

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.6.573

압력에 따른 평행박막 밸브의 자율 변형을 이용한 수동형 유량 제어기

도 일* · 조 영 호†

(2008년 7월 16일 접수, 2009년 4월 16일 수정, 2009년 5월 25일 심사완료)

A Passive Flow-rate Regulator Using Pressure-dependent Autonomous Deflection of Parallel Membrane Valves

Il Doh and Young-Ho Cho

Key Words : Passive Flow-rate Regulator(수동형 유량제어기), Parallel Membrane Valve(평행박막 밸브), Autonomous Deflection(자율변형)

Abstract

We present a passive flow-rate regulator, capable to compensate inlet pressure variation and to maintain a constant flow-rate for precise liquid control. Deflection of the parallel membrane valves in the passive flow-rate regulator adjusts fluidic resistance according to inlet fluid pressure without any external energy. Compared to previous passive flow-rate regulators, the present device achieves precision flow regulation functions at the lower threshold compensation pressure of 20kPa with the simpler structure. In the experimental study, the fabricated device achieves the constant flow-rate of $6.09 \pm 0.32 \mu\text{l/s}$ over the inlet pressure range of 20~50 kPa. The present flow-rate regulator having simple structure and lower compensation pressure level demonstrates potentials for use in integrated micropump systems.

기호설명

P : 입력압력
 R : 유동저항
 Q : 유량

1. 서론

미소 생화학 분석시스템 상에서의 정밀한 유체 이송을 위하여 많은 미소펌프의 개발이 이루어져

왔다. 하지만 미소펌프들은 주기적인 유동을 생성하는 관계로 일정한 압력의 유동을 형성하거나 시료의 유량 공급을 일정하게 유지하기 힘든 문제점을 가지고 있다. 특히 정교한 약물전달 시스템의 경우, 유량의 변동이 5%이내⁽¹⁾로 요구되고 있어, 각종 압력정류기 혹은 유량제어기가 개발되고 있다.

기존의 유량제어기의 경우, 동작방식에 따라 능동형과 수동형으로 나눌 수 있으며, 이중 구조가 비교적 간단하며 별도 구동기가 필요 없는 수동형 유량제어기에 관한 관심이 증가하고 있다. 기존의 수동형 유량제어기^(2,3)의 경우, 구조가 복잡하거나 60kPa의 높은 압력에 대해서만 동작하므로 실제 대다수의 미소펌프에서 생성되는 50kPa 이하의 압력 영역⁽⁴⁾에서는 적용하기 곤란한 문제가 있다.

이에 본 논문에서는 간단한 구조로 낮은 압력에

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)350-8691 FAX : (042)350-8690

* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

대해서도 동작하는 새로운 구조의 수동형 유량제어기를 제안한다. 본 수동형 유량제어기는 유로와 집적된 단일층 구조를 갖고 또한 평행막막 밸브의 사용으로 인한 낮은 압력(20kPa)에서도 유량조절 기능을 갖기 때문에 미소펌프에 적용 가능하다는 장점이 있다.

2. 동작 원리 및 설계

Fig. 1 은 본 논문에서 제안한 수동형 유량제어기 (passive flow-rate regulator)의 구조와 동작원리를 나타낸다. 유로의 입력단과 출력단 사이에 가변유체저항(variable fluidic resistor)을 위한 평행막막 밸브(parallel membrane valve)가 있고, 이 막막은 유체의 입력단과 부유로(subchannel)를 통해 연결되어 있어 입력단의 압력을 평행막막에 전달할 수 있도록 설계하였다. 입력단의 압력이 낮을 때(P)에는 평행막막의 변형이 작기 때문에 통과유로 전체는 낮은 유동저항(R)을 갖고[Fig. 1(a)], 반대로 유체의 압력이 높을 때($P+\Delta P$)에는 Fig. 1(b)에서와 같이 평행막막의 변형이 크기 때문에 높은 유동저항($R+\Delta R$)을 갖는다. 따라서 압력의 변화에 따라 자율적으로 유동저항을 변화시켜 일정한 유량을 유지할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$Q = \frac{P}{R} = \frac{P \pm \Delta P}{R \pm \Delta R} \quad (1)$$

평행막막 밸브로 이루어진 가변유체저항의 치수는 높이가 각각 $100\mu\text{m}$ 이며, 평행막막 밸브의 두께는 제작공정을 고려한 최소 두께인

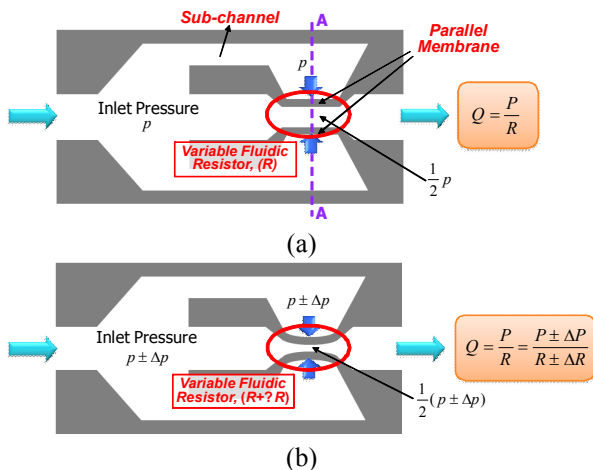


Fig. 1 Working principle of the autonomous passive flow regulator: (a) at the low inlet pressure; (b) at the high inlet pressure

$10\mu\text{m}$ (Aspect ratio: 10:1)로 설계하였다. 가변유체저항의 폭 혹은 평행막막 밸브 사이의 거리가 20, 30, 40, $50\mu\text{m}$ 으로 서로 다른 값을 갖는 네 종류의 소자(W20, W30, W40, W50)를 각각 제작하였다. 또한 각각의 소자에 대해 막막밸브가 없는 고정된 유체저항을 갖는 소자를 추가로 제작하여 압력 변화에 따른 유량변화 성능을 비교하였다. 유량의 예측은 유체와 고체가 상호 연관되는 3D FSI(Fluid-Structure Interaction) 모델을 사용한 수치해석을 통해 예측하였다. 이때 평행막막 밸브의 영계수(Young's Modulus)는 마이크로 인장시험기를 통해 측정된 값 ($955\pm 44\text{kPa}$)을 사용하였고, 사용 유체는 물의 물성을 사용하여 예측을 수행하였다.

3. 제작공정

수동형 유량제어기는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이, $100\mu\text{m}$ 두께의 SU8-2100 PR 과 PDMS 몰딩방법을 이용하여 제작되었다. 10:1의 고종횡비(aspect ratio) 막막 구조물 제작을 위해, Pyrex 웨이퍼 상에서 Cr 을 패터닝하고 이를 SU8 노광을 위한 마스크로 사용하여 배면(backside) 노광⁽⁵⁾을 수행하였다. 완성된 SU8 몰드 위에

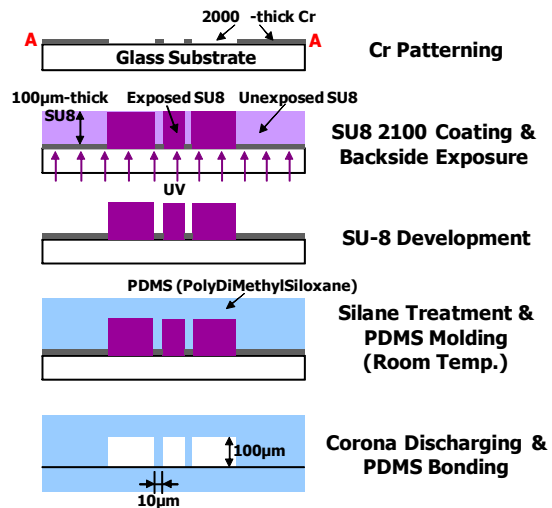


Fig. 2 Fabrication process showing the cross section of A-A' in Fig. 1

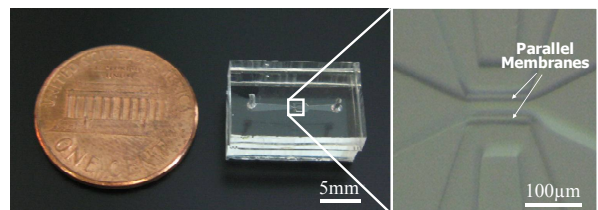


Fig. 3 Fabricated passive flow regulator and the enlarged view of the variable fluidic resistor, composed of parallel membrane valves

PDMS와 경화제를 각각 10:1의 질량비율로 섞은 혼합물을 붓고 경화시켰다. 이때 상온에서 약 2일간 경화시킴으로써 PDMS 경화 시에 발생하는 수축에 의한 영향을 최소화하고자 하였다. 완성된 PDMS 상판은 코로나 표면처리를 통해 밀판과 접합함으로써 소자제작을 완성하였다. Figure 3은 제작된 소자의 전체 모습과 가변유체저항 부분의 확대사진이다.

4. 실험결과 및 토의

Figure 4는 제작된 소자의 유량제어 성능검증을 위한 실험장치의 구성도이다. 압력에 따른 유량의 변화는 소자를 통과한 유체의 단위시간당 질량변화 측정치를 기준으로 분석하였으며, 현미경을 통해 평행막막 밸브의 변형을 관찰하였다. Fig. 5와

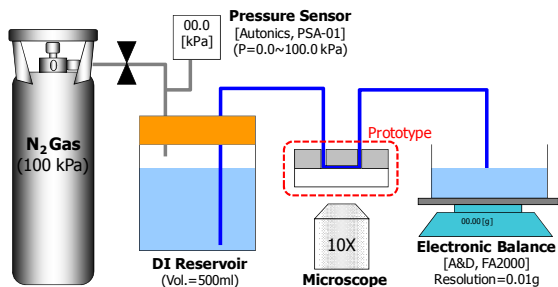


Fig. 4 Experimental setup for the verification of flow regulation function

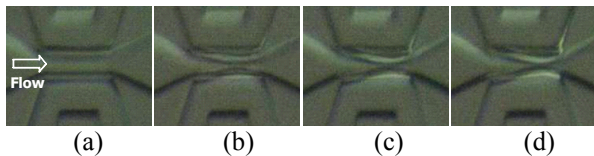


Fig. 5 Photographs of the deformed parallel membrane valves at the inlet pressure of: (a) 0 kPa; (b) 20 kPa; (c) 40 kPa; (d) 60 kPa

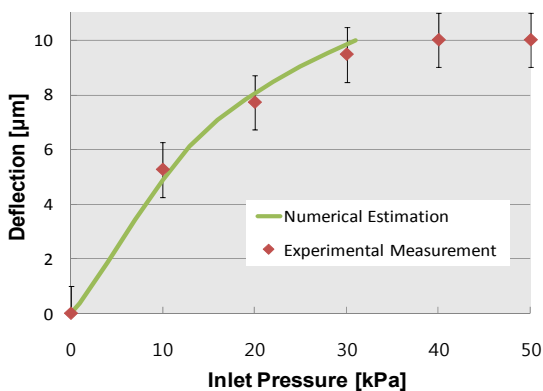


Fig. 6 Measured and Estimated deflection of the membrane valve for varying inlet pressure

6은 W20 소자에 대해 압력에 따른 평행막막 밸브의 변형된 사진과 측정된 변형값을 정리한 것으로 압력에 따라 막막의 변형 역시 증가하고, 30 kPa의 압력에서 두 평행막막이 서로 접촉하는 것을 확인하였다. 이는 두 막막간의 최대 변형지점에서 점 접촉이 시작된 것으로, 입력압력이 증가함에 따라 막막의 변형 역시 계속 증가하여 두 막막의 접촉면적이 넓어지고 유동저항도 증가하게 된다.

Fig. 7은 초기 동일한 전체 유동저항을 가지는 W20 소자에 대하여 평행막막 밸브의 유무에 따른 압력-유량 간의 관계를 나타낸다. 평행막막 밸브가 없는 소자는 압력이 증가함에 따라 유량 역시 증가하는 경향을 가지지만, 평행막막 밸브가 있는 소자에서는 20 kPa 이상의 압력에서는 압력이 증가하여도 $6.09 \pm 0.32 \mu\text{l}$ 의 일정한 유량을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 평행막막 밸브의 압력에 따른 자율변형에 의해 유량제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 서로 다른 네 종류 소자의 압력에 따른 유량 변화는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 평행막막 밸브간의 폭이 넓어질수록

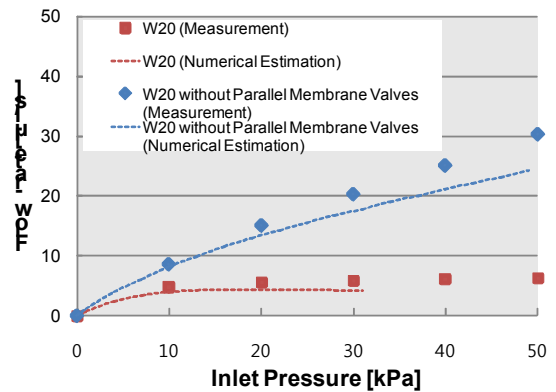


Fig. 7 Measured flow-rate of W20 varying inlet pressure with and without parallel membrane valves

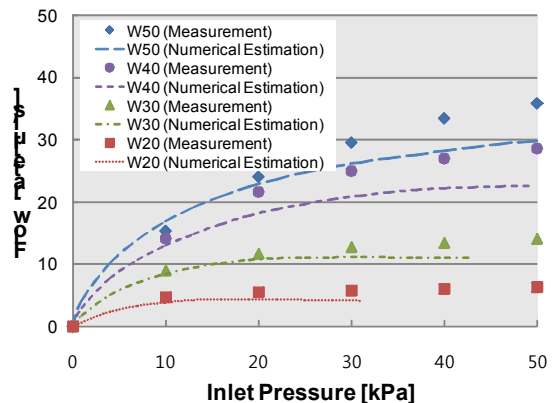


Fig. 8 Measured flow-rate of W20, W30, W40 and W50, varying inlet pressure

유량이 일정하게 유지되기 시작하는 임계압력과 이때의 유량이 모두 증가하는 것으로 측정되었다. 향후 미소펌프와의 집적화를 위해서는, 정적 입력 압력 변화에 대한 유량 분석 뿐 아니라 주기적인 동적 입력압력 변동에 의한 유량 분석이 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 평행박막 밸브를 사용하여 구조가 간단하고 낮은 압력변화를 자율적으로 제어할 수 있는 새로운 수동형 유량제어기를 제안하고, 이를 설계, 제작하였으며, 유량정류 성능을 실험적으로 검증하였다. 제안한 수동형 유량제어기는 W20 소자에 있어서 약 20kPa 이상의 압력부터 동작하며 20~50kPa 정적압력 범위 내에서 $6.09 \pm 0.32 \mu\text{l}$ 의 일정한 유량을 유지함을 확인하였다. 본 수동형 유량제어기는 미소펌프를 사용하는 미소 생화학 분석시스템에서 정밀한 유체 이송 구현에 효과적으로 응용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적

연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 "생체모사 기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Mailllefer, D., Gamper, S., Frehner, B., Balmer, P., van Lintel, H. and Renaud, P., 2001, "A High-performance Silicon Micropump for Disposable Drug Delivery Systems," *Proc. 14th IEEE Inter. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2001)*, Interlaken, Switzerland (Jan. 21-25, 2001), pp.413~417.
- (2) Cousseau, P., Hirschi, R., Frehner, B., Gamper, S. and Mailllefer, D., 2001, "Improved Microflow Regulator for Drug Delivery Systems," *Proc. MEMS 2001*, pp. 527~530.
- (3) Yang, B., and Lin, Q., 2007, "A Planar Compliance-based Self-adaptive Microfluid Variable Resistor," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol.16, pp. 411~419.
- (4) Laser, D., and Santiago, J., 2004, A Review of Micropumps," *J. Micromech. and Microeng.*, Vol.14, p. R35
- (5) Huang, H., and Fu, C., 2007, "Different Fabrication Methods of Out-of-plane Polymer Hollow Needle Arrays and Their Variations," *J. Micromech. and Microeng.*, Vol.17, p. 393.