

자기변형 잉크젯헤드의 고점도 유체 토출 요구 압력에 관한 연구

Study on the Highly Viscous Fluid Ejection Pressure of Magnetostrictive Inkjet Head

오옥균¹, 박영우^{2,✉}
Ock Kyun Oh¹ and Young-Woo Park^{2,✉}

¹ 충남대학교 대학원 기계설계·메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical Design & Mechatronics Engineering, Graduate School, Chungnam National University)

² 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: ywpark@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6874

Manuscript received: 2014.12.19. / Revised: 2015.3.19. / Accepted: 2015.3.24.

This paper presents ejection of high viscosity fluids with magnetostrictive inkjet printhead(Magjet), which is not common with any other printhead. The Magjet uses a magnetostrictive material, Terfenol-D rod with 10-mm in diameter and 50-mm in length, as an actuation mechanism. It has been known that high viscosity is often an obstacle in ejecting small and mono-disperse droplets. We calculated required pressure with fluidic inertia (Bernoulli equation) and viscous loss (Hagen Poiseuille equation). The required pressure for ejecting a droplet is 1300kPa. The generated force and displacement with Terfenol-D rod are estimated to be 480N (2600kPa) and 2 μ m, respectively. It was enough that Magjet eject high viscosity fluid (Max 1000cP). The experiments are performed to eject the high viscosity fluid with Magjet. The ejection of high viscosity fluids is successful with the aid of Terfenol-D's high performance.

KEYWORDS: Magnetostrictive inkjet (자기변형 잉크젯), High viscosity fluid (고점도 유체), Required pressure (요구 압력), Droplet (액적), Viscous loss (점성 마찰 손실)

NOMENCLATURE

ρ = density
 v = drop speed
 η = viscosity
 γ = surface tension
 θ = contact angle
 r = the radius of the nozzle orifice
 L = length of nozzle

Q = volumetric flow rate

1. 서론

잉크젯 프린팅 기술을 수십에서 수백 마이크로미터의 직경을 갖는 액적을 특정 위치에 형성시키는 기술로써 기계, 전자, 유체의 복잡한 메커니즘을 통해 마이크로미터 단위의 액적을 다루기 때문에 구현이 어렵다.¹ 비접촉 방식의 잉크젯 프린팅

기술은 액적의 분사 방식에 따라 연속식 잉크젯 프린팅 기술(Continuous mode)과 액적 하나하나를 분사하는 요구적하 잉크젯 프린팅 기술(Drop on Demand mode)로 나눌 수 있다. 연속식 잉크젯 프린팅 기술일 경우, 잉크의 연속적인 토출로 인해 미세한 양의 액적 토출이 어렵다. 또한, 빠른 속도로 유체를 토출할 경우, 기관에서 유체 튕 현상이 발생하기 때문에 정밀한 작업을 요구하는 분야에서는 토출 속도의 제한을 받는다. 반면, 요구적하 잉크젯 프린팅 방식은 제어 신호를 통해 다양한 크기의 액적이 토출 가능하고 다양한 형상을 기관 위에 직접 묘화 할 수 있는 장점이 있다. 이러한 방식의 잉크젯 프린팅 기술은 사무용에서부터 전자 재료의 토출 등 그 응용범위가 점점 넓어지고 있다.² 또한, 잉크젯 프린팅 기술의 적용범위가 넓어질수록 토출 유체의 종류 또한 넓어지게 된다. 그 중, 점도에 따른 잉크젯 헤드의 유체 토출 기술은 구동력의 한계로 인하여 가열장치 또는 공압이 필요하다.^{3,4} 이러한 경우 유체의 변성을 야기할 수 있는 유체에는 적용하기 어렵다. 따라서 고점도 유체를 추가장치 없이 요구적하 방식으로 토출할 수 있는 잉크젯 헤드의 기술이 필요하다.

본 논문에서는 선행연구에서 설계 및 3cP의 잉크 토출 성능평가를 마친 자기변형 잉크젯 헤드를 통한^{6,7} 추가장치 없이 1000cP의 점도를 갖는 유체를 요구적하 방식으로 토출 하고자 한다. 점도에 따른 유체의 토출 요구 압력을 도출하여 높은 점도를 갖는 유체의 토출 가능성을 제시하고자 한다.

2. 자기변형 잉크젯 헤드

2.1 자기변형재료

자기변형재료는 자기장을 인가하면 그에 상응하는 변위를 발생하는 줄 효과(Joule effect)와 기계적인 힘을 인가하면 자기장이 변화하는 빌라리 효과(Villari effect)를 이용하여 구동기(Actuator) 또는 센서(Sensor)등으로 사용되고 있는 스마트 재료의 일종이다. 현재까지 상용화된 대표적인 자기변형 재료로는 Terfenol-D가 있으며, 가장 널리 사용되고 있는 압전재료가 제공 할 수 없는 독특한 특징 때문에 많은 주목을 받고 있다. Terfenol-D의 대표적인 물성은 Table 1과 같다. Terfenol-D는 압전 재료보다 5~20배의 변위 발생이 가능하고, 15~25배의 에너지 밀도를 가지고 있다. Terfenol-D의 포화 변형률이 압전재료보다 15~20배 높음을 알 수 있으

Table 1 Material properties of Terfenol-D

Saturation strain, ppm	1500-2000
Relative permeability	3 - 10
Curie temperature, °C	380
Density, kg/m ³	9250
Young's modulus, GPa	25 - 35

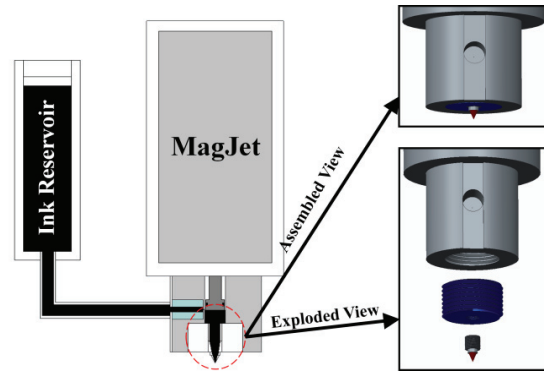


Fig. 1 Magnetostrictive inkjet printhead (MagJet)

며, 응력은 2배 이상이므로 단위 면적 발생 할 수 있는 힘이 압전재료보다 크다. Terfenol-D의 결합계수(coupling factor)는 최대 0.75로 0.65인 압전재료보다 크다. 즉 Terfenol-D의 에너지 전달효율이 압전재료보다 높으며, 또한 큐리온도가 380°C로 압전재료보다 200°C 높아 고온의 환경에서 사용될 수 있다.

고점도의 유체의 토출이 어려운 이유 중 하나는 점도에 따른 마찰 손실 값을 극복하기 힘들기 때문이다. 때문에 높은 변위와 높은 에너지 밀도를 갖는 Terfenol-D는 고점도 유체를 토출 하는데 유리하다.

2.2 잉크젯 헤드

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 자기변형재료를 이용한 구동방식의 자기변형 잉크젯 헤드(MagJet)이다. 자기변형 잉크젯 헤드는 자기변형 구동기, 사파이어 노즐, 챔버 내부로 이어져 있는 잉크 리저버로 구성 되어있다. 유체의 점도가 증가함에 따라 액적을 토출하는 데 필요한 압력도 높아진다. 따라서 유체의 유출을 막는 실링 작업이 제대로 이루어지지 않는다면 챔버 내부의 압력손실로 인하여 고점도 토출에 어려움이 있다.

기존의 자기변형 잉크젯 헤드는 기계적 결합요소가 많기 때문에 압력의 손실을 줄이고자 노즐

결합부를 Fig. 1의 분해도와 조립도 같이 간결하게 구성하였다. 노즐은 50 μ m의 직경을 갖는 사파이어 노즐 (무사시, FN-0.05ND)을 사용하였으며 노즐과 챔버를 연결해주는 노즐지지대는 알루미늄으로 가공하였다. 자기변형구동기는 자기변형재료, 자기통로, 솔레노이드, 푸쉬로드, 예압스프링으로 구성되어 있다. 자기변형재료로는 10 mm의 직경을 갖고 길이가 50 mm인 Terfenol-D 로드를 사용하였다. 자기변형재료에 자기장을 인가하기 위해 솔레노이드가 감싸고 있으며, 솔레노이드로부터 생성된 자기장이 자기변형재료로 흐를 수 있도록 자기통로가 위치하고 있다. 그리고 자기변형재료에 기계적 예압을 가해 주기 위한 예압스프링, 자기변형재료의 변위를 전달하는 푸쉬로드로 구성되어 있다. 이때 솔레노이드에 1A의 전류를 인가 하면 자기변형재료는 28 μ m의 변위와 480N의 힘을 낸다.

3. 고점도 유체 토출 실험

3.1 실험장치 및 구성

Fig. 2는 실험장치의 시스템 구성도로 자기변형 잉크젯 헤드의 제어는 랩뷰(LabVIEW) 기반의 프로그램을 개발하여 사용하였다. 설계된 구동파형은 고속 다기능 데이터수집장치(DAQ, NI USB-6251)를 통해서 생성되며 전류앰프를 거쳐 잉크젯 헤드의 구동신호로 들어가게 된다. 자기변형 잉크젯 헤드는 전류제어에 의해 구동되지만 데이터수집장치에서 생성된 신호는 전압이기 때문에 전압 대비 전류를 증폭하기 위해 전류앰프를 사용하였다. 자기변형 잉크젯에서 토출되는 액적의 측정은 고속카메라(IDT Digital Cameras Y5, Maximum fps 68,000)와 줌렌즈(VSZ-M07545, $\times 0.75\sim\times 4.5$), 후면변환렌즈(SV-2.0X, $\times 2.0$), 전면변환렌즈(VSZ-M20X, $\times 2.0$)를 사용해 최대 $\times 18$ 배율로 확대가 가능하여 수~수백 μ m의 크기의 토출 액적을 측정할 수 있는 시스템으로 구축하였다. 자기변형 잉크젯 헤드의 액적형성 과정을 측정하기 위해 12000fps로 촬영하였으며 이는 1초에 12000장의 이미지를 찍게 된다는 의미이다.

3.2 구동파형

Fig. 3은 고점도 유체를 토출하는 자기변형 잉크젯 헤드에 인가된 구동파형을 나타낸다. 무극성인 자기변형재료의 특성에 맞도록 유니폴라 형태의 구동파형으로 토출실험을 수행하였다. t_1 은 상승

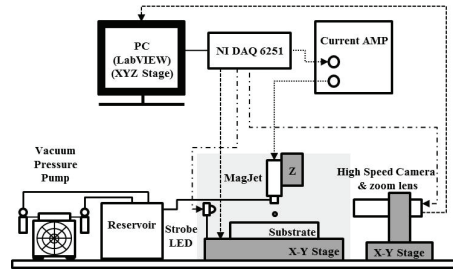


Fig. 2 Schematic of the experimental apparatus

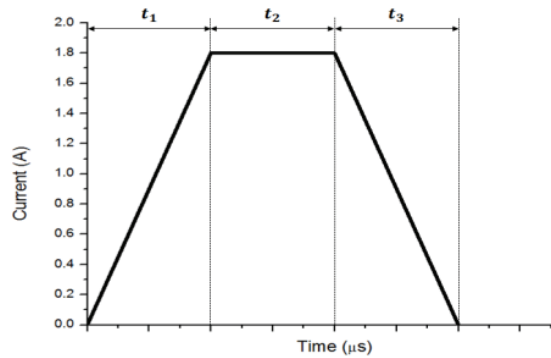


Fig. 3 Unipolar driving waveform

Table 2 Experimental conditions for driving waveform

Fluid type	Time(μ s)		
	t_1	t_2	t_3
Commercial ink	20	500	20
Current(A)	0	0.7	0
Silicon oil 1	20	600	20
Current(A)	0	0.8	0
Silicon oil 2	20	650	60
Current(A)	0	0.9	0
Silicon oil 3	20	650	60
Current(A)	0	1	0
Silicon oil 4	20	650	60
Current(A)	0	1	0

시간으로써 자기변형재료가 확장하여 챔버의 유체를 밀어내는 구간이다. 그리고 t_2 는 유지시간이며 자기변형재료가 변위를 유지하여 노즐 끝단에 액적을 형성하는 구간이며 t_3 은 자기변형재료가 초기 상태로 되돌아오면서 노즐 밖으로 형성된 액적과 노즐을 분리하는 구간이다. 자기변형 잉크젯 헤드는 솔레노이드의 기자력에 의해 구동되기 때문에 솔레노이드에 최대 2A의 유니폴라 형태의 전류를 5Hz로 인가하였다. Table 2는 실험에 사용된 유체의

Table 3 Fluid properties room temperature

Fluids	Properties		
	Viscosity	Density	Surface tension
Ink	3.09 cPs	1300 kg/m ³	33.3 Nm
Silicon oil 1	100 cPs	965 kg/m ³	20.9 Nm
Silicon oil 2	350 cPs	970 kg/m ³	21.1 Nm
Silicon oil 3	500 cPs	970 kg/m ³	21.1 Nm
Silicon oil 4	1000 cPs	970 kg/m ³	21.1 Nm

토출에 사용된 구동과형의 인가시간과 입력전류 값이다. Table 3은 실험에 사용된 유체의 물성을 정리한 것이다. 유체의 점도가 높아질 수록 구동력이 커져야 하기 때문에 입력 전류의 값을 높게 설정하여야 한다. 또한, 노즐 끝단에서의 액적형성 구간도 점도에 따라 다르게 설정하여야 한다.

4. 고점도 유체의 토출 요구 압력

고점도의 유체를 토출하기 위해서 충분한 압력을 챔버에 가해줘야 한다. 토출 요구 압력은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{required} = P_i(\rho, v) + P_{H-P}(\eta, d) + P_c(\gamma, \theta) \quad (1)$$

첫 번째와 두 번째 항은 각각 유체를 토출하기 위한 동압력과 하겐-푸아죄유(Hagen-Poiseuille)의 유체의 점성에 의한 압력손실이며, 식(2), (3)으로 표현할 수 있다.

$$P_i = \rho v^2 / 2 \quad (2)$$

$$P_{H-P} = 8\eta LQ / \pi d^4 \quad (3)$$

세 번째 항은 노즐 끝단의 표면장력을 극복하기 위한 압력이며 식(4) 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = 2\gamma \cos\theta / r \quad (4)$$

1000cP의 점도를 갖는 실리콘 오일을 토출하기 위해서 요구되는 압력은 식(1)을 통하여 1300kPa임을 알 수 있다. 이는 자기변형잉크젯 헤드가 1000cP 유체를 충분히 토출하기 위해 1300kPa 이상의 압력을 출력 할 수 있어야 한다.

5. 결과 및 고찰

5.1 자기변형 구동기의 출력 변위 및 힘

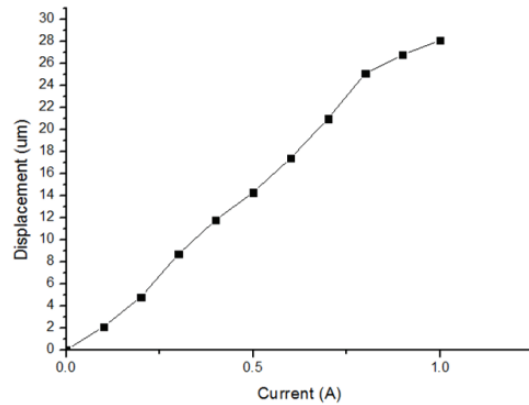


Fig. 4 Displacement vs. current

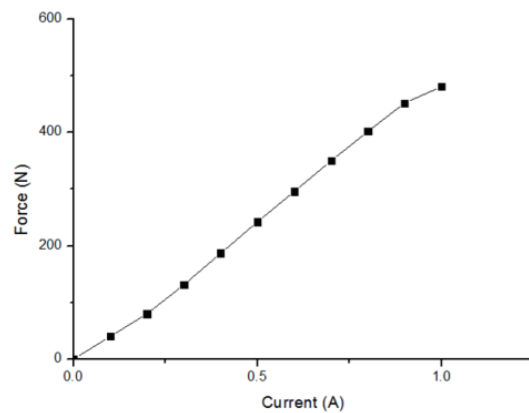


Fig. 5 Force vs. current

자기변형 구동기의 성능을 비교하기 위해 입력 전류에 따른 구동 변위와 힘을 측정하였다. 자기변형재료는 자기장에 의해 변형되지만 자기장을 형성시키는 전원소스는 코일에 인가된 입력전류이므로 입력 값을 입력 전류로 나타냈다. 입력 전류는 0A에서 최대 1A를 인가하였으며 변위센서와, 힘센서를 통하여 출력을 측정하였다. Fig. 4는 입력 전류에 따른 자기변형 구동기의 변위변화를 나타낸다. Fig. 5는 자기변형 구동기의 힘을 측정한 값이다.

최대 구동 변위는 28μm, 구동력은 480N으로 측정되었으며, 이를 환산하면 2600kPa이므로 1000cP의 점도를 갖은 유체를 충분히 토출할 수 있다.

5.2 점도에 따른 토출 특성

자기변형 잉크젯 헤드 유체의 점도에 따라 어떠한 토출 특성을 가지고 있는지 확인하였다.

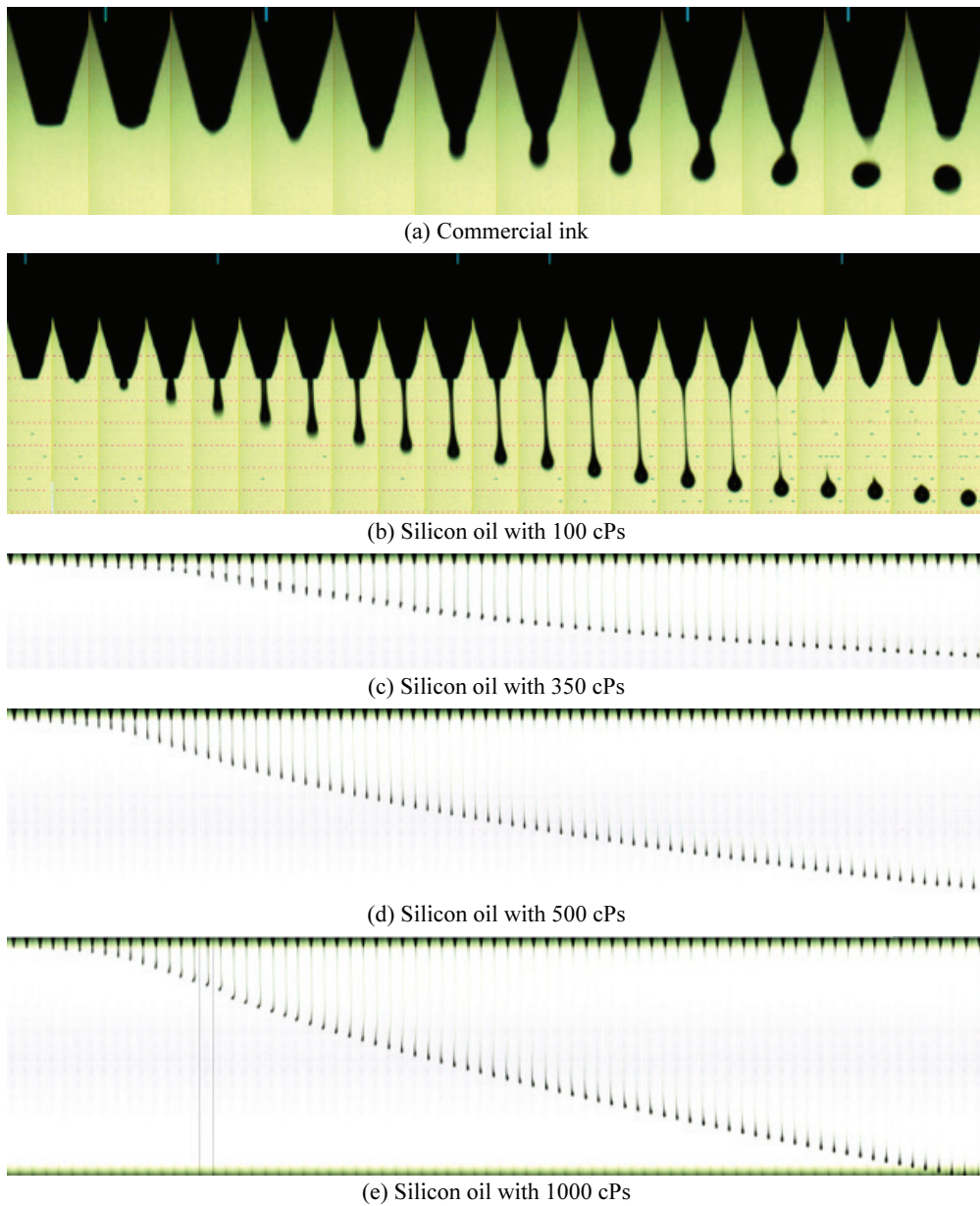


Fig. 6 Droplet formation process by MagJet

Table 4 Summary of ejection results

Fluids	Current	Tail length	Break-off time
Ink	0.8 A	100 μm	1.1 ms
Silicon oil 1	0.9 A	724 μm	1.7 ms
Silicon oil 2	1 A	2698 μm	6.9 ms
Silicon oil 3	1 A	3278 μm	7.2 ms
Silicon oil 4	1 A	3821 μm	8.1 ms

이를 위해 Table 4와 같이 서로 다른 점도를 가지는 유체의 토출 실험을 통해 유체의 점도에 따른 자기변형 잉크젯 헤드의 토출 특성에 대하여 알아보았다. 유체는 신에츠의 실리콘 오일을 사용하였다. Fig. 6은 시간에 따른 다양한 유체의 액적 형성을 나타내며 이때 테일의 길이와 액적의 분리시간은 Table 4와 같이 점도가 높아질수록 액적의 길이

와 분리시간이 길어짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 6(a)는 수성잉크의 액적형성과정을 나타내며 다른 유체의 액적형성과정과 비교하기 위한 기본유체로 사용하였다. 테일의 길이가 짧으며, 세틀라이트도 형성되지 않는다. 구동파형은 유니폴라 형태의 파형을 입력하였으며 최대 전류는 0.7A를 인가하였다.

Fig. 6(b)는 100cP 실리콘 오일의 액적형성과정이다. 구동파형은 유니폴라 형태의 파형을 입력하였으며 최대 전류는 0.8A를 인가하였다. 테일이 분리되는 시간은 1.7ms 이며 이때 테일의 길이는 724.4 μ m이다.

Fig. 6(c)는 350cP 실리콘 오일의 액적형성과정이다. 구동파형은 유니폴라 형태의 파형을 입력하였으며 최대 전류는 0.9A를 인가하였다. 테일이 분리되는 시간은 6.9ms 이며 이때 테일의 길이는 2697.7 μ m이다.

Fig. 6(d)는 500cP 실리콘 오일의 액적형성과정이다. 구동파형은 유니폴라 형태의 파형을 입력하였으며 최대 전류는 1A를 인가하였다. 테일이 분리되는 시간은 7.2ms 이며 이때 테일의 길이는 3278.3 μ m이다.

Fig. 6(e)는 1000cP 실리콘 오일의 액적형성과정이다. 구동파형은 유니폴라 형태의 파형을 입력하였으며 최대 전류는 1A를 인가하였다. 테일이 분리되는 시간은 8.1ms 이며 이때 테일의 길이는 3821.1 μ m이다. 점도가 증가함에 따라 테일이 길게 형성 되는 것을 알 수 있고 표면장력이 증가함에 따라 주 액적과 테일의 분리시간이 짧아진다는 것을 알 수 있다. 점도와 표면장력이 토출 특성에 큰 영향을 주며 이는 식 (5)를 통해 알 수 있다.⁵ 여기서 t_{η} 는 액적의 테일이 분리되는 시간이다.

$$t_{\eta} = \eta^3 / \rho\gamma^3 \quad (5)$$

6. 결론

본 논문에서는 자기변형 잉크젯 헤드의 고점도 유체 토출 메커니즘에 관한 연구 내용을 다루었다. 열전사 방식과 정전기력 방식의 잉크젯헤드에서 높은 열과 전압으로 인해 사용유체의 변성이 발생되는 문제점을 해결하고 고점도 유체를 토출하기 위한 조건을 도출하여 고점도 유체 토출을 가능하게 하였다. 유체의 점도가 높아짐에 따라 점도에 따른 마찰 손실이 다른 손실에 비해 매우 크기 때

문에 하겐-푸아죄유 법칙을 통하여 1000cP의 유체를 토출하기 위한 요구 압력인 1300kPa의 조건을 확인 한 뒤, 자기변형 구동기가 조건에 충족하는 압력을 출력 하기 위해 전류에 따른 구동기의 힘, 변위 측정을 하여 자기변형 잉크젯 헤드가 조건에 충족하는 압력을 출력함을 확인 하였다. 자기변형 잉크젯 헤드를 통하여 다양한 점도의 유체를 토출 과정을 고속 카메라로 촬영하여 토출 특성을 확인 한 결과, 점도가 증가함에 따라 테일이 길어지게 되고, 테일의 분리시간이 길어짐을 확인하였다.

상용화된 잉크젯 중 상온에서 특별한 장치없이 요구적하방식으로 토출가능한 최대 점도는 450cP 이며, 소노플롯의 GIX microplotter으로 가능하다. 본 논문에서는 1000cP의 유체를 상온에서 특별한 장치 없이 요구적하방식으로 토출하였으며 구동파형 등 토출 특성연구를 통하여 기관 인쇄, 3D 프린터 등 현재 고점도 유체를 토출 하는데 구동력의 한계로 제한 되는 산업분야에 적용 시킬 수 있을 것이다. 자기변형 잉크젯 헤드의 고점도 유체 토출 요구 압력을 충족시켜 고점도 유체의 토출 가능성을 확인하였으나 긴 테일과 분리시간은 잉크젯 헤드의 정밀도, 구동주파수 등을 저하시키는 요인이다. 그렇기 때문에 구동파형의 최적화 및 성능평가를 통한 긴 테일, 원하는 액적의 크기에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No.NRF-2008-313-D0008)

REFERENCES

1. Yoo, J.-H. and Park, Y.-W., "Experimental Investigation of Magnetostrictive DoD Inkjet Head for Droplet Formation," Current Applied Physics, Vol. 11, No. 1, pp. S353-S359, 2011.
2. Kwon, K., "Development of a Test Stand for Measuring Ink Jetting Performance," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 8, pp. 45-50, 2008.
3. Fan, K.-C., Chen, J.-Y., Wang, C.-H., and Pan, W.-C., "Development of a Drop-on-Demand Droplet Generator for One-Drop-Fill Technology," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 147, No. 2, pp. 649-

- 655, 2008.
4. Goghari, A. A. and Chandra, S., "Producing Droplets Smaller than the Nozzle Diameter by Using a Pneumatic Drop-on-Demand Droplet Generator," *Experiments in Fluids*, Vol. 44, No. 1, pp. 105-114, 2008.
 5. Wijshoff, H., "The Dynamics of the Piezo Inkjet Printhead Operation," *Physics Reports*, Vol. 491, No. 4, pp. 77-177, 2010.
 6. Kim, B. H., "Optimum Design of Inkjet Head Using Magnetostrictive Principle," M.Sc. Thesis, Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, 2010.
 7. Yoo, J. H., "A Study on Development and Jetting Performance of Magnetostrictive Inkjet Head," M.Sc. Thesis, Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, 2011.