

자기변형 원리를 이용한 잉크젯 헤드 설계 및 시뮬레이션 검증 Inkjethead Design Using Magnetostrictive Principle and Simulation Verification

*#김병현¹, 박영우¹, 유재현¹

*#B. H. Kim(bk8208@nate.com)¹, Y. W. Park¹, J. H. Yoo¹

¹ 충남대학교 BK21메카트로닉스 사업단 메카트로닉스공학과

Key words : Inkjet technology, Inkjet head, Magnetostrictive principle, Drop-on-demand, Simulation verification

1. 서론

잉크젯 기술은 잉크액적을 특정 위치에 분사시키는 기술로서 디스플레이 제조공정부터 Micro Array와 같은 분야에 이르기까지 광범위한 분야에 적용되고 있다. 현재, 산업용 잉크젯 헤드 시장에서는 잉크를 가열하여 분사하는 Thermal 방식보다는 피에조방식의 잉크젯 헤드가 주로 사용되고 있다.

피에조 잉크젯헤드를 산업용 잉크젯헤드에 적용하기 위해 Seiko Epson, Micro drop, Microfab, Xaar 등은 피에조방식의 헤드의 디바이스 구조에 변화를 주어 독자적인 헤드를 개발하고 있다[1]. 하지만 피에조 방식은 피에조의 압전효과를 이용하여 유체 챔버의 체적을 변화시켜 유체를 분사하는 방식이다. 유체에 가열이나 높은 전압을 걸어야 할 필요가 없어 다양한 유체에 적용할 수 있는 장점이 있지만 피에조 재료에 직접적인 물리접촉으로 입력 전압을 인가해야함으로 유로와 노즐 전체 구조가 복잡해지고 Piezo diaphragm의 벤딩에 의해 압력을 주므로 작동유체에 일정한 압력을 가해주기 어렵다는 단점이 있다[2]. 자기변형재료는 피에조와 유사한 특성을 갖는 재료이지만 피에조에 비해 변형률, 빠른 응답, 낮은 작동전압 등에서 뛰어난 장점을 갖고 있고 자기변형재료의 변위를 푸쉬로드를 통해 일정한 압력으로 작동유체에 가해줄 수 있다는 장점이 있다. 또한 source의 인가방식이 물리접촉이 아닌 자기장에 의한 방식이다. 잉크젯헤드를 개발하기 위해서는 수 pl의 잉크를 균일분사하기 위한 노즐의 설계, 잉크를 분사하기 위해 노즐에 힘을 전달하는 Actuator의 설계가 필요하다.

본 논문에서는 기존의 피에조 잉크젯헤드의 한계점을 극복하기 위해 자기변형 재료의 자기변형 원리를 이용한 잉크젯헤드를 설계하고자 한다. 노즐 구조설계를 통해 자기변형재료의 요구 힘을 도출하여 자기변형재료를 선정하고 자기변형 구동기를 설계한 뒤 토출 시뮬레이션 통해 잉크젯헤드 설계를 검증해 하도록 하였다.

2. 노즐의 설계

자기변형 잉크젯헤드는 Fig. 1(a)과 같이 유체를 담고 있는 챔버, 유체를 분사하는 노즐, 챔버에 유체를 공급하기 위한 리저버, 자기변형 구동기로 구성된다. 자기변형 구동기는 챔버에 힘과 변위를 발생시켜 챔버에 전달하면 챔버의 볼륨이 줄어들어 줄어든 볼륨만큼 액적이 형성되어 노즐을 통해 토출되는 원리이다.

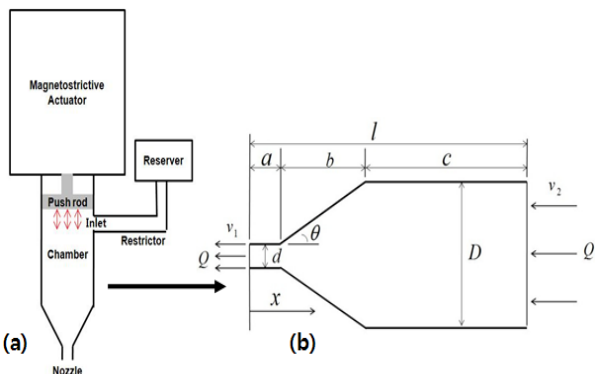


Fig. 1 (a) A schematic view of inkjet head, (b) nozzle geometry

설계에 사용된 유체는 잉크젯 헤드 설계에 흔히 사용되는 물을 사용하였다. 노즐에서 유체의 유동을 해석하기 위해 물을 비압축성 유체, 점성 층류유동으로 가정하고 연구를 진행하였다. 흔히 산업용 잉크젯 헤드는 액적 토출속도로써 5m/s 이상을 요구한다[3]. Fig. 2(b)에서 노즐 끝단 a의 속도를 5m/s로 고정하고 챔버인 c구간에서의 유량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = A_a v_a = A_c v_c \quad (1)$$

노즐의 직경을 100um, 챔버의 직경을 2mm로 정했을 때 챔버의 유속은 식 (1)에 의해 1.25mm/s로 나타났다. 노즐을 통해 잉크를 토출시키기 위해서는 적당한 압력을 챔버에 가해줘야 한다. 챔버에서 노즐까지 압력이 전달되는 과정에서 유체의 마찰에 의한 압력 손실을 Hagen-Poiseuille 방정식을 이용해서 다음과 같이 구할 수 있다[4].

$$\begin{aligned} p_a(x) &= 128\mu Q a / \pi d^4 \\ p_b(x) &= (64\mu Q / 3\pi \sin\theta)(1/d^3 - 1/D^3) \\ p_c(x) &= 128\mu Q c / \pi D^4 \\ p_l &= p_c + p_b + p_a \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 미세관에서 유체의 표면장력에 의해 발생하는 메니스커스압력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = 2\sigma / R \left[\frac{4r_1^2}{4r_1^2 + R^2} \right] \quad (3)$$

유체의 마찰에 의한 압력손실과 메니스커스 압력이 결정되면 이를 베르누이 방정식에 적용함으로써 챔버에 가해줘야 할 최소 요구압력을 구할 수 있다. P_o 는 챔버에 가해줘야 할 최소요구압력으로 22714 Pa이 된다.

$$P_o + \frac{v_c^2}{2g} \gamma + z\gamma - P_l = P_{m-\max} + \frac{v_n^2}{2g} \gamma \quad (4)$$

3. 자기변형 구동기의 설계

자기변형 구동기는 지능재료인 자기변형 재료를 사용하여 제작한 구동기이다. 자기변형 재료는 자기장에 반응하여 그 형태가 변하고 이로 인해 변위와 힘이 발생된다. 이를 이용하여 액츄에이터로 만든 것이 자기변형 구동기가 된다. 자기변형 구동기의 구조는 Fig. 2 와 같다.

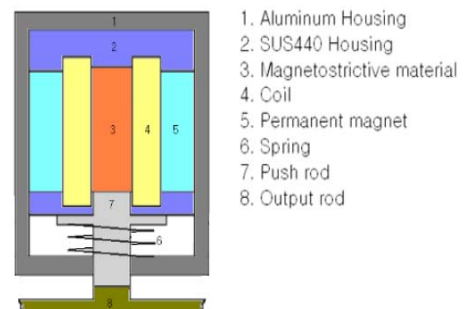


Fig. 2 Structure of magnetostrictive actuator

노즐의 설계를 통해 챔버의 유속과 챔버에 가해줘야 할 최소요구압력이 결정되었다. 이는 자기변형 구동기를 설계하기 위한 중요 설계변수로서 자기변형 구동기의 요구 힘과 변위를 결정하게 된다. 자기변형 구동기로 잉크를 토출하기 위해서는 챔버에 가해줘야 할 최소요구압력과 함께 푸쉬로드와 챔버 사이의 마찰력도 고려해야 한다. 마찰력과 최소요구압력을 합치면 최종요구힘은 8.8 N 이 된다. 그리고 챔버의 유속과 구동파형의 시간으로 자기변형재료의 변위를 구하면 125 nm가 요구된다.

자기변형 재료의 특성 데이터를 토대로 자기변형재료의 예압과 자기바이어스를 결정하고 자기변형 구동기의 변위를 제어할 수 있는 자계강도 범위를 설정하여 자기변형재료의 길이를 선정할 수 있다. 그리고 자기변형 재료의 단면적과 힘과의 관계를 통해 자기변형재료의 직경을 선정한다. 선정된 자기변형재료의 FEM 해석을 통해서 설계를 검증할 수 있다.

4. 시뮬레이션 검증

설계된 자기변형 잉크젯헤드를 검증하기 위해 유체해석 프로그램인 FLUENT 6.3을 사용하였다. Fig. 3은 자기변형 잉크젯헤드의 구동파형을 나타낸다.

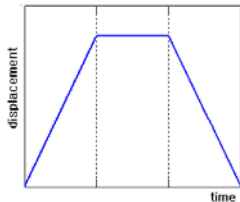


Fig. 3 Driving waveform

Fig. 4는 노즐의 설계변수 중 좁아지는 챔버의 각도(b)를 15°로 정해 놓고 위의 구동파형을 입력신호로 주었을 때 시뮬레이션을 나타낸다. 액적의 출구속도를 5m/s라는 것을 알 수 있다.

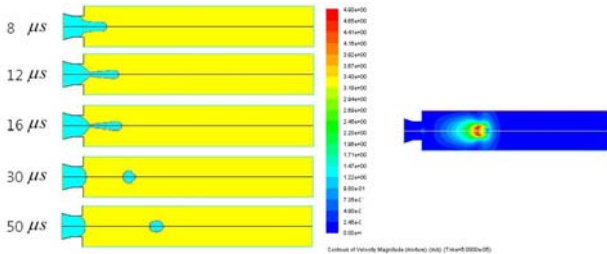


Fig. 4 Droplet formation and nozzle velocity simulation

Fig. 5는 좁아지는 챔버각도에 따른 토출 시뮬레이션이다.각도가 커질수록 액적의 속도는 증가하지만 새틀라이트가 발생하여 잉크 액적이 불안정하게 토출된다. 새틀라이트가 발생하더라도 주 액적에 합쳐지는 경우도 있지만 이것은 액적의 직진성이 좋은 경우이고 헤드의 상대적인 운동이나 주위 기류에 의해 목표점에서 벗어난 위치에 떨어질 수도 있다. 따라서 속도가 빠르지 않더라도 안정적인 액적을 토출하면서 새틀라이트를 발생시키지 것이 요구된다. 토출 시뮬레이션에서는 노즐의 각도가 20° 일 때 새틀라이트를 발생시키지 않으면서 가장 안정적인 토출을 보여준다.

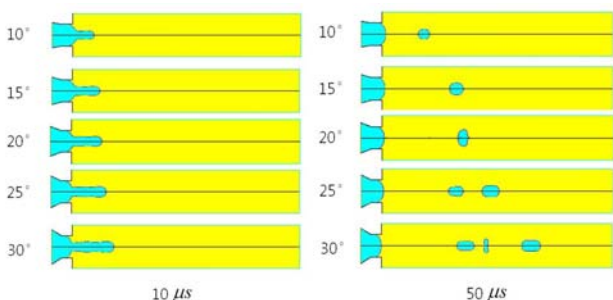


Fig. 5 Simulation by tapered chamber angle

table 1 Surface tension and viscosity of water by temperature

온도(°C)	0	20	25	30	50
표면장력(dyne/cm)	75.64	72.57	73.5	71.18	67.8
점도(kg·m·s)(×10 ⁻³)	1.792	1.005	0.894	0.801	0.556

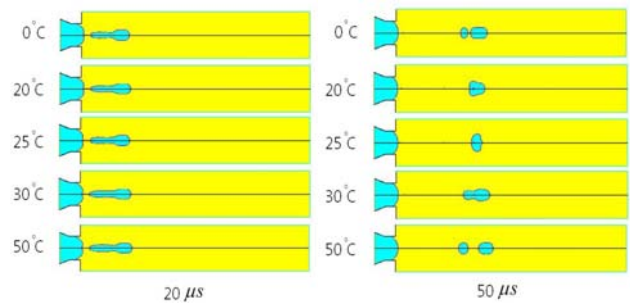


Fig. 6 Simulation

작동유체의 표면장력과 점도는 액적의 토출 특성을 결정하는 중요한 요소이다. table 1은 온도에 따른 물의 표면장력과 점도를 보여주는데 표면장력과 점도에 변화를 주어 온도에 따른 토출시뮬레이션을 Fig. 6에서 나타내고 있다. 물의 경우 온도에 따른 표면장력과 점도의 변화가 거의 없기 때문에 시뮬레이션을 통해서 토출속도의 변화는 볼 수 없지만 일반적으로 점도가 높아지게 되면 분리시간과 분리거리가 증가하여 액적의 꼬리가 길어져 새틀라이트 발생가능성이 높아진다. 주액적과 새틀라이트가 나중에 합쳐질 수도 있지만 주위기류에 의해 새틀라이트가 발생할 수 있으므로 가장 빨리 합쳐지는 물의 온도 25°C에서 가장 안정적인 토출이 이루어진다고 볼 수 있다.

5. 결론

노즐의 설계변수에 따른 압력손실과 메니스커스 압력을 통해 챔버의 최소요구압력을 구하고 챔버와 푸쉬로드의 마찰력을 고려해 최종적으로 자기변형재료의 요구힘을 도출할 수 있었다. 그리고 도출된 힘을 가지고 자기변형 구동기를 설계하여 구동파형의 제어를 통해 안정적인 잉크토출이 가능한 자기변형 잉크젯헤드의 설계하였다. 또한 설계된 잉크젯헤드의 시뮬레이션을 통해 안정적인 토출을 검증할 수 있었고 좁아지는 챔버의 각도와 표면장력, 점도를 변화시키면서 안정적인 토출을 할 수 있는 노즐의 구조와 작동유체의 상태도 검증할 수 있었다.

후기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D00087(103965))

참고문헌

1. 안동훈, 권효택, "잉크젯 프린팅기술의 현황과 전개", 한국정보디스플레이학회지, 제 5권 3호, 2004
2. (주)에이아이티, "잉크젯 프린터의 분사 방식에 따른 종류와 특징", <http://www.aitink.com/korea>
3. 김영재 외 5명, "산업용 압전 잉크젯 헤드의 구동신호에 따른 특성", 전기학회논문지 55권 8호, 2006. 8.
4. G.J. Park 외 3명, "Numerical investigation of the flow in a micronozzle for seal dispenser", 한국전산유체공학회 2007년도 추계학술대회논문집, pp. 236-242, 2007