

압력평형메커니즘을 이용한 초소형 수동형 기체 압력조정기

논문
59-1-26

A Micro Passive Gas Pressure Regulator using Pressure Balance Mechanism

이 기 정* · 양 상 식†
(Ki Jung Lee · Sang Sik Yang)

Abstract - This paper presents the analysis, the fabrication and the test results of a micro passive gas pressure regulator to keep the outlet pressure constant even for a widely-varying inlet pressure. This device is to regulate the outlet pressure according to the applied reference pressure based on the pressure balancing mechanism of the structure including a membrane and a valve. This regulator consists of four layers; a bulk-micromachined silicon substrate, a sandblasted glass substrate, a PDMS valve seat layer and a glass valve layer. The device size is $10 \times 13 \times 1.7$ mm³. The device was fabricated by micromachining. The characteristic of the device was analyzed and tested. The characteristic of the fabricated pressure regulator is similar to that obtained from the analysis. The pressure regulator of this paper is feasible for portable systems and miniature drug delivery systems.

Key Words : Passive, Ppressure regulator, Pressure balancing mechanism, Membrane

1. 서 론

미소유체는 밀리미터 이하 스케일 단위를 갖는 유체의 움직임과 정확한 제어를 다루는 분야로 지난 20여 년 동안 MEMS(Microelectromechanical Systems)를 이용한 초소형 분석장치를 필두로 하여 미소유체소자에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. MEMS 기술을 이용한 소자들은 기존의 매크로 스케일 제품과 비교하여 크기가 작고 반도체 공정을 이용하기 때문에 대량생산이 가능할 뿐만 아니라 가격 경쟁력을 갖추고 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 현재 미소유체시스템은 바이오 기술, 약물전달, 연료전지 소자들에 적용되고 있으며 일부 기업들은 MEMS 기술을 이용하여 기존의 매크로 스케일 제품을 소형화시켜 성능향상을 꾀하고 있다 [1-2]. 미소유체시스템은 초소형 펌프, 초소형 밸브 등 여러 초소형 소자들로 구성되어 있다. 일정한 유량이나 압력을 얻기 위해서는 유량 센서, 압력 센서, 밸브, 펌프, 이를 제어하기 위한 제어 소자 등을 필요로 하여 구조가 복잡해진다. 또한, 크기도 커지며 구성된 소자들의 전력 소모로 효율이 낮아지게 된다. 수동형 소자는 제어나 센서를 요하지 않아 구조를 단순화시키고 전력 소모의 측면에서 효율이 향상되는 장점을 갖고 있다. 휴대용 혹은 인체삽입형 약물전달장치나 연료전지 분야 등에서는 효율성 측면에서 유리한 수동형 미소유체소자들이 연구되고 있다 [3-7]. 기존에 연구

된 압력조정기는 실리콘을 재료로 하여 건식 식각, 퓨전 본딩, 직접 본딩 등 복잡한 공정으로 제작되었다.

본 논문에서 제시하는 수동형 압력조정기는 압력평형메커니즘에 의해 작동되는 수동형 압력조정기로서 외부의 전원을 필요로 하지 않으며, 압력조정기에 인가하는 기준압력에 따라 출구 압력이 조절되는 특성을 갖고 있다. 이 압력조정기는 실리콘과 파이렉스유리, PDMS(Polydimethylsiloxane) 등 생체적합재료들을 사용하고, 마이크로머시닝 기술로 제작할 수 있어서 소형화가 가능하다. 본 논문에서는 압력조정기를 제작하고 해석과 실험으로 그 성능을 구하고 비교한다.

2. 구조 및 작동원리

그림 1은 네 개의 층으로 형성되는 압력조정기의 3차원 단면도이다. 압력조정기는 박막과 밸브축, 밸브, 유로, 출구 등으로 구성되어 있다. 두 번째 층(Layer 2)에는 첫 번째 층(Layer 1)의 박막과 네 번째 층(Layer 4)의 밸브를 연결하는 밸브축이 있고, 유체가 입구에서 출구로 이동할 수 있는 유로가 있다. 세 번째 층(Layer 3)은 밸브축과 밸브를 연결하는 접합층이다.

그림 2는 압력조정기의 작동 원리를 보여준다. 박막의 상부에는 일정한 기준압력, p_r 이 인가된다. 밸브는 밸브축을 통해서 박막과 연결되어 있어서 입구압력, p_i 와 출구압력, p_o , 기준압력, p_r 에 의해 수직 방향으로 움직이면서 입구를 여닫는다. 출구압력이 충분히 커서 박막을 올리는 힘이 내리는 힘보다 크면 밸브가 닫혀서 그림 2(a)와 같이 된다. 출구에서 유체가 토출되면 출구압력 p_o 가 낮아지고 이에 따라 박막을 올리는 힘이 감소하게 된다. 박막을 올리는 힘이 내

* 준 회원 : 아주대학교 전자공학과 박사과정

† 교신저자, 정회원 : 아주대학교 전자공학과 교수 · 공학박사

E-mail : sssyang@ajou.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 2일

최종일자 : 2009년 10월 22일

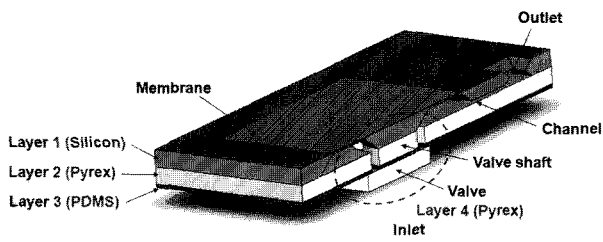


그림 1 압력조정기의 단면도
Fig. 1 The cross sectional view of the pressure regulator

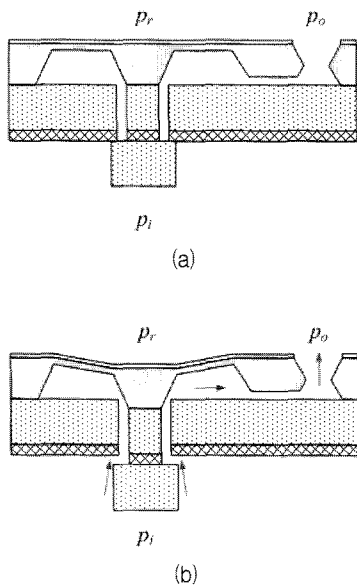


그림 2 압력조정기 작동원리 (a) 닫힌 상태, (b) 열린 상태
Fig. 2 The operation principle of the pressure regulator
(a) closed state, (b) open state (flow : →)

리는 힘보다 작아지게 되면 그림 2(b)와 같이 밸브가 열려 유체가 흐르게 된다. 밸브가 열려 유체가 출구쪽으로 흐르면 p_o 가 높아지고 박막을 올리는 힘이 증가하면서 밸브는 다시 닫히게 된다. 이와 같은 작동원리로 출구압력 p_o 가 일정하게 유지되는데 이 출구압력은 기준 압력 p_r 에 의해 정해진다.

3. 압력조정기의 제작

그림 3은 압력조정기의 제작공정도이다. 첫 번째 층은 실리콘으로 제작하고 두 번째 층과 네 번째 층은 파이렉스유리로 제작하며, 두 파이렉스유리 사이의 중간 접합층으로는 PDMS를 사용한다. 첫 번째 층은 두 번의 습식 식각으로 제작한다. 두께가 $525 \mu\text{m}$ 인 실리콘 웨이퍼에 습식 식각용 마스크로 사용하기 위해 5000 \AA 의 열산화막을 형성한다(그림 3(a)). 형성된 열산화막에 사진식각공정으로 감광제를 패터닝한다. 감광제를 보호막으로 하여 BOE (Buffered Oxide

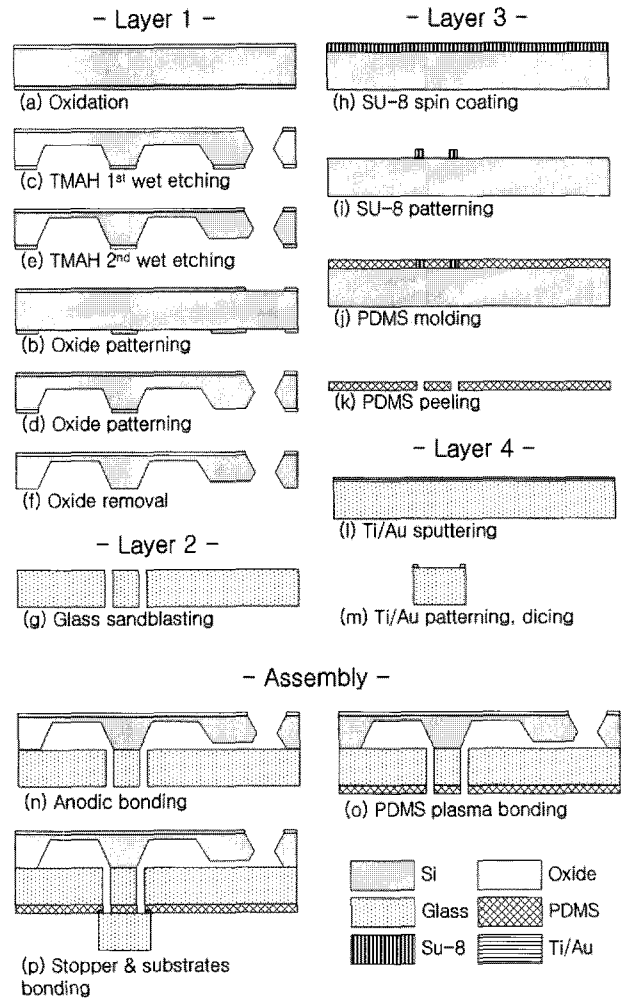


그림 3 압력조정기 제작 공정
Fig. 3 The fabrication process of the pressure regulator

Etchant)로 산화막을 패터닝하고 감광제를 제거한다(그림 3(b)). TMAH(Tetramethylammonium hydroxide)를 이용하여 박막이 될 부분을 $325 \mu\text{m}$ 만큼 식각하고 출구를 제작한다(그림 3(c)). 두 번째 습식식각은 첫 번째와 같은 방식으로 미세유로가 형성될 부분의 산화막을 제거한 후(그림 3(d)), TMAH 습식 식각으로 $100 \mu\text{m}$ 깊이의 미세 유로를 제작함과 동시에 $100 \mu\text{m}$ 두께의 실리콘 박막을 남긴다(그림 3(e)). 제작된 첫 번째 층의 뒷면은 PDMS와 접합하기 위해 산화막을 그대로 두고, 아랫면은 두 번째 층인 파이렉스유리와 접합하기 위해 산화막을 제거한다(그림 3(f)).

두 번째 층은 두께가 $500 \mu\text{m}$ 인 파이렉스유리 웨이퍼에 샌드블라스트방법으로 밸브축과 유로를 제작한다(그림 3(g)). 음성 감광제인 SU-8 2100을 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 $150 \mu\text{m}$ 두께의 주형을 제작하고 이를 이용하여 PDMS 층을 제작한다(그림 3(h)-(k)). 네 번째 층인 밸브는 $500 \mu\text{m}$ 의 파이렉스유리 웨이퍼 위에 Ti와 Au를 각각 500 \AA 과 2500 \AA 두께로 증착하고 원형의 패턴을 만들고 절단하여 완성한다(그림 3(l),(m)). 양극 접합 방법을 이용하여 첫 번째 실리콘 층과 두 번째 파이렉스유리 층을 접합한다(그림 3(n)). 테슬라 코일을 이용하여 PDMS 층을 표면 처리한 후

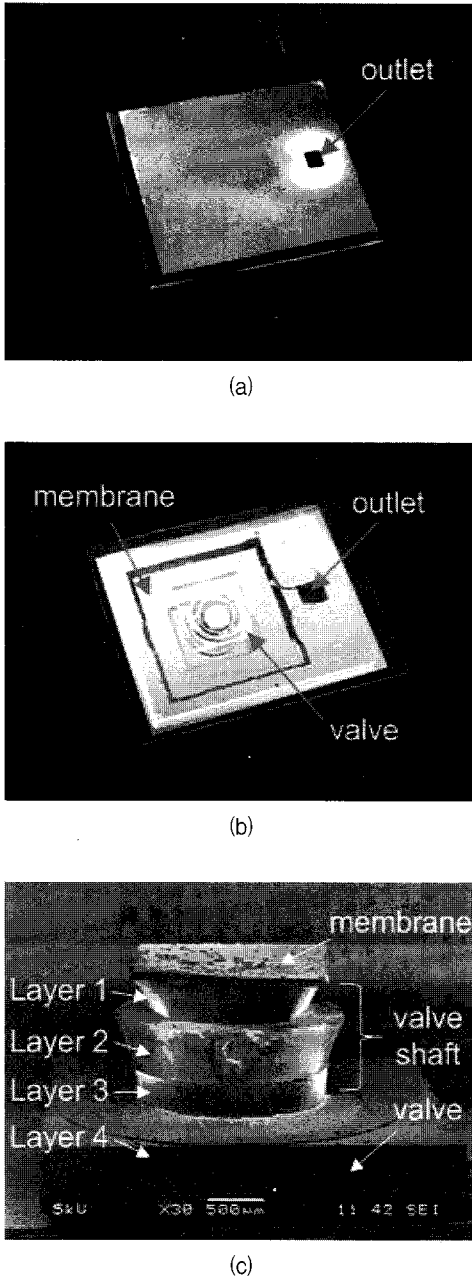


그림 4 제작된 소자의 사진 (a) 상부, (b) 하부, (c) SEM 사진
 Fig. 4 The fabricated device (a) top view, (b) bottom view, (c) SEM image

두 번째 층과 접합하고 네 번째 층의 밸브를 접합하여 압력조정기를 완성한다(그림 3(o),(p)). 이때 밸브에 제작된 Ti/Au 패턴으로 인하여 밸브가 닿는 PDMS 밸브시트 부분과 밸브는 접합되지 않는다.

그림 4의 (a)와 (b)는 각각 제작된 압력조정기의 상부와 하부 광학 사진이다. 투명한 파이렉스유리와 PDMS로 제작되어 내부 구조의 파악이 용이하다. 그림 4(c)는 그림 1의 점선 부분의 SEM 사진으로 박막에서부터 밸브까지 네 개의 층이 접합되어 있는 구조물을 보여준다. 작동 중에 인장응력이 작용하는 이 구조물을 제작함에 있어서 양극접합과 PDMS층을 이용한 접합이 적절하고, 밸브에 형성된 Ti/Au

패턴은 증착된 두께가 PDMS 층에 비하여 매우 작기 때문에 밸브축과 밸브의 접합에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

4. 압력조정기의 특성 해석

제안된 압력조정기는 2절에서 언급된 바와 같이 출구압력이 기준압력에 따른 특정 압력으로 유지되도록 되어 있으며 그 특정 압력보다 낮거나 높아지면 밸브가 열리거나 닫히면서 압력이 조절된다. 이 특정 압력을 구하기 위하여 압력조정기를 그림 5와 같이 실리콘 박막과 밸브축, 밸브 등으로 단순화시킨 자유물체도로 나타내고 그에 작용하는 압력을 표시하였다. 밸브가 열리기 시작하는 순간이나 닫히기 직전에는 밸브와 밸브시트 사이에 접촉력이 작용하지 않고 박막의 변형이 없게 된다. 이때 p_r , p_o , p_i 에 의해 작용하는 힘은 평형을 이루므로 식(1)과 같이 표현된다.

$$r_v^2 \pi p_i + \left\{ (a_m^2 - r_s^2) - \pi (r_v^2 - r_s^2) \right\} p_o - a_m^2 p_r = 0 \quad (1)$$

여기서, a_m 은 박막의 한 변의 길이, r_v 는 p_i 가 작용하는 밸브면의 반지름이고, r_s 는 밸브축의 반지름이다. 식(1)에서 p_o 를 p_r 과 p_i 로 나타내면 식(2)와 같다.

$$p_o = \frac{p_r - \beta p_i}{1 - \beta} = p_r - \frac{\beta}{1 - \beta} (p_i - p_r) \quad (2)$$

여기서, β 는 식(3)과 같다.

$$\beta = \pi \left(\frac{r_v}{a_m} \right)^2 \quad (3)$$

식(2)에서 입구압력과 기준압력의 크기가 대등하고 β 가 1에 비하여 무시할 정도로 작을 때, 출구압력은 기준압력과 같아짐을 알 수 있다. 본 논문에서 a_m 은 8 mm이고, r_v 는 1.5 mm이므로 β 는 0.110이다. 따라서 출구압력은 기준압력보다 조금 작은 값으로 결정된다.

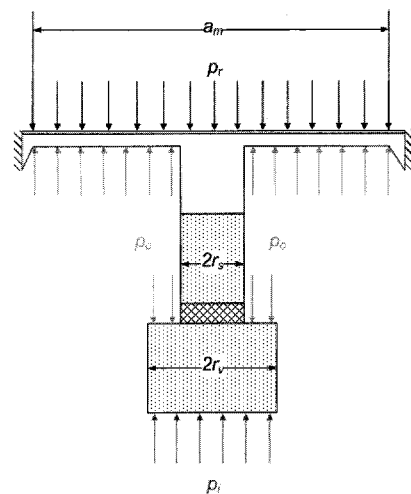


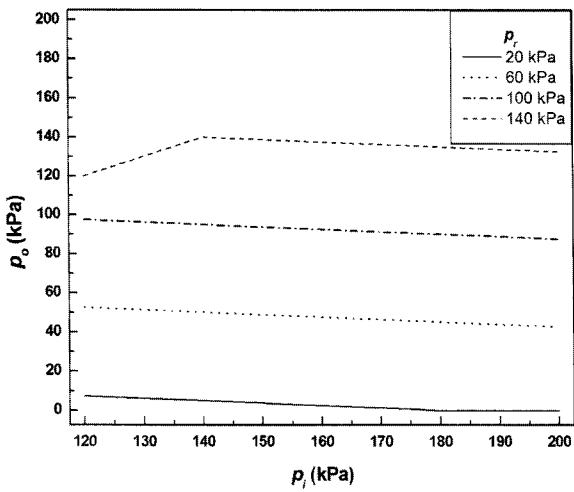
그림 5 특성 해석을 위한 자유물체도
 Fig. 5 The free body diagram for characteristic analysis

입구압력과 기준압력을 변화시키면서 출구압력을 구한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)에서 기준압력이 일정할 때 입구압력이 80 kPa만큼 증가하면, 출구압력은 9.9 kPa만큼 감소하며 그 기울기는 -0.12이다. 기준압력이 20 kPa인 경우, 입구압력이 181 kPa보다 커지면 밸브가 닫혀서 출구측으로 유체가 더 이상 흐르지 못하므로 출구압력은 0 kPa이 된다. 또 기준압력이 140 kPa인 경우, 입구압력이 140 kPa보다 작아지면 밸브가 열린 상태가 되어 출구압력이 입구압력과 같게 된다. 그림 6(b)에서 입구압력이 일정한 경우 기준압력이 증가하면 출구압력이 1.12의 기울기로 증가하는 특성을 보여 준다. 입구압력이 200 kPa인 경우, 기준압력이 22 kPa보다 작으면 밸브가 닫혀서 출구압력은 0 kPa이 되고, 기준압력이 200 kPa보다 크면 밸브가 열려서 출구압력

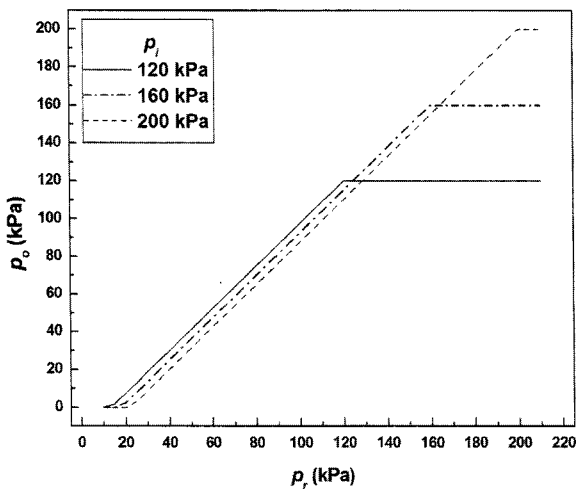
이 입구압력과 같게 된다. 따라서 주어진 입력압력 범위에서 원하는 출구압력을 얻기 위한 적절한 기준압력은 그림 6(b)에서 알 수 있다. 예를 들어 정격 입력압력이 160 kPa이고 ± 40 kPa 만큼 변하는 경우, 원하는 정격 출력압력이 100 kPa이면 기준압력은 107 kPa로 결정된다. 이 경우, 입구압력이 정격의 $\pm 5\%$ 까지 변하는 것에 비하여 출구압력은 정격의 $\pm 5\%$ 이내에서 변한다. 이와 같이 본 논문의 압력조정기는 입구압력이 크게 변화하더라도 출구압력을 기준압력 부근에서 유지하게 하고, 입구압력의 변화비율에 비하여 출구압력의 변화비율이 훨씬 작은 특징을 갖는다. 압력조정기의 박막의 크기에 비하여 밸브 반경을 더 줄이면 β 가 작아지고 출구압력의 변화비율이 더 작게 된다.

5. 압력조정기의 실험 결과 및 토의

그림 7은 제작된 압력조정기의 특성 실험을 위한 장치를 보여준다. 3절에서 제작한 압력조정기를 그림 7(a)와 같이 아크릴로 제작한 상부 틀과 하부 틀 사이에 넣고 서로 잘 밀착되도록 그 사이에 PDMS 층을 끼워 넣어 나사로 조여 조립한다. 그림 7(b)는 압력조정기를 아크릴 틀에 조립한 사



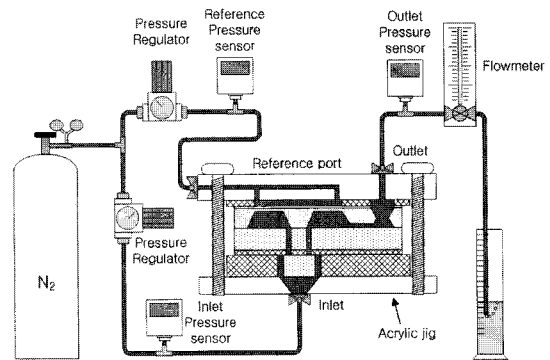
(a)



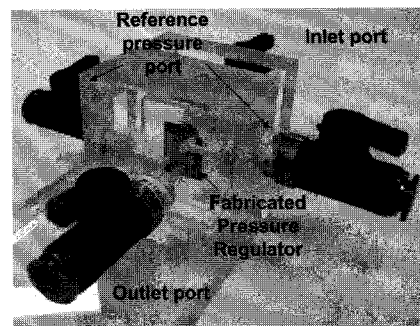
(b)

그림 6 계산된 압력조정기 특성 (a) p_r 이 일정할 때, p_i 에 따른 p_o , (b) p_i 가 일정할 때, p_r 에 따른 p_o

Fig. 6 The calculated characteristics of the pressure regulator (a) p_o vs. p_i with p_r constant, (b) p_o vs. p_r with p_i constant



(a)



(b)

그림 7 실험 장치 (a) 장치 연결도, (b) 아크릴 틀에 조립된 압력조정기

Fig. 7 The experimental setup (a) the connection of equipments, (b) the assembly of the pressure regulator and the test jig

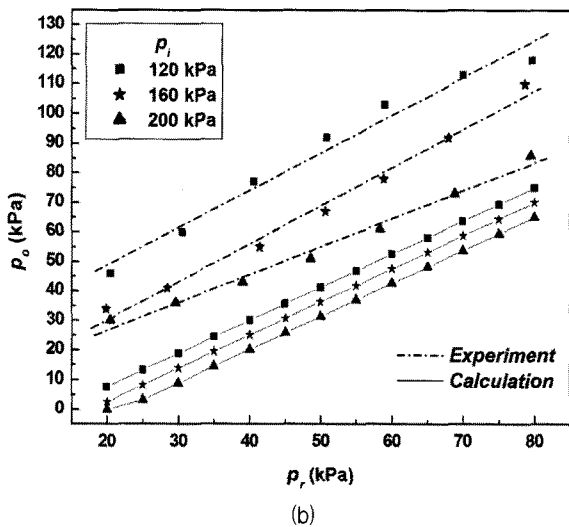
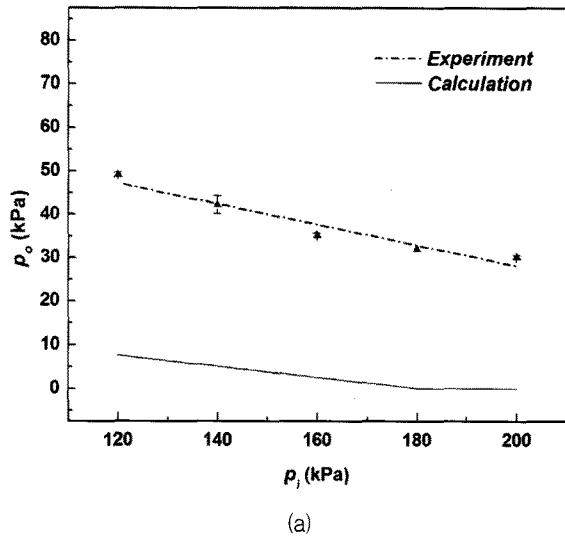


그림 8 측정된 압력조정기 특성 (a) p_i 가 20 kPa일 때, p_i 에 따른 p_o , (b) p_i 가 일정할 때, p_i 에 따른 p_o

Fig. 8 The measured characteristics of the pressure regulator (a) p_o vs. p_i when p_i is 20 kPa (b) p_o vs. p_i with p_i constant

진이다. 제작된 압력조정기의 입구와 기준압력 연결구에 일정 압력을 인가하기 위하여 질소 가스와 상용 압력조정기를 이용하였다. 압력 센서로는 Copal 사의 PG-208-102G 1개와 PG-35-103R 2개를 사용하여 기준압력과 입구압력, 출구압력을 측정하였다. 측정된 압력값은 모두 상대압력이다. 출구에 연결된 유량계는 Dwyer 사의 RMA-14-SSV로서 미소 유량을 제어하는 밸브로 사용하였다.

그림 8(a)는 기준압력을 20 kPa로 일정하게 유지하고, 입구압력을 120 kPa부터 200 kPa까지 약 20 kPa 간격으로 증가시키면서 매번 유량계 밸브를 열었다 닫은 후 출구압력을 측정하는 방식으로 5회 실험한 결과의 평균값과 I-bar로 나타낸 표준편차를 보여준다. 입구압력이 120 kPa부터 200 kPa까지 80 kPa 만큼 증가할 때 출구압력은 49 kPa에서 30 kPa로 19 kPa이 감소하였다. 입구압력과 출구압력의 관계를

나타내는 직선의 기울기는 -0.24이다.

그림 8(b)는 입구에 120, 160, 200 kPa의 압력을 일정하게 인가한 상태에서 기준압력을 20 kPa부터 10 kPa 간격으로 80 kPa까지 증가시키면서 출구압력을 측정한 결과이다. 입구압력이 일정할 때 기준압력이 증가하면 출구압력은 기준압력에 비례하여 증가한다. 입구압력이 각각 120, 160, 200 kPa일 때, 기준압력과 출구압력의 관계를 나타내는 직선의 기울기는 각각 1.26, 1.29, 0.95이다. 이 곡선 접합 결과에서 기준압력이 70 kPa일 때, 입구압력이 160 kPa에서 ± 40 kPa 만큼 변하면 출구압력은 95 kPa에서 ± 25 kPa 만큼 변하는 것을 알 수 있다.

그림 8의 압력조정기 특성시험 결과는 그림 6의 특성 해석 결과와 같은 경향을 보여주나, 절대치에서는 차이를 보이고 있다. 기준압력이 20 kPa로 일정한 경우, 입구압력의 변화에 대한 출구압력의 변화 비율은 실험값이 해석값의 두 배이고, 출구압력은 실험값이 해석값에 비하여 30~40 kPa 정도 높다. 이것은 밸브와 밸브시트의 표면 거칠기와 평탄도가 실제의 경우에 이상적이지 않기 때문에 가스 누설이 있어서 입력압력이 해석 결과보다 더 높아야 밸브가 닫히게 되어 출구압력이 해석값보다 높아진 것이다. 입구압력이 일정한 경우에도, 앞서 언급한 바와 같이 측정된 출구압력이 해석값보다 전반적으로 높으나, 기준압력의 변화에 대한 출구압력의 변화 비율은 실험값과 해석값에 큰 차이는 없다.

6. 결 론

본 논문에서는 초소형 압력조정기를 제안하고 압력평형메카니즘을 해석하였다. 생체 적합성이 있는 실리콘과 폴리락스유리, PDMS를 재료로 하여 습식 식각과 양극 접합, 플라즈마처리를 이용한 PDMS 접합 등을 포함하는 마이크로머시닝 기술로 초소형 압력조정기를 간단하면서도 저렴하게 제작하고 그 성능을 시험하였다. 입구압력이 기준압력보다 충분히 높게 일정한 경우, 출구압력은 기준압력보다 조금 작은 값으로 결정된다. 본 압력조정기의 기준압력이 일정하게 인가되는 경우, 입구압력의 변화비율에 비하여 출구압력의 변화비율이 훨씬 작은 특징을 갖는다. 제작된 압력조정기는 표면이 양호하지 않아서 그 특성이 해석 결과와는 다를 수 있으나, 경향은 동일하며 압력조정기로 잘 작동하였다. 차후 압력조정기에 밸브 시트를 추가하여 가스 누설을 줄이고 박막의 크기에 대한 밸브 반경의 비를 줄이면 성능이 향상될 것으로 사료된다. 본 논문의 압력조정기는 초소형으로 제작할 수 있고 전력소모 없이 출구압력을 일정하게 유지할 수 있으므로 휴대용 기기 및 인체삽입형 약물전달장치 등에 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Kwang W Oh and Chong H Ahn, "A review of microvalves," *J. Micromech. Microeng.* **16** R13-R39, 2006.
- [2] B. Ziai, A. Baldi, M. Lei, Y. Gu, R. A. Siegel, "Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in

- microfluidics and drug delivery." *Adv Drug Deliv Rev.* **56** 145-172, 2004.
- [3] P. Cousseau, R. Hirschi, B. Frehner, S. Gamper and D. Maillefer, "Improved micro-flow regulator for drug delivery systems." *Proc. of the 14th IEEE MEMS*, 527-530, 2001.
- [4] Debray, T. Nakakubo, A. Yokoi, S. Mogi, K. Ueda, S. Mogi, M. Shibata and H. Fujita, "A passive micro gas regulator for hydrogen flow control." *J. Micromech. Microeng.* **15** 202-209, 2005.
- [5] Debray, T. Nakakubo, K. Ueda, S. Mogi, K. Ueda, M. Shibata, S. Takeuchi and H. Fujita, "A micro-machined safety valve for power applications with improved sealing." *J. Micromech. Microeng.* **16** 240-247, 2006.
- [6] I. Fazal, M. C. Louwerse, H. V. Jansen and M. C. Elwenspoek, "Design, fabrication and characterization of a novel gas microvalve using micro- and fine-machining." *J. Micromech. Microeng.* **16** 1207-1214, 2006.
- [7] Y. Bozhi and L. Qiao, "A planar compliance-based self-adaptive microfluid variable resistor." *J. Microelectromechanical Systems*, **16** 411-419, 2007.

저 자 소 개



이 기 정 (李基禎)

1981년 10월 10일생. 2007년 아주대학교 전자공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정
Tel : 031-219-2488
E-mail : shohoku8@ajou.ac.kr



양 상 식 (梁翔植)

1958년 1월 16일생. 1980년 서울대학교 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 기계공학과 졸업(공학박사). New Jersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대학교 전자공학부 교수.
Tel : 031-219-2481
E-mail : ssyang@ajou.ac.kr