

MEMS용 적층형 압전밸브의 제작

김재민*, 윤재영*, 정귀상*
동서대학교 정보시스템공학부

Fabrication of MCA Valve For MEMS

jae-min Kim*, jae-young Yun*, Gwi-y Sang Chung*
Dong-Seo Univ.

Abstract

This paper describes the design, fabrication and characteristics of a piezoelectric valve using MCA(Multilayer ceramic actuator). The MCA valve, which has the buckling effect, consists of three separate structures; MCA, a valve actuator die and an a seat die. The design of the actuator die was done by FEM modeling and displacement measurement, respectively. The valve seat die with 6 trenches was made, and the actuator die, which is driven to MCA under optimized conditions, was also fabricated. After Si-wafer direct bonding between the seat die and the actuator die, MCA was also anodic bonded to the seat/actuator die structure. PDMS sealing pad was fabricated to minimize a leak-rate. It was also bonded to seat die and SUS package. The MCA valve shows a flow rate of 9.13 sccm at a supplied voltage of 100 V with a 50 % duty cycle, maximum non-linearity was 2.24 % FS and leak rate was 3.03×10^{-8} pa · m³/cm³. Therefore, the fabricated MCA valve is suitable for a variety of flow control equipment, a medical bio-system, automobile and air transportation industry.

Key Words : Piezoelectric, Valve, MCA, Seat die, Actuator die

1. 서 론

최근 M/NEMS(Micro/Nano Electro Micro Systems) 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 그 중에서도 미래형 핵심산업으로 의료 및 수술, 제어분야에서 막대한 시장잠재력을 보유하고 있는 유공압 제어용 IT+BT+ NT 융합·복합산업이 크게 성장·발전할 것으로 기대된다.[1] 시장규모에 있어서, 약물전달시스템(Drug Delivery Systems), μ -TAS(Total Analysis Systems) 및 MFC(Mass Flow Controller) 등 극미세 소량의 유량 및 초정밀 유체제어기기에 대한 연구·개발이 크게 증대되고 있다.[2]

'70년대까지 모터를 구동원으로 사용하여 유형, 형상기억합금, 열공압형, 전자기형, 등 3차원 구조의 액추에이터가 집적화된 소형 밸브에 관한 연구가 활발히 진행되기 시작했다. 그러나, 정전형 밸브의 경우, 응답속도는 빠르지만 100 V 이상의 큰 인가전압이 요구되고 구동력이 적으며, 형상기억합금과 열공압형

밸브는 응답속도가 느리고 제작 공정이 복잡하며 온도상승에 따른 재료변형이나 응력이 생기는 단점을 가지고 있다.

한편 MCA(Multilayer Ceramic Actuator)는 압전세라믹을 여러 장 올려 쌓은 형태로서, 유니몰프(Unimorph)와 바이몰프(Bimorph)형 액추에이터보다도 경량, μ sec 단위의 고속응답, 에너지 변환효율이 40 % 이상인 저소비전력, kg/mm² 단위의 큰 구동력 그리고 고정밀도 등의 특징을 가지고 있어 각종 전자/기계/바이오 부품의 신뢰성 있는 동력원으로 활용할 수 있는 무한한 잠재성을 가지고 있다.[3]

따라서, 본 연구에서는 MCA를 구동부로 사용한 밸브를 설계 및 제작하였으며, 구동 드라이버 및 유체제어시스템을 제작한 후, 인가압력 및 듀티비(Duty Cycle)에 따른 적층형 압전밸브의 유량제어특성을 분석하였다. 최종적으로 선형성과 재현성 등을 분석하고 기존의 밸브와 비교하여 고부가가치의 의료 및 생체기기, 자동차 및 항공기 미세 연료분사기 등에

사용가능한 유공압 기체/액체 유량 제어용 고성능 밸브를 개발하고자 한다.

2. 설계 및 제작

2.1 설계

적층형 압전밸브는 그림 1과 같이 밸브에 구동력을 전달시켜 채널 높이를 가변시키는 MCA (5×5×20 mm, 90층), 액추에이터를 지지하고 채널을 형성시키는 액추에이터 다이, 입구와 출구를 가지는 시트 다이로 구성된다. 그림 (a)와 같이 밸브가 닫혀 있을 경우, 구동 드라이버에서 펄스를 가지는 DC 전압을 인가하면, 그림 (b)처럼 MCA에 변위가 발생하여 위쪽으로 수축이 일어난다. 동시에 MCA와 접합되어 있는 액추에이터 다이 역시 위쪽으로 끌려 올라가게 된다. 액추에이터 다이의 변형이 발생하면, MCA 하부에 위치하는 액추에이터 다이와 시트 다이 사이에 채널이 생기게 되며, 유체는 입구를 지나 채널을 통과하여 출구로 빠져나온다. 역으로 MCA에 인가된 전압이 제거되면 액추에이터 다이는 원상복귀하면서 유체는 정지하게 된다.

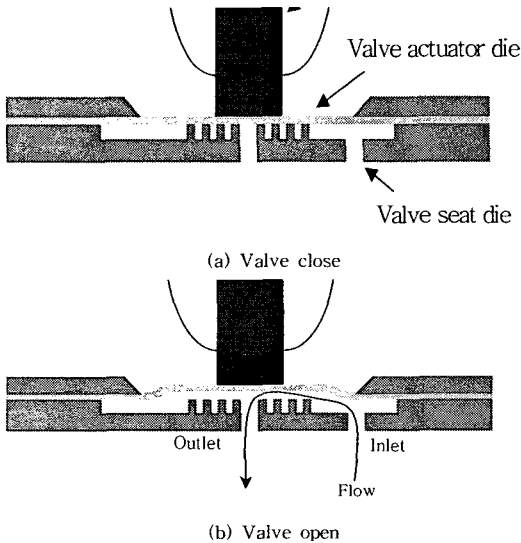


그림 1. 적층형 압전밸브의 동작원리.

MCA/액추에이터 다이 구조에서 전압인가시 변위특성을 해석하기 위하여, ANSYS (Ver 6.1)를 사용해 액추에이터 다이의 Si 다이어프램 면적과 두께에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위특성을 해석하였다.

그림 2는 다이어프램의 두께를 200 μm 로 고정시킨 후, MCA와 접합되어 있는 정방형 Si 다이어프램의 직경을 6 mm에서 15 mm까지 증가시키며 변위특성을 해석한 것이다. 변위 해석결과, 100 V의 인가전압이 발생하였을 때, Si 다이어프램의 직경이 증가하더라도 MCA의 변위는 전체적으로 1.33~1.34 μm 로서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 레이저 변위계를 사용한 실제 측정에서는 Si 다이어프램의 면적이 증가함에 따라서 MCA의 변위 역시 약간 증가함을 알 수 있으며, Si 다이어프램 직경 10-12 mm에서 해석값과 측정값이 일치됨을 알 수 있다.

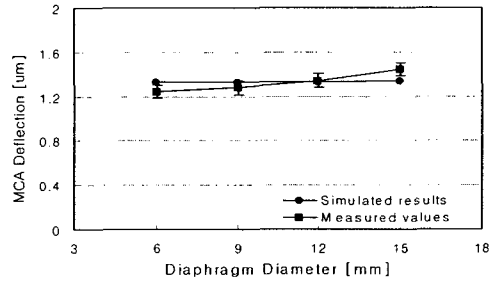


그림 2. Si 다이어프램 직경에 따른 MCA 최대 변위의 이론값과 측정값 분석 비교.

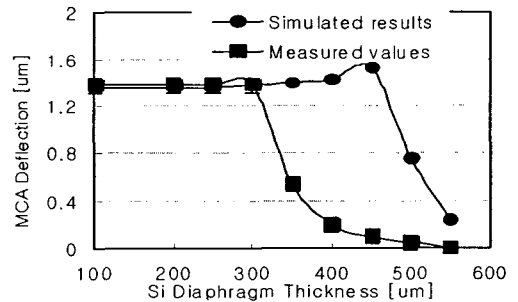


그림 3. Si 다이어프램 두께에 따른 MCA 최대 변위의 이론값과 측정값 분석 비교.

그림 3은 Si 다이어프램의 직경을 10 mm로 고정시킨 후, Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 액추에이터 다이의 변위특성을 해석한 결과이다. Si 다이어프램의 두께를 100-550 μm 로 가변하였을 때, 300 μm 까지의 두께에서는 MCA 결합계면의 변위를 1.38±0.1 μm 로 거의 일정하게 유지하다가 그 이상의 두께에서는 변위의 선형성을 가지지 못함을 알 수 있다.[4] 또한 실제 변위 측정에서는 250 μm 이하의 Si 다이어프램 두께에서 MCA의 변위가 일정한 것을 확인할 수 있다. 따라서, MCA에 인가되는 전압을 100 V로 고정

시켰을 경우, 10 μm 의 변위가 일정하게 발생할 수 있도록 Si 다이어프램의 직경을 10 mm, 두께를 200 μm 로 하여 액추에이터 다이를 제작하였다.

2.2 제작

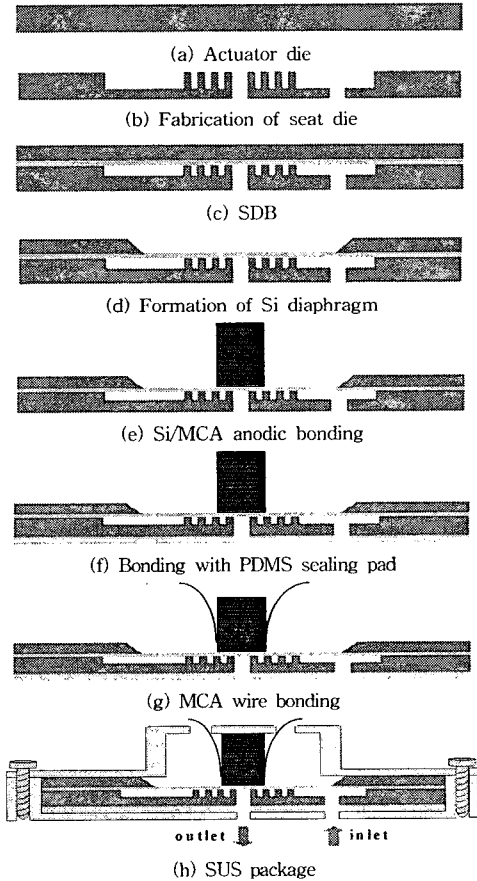


그림 4. 적층형 압전밸브의 제작 공정도.

그림 4는 적층형 압전밸브의 제작공정도를 나타낸 것이다. 먼저, $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기의 Si기판에 TMAH 20 wt.% 이방성 수용액을 사용하여 430 μm 의 폭을 가지는 입출구를 습식식각으로 제작하였다. 입출구가 제작된 Si기판은 다시 TMAH 10 wt.% 이방성 수용액을 사용한 습식식각으로 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 면적, 50 μm 깊이의 밸브 챔버와 6개의 시트 트랜치를 형성하였다. 다음으로 1000 $^\circ\text{C}$ 에서 3분 동안 시트 트랜치가 형성되어 있는 밸브 시트 다이 상부에 APCVD를 이용하여 약 500Å의 질화막(Si_3N_4)을 증착하였으며, 선택적 접합(Selective Bonding)이 가능하도록 PR 패터닝 및 buffer HF를 이용한 측면 질화막 제거로 밸브 시트

다이를 제조하였다(그림 4(b)). 제조된 시트 다이와 액추에이터 다이는 기판세정공정을 거친 후, 직접접합(SDB: Si-wafer Direct Bonding)을 수행하였다(그림 4(c)). 접합이 완료된 액추에이터 다이는 두께 200 μm , 직경 1 mm의 정방형 Si 다이어프램으로 제조하였다(그림 4(d)). 또한 액추에이터 다이와 5 μm 의 Pyrex #7740 glass 박막을 증착한 MCA를 600 V, 400 $^\circ\text{C}$ 의 인가조건으로 1×10^{-6} Torr 진공 챔버 내에서 양극접합하였다(그림 4(e)). 접합한 MCA는 분극 재처리를 행한 후, 전기적, 열적 절연을 위하여 입출구가 형성된 PDMS(Poly Di-Methyl Siloxane) sealing pad와 접합하였다(그림 4(f)). MCA에 wire bonding을 한 후(그림 4(g)), 최종적으로 MCA 및 적층형 압전밸브를 지지하고 외부의 입출구 호스를 연결하기 위하여 SUS(303L) packaging을 수행하였다(그림 4(h)).

그림 5은 밸브 액추에이터 다이, 시트 다이 및 밸브 패키지를 조립하여 최종적으로 제작한 적층형 압전밸브의 사진이다.

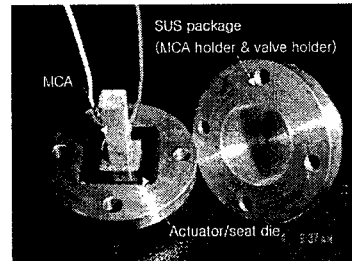


그림 5. 제작된 적층형 압전밸브 사진.

3. 결과 및 고찰

적층형 압전밸브의 성능측정은 유체제어시스템을 사용하여 입구쪽 압력과 출구쪽 압력의 차이를 0-0.5 bar까지 변화시켜가며 분석하였다. 본 연구에서 사용한 유체는 N_2 가스이며, 압전밸브에 장착된 MCA의 구동은 구동 드라이버를 사용하여 100 V DC 전압, 펄스 주기 200 Hz를 인가하였다. 먼저 듀티비를 25 %와 50 %로 설정한 후, 압력을 0.5 bar까지 증가시키면서 측정된 유량을 이론값과 함께 비교했다.

그림 6은 듀티비 25 %와 50 % 그리고 밸브 출구에서의 유량 이론값을 비교한 그림이다. 이론값 계산에서는 첫째, 유체를 비압축성 이상유체로 가정하였으며 둘째, 유량계수(C_d)를 0.96으로 가정하

였다. 측정결과, 듀티비 25 %일 때 인가압력 0.5 bar에서 8.49 sccm의 최대유량을 나타냈으며 비선형성은 5.77 %였다. 반면, 듀티비 50 %일 때의 최대유량은 9.13 sccm이며 비선형성은 2.24 % FS로서, 듀티비 25 %보다 인가압력에 대한 유량의 선형성이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 듀티비 50 %, 인가압력 0.5 bar에서의 이론적인 유량값은 11.6 sccm으로 측정값이 약 2.5 sccm 정도 작은 것을 알 수 있다. 이는 MCA 자체의 충방전 특성, Si기판을 이용하여 가공된 밸브 시트 다이의 거칠기 등에 기인한 것으로 사료된다.

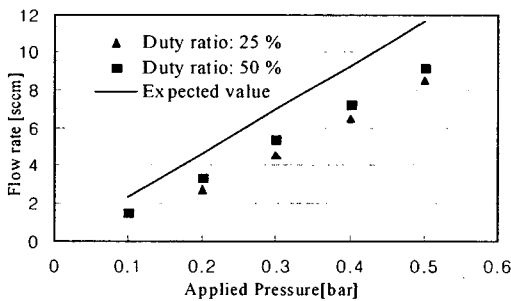


그림 6. 제작된 적층형 압전밸브의 인가압력에 따른 유량특성.

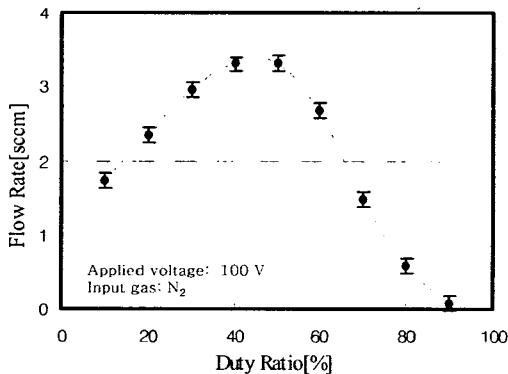


그림 7. 제작된 적층형 압전밸브의 듀티비에 따른 유량특성(applied pressure: 0.2 bar).

그림 7은 인가압력을 0.2 bar로 고정시키고 듀티비를 10-90 %까지 가변한 후, 100 V DC 전압을 인가하여 유량변화를 측정하는 것이다. 듀티비가 증가할수록 유량이 선형적으로 많아지면서 듀티비 50 %에서 가장 많은 3.28 sccm의 유량이 흐르는 것을 확인할 수 있다. 그러나 듀티비가 60 % 이상

으로 증가하면 N₂ 가스 유량이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 구동 드라이버의 듀티비를 10-90 %까지 가변함으로써 5 sccm 미만의 유량조절이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 MCA를 사용한 적층형 압전밸브의 설계, 제작한 후, 유량특성을 분석한 결과, 입구쪽 압력을 0-0.5 bar까지 인가하였을 때 duty ratio 50 %에서 2.24 % FS의 최대 비선형성을 얻을 수 있었으며 이 때의 유량은 0-8.13 sccm이었다. 또한, 인가압력 0.5 bar에서 최대 $3.03 \times 10^{-8} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 의 N₂ 가스 누설이 발생하였으며 AFC 압전밸브에 비하여 누설특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구에서 MCA를 이용한 적층형 압전밸브는 고신뢰도, 저소비전력, 우수한 누설특성과 반복성을 가지기 때문에 고부가가치의 의료 및 생체기기, 자동차 및 항공기 미세 연료 분사기 등에 사용가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] N. T. Nguyen, S. Schubert, S. Richter and W. Dotzel, "Hybrid-assembled micro dosing system using silicon-based micropump valve and mass flow sensor", *Sensors and Actuators, Vol. A 69*, pp. 85-91, 1988.
- [2] D. L. Polla, "BioMEMS application in medicine", *International symposium on micromechanics and human science*, pp. 13-15, 2001.
- [3] G. Caliano, N. Lamberti, A. Iula and M. Pappalardo, "A piezoelectric bimorph static pressure sensor", *Sensors and Actuators, Vol. A 46-47*, pp. 176-178, 1995.
- [4] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", *Sensors and Actuators, Vol. A 83*, pp. 188-192, 2000.