

압력에 따른 평행박막 밸브의 자율 변형을 이용한 수동형 유량 제어기의 동적특성 평가

도 일* · 조 영 호*†

* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과

Dynamic Characterization of Passive Flow-Rate Regulator Using Pressure-Dependent Autonomous Deflection of Parallel Membrane Valves

Il Doh* and Young-Ho Cho*†

* Dept. of Bio and Brain Engineering, KAIST

(Received February 18, 2011 ; Revised April 19, 2011; Accepted June 1, 2011)

Key Words : Passive Flow-rate Regulator(수동형 유량제어기), Dynamic Characterization(동적특성평가), Autonomous Deflection(자율변형)

초록: 본 연구에서는, 미소유체시스템 상에서 정밀한 유체 제어를 위해 입력압력이 변화여도 일정한 유량을 유지할 수 있는 수동형 유량제어기를 개발함에 있어, 주기적으로 변화하는 압력에 대한 유량제어기의 동적특성을 평가하였다. 압력 변화의 주기보다 짧은 시간 내에 유량을 측정하기 위하여 입자영상속도계(Particle Image Velocimetry, PIV) 방법을 이용하였다. 지름이 0.7 μ m 인 형광입자가 담긴 탈이온수를 유량제어기에 공급하고, 펄스레이저와 형광현미경을 이용하여 10 μ s 간격의 연속된 사진을 얻고 이를 분석하여 유량제어기를 통과한 후의 유체의 속도를 측정하였다. 개발된 유량제어기는 20kPa 과 50kPa 사이를 주기적으로 변화하는 60Hz 의 압력 하에서 0.194 \pm 0.014m/s 의 일정한 유속을 유지함을 실험적으로 확인하였다. 압력의 주파수를 1~60Hz 까지 변화시켜가며 수행한 실험에서도 유량제어기는 압력의 주파수에 상관없이 5.82 \pm 0.29 μ l/s 의 일정한 유량 공급이 가능함을 확인하였다.

Abstract: We performed a dynamic characterization of passive flow-rate regulators, which compensate for inlet pressure variation and maintain a constant flow rate for precise liquid control in microfluidic systems. To measure the flow rate for a short time, much less than the period of the dynamic inlet pressure, we use the particle image velocimetry (PIV) method. DI water containing fluorescent beads with a 0.7- μ m diameter was supplied to the flow-rate regulators, and two successive images of the particles were taken by a pulse laser and a fluorescent microscope to measure the flow velocity. For a dynamic inlet pressure of frequency 60 Hz, the flow velocity was constant with an average of 0.194 \pm 0.014 m/s as the inlet pressure varied between 20 kPa to 50 kPa. The flow-rate regulators provided a constant flow rate of 5.82 \pm 0.29 μ l/s in the frequency range of the inlet pressure from 1 Hz to 60 Hz.

1. 서론

미소 생화학 분석시스템 상에서의 유체 이송을 위하여 개발된 대다수의 미소펌프(micropump)들은 박막 또는 구조물의 주기적인 운동을 바탕으로 유동 압력을 공급한다. 따라서 이러한 미소펌프들은 시간에 따라 일정한 유동 압력을 형성하기가 불가능하기 때문에 일정한 유량의 시료 공급이 어려운 문제점을 공통적으로 가지고 있다. 이러한 점은

시료의 고속처리 및 정밀 분석을 수행하는데 있어 큰 문제점으로 지적되고 있으며, 이러한 문제를 해결하고자 기존의 미소펌프에서 공급된 유동 압력이 일정하지 않더라도 일정한 유량의 시료를 공급할 수 있는 자율 유량제어기(Flow-rate regulator)⁽¹⁾를 제안한 바 있다. 개발된 유량제어기는 외부 에너지원 및 제어 없이 동작하는 수동형 동작방식으로, 낮은 동작압력을 가지며 구조가 간단한 장점을 가지고 있다. 하지만 개발된 유량제어기의 특성을 평가함에 있어 정압(static pressure)에 대한 유량의 변화만을 검증하였기 때문에, 미소 펌프가 생성하는 일정한 주기를 갖으며 진동하는 압력

† Corresponding Author, nanosys@kaist.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Comparison of Flow velocity measurement methods

Principle	Pitot-tube	Rod ⁽²⁾	Hot-wire ⁽³⁾	LDV (Laser Doppler Velocimetry) ⁽⁴⁾	PIV (Particle Image Velocimetry) ^(5,6)
Measurement Quantity	Fluid Pressure	Deflection	Temperature	Fluid Velocity	Fluid Velocity
Measuring Time	~ s	~ ms	~ ms	~ ns	~ μs
Measuring Site	Point	Point	Point	Point	Area
Flow-field Disturbance	Intrusive	Intrusive	Intrusive	Nonintrusive	Nonintrusive

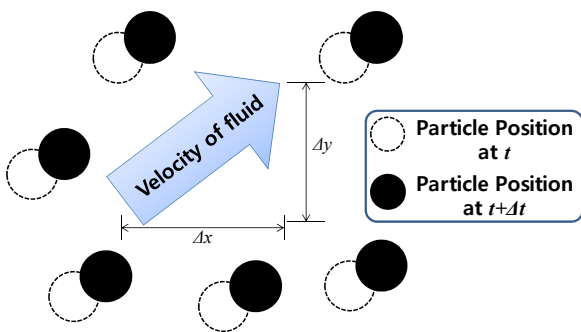


Fig. 1 Working principle of the flow-rate measurement by particle image velocimetry (PIV)

(oscillating pressure)에 대한 추가적인 유량 변화의 검증과 확인이 필요하다. 본 연구에서는 PIV (Particle Image Velocimetry) 방법을 이용하여 개발된 수동형 유량제어기의 동적특성을 평가하였다.

2. 동작원리 및 설계

미소유로 내에서의 유속을 측정하기 위하여 지금까지 제안된 방법을 Table 1에 비교하여 정리하였다. Pitot-tube, Rod 및 Hot-wire을 이용하는 방법은 유로의 추가적인 변경이 필요할 뿐 아니라, 직접적으로 유속 또는 유량을 측정하는 방식이 아닌 수두의 높이, 구조물의 변형, 온도 변화를 측정하는 간접 측정방식으로 측정시간이 상대적으로 길기 때문에, 압력 변화에 의해 짧은 시간 내에 변하는 유량을 측정하기에는 적합하지 않다. 한편, LDV 및 PI는 추가적인 유로 형상의 변경 없이 유속을 측정할 수 있는 직접적인 방식이라는 장점 이외에도 μs 또는 그 이하의 짧은 시간 동안 유속 측정이 가능하여 주기적으로 변하는 압력에 의한 유량 변화 측정에 적합하다. 본 실험에서의 유량 측정은, 유량제어기에 인가하는 압력의 주기에 비해 충분히 짧은 시간 (1/100 이하) 내에 이루어져야만 한다. 특히 유체 내 미소입자를 혼합하고 이들 나노입자의 움직임을

측정하여 한 지점의 대표 속도벡터를 측정하는 PIV 방식은, LDV에 비해 넓은 영역에서 유속 측정이 가능한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 PIV 방법을 이용하여 주기적으로 변하는 압력 하에서의 유량제어기를 통과하여 공급되는 유량을 측정하고자 하였다.

PIV는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 두 장의 연속된 사진 속에서의 입자 이동을 바탕으로 한 지점의 대표 속도벡터를 측정하는 과정을 도시한 것이다. Δt의 시간 차이에서 두 입자의 x 축 방향과 y 축 방향 위치 변화가 각각 Δx, Δy 일 경우, 입자의 속도 u, v는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

한편, 폭 2a, 높이 2b를 갖는 사각단면 유로에서의 유속과 유량⁽⁷⁻⁹⁾은 아래의 식을 통해 얻을 수 있다.

$$u(y, z) = -\frac{4a^2}{\mu\pi^3} \left(\frac{dp}{dx}\right) \cdot \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} (-1)^{(i-1)/2} \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{inz}{2a}\right)}{\cosh\left(\frac{inb}{2a}\right)} \right] \frac{\cosh\left(\frac{iny}{2a}\right)}{i^3} \quad (2)$$

$$Q = \frac{4ab^3}{3\mu} \left(\frac{dp}{dx}\right) \left[1 - \frac{b}{a} \left(\frac{192}{\pi^5} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{\pi wi}{4b}\right)\right) \right] \quad (3)$$

이때, μ는 유체의 점성을 나타낸다. 식 (2)와 (3)을 함께 사용하면 PIV 방법을 통해 측정된 유속으로부터 유체의 유량을 계산할 수 있다.

한편, 4면의 모서리가 모두 고정된(clamped) 사각 박막의 공진주파수⁽¹⁰⁾는 아래와 같다.

$$f_m = \frac{36}{2\pi} \sqrt{\frac{Dg}{wa}} \quad (4)$$

이때 g는 중력가속도이며, w는 자중을 포함한 박막에 가해지는 단위면적당 균일분포하중이다.

D 는 박막의 강성으로 $Eh^3/12(1-\nu^2)$ 값을 가진다. 진공 상태가 아닌 유체 내에서의 구조물의 진동은 유체의 점성에 크게 좌우된다. 유체 내에서 구조물의 변형 형태가 대기 내에서의 변형 형태와 동일하다고 가정하면, 유체 내에서 박막의 고유진동수⁽¹¹⁾는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\omega_{water} = \frac{\omega_{air}}{\sqrt{1+\beta}} \quad (5)$$

ω_{water} 와 ω_{air} 는 각각 유체와 대기 내에서의 공진주파수를 각각 나타낸다 β 는 유체의 점성에 의한 가상의 질량증가를 나타내는 계수이다. AFM 빔의 경우 유체 내에서의 고유진동수는 공기 내에서의 것에 비해 약 67% 감소⁽¹²⁾하는 것으로 나타났다.

3. 실험장치 구성

동적 특성평가를 위한 실험장치를 Fig. 2 와 같이 구성하였다. 512nm 파장을 갖는 Nd-Yag 레이저를 4ns 간 주사할 수 있는 광학계 및 pulse/delay 생성기 시스템을 구성하였다. PIV 에 사용될 입자는 지름 0.7 μ m 인 형광입자(Duke Scientific Inc)를 이용하였다. 형광입자는 탈이온수(Deionized water)에 0.005% v/v 의 비율로 충분히 낮게 희석하여, 입자에 의한 유동장 교란 및 유량제어기에서의 유로 막힘(clogging)을 방지하고자 하였다. 형광 현미경에는 CCD 카메라를 연결하여 입자 위치가 찍힌 이미지를 얻었다. 한편, 주기적으로 변하는 압력은 고속 3-way 공압 솔레노이드밸브(VQ110, SMC Inc.)를 이용하여 20kPa 와 50kPa 를 교대로 연결하였으며, 주파수 범위는 1~60Hz 를 이용하였다. 60Hz 이상의 주파수에서는 원활한 압력 변환이 이루어지지 않아 실험이

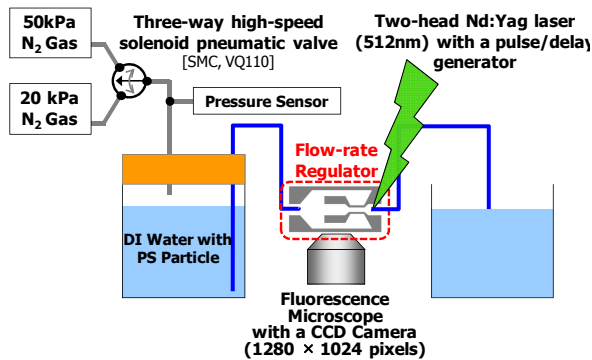


Fig. 2 Experimental setup for dynamic characterization of flow-rate regulators using particle image velocimetry (PIV)

불가능하였다. 유량제어 기에 인가된 압력은 디지털압력센서 (Autonics, PSA-01)를 이용하여 0.1 kPa 단위로 측정하였다.

4. 실험결과 및 토의

유량측정은 유량제어기를 통과한 후의 직사각형 단면 형상을 갖는 미소유로(폭 400 μ m, 높이 100 μ m)에서 측정하였다. Fig. 3 은 유량제어기 내에서 10 μ s 의 시간 간격으로 연속하여 촬영된 이미지와 두 장을 중첩하여 나타낸 사진을 보여준다. 이 사진을 바탕으로 미소유로 내에서의 속도장을 Fig. 4 와 같이 계산할 수 있다. 이때 Fig. 4 속도장의 모서리에서 확인되는 노이즈를 제외한 나머지 값을 평균 내어 유량제어기에서의 유속을 측정하였다. 압력의 주파수에 따라 측정된 유속의 최소, 최대, 평균, 분산값을 Table 2 에 정리하여 나타내었다.

60 Hz 의 주기적으로 변화하는 압력에 대하여 미소유로에서의 유속의 변화를 유량제어기의

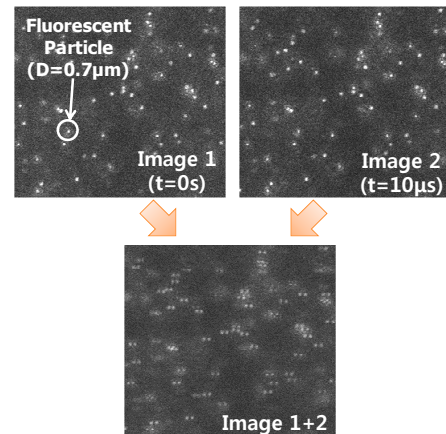


Fig. 3 Photographs (top view) of 0.7 μ m diameter PS bead movement (20 μ m \times 20 μ m), double-exposed with 10 μ s interval

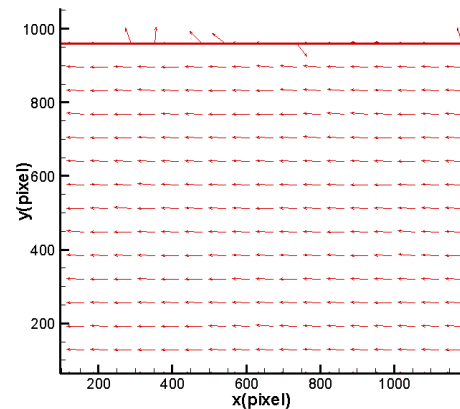
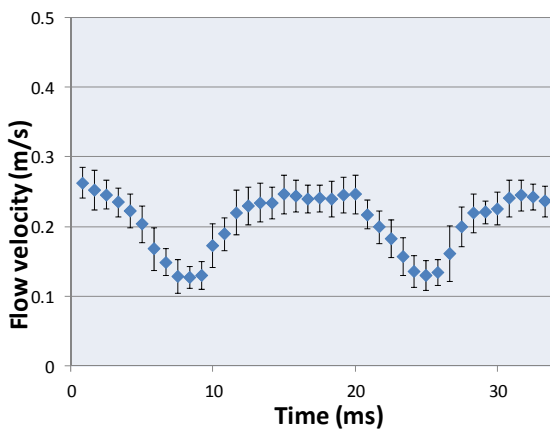


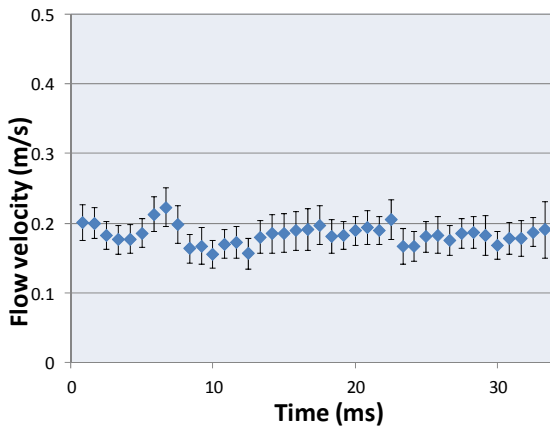
Fig. 4 Measurement of flow velocity field (200 μ m \times 300 μ m) calculated from PS bead trajectory of Fig.3

Table 2 Measured flow velocity depending on the frequency of oscillating pressure

Inlet Pressure Frequency [Hz]	1	5	10	20	40	60
Maximum [m/s]	0.230	0.237	0.208	0.243	0.255	0.223
Minimum [m/s]	0.169	0.181	0.163	0.183	0.173	0.166
Average [m/s]	0.205	0.205	0.188	0.210	0.192	0.194
Standard Deviation [m/s]	0.017	0.011	0.012	0.014	0.023	0.014



(a)



(b)

Fig. 5 Measured outlet flow-rate for the inlet pressure frequency of 60 Hz: (a) without flow-rate regulator; (b) with flow-rate regulator

유무에 따라 측정하여 이를 Fig. 5 에 나타내었다. 유속의 오차막대는 CCD 의 해상도에 비해 측정영역이 넓고 형광입자의 크기가 작은 것에 기인하는 것으로 생각되며 모든 측정사진에서 유사한 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유량제어기의 유무에 따라 측정된 유량을 살펴보면, 유량제어기가 없는 경우 유속이 입력 압력의 변화에 따라 주기적으로 변하는 것을

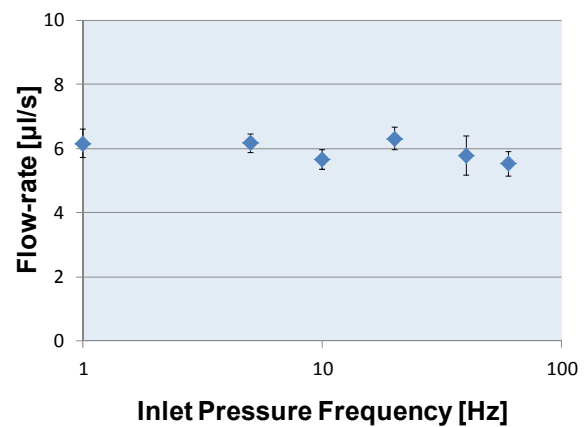


Fig. 6 Measured outlet flow-rate depending on the frequency of dynamic inlet pressure, obtained from the measured fluid velocity

관찰할 수 있으나(Fig. 5(a)), 유량제어기를 통과한 후의 유속은 비교적 일정한 값을 유지하는 것을 확인(Fig. 5(b))할 수 있다. 이때 측정된 평균유속은 0.194m/s 이었다. 압력의 주파수를 1Hz 에서 최대 60Hz 까지 증가시켜 유속을 측정하였으며, 이를 식 (2)와 (3)에 의해 유량으로 변화시켜 Fig. 6 에 나타내었다. 개발된 수동형 유량제어기는 60Hz 이내의 주파수에서도 입력압력의 변화에도 불구하고 $5.82 \pm 0.29 \mu\text{l/s}$ 의 일정한 유량 공급이 가능함을 실험적으로 확인하였다.

몇몇 미소펌프는 60Hz 이상의 주파수에서도 동작하기 때문에 이 영역에서의 유량제어 효과에 대한검증도 추가로 필요할 것이다. 개발된 유량제어기에서 사용된 박막의 유체(탈이온수) 내에서의 고유진동수를 확인하기 위하여, 박막의 치수($100\mu\text{m}[\text{W}] \times 100\mu\text{m}[\text{L}] \times 10\mu\text{m}[\text{H}]$)와 제작에 사용된 소재인 PDMS(Polydimethylsiloxane)의 물성치($E=0.998\text{kPa}$, $\nu=0.5$)를 식 (4)에 대입하면, 58.495 kHz 의 고유진동수를 얻을 수 있다. 식 (6)에 의한 β 계수에 의한 고유진동수의 감소를 감안하여도 유체 내에서 수 kHz 이상의 고유진동수를 가질 것으로

예측되며, 따라서 개발된 유량제어기는 60Hz 이상의 압력변화 주파수 하에서도 일정한 유량 공급이 가능할 것으로 예측된다. 보다 정확한 실험을 위해서는 유량제어기가 집적된 미소펌프를 제작하여 PIV 방법을 이용한 동적특성 평가가 추가로 이루어져야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는, 정밀한 유체 제어를 위해 입력 압력이 변하여도 일정한 유량을 유지할 수 있는 수동형 유량제어기를 개발함에 있어 필수적인, 주기적으로 변화하는 압력에 대한 유량제어 특성을 평가하였다. 개발된 수동형 유량제어기는 20kPa 와 50kPa 로 변하는 1~60Hz 의 압력 주파수 변화 하에서 $5.82 \pm 0.29 \mu\text{l/s}$ 의 일정한 유량 공급이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 개발된 유량제어기는 향후 미소펌프와의 집적을 통해 미소유체시스템 상에서의 정밀한 유체 제어를 위해 널리 사용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적 연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 “생체모사 기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” (과제번호 R16-2000-003-01001-0)와 중견연구 자지원사업(도약과제)인 “생체모사 인간감응시스템” (과제번호 2010-0018083)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Doh, I. and Cho, Y.-H., 2009, “A Passive Flow-rate Regulator Using Pressure-dependent Autonomous Deflection of Parallel Membrane Valves,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 33, pp. 573~576.
 (2) Rollier, A.S., Faucher, M., Legrand, B., Collard, D.

and Buchailot, L., 2006, “Electrostatic Actuators Operating in Liquid Environment: Suppression of Pull-in Instability and Dynamic Response,” *DTIP of Mems and Moems*, Stresa, Italy.
 (3) Fan, Z., Chen, J., Zou, J., Bullen, D., Liu, C. and Delcomyn, F., 2002, “Design and Fabrication of Artificial Lateral Line Flow Sensors,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 12, pp. 655~661.
 (4) Chen, J., Fan, Z., Zou, J. and Engel, J., 2003, “Two-Dimensional Micromachined Flow Sensor Array for Fluid Mechanics Studies,” *Journal of Aerospace*, Vol. 16, pp. 85~97.
 (5) Onofri, F., 2006, “Three Interfering Beams in Laser Doppler Velocimetry for Particle Position and Microflow Velocity Profile Measurements,” *Applied optics*, Vol. 45, pp. 3317~3324.
 (6) Kim, B.J., Liu, Y.Z. and Sung, H.J., 2004, “Micro PIV Measurement of Two-Fluid Flow with Different Refractive Indices,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, pp. 1097~1103.
 (7) Wang, H. and Wang, Y., 2009, “Measurement of Water Flow Rate in Microchannels Based on the Microfluidic Particle Image Velocimetry,” *Measurement*, Vol. 42, pp. 119~126.
 (8) White, F.M., 1991, *Viscous Fluid Flow*, New York: McGraw Hill.
 (9) KIM, J. and JU, Y.S., 2008, “Brownian Microscopy for Simultaneous in situ Measurements of the Viscosity and Velocity Fields in Steady Laminar Microchannel Flows,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 17, pp. 1135~1143.
 (10) Lee, G.-B., Chang, C.-C., Huang, S.-B. and Yang, R.-J., 2006, “The Hydrodynamic Focusing Effect Inside Rectangular Microchannels,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, pp. 1024~1032.
 (11) Young, W. and Budynas, R., 2001, *Roark's Formulas for Stress & Strains*, McGraw Hill.
 (12) Chang, T., 2000, “on the Natural Frequency of a Rectangular Isotropic Plate in Contact With Fluid,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 236, pp. 547~553.