

적층형 압전밸브의 설계, 제작 및 특성

정귀상[†] · 김재민 · 윤석진* · 정순종** · 송재성**

Design, Fabrication and Characteristics of a MCA Valve

Gwiy-Sang Chung[†], Jae-Min Kim, Suk-Jin Yoon*, Soon-Jong Jeong**, and Jae-Sung Song**

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 $3.03 \times 10^{-8} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{cm}^2$. 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 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 수술, 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 소형 분석 시스템에 응용할 수 있다. 국내에서는 압전박막을 이용한 극미세 에너지나 물질을 제어 및 처리할 수 있는 초소형 유압제어시스템 개발과 관련해 일부 연구가 진행되고 있지만, 압전

동서대학교 정보시스템공학부(School of Information and System Engineering, Dongseo University)

*한국과학기술연구원 박막기술연구센터(KIST)

**한국전기연구원 전자기소자그룹(KERI)

[†]Corresponding author: gschung@dongseo.ac.kr

(Received : January 14, 2004, Accepted : March 11, 2004)

박막은 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, 유니몰프(Unimorph)와 바이몰프(Bimorph)형 액추에이터보다도 경량, μsec 단위의 고속응답, 에너지 변환효율이 40% 이상인 저소비전력, kg/mm^2 단위의 큰 구동력 그리고 고정밀도 등의 특징을 가지고 있어 구동력이 약한 압전박막형 액추에이터를 대신하여 각종 전자/기계/바이오 부품의 신뢰성 있는 동력원으로 활용할 수 있는 무한한 잠재성을 가지고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

따라서, 본 연구에서는 압전박막형 밸브의 단점을 해결하기 위하여 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 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.

2. 설 계

적층형 압전밸브는 그림 1과 같이 밸브에 구동력을 전달시켜 채널 높이를 가변시키는 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, MCA를 구동하기 위한 구동 드라이버로 구성된다. 본 연구에서는 액추에이터 다이의 상하 왕복운동을 이용한 밸브의 면 접촉 방식(Buckling Effect)을 이용하여 유체를 제어하는 방식이다¹¹⁾. 구동 드라이버를 사용하여 펄스를 가지는 DC 혹은 AC 전압을 인가하면, MCA에 수 μm 안팎의 변위가 발생하여 MCA와 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 MCA에 인가된 전압이 제거되면 액추에이터 다이는 원상 복귀하면서 다시 시트 다이와 접촉하게 되어 유체는 정지하게 된다.

적층형 압전밸브를 제작하기에 앞서 MCA의 기계적 변위특성을 선형적으로 유지할 수 있는 최적의 액추에

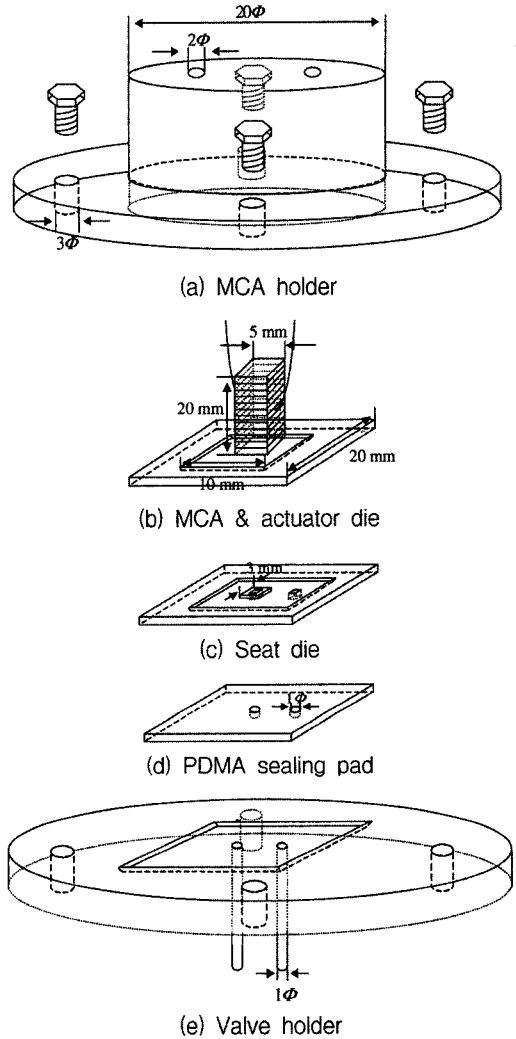


그림 1. 적층형 압전밸브의 개략도
Fig. 1. Schematic diagrams of the MCA valve.

이터 다이를 제작하기 위하여 Si 다이어프램의 면적과 두께를 조절하면서 액추에이터 다이를 설계하였다. 먼저, Pyrex #7740 glass 박막을 이용하여 접합한 MCA/액추에이터 다이 구조에서 전압 인가시 접합 경계면의 순간적인 거동을 확인하기 위하여, ANSYS를 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, MCA의 상부(z축) 및 Si 다이어프램의 측면은 모두 구속되어 있다고 가정하였다. 둘째, 압전세라믹 박막의 물성치는 본 연구에서 사용한 Tokin사의 MCA(5 mm

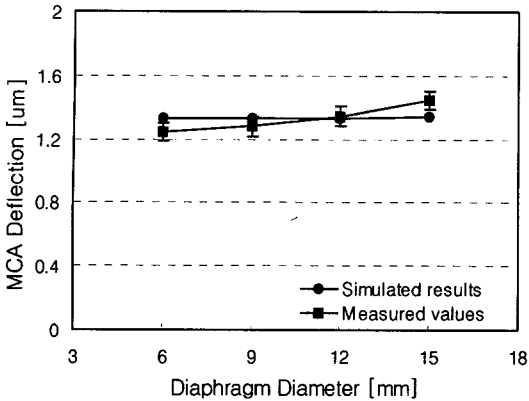


그림 2. Si 다이어프램 직경에 따른 MCA 최대 변위의 이론값과 측정값 분석 비교
 Fig. 2. Comparison between simulated results and measured values of the MCA deflection as functions of different Si diaphragm diameter.

× 5 mm × 20 mm, 90층) stress form data를 사용하였다. 셋째, 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 μm로 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 μm로서 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 3은 Si 다이어프램의 직경을 10 mm로 고정 한 후, Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 액추에이터 다이의 변위특성을 해석한 결과이다. Si 다이어프램의 두께를 100~550 μm로 가변하였을 때, 300 μm까지의 두께에서는 MCA 결합계면의 변위를 1.38 ± 0.1 μm로 거의 일정하게 유지하다가 그 이상의 두께에서는 변위의 선형성을 가지지 못함을 알 수 있다^[13]. 또한 실제 변위 측정에서는 250 μm 이하의 Si 다이어프램 두께에서 MCA의 변위가 일정한 것을 확인할 수 있다. 따라서, MCA에 인가되는 전압을 100 V로 고정시켰을 경우, 10 μm의 변위가 일정하게 발생할 수 있도록 Si

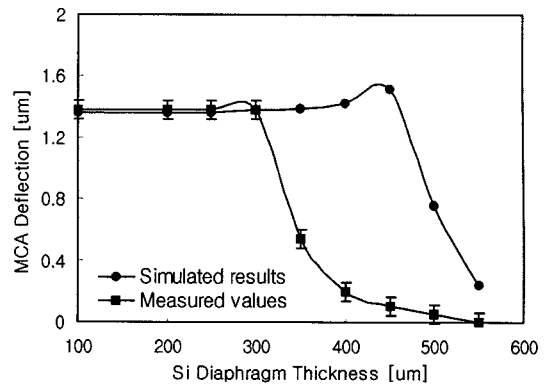


그림 3. Si 다이어프램 두께에 따른 MCA 최대 변위의 이론값과 측정값 분석 비교
 Fig. 3. Comparison between simulated results and measured values of the MCA deflection as functions of different Si diaphragm thickness.

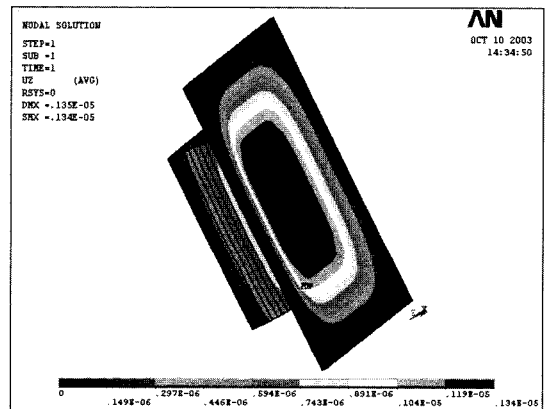


그림 4. MCA/액추에이터 다이 구조의 변위특성 해석(Si 다이어프램 직경: 10 mm, 두께: 200 μm)
 Fig. 4. Simulation of a deflection result of the MCA/actuator die structure(Si diaphragm diameter: 10 mm, thickness: 200 μm).

다이어프램의 직경을 10 mm, 두께를 200 μm로 하여 액추에이터 다이를 제작하였다.

그림 4는 MCA와 접합된 액추에이터 다이의 Si 다이어프램 직경을 10 mm, 두께를 200 μm로 최적 설계한 후, DC 전압을 100 V 인가하여 변위특성을 해석한 그림이다.

3. 제 작

그림 5는 적층형 압전밸브의 제작공정도를 나타낸 것이다. 먼저, 2 × 2 cm² 크기의 Si기판에 TMAH 20

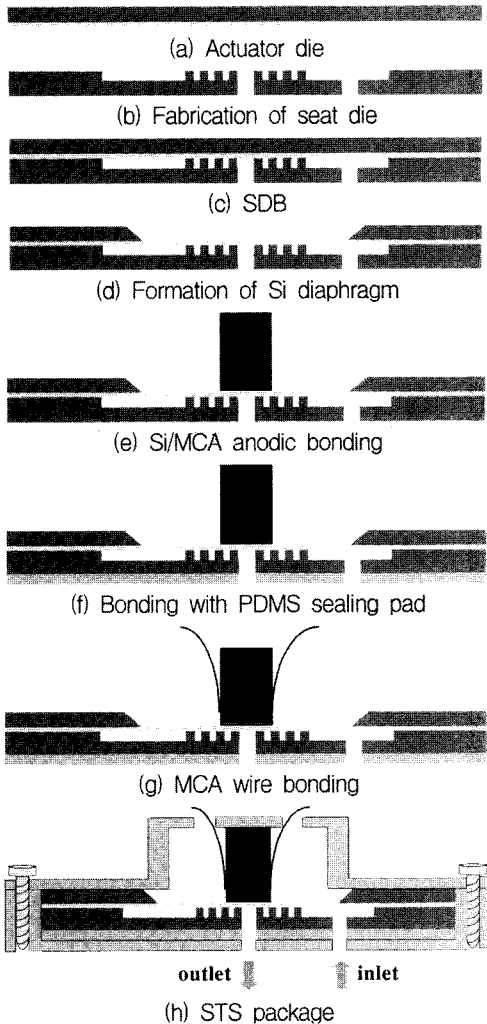


그림 5. 적층형 압전밸브의 제작 공정도
Fig. 5. Fabrication process sequences of the MCA valve.

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 cm^2 의 면적, 50 μm 깊이의 밸브 챔버와 6개의 시트 트렌치를 형성하였다. 다음으로 1000°C에서 3분 동안 시트 트렌치가 형성되어 있는 밸브 시트 다이 상부에 APCVD를 이용하여 약 500 Å의 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 5(b)). 제조된 시트 다이와 액추에이터 다이는 기판 세정공정을 거친 후, 직접접합(SDB: Si-wafer Direct Bonding)을 수행하였다(그림 5(c)). 접합이 완료

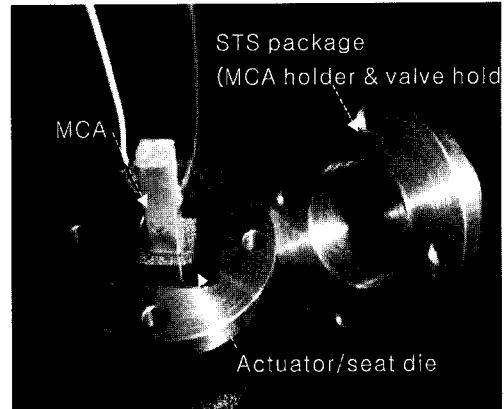


그림 6. 제작된 적층형 압전밸브 사진
Fig. 6. Photograph of the fabricated MCA valve.

된 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 MCA를 600 V, 400°C의 인가조건으로 1×10^{-6} Torr 진공 챔버 내에서 양극접합하였다(그림 5(e)). 접합한 MCA는 분극 재처리를 행한 후, 전기적, 열적 절연을 위하여 입출구가 형성된 PDMS(Poly Di-Methyl Siloxane) sealing pad와 접합하였다(그림 5(f)). MCA에 wire bonding을 한 후(그림 5(g)), 최종적으로 MCA 및 적층형 압전밸브를 지지하고 외부의 입출구 호스를 연결하기 위하여 STS(303L) packaging을 수행하였다(그림 5(h)).

그림 6은 밸브 액추에이터 다이, 시트 다이 및 밸브 패키지를 조립하여 최종적으로 제작한 적층형 압전밸브의 사진이다.

4. 결과 및 고찰

적층형 압전밸브의 성능 측정은 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 인가전압 DC 100 V, 펄스 주기 200 Hz를 인가하였다. 먼저 duty cycle을 25%로 고정시킨 후, 압력을 0.5 bar까지 증가시키면서 측정된 유량을 이론값과 비교했다. 여기서, 유량계수 Cd는 0.96이며 모든 단위는 MKS 단위계를 사용하였다. 측정결과, 입구쪽 압력을 최대 0.5 bar까지 인가하였을 때의 유량은 이론값인 11.6 sccm에 비하여 약간 작은 값인 8.49 sccm을 나타내었으며 선형성은

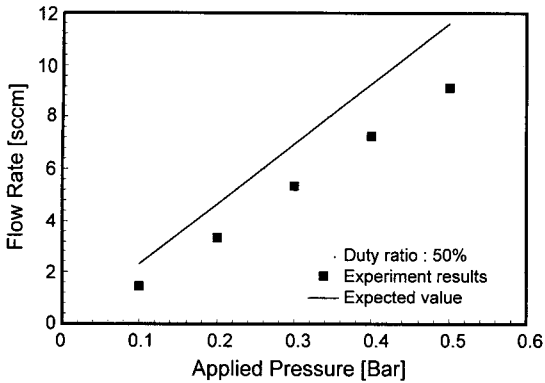


그림 7. 제작된 적층형 압전밸브의 인가 압력에 따른 유량 특성(duty cycle : 50%)

Fig. 7. Flow rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of applied pressure(duty cycle : 50%).

표 1. 인가압력에 따른 제작된 적층형 압전밸브의 누설특성
Table 1. Leak rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of applied pressure

Applied pressure (bar)	Leak rate ($\text{pa} \cdot \text{m}^3/\text{cm}^2$)
0.1	1.19×10^{-8}
0.3	3.03×10^{-8}
0.5	3.03×10^{-8}

5.77% FS이었다. 측정값이 이론값보다 작은 이유는, MCA에 펄스 전압이 인가되면 MCA 자체에서 충전과 방전을 거듭하면서 변위가 지속적으로 변하기 때문에 밸브가 완전히 개방되어 있다고 가정 한 이론값과 차이가 생긴 것으로 사료된다. 그림 7은 duty cycle 50%에서의 적층형 압전밸브의 인가압력에 따른 유량특성을 나타낸 것이다. 이 때의 유량은 9.13 sccm이었으며, 최대 비선형성은 2.24% FS로서 AFC 압전밸브의 2.5% FS에 비하여 인가압력에 대한 유량특성이 우수함을 확인할 수 있다.

표 1은 인가압력에 따른 적층형 압전밸브의 누설특성을 분석한 것이다. 누설측정은 진공방치법(Build-up Test)을 사용하여 수행하였으며, 제작된 적층형 압전밸브를 완전히 닫은 상태에서 밸브 뒤쪽에 유량계를 설치하여 수 일 동안 누설되는 유량을 측정하였다. 측정 결과, 인가압력 0.1 bar에서 최대 $1.19 \times 10^{-8} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{cm}^2$ 의 N_2 가스 누설이 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 본 연구에서 제작한 밸브의 누설특성이 AFC 압전밸브의 $1.22 \times 10^{-8} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{cm}^2$ 에 비하여 우수함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 MCA를 사용한 적층형 압전밸브의 설계, 제작한 후, 유량특성을 분석하였다. 유량 측정시스템을 구성하고 duty ratio를 가지는 DC 전압을 인가하여 적층형 압전밸브의 유량특성을 분석한 결과, 입구 쪽 압력을 0-0.5 bar까지 인가하였을 때 duty ratio 50%에서 2.24% FS의 최대 비선형을 얻을 수 있었으며 이 때의 유량은 0-8.13 sccm이었다. 또한, 인가압력 0.1 bar에서 최대 $1.19 \times 10^{-8} \text{ pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 의 N_2 가스 누설이 발생하였으며 AFC 압전밸브에 비하여 누설특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

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

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발 사업의 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, pp. 85-91, 1988.
- [2] L. Lo, M. Tsai, T. Tsia, C. Fan, C. Wu, and R. Huang, "A silicon mass flow control micro-system", *Mechanics and Industries*, vol. 2, pp. 363-369, 2001.
- [3] D. L. Polla, "BioMEMS application in medicine", *International Symposium on Micromechanics and Human Science*, pp. 13-15, 2001.
- [4] Nexes Task Force, "Market analysis for micro-systems 1996-2002", [Http://www.nexus-emsto.com](http://www.nexus-emsto.com), pp. 4-5, 1998.
- [5] E. Thielicke and E. Obermeier, "Microactuators and their technologies", *Mechatronics*, vol. 10, pp. 431-455, 2000.
- [6] P. Muralt, "PZT Thin films for micro-sensors and actuators: where do we stand?", *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control*, vol. 47, no. 4, pp. 903-915, 2000.

[7] X. Wang, Z. Zhou, X. Ye, Y. Li, and W. Zhang, "A PZT-driven micropump", *International Symposium on Micromechanics and Human Science*, pp. 269-271, 1998.

[8] 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.

[9] T. Idogaki, T. Tominaga, K. Sanda, N. Ohya, and T. Hattori, "Bending and expending motion actuators", *Sensors and Actuators*, vol. A 54, pp. 760-764, 1996.

[10] M. Sitti, D. Campolo, J. Yan, and R. S. Fearing, "Development of PZT and PZN-PT based unimorph actuators for micromechanical flapping mechanisms", *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3839-3846, 2003.

[11] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, and T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", *Sensors and Actuators*, vol. A 83, pp. 188-192, 2000.



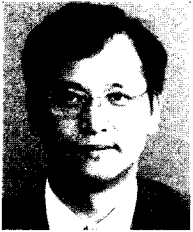
정 귀 상

- 1982년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1985년 2월 영남대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1992년 2월 일본 도요하시기술과학대학 졸업(공학박사)
- 1993년 ~ 현재 동서대학교 정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC 및 SiCN-M/NEMS, 압전 및 SMA 액추에이터



김 재 민

- 2002년 2월 동서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 2002년 ~ 현재 동서대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 주관심분야 : Si 및 Bio-MEMS, 압전 액추에이터



윤 석 진

- 1983년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
- 1985년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학석사)
- 1992년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 1992년 ~ 현재 한국과학기술연구원 박막기술연구센터 책임연구원
- 주관심분야 : 액추에이터, 고주파 유전체



정 순 중

- 1989년 연세대학교 금속공학과 졸업 (공학사)
- 1991년 연세대학교 금속공학과 졸업 (공학석사)
- 2000년 워싱턴 주립대 재료공학과 졸업 (공학박사)
- 2000년 ~ 현재 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 선임연구원
- 주관심분야 : 스마트재료/기능재료/액추에이터



송 재 성

- 1980년 2월 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1982년 2월 KAIST 전자재료공학과 졸업 (공학석사)
- 1991년 2월 KAIST 전자재료공학과 졸업 (공학석사)
- 1991년 ~ 현재 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 책임연구원
- 주관심분야 : 전자재료, 박막전자기소자, 나노신기능소자