

마이크로 적층형 압전밸브의 제작과 그 특성

정귀상**, 김재민*, 조상복*

울산대학교 공과대학 전기전자정보시스템공학부

Fabrication of a Micro Multilayer Piezo Actuator Valve and Its Characteristics

Gwi-y-Sang Chung**, Jae-Min Kimm*, Sang-Bock Cho*

School of Electrical Eng., Univ. of Ulsan

E-mail : **gschung@ulsan.ac.kr

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/cm².

I. 서론

최근 센서와 액추에이터 같은 기계장치와 컴퓨터가 결합하여 환경의 미세 변화에 대한 감지와 조절이 가능한 M/NEMS (Micro/Nano Electro Micro Systems) 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 그 중에서도 미래형 핵심산업으로 의료 및 수송, 제어분야에서 막대한 시장잠재력을 보유하고 있는 유공압 제어용 IT+BT+NT 융합. 복합산업이 크게 성장. 발전할 것으로 기대된다.^[1-2] 시장규모에 있어서, 약물전달시스템 (Drug Delivery Systems), μ -TAS (Total Analysis Systems) 및 MFC(Mass Flow Controller) 등

극미세 소량의 유량 및 시료 조절이 요구되는 초정밀 유체제어기기에 대한 연구. 개발이 크게 증대되고 있는 것이 그 대표적인 예라 할 수 있다.^[3]

‘70년대까지 모터를 구동원으로 사용하여 유동을 발생시켰던 유압기기는 ‘90년대 이후부터 정전형, 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. 전자기형 밸브 또한 소비전력이 크고 구동력이 적은 문제점이 있다.^[4-5]

이들 밸브 중에서도 압전박막형 밸브에 관한 연구가 최근 가장 활발히 이뤄지고 있다. 압전박막의 변형을 기계적 에너지로 사용하면 경량, 고속응답, 저소비전력, 큰 구동력 등의 장점을 가지게 되어 각종 액추에이터의 동력원으로 활용할 수 있으며 미소 변위의 제어, 단백질 및 DNA 칩 등의 소형분석시스템에 응용할 수 있다. 국내에서는 압전박막을 이용한 극미세 에너지나 물질을 제어 및 처리할 수 있는 초소형 유압제어시스템 개발과 관련해 일부 연구가 진행되고 있지만, 압전박막은 극미세 에너지나 물질을 제어할 수 있는 충분한 구동력이나 응답속도를 가지고 있지 못한 문제점을 가지고 있다.^[6-7]

한편 MCA (Multilayer Ceramic Actuator)는 압전세라믹을 여러 장 올려 쌓은 형태로서, 유니몰프와 바이몰프형 액추에이터보다도 경량, μ sec 단위의 고속응답,

에너지 변환효율이 40 % 이상인 저소비전력, kg/mm² 단위의 큰 구동력, 고정밀도 등의 특징을 가지고 있어 구동력이 약한 압전박막형 액추에이터를 대신하여 각종 전자/기계/바이오 부품의 신뢰성 있는 동력원으로 활용할 수 있는 무한한 잠재성을 가지고 있다.^[8-10]

따라서, 본 연구에서는 압전박막형 밸브의 단점을 해결하기 위하여 MCA 를 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 누설특성, 허용압력 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.

II. 설 계

적층형 압전밸브는 밸브에 구동력을 전달시켜 채널 높이를 가변 시키는 MCA, 액추에이터를 지지하고 채널을 형성시키는 액추에이터 다이, 입구와 출구를 가지는 시트 다이, 밸브 및 MCA 홀더, 그리고 시트 다이와 밸브 홀더 그리고 누설방지를 위한 PDMS sealing pad, MCA 를 구동하기 위한 구동 드라이버로 구성된다. 본 연구에서는 액추에이터 다이의 상하 왕복운동을 이용한 밸브의 면 접촉 방식(Buckling Effect)을 이용하여 유체를 제어하는 방식이다.^[11] 구동 드라이버를 사용하여 펄스를 가지는 DC 혹은 AC 전압을 인가하면, MCA 에 수 μm 안팎의 변위가 발생하여 MCA 와 접합되어 있는 액추에이터 다이 역시 위쪽으로 끌려 올라가게 된다. MCA 하부에 위치하는 액추에이터 다이와 시트 다이 사이에는 채널이 생기게 되어 유체가 출구로 흐르게 되며, 역으로 MCA 에 인가된 전압이 제거되면 액추에이터 다이는 원상 복귀하면서 다시 시트 다이와 접촉하게 되어 유체는 정지하게 된다.

적층형 압전밸브를 제작하기에 앞서 MCA 의 기계적 변위특성을 선형적으로 유지할 수 있는 최적의 액추에이터 다이를 제작하기 위하여 Si 다이어프램의 면적과 두께를 조절하면서 액추에이터 다이를 설계하였다. 먼저, Pyrex #7740 glass 박막을 이용하여 접합한 MCA/액추에이터 다이 구조에서 전압인가시 접합 경계면의 순간적인 거동을 확인하기 위하여, ANSYS 를 사용해 액추에이터 다이의 Si 다이어프램 면적과 두께에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위특성을 해석하였다. 또한 레이저 변위계를 사용하여 실제 측정된 MCA 변위특성을 해석값과 비교하였다. 본 해석에서는

첫째, MCA 의 상부(z 축) 및 Si 다이어프램의 측면은 모두 구속되어 있다고 가정하였다. 둘째, 압전세라믹 박막의 물성치는 본 연구에서 사용한 Tokin 사의 MCA(5 mm×5 mm×20 mm, 90 층) stress form data 를 사용하였다. 셋째, MCA 의 변위는 PZT 의 층수에 정비례하기 때문에, MCA 설계시 실제 밸브 제작에 사용된 MCA 의 층수를 9 분의 1 로 축소한 10 층으로 설계하였다. 따라서 레이저 변위계를 사용하여 측정된 실험값도 수치를 9 분의 1 로 환산하여 해석값과 비교하였다.

그림 1 은 다이어프램의 두께를 200 μm 로 고정시킨 후, MCA 와 접합되어 있는 정방형 Si 다이어프램의 직경을 6 mm에서 15 mm까지 증가시키며 변위특성을 해석한 것이다. 변위 해석결과, 100 V 의 인가전압이 발생하였을 때, Si 다이어프램의 직경이 증가하더라도 MCA 의 변위는 전체적으로 1.33~1.34 μm 로서 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 레이저 변위계를 사용한 실제 측정에서는 Si 다이어프램의 면적이 증가함에 따라서 MCA 의 변위 역시 약간 증가함을 알 수 있으며, Si 다이어프램 직경 10-12 mm에서 해석값과 측정값이 일치됨을 알 수 있다.

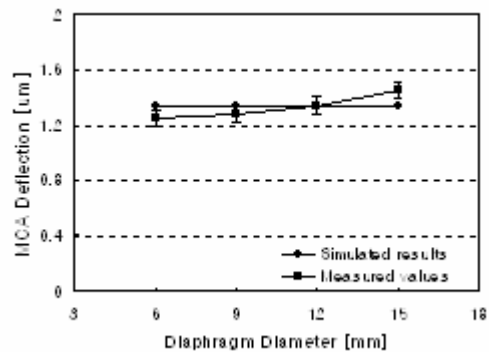


Fig. 1. Comparison between simulated results and measured values of the MCA deflection as functions of different Si diaphragm diameter.

그림 2 은 Si 다이어프램의 직경을 10 mm로 고정된 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.^[13] 또한 실제 변위 측정에서는 250 μm 이하의 Si 다이어프램 두께에서 MCA 의 변위가 일정한 것을 확인할 수 있다. 따라서, MCA 에 인가되는 전압을 100 V 로 고정시켰을

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

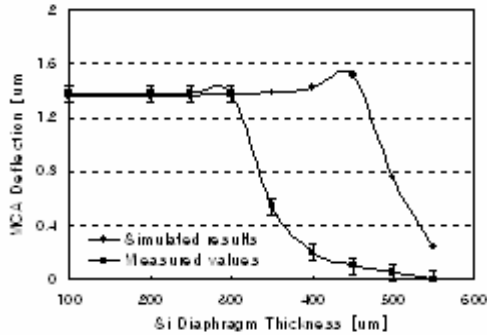


Fig. 2. Comparison between simulated results and measured values of the MCA deflection as functions of different Si diaphragm thickness.

III. 제작

그림 3은 적층형 압전밸브의 제작공정도를 나타낸 것이다. 먼저, $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 크기의 Si 기판에 TMAH 20 wt.% 이방성 수용액을 사용하여 430 μm 의 폭을 가지는 입출구를 습식식각으로 제작하였다. 입출구가 제작된 Si 기판은 다시 TMAH 10 wt.% 이방성 수용액을 사용한 습식식각으로 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 면적, 50 μm 깊이의 밸브 챔버와 6 개의 시트 트랜치를 형성하였다. 다음으로 1000 $^{\circ}\text{C}$ 에서 3 분 동안 시트 트랜치가 형성되어 있는 밸브 시트 다이 상부에 APCVD 를 이용하여 약 500 \AA 의 질화막(Si_3N_4)을 증착하였으며, 선택적 접합 (Selective Bonding)이 가능하도록 PR 패터닝 및 buffer HF 를 이용한 측면 질화막 제거로 밸브 시트 다이를 제조하였다(그림 3(b)). 제조된 시트 다이와 액추에이터 다이는 기판세정공정을 거친 후, 직접접합(SDB: Si-wafer Direct Bonding)을 수행하였다(그림 3(c)). 접합이 완료된 액추에이터 다이는 두께 200 μm , 직경 1 mm의 정방형 Si 다이어프램으로 제조하였다(그림 5(d)). 또한 액추에이터 다이와 5 μm 의 Pyrex #7740 glass 박막을 증착한 MCA 를 600 V, 400 $^{\circ}\text{C}$ 의 인가조건으로 1×10^{-6} Torr 진공 챔버 내에서 양극접합하였다(그림 5(e)). 접합한 MCA 는 분극 재처리를 행한 후, 전기적, 열적 절연을 위하여 입출구가 형성된 PDMS(Poly Di-Methyl Siloxane) sealing pad 와 접합하였다(그림 3(f)). MCA 에 wire bonding 을 한 후(그림 3(g)), 최종적으로 MCA 및 적층형 압전밸브를 지지하고 외부의 입출구 호스를 연결하기 위하여 SUS(303L) packaging 을 수행하였다(그림 3(h)).

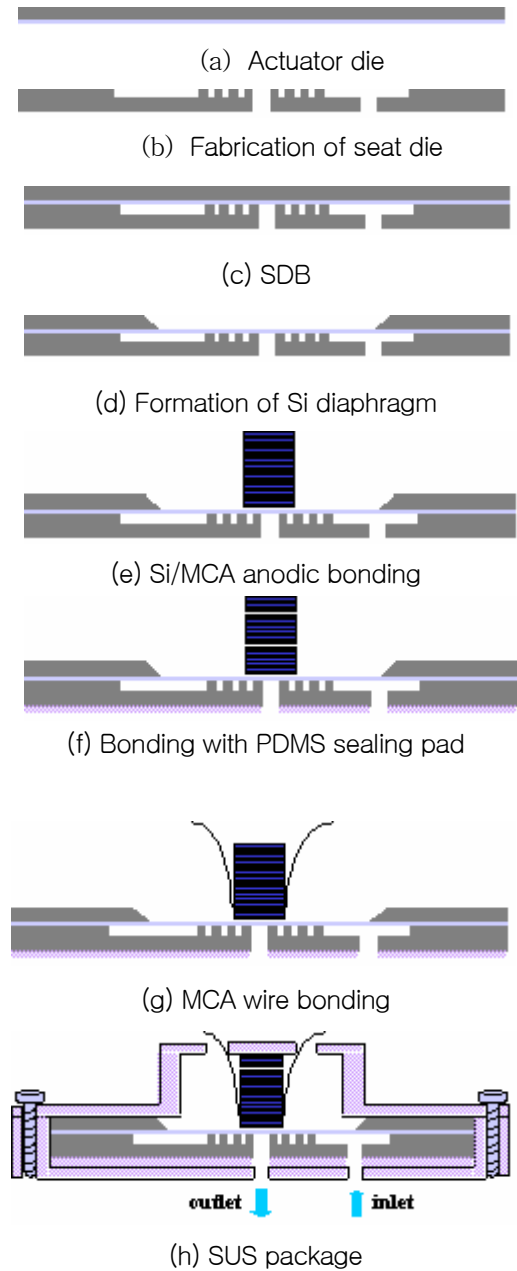


Fig. 3. Fabrication process sequences of the MCA valve.

그림 4 는 밸브 액추에이터 다이, 시트 다이 및 밸브 패키지를 조립하여 최종적으로 제작한 적층형 압전밸브의 사진이다.

IV. 결과 및 고찰

적층형 압전밸브의 성능측정은 유체제어시스템을 사용하여 사용하여 입구쪽 압력과 출구쪽 압력의 차이를 0-0.5 bar Rkw 까지 변화시켜가며 분석하였다. 본 연구에서 사용한 유체는 N_2 가스이며, 압전밸브에 장착된 MCA 의 구동은 구동

드라이버를 사용하여 인가전압 DC 100 V, 펄스 주기 200 Hz 를 인가하였다.



Fig. 4. Photograph of the fabricated MCA valve.

먼저 duty cycle 을 25 %로 고정시킨 후, 압력을 0.5 bar 까지 증가시키면서 측정된 유량을 이론값과 비교했다. 여기서, 유량계수 C_d 는 0.96 이며 모든 단위는 MKS 단위계를 사용하였다. 측정결과, 입구쪽 압력을 최대 0.5 bar 까지 인가하였을 때의 유량은 이론값인 11.6 sccm 에 비하여 약간 작은 값인 8.49 sccm 을 나타내었으며 선형성은 5.77 % FS 이었다. 측정값이 이론값보다 작은 이유는, MCA 에 펄스 전압이 인가되면 MCA 자체에서 충전과 방전을 거듭하면서 변위가 지속적으로 변하기 때문에 밸브가 완전히 개방되어 있다고 가정한 이론값과 차이가 생긴 것으로 사료된다. 그림 5 는 duty cycle 50 %에서의 적층형 압전밸브의 인가압력에 따른 유량특성을 나타낸 것이다. 이 때의 유량은 9.13 sccm 이었으며, 최대 비선형성은 2.24 % FS 로서 AFC 압전밸브의 2.5 % FS 에 비하여 인가압력에 대한 유량특성이 우수함을 확인할 수 있다.

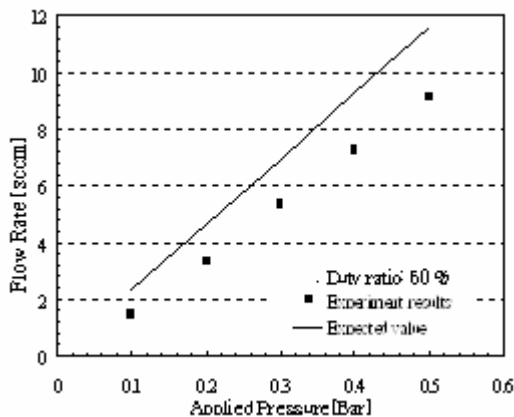


Fig. 5. Flow rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of applied pressure(duty cycle : 50 %).

V. 결 론

본 논문에서는 MCA 를 사용한 적층형 압전밸브의 설계, 제작한 후, 유량특성을 분석하였다. 유량 측정시스템을 구성하고 duty ratio 를 가지는 DC 전압을 인가하여 적층형 압전밸브의 유량특성을 분석한 결과, 입구쪽 압력을 0-0.5 bar 까지 인가하였을 때 duty ratio 50 %에서 2.24 % FS 의 최대 비선형성을 얻을 수 있었으며 이 때의 유량은 0-8.13 sccm 이었다. 또한, 인가압력 0.5 bar 에서 최대 3.03×10^{-8} pa. m^3/s 의 N_2 가스 누설이 발생하였으며 AFC 압전밸브에 비하여 누설특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구에서 MCA 를 이용하여 제작한 적층형 압전밸브는 고신뢰도, 저소비전력, 우수한 누설특성과 반복성을 가지기 때문에 고부가가치의 의료 및 생체기기, 자동차 및 항공기 미세 연료분사기 등에 사용가능할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] N. T. Nguyen et al., Sensors & Actuators, A 69(1988) 85.
- [2] L. Lo, M. Tsai et al., Mecanique & industries, 2 (2001)363.
- [3] D. L. Polla, Int. sympo. on micromechatronics & human science, (2001)13.
- [4] Nexes Task Force, Http://www. nexes-emsto.com, (1998)4.
- [5] E. Thielicke & E et al., Mechatronics, 10(2000) 431
- [6] P. Murali, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency control, 47(2000)903.
- [7] X. Wang et al., Int. sympo. on micromechatronics & human science, (1998)269.
- [8] G. Caliano et al.,Sensors & Actuators, A 46(1995)176.
- [9] T. Idogaki et al., Sensors & Actuators, A 54(1996) 760
- [10] M. Sitti, IEEE Int. Conf. Robotics & Automation, (2003)3839.
- [11] I. Chakraborty et al., Sensors & Actuators. A 83(2000)188.