

논문 97-6-1-10

실리콘 마이크로머시닝을 이용한 플래퍼-노즐 밸브의 제작 및 특성 실험

권영신*, 김태현*, 조동일*

Flapper-nozzle Valve Fabrication Using Silicon Micromachining and Flow Characterization

Young-Shin Kwon*, Tae-Hyun Kim* and Dong-Il Cho*

요 약

실리콘 공정을 이용하여 마이크로 밸브(valve)를 제작할 때에 역방향 누설 유량은 중요한 문제중 하나이다. 본 논문에서는 플래퍼(flapper)와 노즐(nozzle)을 이용하여 누설 유량이 없는 마이크로 밸브를 설계하고, 실리콘 공정을 이용하여 제작하였다. 제작된 마이크로 밸브의 작동원리는 정방향 압력이 가해질 때에는 유체의 압력이 플래퍼를 위로 밀어서 유체를 흐르게 하고, 역방향 압력이 가해질 때에는 플래퍼를 밀지만 이때는 노즐의 입구에 의해 지지되므로 플래퍼나 노즐이 깨지지 않는 한 유체가 흐를 수 없게 된다. 노즐은 (100) 웨이퍼를 습식 식각하여 제작하였고, 플래퍼는 역형상을 20 μm 만큼 플라즈마 식각장비(RIE)로 수직 식각한 뒤 뒷면에서부터 습식 식각을 하여 제작하였다. 제작된 마이크로 플래퍼-노즐 밸브의 정적특성을 해석하였고, 순수를 사용한 실험결과와 비교하였다. 실험결과는 제작된 마이크로 플래퍼-노즐 밸브가 완전한 다이오드적인 특성을 가진다는 것을 보여주었다.

Abstract

One of the concerns in micro fluidic valve designs is that of reverse direction leakage. This paper designs and fabricates a new fluidic valve to achieve zero leakage. The design uses flapper and nozzle elements. In the forward direction the working fluid pushes the flapper upward to allow flow. In the reverse direction, the flapper pushes against the orifice seat, and thus, no flow can be generated, unless the flapper or nozzle element breaks. The nozzle element fabrication involves fabricating an orifice by wet etching of (100) wafer. The flapper element fabrication involves 20 μm deep patterning of the negative image of the flapper, followed by wet etching from backside. Flow experiments were conducted with DI water as the working fluid, and the results are compared to analytical predictions. The results show that the developed flapper-nozzle valve achieves a true diodic flow characteristic.

1.서론

유압기기 또는 유체 제어 시스템은 힘을 전달하는 액츄에이터, 유량과 유압을 조절하는 밸브와 펌프 및

이를 제어하는 전기전자 회로로 구성된다. 유압기기는 자동차 연료 분사기에서 항공기의 조종익 제어 시스템 까지, 기존 세계에서는 없어서는 안 될 가장 중요한 부품 중의 하나이다. 초소형 마이크로 밸브와 펌프는 미세세계에서 큰 가능성을 가지고 있으며, 의공학 시스템 또는 초소형 엔진에 필요하기 때문에 80년대부터 초소

* 서울대학교 전기공학부
(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

<접수일자 : 1996년 9월 20일>

형 밸브와 펌프에 대한 연구는 매우 활발하게 진행되어 왔다.

본 논문에서는 최근 발표된 각종 학회지의 논문 및 문헌 조사를 통해 미세 밸브를 구조에 따라 다음과 같이 링 메사(ring mesa)형[1~4], 캔틸레버(cantilever)형[5~8], 디스크(disk)형[9, 10], 브이-셰이프(V-shape)형[11, 12], 막막(membrane)형[13~21], 플로우트(float)형[22], 필름(film)형[23], 그리고 밸브리스(valveless)형[24~30]으로 구분하여 제작방법과 설계 및 성능의 장단점을 검토하였다. 조사결과 지금까지 발표된 초소형 밸브의 단점은 역방향 누설에 관한 문제였다.

이 역방향 누설 문제를 개선하기 위해 본 논문에서는 정방향 흐름일 때는 유량이 많고 역방향 흐름일 때는 유량이 거의 없는 초소형 플래퍼-노즐 밸브를 설계하였다. 기존 크기의 플래퍼-노즐 밸브는 약간의 누설이 있으나, 초소형 플래퍼-노즐 밸브는 시트(seat)의 간격이 매우 작아 미세세계의 특징인 점성력의 지배로 역방향 흐름을 제거할 수 있다. 본 논문은 설계된 플래퍼-노즐 밸브를 실리콘 건식식각 및 습식식각을 이용하여 제작하였다. 노즐과 밸브의 유량측정 실험을 통해 노즐의 시뮬레이션과 측정값 및 밸브의 이론식과 실험측정값을 비교하고, 설계된 플래퍼-노즐 밸브의 다이오드특성을 검증하였다.

2. 작동원리

플래퍼가 제작된 칩과 노즐이 제작된 칩을 그림1과 같이 접합함으로써 정상상태에서는 플래퍼가 노즐

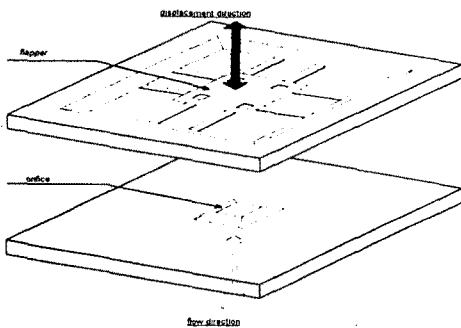


그림 1. 밸브의 전체 구성도
Fig. 1. Overall view of flapper-nozzle valve

를 막고 있는 구조를 가지게 된다. 유체가 노즐쪽에서 진행할 때는 노즐을 통한 입력압력이 플래퍼를 밀어내어 노즐과 플래퍼 사이의 간격이 형성되며 유체가 흐를 수 있게 된다. 반면 플래퍼쪽에서 입력압력이 인가되면 플래퍼가 노즐 입구에 의해 지지되므로 유체의 역방향 흐름을 억제한다. 역방향 흐름은 플래퍼나 노즐이 파괴되지 않는한 생길 수 없으며, 따라서 설계된 플래퍼-노즐 밸브는 완전한 다이오드 특성을 가지게 된다.

2.1 노즐 유량식

노즐을 통과하는 유체의 압력에 대한 유량의 정역학적 모델링은 베르누이(Bernoulli)식과 연속체(continuity)식으로부터 유체가 비압축성이라고 가정하고 유도할 수 있다. 그림 2와 같이 유체가 통과하는 노즐의 면적이 유체의 압력을 받는 전체면(upstream area)에 비해 작을 때 유체 속도에 의한 영향을 무시하면 노즐을 통과하는 유량을 다음과 같이 모델링할 수 있다 [31].

$$Q = C_d \cdot A_e \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

여기서, C_d 는 유출계수(discharge coefficient), ΔP 는 노즐의 입력부(upstream)압력과 출력부(downstream)압력 양단간 압력차, A_e 는 유체가 통과하는 노즐의 단면적, ρ 는 유체의 밀도이다.

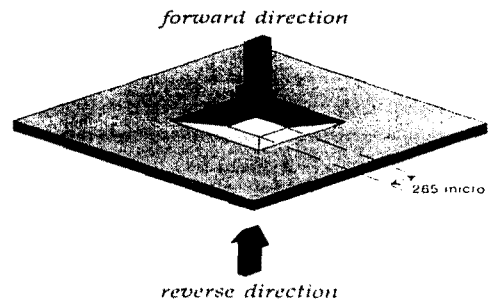
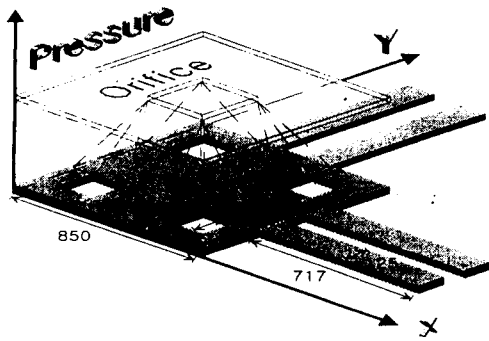


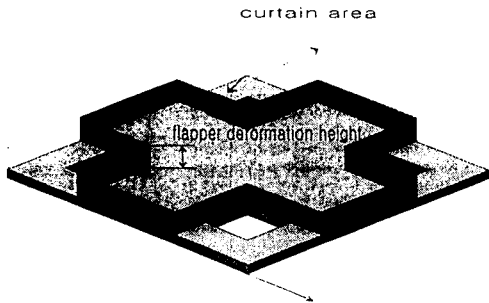
그림 2. 노즐 구조
Fig. 2. Orifice structure

2.2 밸브의 유량식

본 논문에서 설계된 플래퍼-노즐 밸브는 플래퍼와 접하는 노즐의 출력단의 노즐형상이 평평하고 플래퍼



(a)



(b)

그림 3. 플래퍼 소자의 모델 (a)플래퍼 압력분포 단면 (b)벽단면적

Fig. 3. Model of the flapper element (a) Pressure distribution on cross section area (b)Curtain area

와 노즐가 매우 작은 간격을 유지한다. 이 밸브의 유량식은 플래퍼와 노즐사이의 정확한 압력분포를 알아야 모델링이 가능하다. 일반적으로 미소단위에서 두개의 평판사이의 압력분포는 삼각함수 또는 포물선함수 형태의 압력 분포의 스퀴즈 필름(squeeze film)으로 모델링할 수 있으나[31], 플래퍼-노즐 밸브의 경우는 그림 3(a)와 같이 선형함수로 더욱 간단히 모델링될 수 있다[32]. 밸브의 유량은 압력으로 인한 노즐과 플래퍼소자 사이의 변위와 curtain area의 둘레 길이[1]

1. 노즐이 sharp하다면 단순히 노즐의 둘레이겠지만 노즐 주변이 평평하므로 그림3(b)와 같이 플래퍼의 벤트부분을 제외한 전 부분의 둘레가 curtain area의 둘레가 됨[32].

의 곱인 그림3(b)와 같은 curtain area에 비례하며 따라서 플래퍼 지지부의 탄성계수 함수와 유압의 함수로 아래와 같이 모델링 할 수 있다.

$$Q = C_f \cdot \left(\frac{2.65 \times 10^{-7} \cdot \Delta P L_b^3 L_c}{2AEI} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

여기서, C_f 는 노즐의 유출계수(discharge coefficient), E 는 실리콘의 탄성계수(Young's modulus), I 는 빔의 관성능률(moment of inertia), L_b ($= 1.17 \times 10^{-4} m$)는 빔하나의 길이, L_c ($= 3.4 \times 10^{-3} m$)는 벽단면 (curtain area)의 둘레 길이, ρ 는 유체의 밀도식, (2)의 계수 2.65×10^{-7} 는 그림 3(a)의 점선이 압력분포선이고 플래퍼 가운데의 압력이 ΔP 일때 플래퍼 전체의 압력을 하나로 표현 할때 계수 그리고 ΔP 는 양단간 입출력 압력 차이이다[2].

3. 제작

밸브 제작은 크게 플래퍼의 제작과 노즐의 제작으로 나누어지는데, 노즐은 단순한 습식공정에 의해 제작되었다, 플래퍼의 제작은 웨이퍼 앞면에 플래퍼의 역형상을 원하는 박막구조물 두께만큼 플라즈마 건식식각으로 수직식각한 후, 열산화막과 질화막으로 웨이퍼 뒷면을 보호한 뒤 웨이퍼 뒷면에 윈도우를 사진작업으로 패터닝하고 습식식각하여 제작하였다. 그 공정 중 플라즈마에 의한 건식식각 기술과 양면정렬 기술은 핵심공정 기술이며, 자세한 제작공정은 아래에 자세히 기술하였다.

3.1 노즐 제작방법

지름이 4 inch, 두께가 520 μm 인 웨이퍼에 완충용 열산화막 500Å을 성장시킨 뒤 1600Å의 질화막을 증착시킨다. 노즐의 외형이 4×4mm² 크기이고 입력단의 크기가 1×1mm²이 되도록 사진작업한 후 플라즈마 건식식각으로 질화막을 식각하고 불산(BHF)에서 산화막을 제거한다. 노출된 실리콘면을 30% 71°C 수산화칼륨(KOH)수용액에서 약12시간 동안 실리콘을 식각하여 노즐의 출력단이 265×265 μm^2 이 되도록 제작하였다. 그림 4는 제작된 노즐의 전자현미경 사진이다.

2. 식(2)의 유량식은 MKS단위임

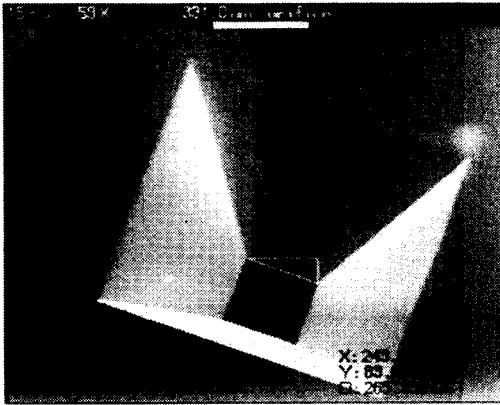


그림 4. 노즐 전자현미경 사진
Fig. 4. SEM micrograph of Orifice

3.2 플래퍼 제작

플래퍼의 제작은 웨이퍼 앞면에 플래퍼 구조물의 역형상을 원하는 두께만큼.(본 논문의 경우 20 μm) 수직으로 식각한 후 웨이퍼 뒷면에서 습식식각하여 플래퍼 형상이 남을 때에 식각을 정지함으로써 구현된다.

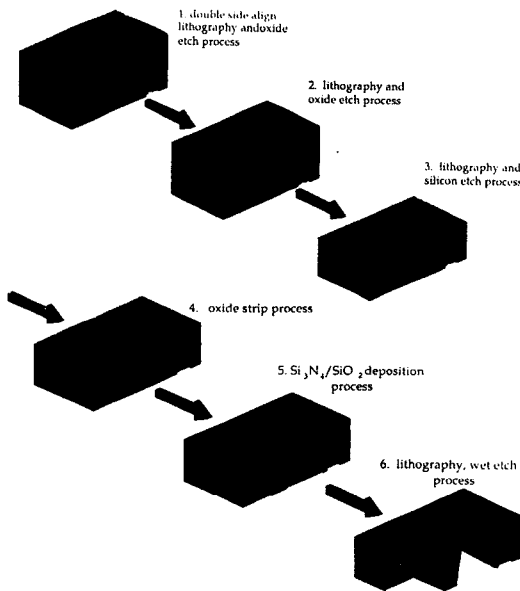


그림 5. 플래퍼 제작을 위해 개발된 공정순서
Fig. 5. Developed process for flapper fabrication

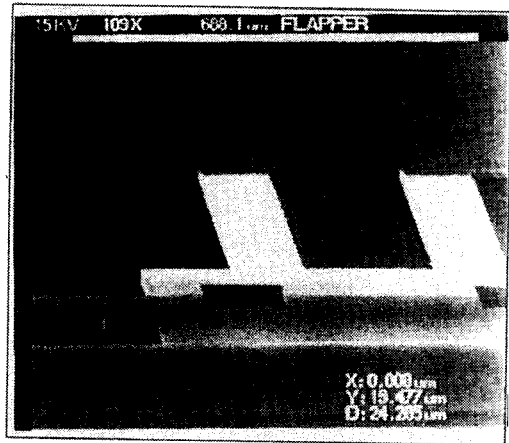
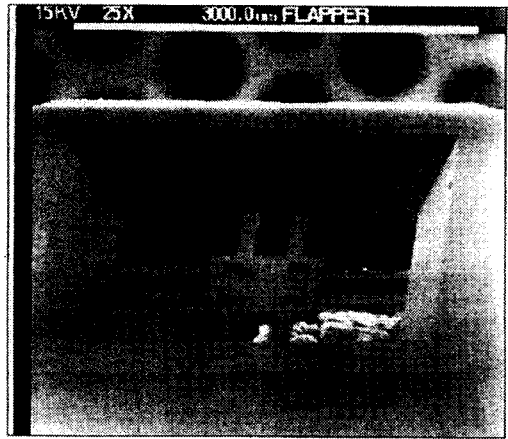


그림 6. 20μm두께의 플래퍼의 전자현미경 사진
Fig. 6. SEM micrograph of 20μm thick flapper

공정순서는 그림 5에 나타내었다. 구체적인 제작방법 및 공정 순서는 다음과 같다. 먼저 웨이퍼 양면에 정렬키를 만들기 위해 양면 정렬 치구를 이용하여 원본마스크로 복사마스크를 만든다. 마스크 층으로 사용할 TEOS를 웨이퍼의 마스크 층으로 앞면에 3μm 증착시키고 웨이퍼 뒷면에 5000Å의 TEOS를 증착시킨 후 양면 정렬 치구와 양면 정렬 마스크를 이용하여 마스크 사이에 양면이 감광제로 코팅된 웨이퍼를 샌드위치 구조로 놓고 양면의 같은 위치에 정렬키를 사진 작업으로 패턴 한다. 웨이퍼 양면의 패턴부위 산화막을 플라즈마 건식식각으로 식각한 뒤 감광제를 O₂ 에칭(ashing)과 황산(H₂SO₄)로 제거한다. 다시 웨이퍼 앞

면에 감광제를 코팅한 후 원하는 박막모양을 정렬기를 이용하여 정렬한 뒤 사진작업하고 패턴부위 산화막을 플라즈마 건식식각으로 식각한 뒤 감광제를 O₂ 에칭과 황산으로 제거한다. 플라즈마 산화막으로 패턴이 된 웨이퍼를 플라즈마 건식식각방법을 사용하여 노출된 실리콘 부위를 20 μ m로 깊이로 식각한다. 이 건식식각은 수직형상의 제작을 위해 염소류를 주 가스로 하며 진행되는데, 외국에서는 이와 같은 수직 건식 에칭에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다[33,34]. 서울대 반도체공동연구소에서 사용가능한 gas의 종류가 참고 문헌[33,34]과 다르기 때문에 본 연구에서 단위공정을 개발하였고, 자세한 공정은 참고문헌[35]에 기술하였다. 그후 남은 플라즈마 산화막을 불산으로 완전히 제거하고 저압기상증착(LPCVD)을 이용하여 완충용 열산화막(500Å)과 절화막(1600Å)을 증착시킨다. 플래퍼가 형성된 면의 반대면에 3 \times 3mm²로 사각윈도우를 사진작업으로 패턴한다. 노출된 윈도우부분의 절화막을 플라즈마 건식식각으로 식각하고 열산화막을 불산으로 식각한다. 절화막을 마스크 재료로 하여 수산화칼륨수용액으로 습식식각을 하여 플래퍼 형상이 생길 때 식각을 멈춘다. 그림 6은 제작된 플래퍼의 전자현미경 사진이다.

3.3 플래퍼 밸브의 접합

제작된 노즐과 플래퍼를 불산에 수분 동안 담궈 남은 절화막과 열산화막을 제거한다. 플래퍼 형상이 있는 칩의 프레임(frame)면과 노즐의 출력단면을 에폭시 수지를 사용하여 그림 1과 같이 접합한다. 그림 7은 제작된 플래퍼-노즐 밸브의 전자현미경 사진을 보여주고 있다.

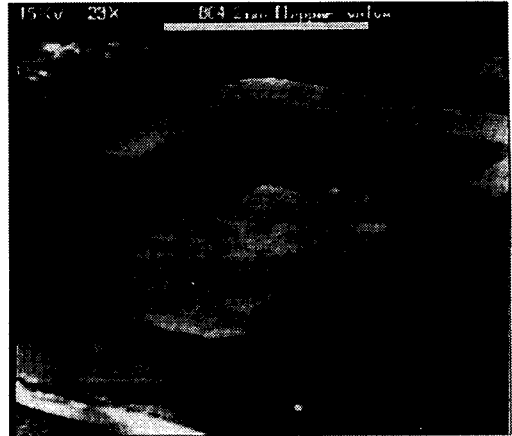
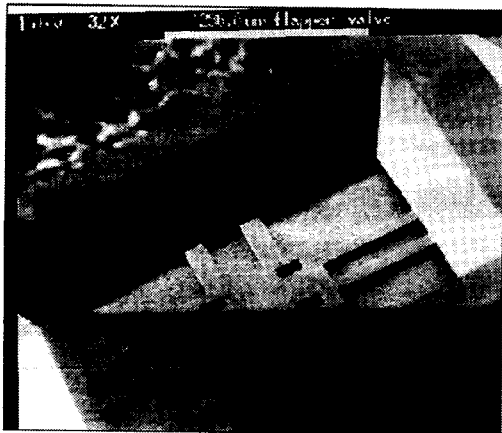


그림 7. 플래퍼-노즐 밸브의 전자현미경 사진
Fig. 7. SEM micrograph of completed flapper-nozzle valve

4. 실험 결과

4.1 노즐 유량 실험

노즐의 유량실험은 upstream압력과 downstream압력의 차이를 1000~8000 Pa까지 압력을 변화 시키면서 유량을 측정하였으며 이것을 결과로 하여 식(1)의 유량식으로 부터 C_d 계수를 정방향과 역방향에 대해 계산하였다(정방향:0.74, 역방향:0.62). 아래 그림 8은 노즐의 압력과 유량의 관계에 대한 실험결과를 나타내고 있는데, 해석식의 결과와 잘 맞는 것을 보여주고 있다. 그러나, 압력이 높아짐에 따라 역방향 유량이 정방

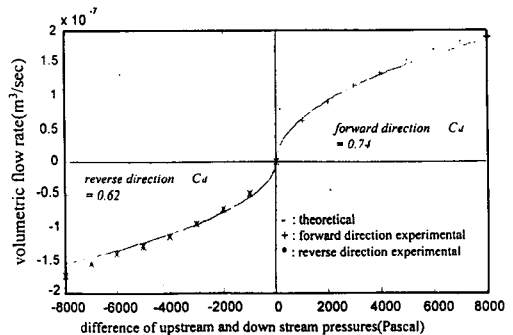


그림 8. 노즐에서 압력과 유량
Fig. 8. pressure vs. mass flow rate at orifice

향 유량과 같아지고 있다. 이것은 노즐을 통과하는 유량이 압력이 높아짐에 따라 형상에 의한 영향이 적어짐을 보여준다.

4.2 밸브의 유량 실험

밸브의 유량실험은 upstream압력과 downstream압력의 차이를 1000~8000 Pascal까지 압력을 변화 시키면서 유량을 측정하였으며, curve fitting에 의해 유출계수를 0.6으로 계산하였다. 실험 결과로부터 밸브를 통과하는 유량은 저압에서는 모델링된 해석식 결과와 일치하는 것을 보여준다. 그러나, 6000Pascal 이상에서는 그림 9에서와 같이 이론식에 적용을 적게 받으며, 플래퍼의 변형보다는 노즐의 유량식에 더욱 지배를 받음을 알 수 있다. 밸브의 역류량 실험을 통해 역방향 누설이 없음을 검증하였으며, 또 역류량의 경우 플래퍼와 노즐의 설계상 특징 때문에 압력이 높아짐에 따라 플래퍼와 노즐사이의 간격이 더 좁아지고, 따라서 소자의 파손이 없는한 역방향 누설이 생길 수 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 본 논문에서 설계 제작된 마이크로 밸브가 미세 유체 시스템에 단방향 체크 밸브로 효과적인 사용이 가능함을 보여준다.

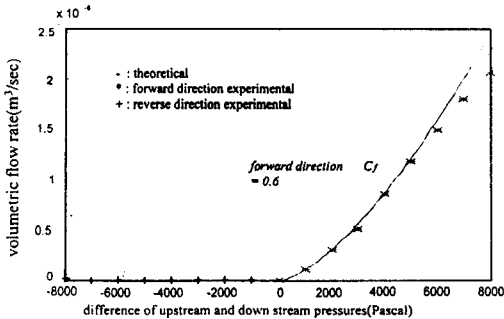


그림 9. 밸브에서 압력과 유량

Fig. 9. Pressure vs. mass flow rate at valve

5. 결론

본 논문은 소형 유체 제어 시스템에 핵심요소중 하나인 마이크로 밸브의 문제점 중의 하나인 역방향 누설이 없는 밸브를 설계하였고, 설계된 플래퍼-노즐 밸브를 실리콘 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작하였다. 마이크로 밸브의 제작은 크게 플래퍼의 제작과

노즐의 제작으로 나누어지는데, 노즐은 단순한 습식공정에 의해 제작되었고, 플래퍼는 웨이퍼 앞면에 패턴을 원하는 두께만큼 플라즈마 건식식각으로 수직식각한 후, 웨이퍼 뒷면으로 부터 윈도우를 습식식각하여 제작하였다. 제작된 플래퍼-노즐 밸브는 실험을 통해 역방향 누설이 없음을 검증하였고, 정방향 흐름은 실험결과와 유체역학 이론으로 유도된 모델을 비교하였다.

6. 사사

본 연구는 교육부 학술연구과제(ISRC-E-94-4060)에 의해 지원 되었고 이에 감사드립니다.

7. 참고 문헌

- [1] Huff, M.A., Gilbert, R., and Schmidt, M.A., "Flow Characteristics of a Pressure-Balanced Microvalve," Transducers'93, pp. 89-101, Yokohama, Japan, June 1993.
- [2] Jerman, J.H., "Electrically-Activated, Micromachined Diaphragm Valves," Proc. IEEE Workshop on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 65-69, Hilton Head, SC, June 1990.
- [3] F. C. M. Van de pol, H. T. G. Van lintel, M. Elwenspoek, J. H. J. Fluitman, "A thermopneumatic microengineering techniques," Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 198-202, 1990.
- [4] V. Gass, B. H. Vander Shoot, S. Jeanneret, Rue A. L. Breguest, "Integrated flow-regulated silicon micropump," Transducers'93, D11-3, pp. 1048-1051, Yokohama, Japan, 1993.
- [5] Ohnstein, T., Fukiura, T., Ridley, J., and Bonne, U., "Micromachined Silicon Microvalve," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 95-98, Napa Valley, CA, Feb. 1990.
- [6] Zengerle, R., Richter, A., and Sandmaier, H., "A Micro Membrane Pump with Electrostatic Actuation," Proc. IEEE Workshop on Micro

- Electro Mechanical Systems, pp. 19-24, Travemunde, Germany, Feb. 1992.
- [7] Zengerle, R., Richter, A., Brosinger, F., and Sandmaier, H., "Performance Simulation of Microminiaturized Membrane Pump," *Transducers'93*, pp. 106-109, Yokohama, Japan, June 1993.
- [8] R. Zengerle, S. Kluge, M. Richter, A. Proc. Richter, "A bidirection silicon micropump," *IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 19-24, Amsterdam, the Netherlands, 1995.
- [9] Esahi, M., Shoji, S., and Nakano, A., "Normally Closed Microvalve and Micropump Fabricated on a Silicon Wafer," *Sensors and Actuators*, 20, pp. 163-169, 1991.
- [10] Shuichi Shoji, Shigeru Nakagawa, Masayoshi Esashi, "Micropump and sample injector for integrated chemical analyzing system," *Sensor and Actuators*, A21-A23, pp. 189-192, 1990.
- [11] L. Smith, B. Hok, "A silicon self-aligned non-reverse valve," *Transducers'91*, B13.5, pp. 1049-1051, 1991.
- [12] 서정덕, 양의혁, 양상식, "붕소식각정지층을 이용한 두 개의 한 방향 실리콘 미세 밸브의 제작," '93 대한전기학회 추계종합학술대회 논문집, pp. 1960~1962, 1993.
- [13] Judy, J.W., Tamagawa, T., and Polla, D.L., "Surface-Machined Micromechanical Membrane Pump," *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 182-186, Nara, Japan, Jan. 1991.
- [14] Yanggiswa, K., Kuwano, H., and Tago, A., "An Electromagnetically Driven Microvalve," *Transducers'93*, pp. 102-105, Yokohama, Japan, June 1993.
- [15] Shinobu Hattori, Toshio Fukuda, Ryoichi Kishi, Hisao Ichijo, Yuji Katsurayama, Hideo Matsuura, Tsutomu Hiramatsu, "Structure and mechanism of two types of micropump using polymer gel," *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 110-115, Travemunde, Germany, 1992.
- [16] R. Rapp, W.K. Schomburg, D. Mass, J. Schulz, W. Stark, "LIGA micropump for gases and liquids," *Sensors and Actuators*, A40, pp. 57-61, 1994
- [17] Jan G. Smits, "Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically," *Sensors and Actuators*, A21-A23, pp. 203-206, 1990.
- [18] Hideo Mizoguchi, Mitsuhiro Ando, Tomokimi Mizuno, "Design and fabrication of light driven micropump," *Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 31-36, Travemunde, Germany, 1992.
- [19] Shuichi Shoji, Nico de Rooji, Masayoshi Esashi, Aza Aoba, Aramaki, "Smallest dead volume microvalves for integrated chemical analyzing system," *Transducers'91*, B13.5, pp. 1049-1055, Montreux, 1991.
- [20] T. Ohnstein, T. Fukiura, J. Ridley, U. Bonne, "Silicon active microvalves using buckled membranes for actuation," *Transducers'95*, No.309-PB7, pp. 305-308, Stockholm, Sweden, 1995.
- [21] Jochen Franz, Helmut Baumann, Hans-Peter Trah, "A silicon microvalve with integrated flow sensor," *Transducers'95*, No.311-PB7, pp. 313-316, Stockholm, Sweden, 1995.
- [22] Shuichi Shoji, Masayoshi Esashi, Bart van der Schoot, Nico de Rooji, "A study of a high pressure micropump for integrated chemical analysing system," *Sensors and Actuators A32*, pp. 335-339, 1990.
- [23] Shikida, M., Sato, K., Tanaka, S., Kawamura, Y., and Fujisaki, Y., "Electrostatically-

- actuated Gas Valve with Large Conductance," Transducers'93, pp. 94-97, Yokohama, Japan, June 1993.
- [24] Stephen F. Bart, Lee S. Tavrow, Mehran Mehregany, Jeffrey H. Lang, "Microfabricated electrohydrodynamic pumps," Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 193-197, 1990.
- [25] Axel Richter, Hermann Sandmaier, "An electrohydrodynamic micropump," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 99-104, 1990.
- [26] G. Fuhr, R. Hagedorn, T. Muller, W. Benecke, B. Wagner, "Pumping of wafer solution in microfabricated electrohydrodynamic system," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 25-30, Travemunde, Germany, 1992.
- [27] Shun-ichi Miyazaki, Takashi Kawai, "A piezo-electric pump driven by a fixural progressive wave," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 182-186, Travemunde, Germany, 1992.
- [28] Koichi OZAKI, "Pumping Mechanism using periodic ganges of a fluid," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 19-24, Amsterdam, the Netherlands, 1995.
- [29] 지영훈, 양상식, "압전구동기를 이용한 마이크로 펌프의 제작," '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1957~1959, 1996.
- [30] 김영수, 양상식, "열공합형 마이크로 펌프의 제작에 관한 연구," '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 210~212, 1996.
- [31] Zhang, L., Cho, D., Shiraishi, H., and Trimmer, W.S.N., "Modeling of Squeeze Film Damping in the Microscale", presented at the ASME Winter Annual Meeting, Anaheim, CA, Nov. 1992, in Micromechanical Systems, pp. 149-160, ASME Press, 1992.
- [32] D. McCloy, H.R. Martin, "Control of fluid power analysis and design," 2nd edition, ellis horwood, 1980
- [33] Henri Jansen, Han Gardeniers, and Jan J. Fluitman, "A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology," IOP Micromech. Microeng.,
- [34] N. C. MacDonald, K.A. Shaw, Z. Lisa Zhang, "SCREAM I: a Single Mask, Single-Crystal Silicon, Reactive Ion Etching Process for Microelectromechanical Structures," Sensors and Actuators ,A 40, pp. 63-70, 1994
- [35] 권영신, 조동일, "에치스탑을 사용하지 않고 제작된 5, 10, 20 μm 두께의 실리콘 박막과 구조물," '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1977~1979, 1996

著 者 紹 介



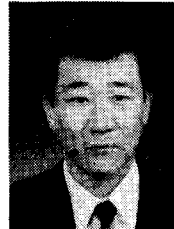
권 영 신

1970년 4월 21일생. 1995년 한양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 현재 서울대학교 전기공학부 석사2학년 재학중. 주관심분야 : MEMS



김 태 현

1972년 6월 14일생. 1995년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사). 현재 서울대학교 전기공학부 석사2학년 재학중. 주관심 분야 : MEMS



조 동 일

1958년 6월 15일생. 1980년 카네기멜론대학교 졸업(공학사). 1984년 MIT대학교 졸업(석사). 1987년 MIT대학교 졸업(박사). 1987~1993년 프린스턴대학교 기계항공공학과 조교수 역임. 1993년~현

재 서울대학교 전기공학부 조교수. Journal of Micro/nanomechatronics의 편집자(1996년~). IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical System의 편집위원(1992년~). IOP Journal of Micromechanics and Microengineering 편집위원(1991년~). ASME Transactions Journal of Dynamics System, Measurement and Control의 편집위원(1993년). 주관심 분야 : MEMS, 제어