

적층형 세라믹 액추에이터를 이용한 MEMS용 압전밸브의 제작 및 특성

Fabrication and Characteristics of a Piezoelectric Valve for MEMS using a Multilayer Ceramic Actuator

정귀상^{1,a}, 김재민¹, 윤석진²
(Gwiy-Sang Chung^{1,a}, Jae-Min Kim¹, and Suk-Jin Yoon²)

Abstract

We report on the development of a piezoelectric valve that is designed to have a high reliability for fluid control systems, such as mass flow control, transportation and chemical analysis. The valve was fabricated using a MCA(multilayer ceramic actuator), which has a low consumption power, high resolution and accurate control. The fabricated valve is composed of MCA, a valve actuator die and an seat die. The design of the actuator die was done by FEM(finite element method) modeling, respectively. And, the valve seat die with 6 trenches was made, and the actuator die, which possible to optimize control to MCA, was 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(poly-dimethylsiloxane) sealing pad was fabricated to minimize a leak-rate. It was also bonded to seat die and stainless steel package. The flow rate was 9.13 sccm at a supplied voltage of 100 V with a 50 % duty ratio and non-linearity was 2.24 % FS. From these results, the fabricated MCA valve is suitable for a variety of flow control equipments, a medical bio-system, semiconductor fabrication process, automobile and air transportation industry with low cost, batch process and mass production.

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

1. 서론

최근 급격한 성장을 보이고 있는 바이오 메디컬 분야에서 극미량의 가스 및 유체를 제어하는 유체 제어시스템(fluidics control system) 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 약물전달시스템이나 μ -TAS(total analysis system)와 같은 고도의 정밀성을 요하는 유압기기에서는 정확하면서도 높은

재현성을 가지는 유체제어시스템이 필요하다[1-3]. 이와 같은 소형의 집적화된 미세유체소자는 극소량 단위의 정확한 흐름조절 및 반응제어가 필수적이므로, 고신뢰도 및 우수한 재현성을 가지는 밸브의 제작이 매우 중요하다. 지금까지 연구되고 있는 밸브의 종류는 액추에이터의 구동방식에 따라 정전(electrostatic)형, 열공압(thermopneumatic)형, 형상기억합금(shape memory alloy)형, 전자기(electromagnetic)형, 압전(piezoelectric)형 밸브 등으로 나눌 수 있다. 정전형 밸브는 수 ms의 고속 응답이 가능하지만 100 V 이상의 고전압으로 구동되며 열공압형 밸브는 자체온도 상승에 따른 응답속도가 저하되는 단점을 각각 가지고 있다. 또한, 형상기억합금형과 전자기형 밸브는 응답속도가 느

1. 동서대학교 정보시스템공학부 메카트로닉스공학전공 (부산시 사상구 주례동 산69-1)
2. 한국과학기술연구원 박막기술연구센터
a. Corresponding Author : gschung@dongseo.ac.kr
접수일자 : 2004. 1. 14
1차 심사 : 2004. 3. 5
심사완료 : 2004. 3. 29

리고 제작공정이 복잡하다는 문제점이 있다[4,5]. 반면 압전형 밸브의 경우, 응답속도가 빠르고 구동력이 크기 때문에 유체분사력이 강하고 10 μm 이하의 정밀변위가 가능하다. 또 장(場) 또는 계의 영향을 받지 않아 유체의 변질이 일어나지 않는다는 장점을 가지고 있어 소형분석 시스템이나 약물 전달기기 등에 가장 적합한 구동원으로써 많은 연구가 진행되고 있다[6,7].

현재까지 압전체 중에서도 압전박막을 이용한 밸브 및 펌프가 연구되고 있으나 압전박막의 경우, 극미세제어를 필요로 하는 유체제어시스템 등에 적용가능한 응답속도를 가지고 있지 못하며 변위 정밀도와 발생력, 공진주파수가 낮은 문제점을 가지고 있기 때문에, 향후 우수한 열손실 특성 및 변위 정밀도가 우수하고 동작시간이 짧은 MCA (multilayer ceramic actuator)를 구동부로 사용한 유체기기가 크게 각광받을 것으로 예상된다[8].

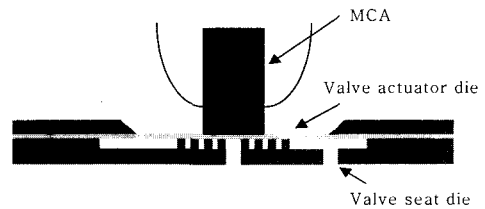
따라서, 본 연구에서는 압전박막형 밸브의 단점을 해결하기 위하여 MCA를 구동부로 사용하여 적층형 압전밸브를 제작하였다. 또한 MCA 구동 드라이버 및 유체제어시스템을 제작한 후, 인가압력 및 듀티비(duty cycle)에 따른 적층형 압전밸브의 유량제어특성을 분석하였다. 최종적으로 선형성과 재현성 등을 분석하고 기존의 밸브와 비교하여 고부가가치의 의료 및 생체기기, 자동차 및 항공기 미세 연료분사기 등에 사용가능한 유공압 기체/액체 유량 제어용 고성능 밸브를 개발하고자 한다.

2. 설계 및 제작

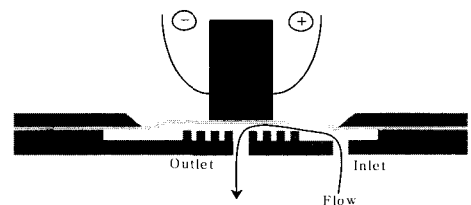
2.1 설계

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. 본 연구에서 사용한 MCA는 200 μm 두께의 PMN-PZT 압전박막이 90층 적층되었으며, Ag-Pd을 상하부 전극으로 사용한 5×5×20 mm 크기의 압전 액추에이터이다. 액추에이터 다이의 상하 왕복운동을 이용한 밸브의 면접촉 방식(Buckling Effect)으로 유체를 제어하는 방식이다. 그림 (a)와 같이 밸브가 닫혀 있을 경우,

구동 드라이버에서 펄스를 가지는 DC 전압을 인가하면, 그림 (b)처럼 MCA에 수 μm 안팎의 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 다시 시트 다이와 접촉하게 되며 유체는 정지하게 된다.



(a) Valve close



(b) Valve open

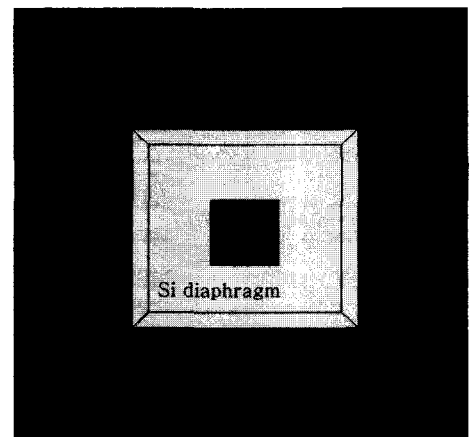


그림 1. 적층형 압전밸브의 동작원리.
Fig. 1. Working principle of the MCA valve.

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. 또한 레이저 변위계를 사용하여 실제 측정된 MCA 변위특성을 해석값과 비교하였다. 본 해석에서, MCA의 변위는 PZT의 층수에 정비례하기 때문에, MCA 설계시 실제 밸브 제작에 사용된 MCA의 층수를 9분의 1로 축소한 10층으로 설계하였다. 따라서 레이저 변위계를 사용하여 측정된 실험값도 수치를 9분의 1로 환산하여 해석값과 비교하였다.

그림 2는 다이어프램의 두께를 200 μm 로 고정시킨 후, MCA와 접합되어 있는 Si 다이어프램의 면적을 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 에서 $15 \times 15 \text{ mm}^2$ 까지 증가시키며 변위특성을 해석한 것이다. 변위 해석결과, 100 V의 인가 전압이 발생하였을 때 Si 다이어프램의 면적이 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[9], $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 에서 $12 \times 12 \text{ mm}^2$ 사이의 Si 다이어프램 면적에서 해석값과 측정값이 일치함을 알 수 있다.

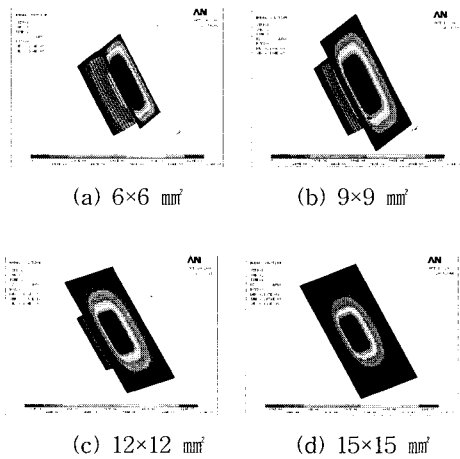


그림 2. Si 다이어프램 면적에 따른 MCA/액추에이터 다이 변위해석.

Fig. 2. Deflection results of the MCA/actuator die as a function of Si diaphragm dimension.

그림 3은 Si 다이어프램의 면적을 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 로 고정시킨 후, Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 액추에이터 다이의 계면을 ANSYS를 사용하여 해석한 결과이다. Si 다이어프램의 두께를 100-550 μm 로 가변하였을 때, 그림 (a)처럼 300 μm 까지의 두께에서는 MCA 결합계면의 변위를 $1.38 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 로 거의 일정하게 유지하다가 그 이상의 두께에서는 변위의 선형성을 가지지 못함을 알 수 있다. 특히, 그림 (c), (d)와 같이 Si 다이어프램의 두께 500 μm 부터 MCA와 Si 표면 사이에 국부적인 균열이 발생하면서 변위량이 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서, 액추에이터 다이의 최적구조를 위하여 Si 다이어프램의 면적을 $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 두께를 200 μm 로 하여 액추에이터 다이를 제작하였다[10].

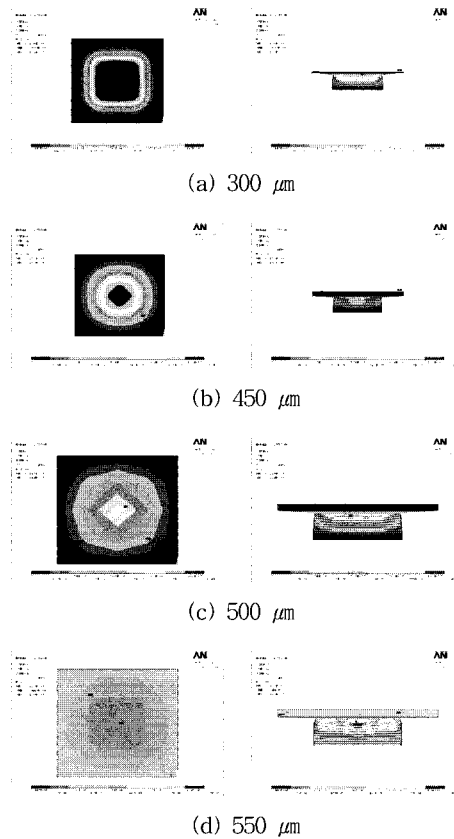


그림 3. Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 다이어프램 변위 해석.

Fig. 3. Deflection results of the MCA/actuator die as a function of Si diaphragm thickness.

2.2 제작

그림 4는 적층형 압전밸브의 제작공정도를 나타낸 것이다. 먼저, TMAH 20 wt.% 이방성 수용액을 사용하여 430 μm 의 폭을 가지는 입출구를 습식 식각으로 제작한 후, $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 면적, 50 μm 의 깊이를 가지는 밸브 챔버 및 6개의 트랜치를 가지는 시트를 형성하였다. 다음으로 APCVD를 이용하여 약 500 \AA 의 질화막(Si_3N_4)을 증착하였으며, 선택적 접합(selective bonding)이 가능하도록 측면 질화막을 제거하여 밸브 시트 다이를 제조하였다(그림 4(b)). 제조된 시트 다이와 액추에이터 다이는 직접접합 (Si-wafer direct bonding)을 수행하였다(그림 4(c)). 또한 액추에이터 다이를 두께 200 μm , 면적 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 Si 다이어프램으로 제조하였다(그림 4(d)). 액추에이터 다이와 5 μm 의 Pyrex #7740 glass 박막을 증착한 MCA를 600 V, 400 $^\circ\text{C}$ 의 인가 조건으로 1×10^{-6} Torr의 진공 챔버 내에서 양극접합하였다(그림 4(e)). 또한 누설을 최소화하기 위하여 입출구가 형성된 PDMS (poly dimethyl siloxane) sealing pad를 시트 다이와 접합하였다(그림 4(f)). MCA에 wire bonding을 한 후, 최종적으로 SUS packaging을 수행하였다(그림 4(g)).

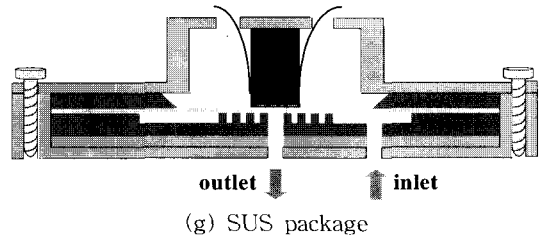
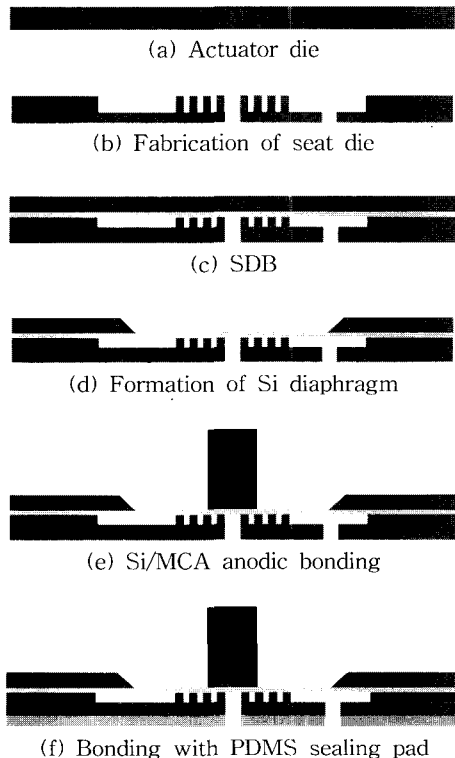


그림 4. 적층형 압전밸브의 제작 공정도.

Fig. 4. Fabrication process sequences of the MCA valve.

그림 5(a)는 밸브 액추에이터 다이, 시트 다이 및 밸브 패키지를 조립하여 최종적으로 제작한 적층형 압전밸브의 사진이며 그림 5(b)는 적층형 압전밸브를 장착한 밸브 성능측정용 유체제어시스템 및 압전밸브를 확대한 사진이다.

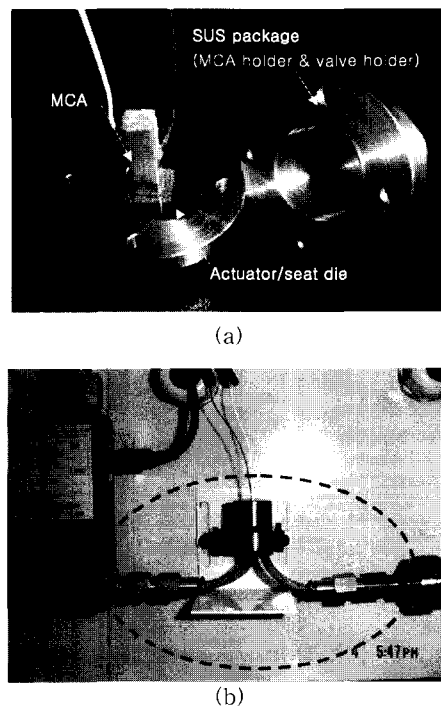


그림 5. (a) 제작된 적층형 압전밸브 사진 및 (b) 제작된 MCA 압전밸브를 장착한 MCA 밸브 측정용 유체제어시스템.

Fig. 5. (a) Photograph of the fabricated MCA valves and (b) a fluidics control system for MCA valve measurement including fabricated MCA valve, respectively.

3. 결과 및 고찰

적층형 압전밸브의 성능측정은 유체제어시스템을 사용하여 입구쪽 압력과 출구쪽 압력의 차이를 0-0.5 bar까지 변화시켜가며 분석하였다. 본 연구에서 사용한 유체는 N₂ 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 가정하였다. 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. 또한 듀티비 50 %에서의 재현성은 0.092 % FS로서 AFC 밸브의 1.0 % FS보다도 우수하였다. 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 중방전 특성, Si기판을 이용하여 가공된 밸브 시트 다이의 거칠기 등에 기인한 것으로 사료된다.

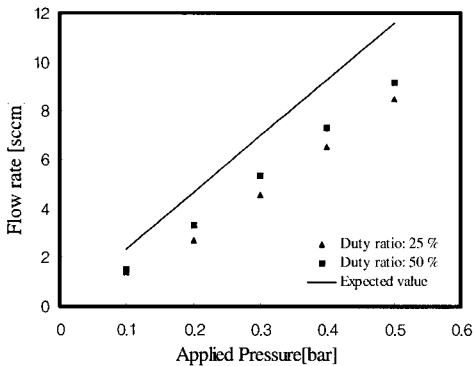


그림 6. 제작된 적층형 압전밸브의 인가압력에 따른 유량특성.

Fig. 6. Flow rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of applied pressure.

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 % 이상으로 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.

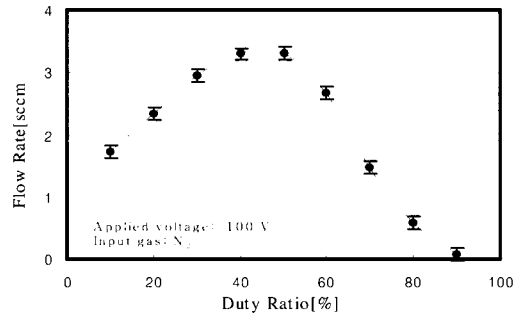


그림 7. 제작된 적층형 압전밸브의 듀티비에 따른 유량특성 (applied pressure: 0.2 bar).

Fig. 7. Flow rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of duty cycle (applied pressure: 0.2 bar).

4. 결론

본 논문에서는 MCA를 사용한 면 접촉방식의 적층형 압전밸브를 설계 및 제작한 후, 유량특성 및 선형성을 분석하였다. 입구압력 0-0.5 bar, 듀티비를 25 %와 50 %로 가변하여 100 V DC 전압을 인가하였을 때, 듀티비 50 %에서의 최대유량은 9.13 sccm이었으며 비선형성은 2.24 % FS, 재현성은 0.092 % FS로서, 듀티비 25 %보다 인가압력에 대한 유량의 선형성이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 또한 AFC 압전밸브의 선형성 2.5 % FS과 1.0 % FS의 재현성에 비하여 우수한 특성을 나타내었다. 한편, 인가압력을 0.2 bar로 고정시키고 100 V DC 전압을 인가한 후, 듀티비를 10-90 %까지 가변하여 유량변화를 측정하였을 때, 0-3.28 sccm까지 유량조절이 가능함을 확인할 수 있었다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때, 본 연구에서

MCA를 이용하여 제작한 적층형 압전밸브는 고신뢰도를 가지는 고부가가치의 의료 및 생체기기, 자동차 및 항공기 미세 연료분사기 등에 사용가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대 소재성형 기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

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, p. 85, 1988.
- [2] L. Lo, M. Tsai, T. Tsia, C. Fan, C. Wu, and R. Huang, "A silicon mass flow control micro-system", *Mec. Ind.*, Vol. 2, p. 363, 2001.
- [3] D. L. Polla, "BioMEMS application in medicine", *International symposium on micro-mechatronics and human science*, p. 13, 2001.
- [4] A. Meckes, J. Behrens, and W. Benecke, "Electromagnetically driven microvalve fabricated in silicon", *IEEE Transducers '97*, p. 821, 1997.
- [5] E. Thielicke and E. Obermeier, "Micro-actuators and their technologies", *Mechatronics*, Vol. 10, p. 431, 2000.
- [6] G. Caliano, N. Lamberti, A. Iula, and M. Pappalardo, "A piezoelectric bimorph static pressure sensor", *Sensors and Actuators*, Vol. A 46-47, p. 176, 1995.
- [7] P. Muralt, "PZT Thin films for micro-sensors and actuators: where do we stand?", *IEEE Transection on Ultrasonics, Ferroelectronics, and Frequency control*, Vol. 47, No. 4, p. 903, 2000.
- [8] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, and T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", *Sensors and Actuators*, Vol. A 83, p. 188, 2000.
- [9] 정귀상, 김재민, 윤석진, "파이렉스 #7740 유리박막을 이용한 MEMS용 MLCA와 Si기판의 양극집합 특성", *한국센서학회지*, Vol. 12, p. 265, 2003.
- [10] 김재민, 이종춘, 윤석진, 정귀상, "MEMS용 MCA/Si diaphragm 구조의 변위해석", *한국전기전자재료학회 추계학술대회논문집*, p. 372, 2003.