착되어 있어 Signal Pin에

2.2 압전세라믹의 구동원리

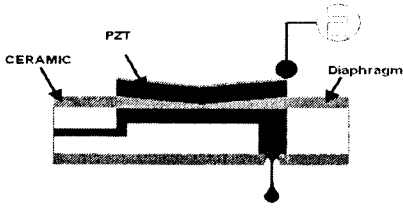
그림 2는 굽힘 모드형 압전세라믹의 연속 구분동작 구조를 나타낸 것이다. 여기서 PZT에 펄스전압을 인가하면 분극현상에 의해 압전 헤드는 응력의 굽힘 변위를 발생시키며 채널내의 잉크를 노즐 밖으로 분사한다. 그림의 순서와 같이 압전 응력의 변형에 따라 잉크드롭을 분사제어 할 수 있다.



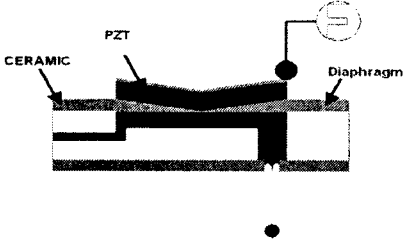
(a) Actuating



(b) Ejection



(c) Jetting



(d) Refill

그림 2. 굽힘 모드의 구분동작

그림 2는 잉크 액적드롭을 효율적으로 제어하기 위하여 잉크채널의 체적을 확장(draw)한 후 수축(release)하고 강화하는 4개의 동작으로 나타낼 수 있다. 이때 잉크 채널의 벽면전극에 양의 전압을 인가하면 그림 2와 같이 잉크 채널은 확장되고 전계가 제로가 되면 잉크 채널은 수축되고 그 후 강화 하는 과정이 되며 이러한 구동은 펄스파형의 제어에 의해 가능하다.

2.3 압전 방정식

전압에 의해 압전이 응력을 발생하는 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다. 압전 동작에 대한 결과를 발생하는 관계는 선형이며 이때 계수는 상수이다.

식 4.1과 식 4.2를 간소화 하면 식 4.3과 식 4.4로 나타낼 수 있다.

$$D_i = d_{ij} T_j \quad 4.1$$

$$S_j = d_{ij} E_i \quad 4.2$$

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

D: 변위(Electric Field), T: 외력(Stress), S: 변형된 응력(Strain), E: 전계

다음은 구조방정식인 Hooke's Law이다.

압전 세라믹은 전기적인 성질이 중요하기 때문에 전기적인 면에서 구조방정식을 고려하면 다음 식과 같다. 여기서 ϵ 는 유전율(permittivity)

$$D_i = \epsilon_{ij} E_j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad 4.3$$

탄성관계를 나타내는 식은 다음과 같다. 여기서 s : 탄성력 이는 외력에 의한 흡인력을 나타낸 것이다.

$$S_i = s_{ij} T_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad 4.4$$

압전 재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태를 나타내는 식은 다음과 같이 표현된다.

$$D = dT + \epsilon^T E \quad 4.5$$

$$S = s^E T + dE \quad 4.6$$

식 4.5는 Direct Piezoelectric Effect(압전효과)를 나타내는 식이고, 식 4.6은 Converse Piezoelectric Effect(역압전효과)를 나타내는 식이다. 여기서 위 첨자로 나타낸 T와 E는 각각 Constant Stress와 Constant Field를 나타내

고, D는 Dielectric Displacement를 나타내는 벡터 량이며, T와 S는 각각 Stress와 Strain을 나타내는 텐서량(tensor)이다. 위의 수식으로 다음의 4가지 압전 구조방정식을 유도할 수 있다.

Strain - Charge Form

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d] \{E\}$$

$$\{D\} = [d]^t \{T\} + [\epsilon^T] \{E\}$$

Stress - Charge Form

$$\{T\} = [c^E] \{S\} + [e] \{E\}$$

$$\{D\} = [e]^t \{S\} + [\epsilon^s] \{E\}$$

Strain - Voltage Form

$$\{S\} = [s^D] \{T\} + [g]^t \{D\}$$

$$\{E\} = -[g] \{T\} + [\epsilon^s]^{-1} \{D\}$$

Stress - Voltage Form

$$\{T\} = [c^D] \{S\} - [q]^t \{D\}$$

$$\{E\} = -[q] \{S\} + [\epsilon^s]^{-1} \{D\}$$

4.7

여기서 압전재료는 탄성계수 s , 압전상수 d 로 나타내어 진다.

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad 4.8$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad 4.9$$

로 나타내어지며, 유전상수는 보통 k 를 사용하여 표현되고, $K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ 의 관계를 가진다.

여기서 압전방정식의 수식계산에 의해서 다음 상수를 얻을 수 있으며 이는 제작한 크기와 공진주파수로부터 압전 파라미터를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[s] = \begin{bmatrix} 15.8 \times 10^{10} & 11.4 \times 10^{10} & 11.4 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 11.4 \times 10^{10} & 15.5 \times 10^{10} & 10.8 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 11.4 \times 10^{10} & 10.8 \times 10^{10} & 22.9 \times 10^{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.14 \times 10^{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3.14 \times 10^{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.4 \times 10^{10} \end{bmatrix} N/m^2$$

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 77 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 77 & 0 & 0 \\ 27.5 & 27.5 & 68 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$$

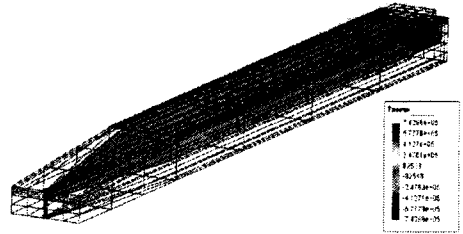
$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 0.38 \times 10^{-8} & 0 & 0 \\ 0 & 0.38 \times 10^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 0.74 \times 10^{-8} \end{bmatrix} C^2/Nm^2 \quad 4.10$$

본 논문에서 적용한 압전 세라믹 물질에 대한 특성은 다음 표 1과 같다.

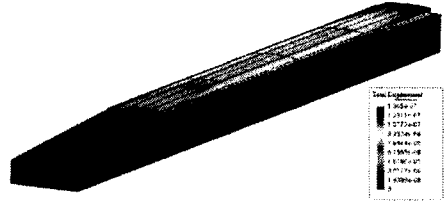
표 1 압전세라믹 PZT-5H2의 특성

Property	Symbol	Unit	Material Type
Dielectric Constant (1KHz)	K_1^1		3450
Density	ρ	g/cm ³	7.87
Curie Point	T_c	°C	242

Coercive Field (Measured < 1 Hz)	E_c	kV/cm	8.8
Coupling Coefficients	k_p		
	k_{33}		0.78
	k_{31}		0.44
	k_t		0.55
	k_{15}		0.78
Piezoelectric Charge (Displacement Coefficient)	d_{31}	Coul/N x 10 ⁻¹²	-300
	d_{33}	(or) m/V x 10 ⁻¹²	595
Piezoelectric Voltage Coefficient (Voltage Coefficient)	g_{33}	V·m/N x 10 ⁻³	19.9
	g_{31}		-10.2
Elastic Modulus	Y_{11}^E	N/m ² x 10 ¹⁰	6.2
	Y_{33}^E		5.1
Frequency Constants Radial	N_r	kHz·cm	
Resonant Thickness	N_r	KHz·cm	202
Anti-Resonant Thickness	N_a	KHz·cm	235
Stress Constants	S_{11}^E	x 10 ⁻¹² m ² /N	16.0
Short Circuit	S_{33}^E	N	19.8
Stress Constants	S_{11}^D	x 10 ⁻¹² m ² /N	13.0
Open Circuit	S_{33}^D	N	7.7
Young Constants	Y_{11}^E	x 10 ¹⁰ N/m ²	6.2
Short Circuit	Y_{33}^E		5.1
Young Constants	Y_{11}^D	x 10 ¹⁰ N/m ²	7.8
Open Circuit	Y_{33}^D		13.0



(b) 잉크 채널



(c) 응력 변위

그림 3. 압전 헤더 한 노즐의 해석구조

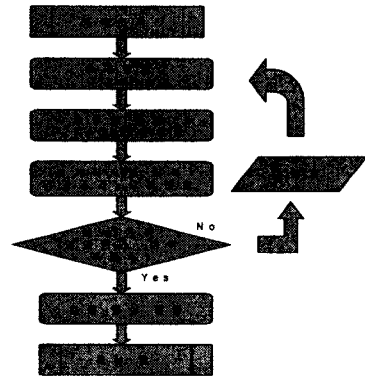
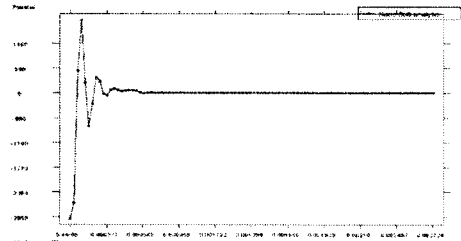


그림 4. 압전헤드의 해석 흐름도

그림 4는 그림 3의 구조설계를 위한 압전 세라믹의 FEM 해석순서도 이다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 FEM의 해석결과, 그림 6은 분사속도의 실험결과를 나타낸 것이다.



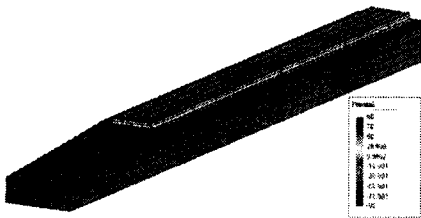
(a) 전계의 과도현상

2.4 압전세라믹의 FEM 해석

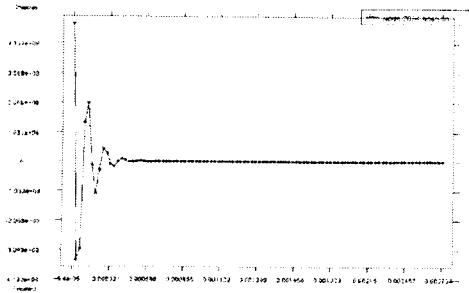
본 논문에서는 잉크젯 압전 프린트헤드의 특성해석을 위해서 유한요소법(FEM)을 사용하였으며 이러한 소프트웨어로서 ATILA를 이용하였다. 그림 3은 유한요소법(FEM)을 이용하여 압전을 해석한 구조이다. 잉크채널 사이 압전 세라믹의 전극에 전압을 인가했을 때 압전세라믹은 잉크액적을 앞으로 드롭하며 변위를 발생한다.

그림 3(a)는 1노즐의 압전세라믹 위 전극에 전압 90V를 인가할 경우 전면으로 잉크가 분사되는 채널의 단면도를 나타낸 것이다. 이것은 굽힘 모드로서 압전 분극방향과 동일한 방향으로 전계를 가하는 것에 의해 굴곡변형을 주어, 채널내 잉크를 가압한다. 그림 4.10(b)는 채널 내에 발생한 압력 10psi 가 노즐, 잉크공급 장치와 각각의 경계에서 반사하여 공진하는 것에 의해 노즐에 가해지는 압력이 시간변화하고 이로부터 잉크액적이 분사되어진다.

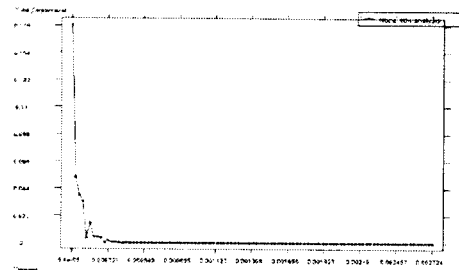
그림 4.10(c)는 잉크 채널 속에 전압을 인가할 경우 압전의 변형력에 의해 변위가 상하로 이동함을 알 수 있다.



(a) 전압에 의한 전계



(b) 잉크압력의 과도현상



(c) 응력의 이동변위
그림 5. FEM에 의한 압전 해석결과

이러한 해석을 통하여 얻은 파라미터는 다음과 같다. 노즐피치 0.667[mm], 노즐면 두께 300[μm], 홈 길이 2[μm], 챔버두께 40[μm], 챔버깊이 160[μm], 압전두께 40[μm], 압전길이 5.6[mm], 압전폭 412[μm]를 얻었다.

그림 6은 그림 8의 압전헤드에 펄스전압에 의해 128 노즐에서 잉크분사속도를 나타낸 것이다.

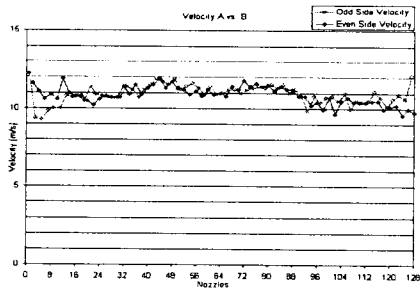
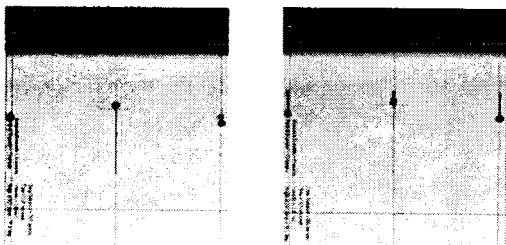


그림 6. 노즐별 분사속도

그림 7은 압전헤드의 전압에 의한 잉크드롭 형상특성을 나타낸 것이다.



(a) 98V (b) 102V
그림 7. 인가전압에 대한 잉크형상

그림 7(a)는 인가전압에 대해서 Satellite(잔점)가 없이 드롭형성이 적합하게 구현됨을 알 수 있지만 그림 7(b)에서는 약간의 Satellite는 발생함을 알 수 있다.

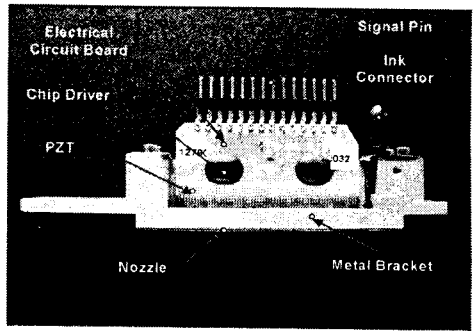


그림 8 압전세라믹 잉크젯 헤드

4. 결 론

본 논문에서는 산업용 잉크젯 프린트헤드에 대한 구동 원리, 압전방정식의 이용하여 압전 파라미터 등을 유도 하였으며 실험을 통하여 이를 측정하였다. 또한 FEM의 해석을 통하여 압전세라믹 프린트헤드를 설계하였으며 제작된 헤드의 잉크드롭 실험을 통하여 이에 대한 타당성을 입증하였다. 압전헤드에 전압펄스에 대한 잉크형성과 분사속도특성 통하여 압전헤드의 특성을 알 수 있었다. 잉크젯 프린트헤드에 고정밀 액적제어기술을 적용하여 FPCB 및 LCD 등에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백수현, 최근수의 2명, "압전 프린트헤드의 잉크드롭 최적형성을 위한 각 노즐제어," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp215-217, 2006, 10, 19-21
- [2] (주)디지털아이, "세라믹 소재를 이용한 디지털프린터헤드 국산화 기술개발," 산업자원부 기술보고서, 2004. 10 - 2006. 9
- [3] Luca Dalessandro, Daniele Rosato, "Finite Element Analysis of the Frequency Response of a Metallic Cantilever Coupled with a Piezoelectric Transducer," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 54, No.5, pp1881-1889, October 2005.
- [4] Han J. M. T. A. Adriaens, Willem L. de Koning, and Reinder Banning, "Modeling Piezoelectric Actuator," IEEE/A SME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No.4, pp.331- 341, December 2000.
- [5] 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
- [6] A. Berchtold, L. F. Feingeratebau and Getrieblehe, "Simulation of A Drop-On-Demand Print Head with Planar Piezoelectric Transducer," Conference of IEEE pp.52-55, 1989.
- [7] Dong Youn Shin, "Analysis of Inkjet Print Head," Manchester Materials Science Centre, UMIST, August 2003.

본 논문은 산업자원부, 한국부품소재 산업진흥원의 연구비로 지원된 과제입니다.