

버클링 마이크로 적층형 압전밸브의 제작

이종화 · 정귀상[†]

Fabrication of a buckling micro MCA valve

Jong-Hwa Lee and Gwi-Sang Chung[†]

Abstract

This paper describes the design, fabrication and characteristics of a buckling microvalve using a MCA (multilayer ceramic actuator). The mechanical and fluidic analysis are done by finite element method. The designed structure is normally closed microvalve using buckling effect, which is consist of three separate structures; a valve seat die, an actuator die and a small piezoelectric actuator. The flow rate of the fabricated MCA valve was 0-8.13 ml/min at the applied pressure of 0-50 kPa. Maximum non-linearity was 2.24 % FS at a duty cycle of 50 %. The maximum pressure was 230 kPa and the leak rate was 3.03×10^{-8} Pa · m³/cm² at a supply voltage of 100 V.

Key Words : multilayer ceramic actuator, microvalve, buckling effect

1. 서 론

최근 급속히 발전하고 있는 MEMS 분야중에서 극미량의 가스 및 유체를 제어하는 미세유체소자 개발에 관심이 높아지고 있다^[1]. 그중에서도 인간의 건강과 복지 증진에 대한 욕구가 커지면서 의료계측 및 진단과 관련하여 인체내 약물주입을 위한 마이크로 약물전달 시스템 혹은 화학분석 시스템 등을 구현하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 소형 집적화 미세유체소자는 극소량 단위의 정확한 흐름조절과 반응제어가 필수적이므로 유체제어 시스템의 핵심 구성요소인 마이크로 밸브 및 펌프의 내부 유동현상을 정확히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

현재 개발되고 있는 마이크로 밸브중에서 다이어프램의 변위를 이용해 유체의 방향을 전환시키는 버클링 마이크로 밸브의 경우, 압전형, 열공압형, 정전형, 형상기억합금형, 전자기형 등 밸브 구동용 액추에이터를 사용한 대부분의 능동형 마이크로 밸브에 적용 가능하다^[2]. 이중에서도 압전 박막형에 관한 연구가 가장 활발하지만, 극미세 에너지나 물질을 제어할 수 있는

구동력이 낮고 응답속도가 느린다^[3]. 최근에 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 압전 세라믹막을 여러 장 올려 쌓은 형태인 MCA (multilayer ceramic actuator)를 구동부로 이용한 마이크로 MCA 밸브가 주목을 받고 있다^[4].

지금까지 버클링 효과를 응용하는 많은 연구가 마이크로 밸브 다이어프램 형상의 최적화 및 구동원의 변위특성 향상에 집중되고 있기 때문에 수 μ l/min 단위의 극미세 유량을 제어하는 마이크로 밸브 제작시 난류나 유체 부손실, cavitation 발생에 대한 정확한 원인 규명이 아직까지 이루어지지 못하고 있다^[5,6]. 특히, 버클링 마이크로 밸브 내부에서 유체 이동시 유속 흐름이 가장 불규칙하고 손실이 심한 부분이 밸브 시트부이다. 그러나 밸브 시트의 경우, 면적이 작으면서 챔버 내부형상의 굴곡이 가장 심해 다이어프램의 방향 전환시 밸브 동작 및 유동 변형에 대한 정밀한 실험 및 측정이 어려운 문제점을 가지고 있다^[7].

따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 밸브 시트부의 기하학적 형상에 따른 정밀 유동특성 분석 및 압력에 따른 챔버내 유속의 선형성을 평가하였다. 또한, 밸브 구동시 챔버와 시트를 통과하는 유체가 난류를 가지지 않고 완전한 층류를 형성하면서 유속을 일정하게 유지할 수 있는 최적의 시트 형상을 설계하여 마이크로 MCA 밸브를 제작 및 특성을 분석하였다.

울산대학교 전기전자정보시스템공학부(School of Electrical Eng., University of Ulsan)

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

(Received : June 17, 2005, Accepted : November 15, 2005)

2. 설계 및 제작

본 연구에서는 밸브 내부에서 유속 분포와 유체 거동의 수치해석을 위해 상용 FEM 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 마이크로 밸브의 모델이 유체 출구를 중심으로 폭 방향에 대해 대칭구조이므로 그림 1과 같이 전체 시트 구조의 1/2만을 나타낸 2-D 모델로 해석하였다. 본 연구에서는 첫째, 밸브 시트부는 steady state로 가정하였고 둘째, 중력에 의한 영향을 무시하였으며 셋째, 유체가 밸브 시트에 도달할 때까지 층류를 유지한다고 가정하였다. 표 1은 MCA 밸브 시트 설계조건을 요약한 것이다.

표 1의 밸브 시트 설계조건과 Navier-Stoke's 정리를 이용하여 압력에 따른 유속을 구간별로 정리하며 다음식과 같이 주어진다⁸⁾.

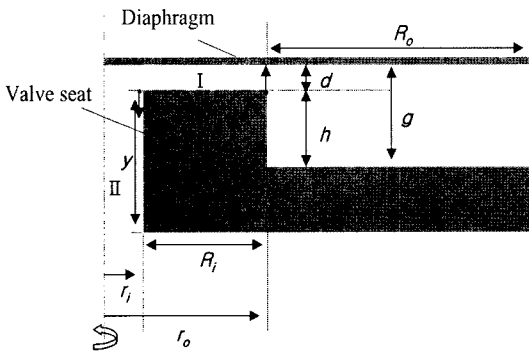


그림 1. 설계된 마이크로 밸브 시트 단면도
Fig. 1. Schematic cross-section of designed microvalve seat model.

표 1. 마이크로 밸브 시트 형상 설계조건
Table 1. Design parameters of microvalve seat geometries

Items		Size(μm)
Outlet length		y 510
Chamber height	Seat height	h 102.65
	Actuation gap	d 0-3.4
	Max. gap	g 0-106.65
Seat radius		R _i 7-42
Chamber length		R _o 840
Valve seat	Inner radius	r _i 18
	Outer radius	r _o 25-60
N ₂ properties	density(kg/m ³)	ρ 1.2507
	viscosity(kg/m·sec)	μ 17.7

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \quad (1)$$

이때, 영역 I에서의 경계조건은 다음식과 같다.

$$Vr_1(z_1=0)=0, \quad Vr_1(z_1=h)=0 \quad (2)$$

또한, 영역 II의 경계조건은 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{\partial Vz_2}{\partial r_2}(r_2=0)=0, \quad Vz_2(z_2=0)=0 \quad (3)$$

여기서, r₁은 밸브 시트 방향의 면적이며 r₂는 출구방향 면적이다. (1), (2)에서 얻어진 이론값과 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 버클링 마이크로 밸브의 챔버 내부와 입출구의 압력변화 및 시트 구조변경에 따른 유동의 선형성을 평가하였다.

본 연구에서 설계한 마이크로 MCA 밸브의 제작공정을 간단히 설명하며 다음과 같다. 먼저, 액추에이터 다이와 시트 다이를 각각 제조한 다음, SDB로 직접접합하였다. 접합된 기관은 액추에이터 다이를 MCA의 지지부로 사용하기 위하여 Si 다이어프램을 제조했다. 또한, 양극접합기술로 제조된 액추에이터 다이의 다이어프램과 Pyrex #7740 glass가 증착한 MCA를 접합했다⁹⁾. 접합한 MCA는 분극 재처리를 행한 후, 전기적, 열적 절연을 위하여 입출구가 형성된 PDMS sealing pad와 접합했다. MCA에 wire bonding을 한 후, 최종적으로 MCA를 지지하고 외부의 입출구 호스를 연결하기 위하여 SUS(303L)로 패키징했다. 그림 2는 제작된 마이크로 MCA 밸브의 사진이다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 해석에 사용된 기계적·물리적 물성값은 벌크 재료의 값을 사용하였으며 해석에 사용된 영

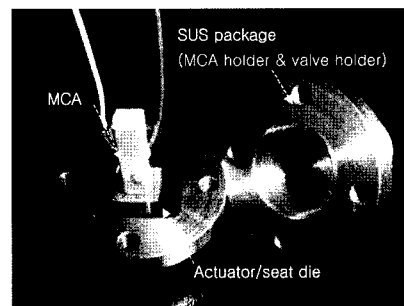


그림 2. 제작된 마이크로 MCA 밸브 사진
Fig. 2. Photograph of the fabricated micro MCA valve.

물은 170 gPa, 포아송 비는 0.3, 기체의 밀도는 1.2507 kg/m³ 그리고 점성계수는 17.7 kg/m·sec이다. 해석모델은 최대 요소가 5696개인 2차원 Axi-symmetric 요소를 사용하였으며 밸브 시트부의 메쉬를 형성한 후, 밸브 시트를 통과하는 유량이 층류를 형성할 수 있는 최적 조건을 결정하기 위하여 Si 다이어프램과 접합되어 있는 MCA에 DC 전압을 0-30 V 인가하여 변위를 발생시키면서 시트 면적에 따른 유량특성, MCA 변위에 따른 유동특성 그리고 출구 중심에서의 유속분포 등을 해석하였다. 시트 면적과 다이어프램의 변위에 따른 유속특성을 해석하였다.

Si 다이어프램의 변위는 MCA에 DC 전압을 인가함으로써 발생하며 Si 다이어프램의 변위는 MCA의 인가전압 30 V에서 최대 3.4 μm까지 증가했다^[10]. 한편, 밸브 입구의 압력이 너무 높을 경우, 밸브 시트와 Si 다이어프램의 형상에 상관없이 유체가 층류를 형성할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 압력 의존도를 낮추기 위하여 입구압력을 20 kPa의 저압으로 설정하였다.

그림 3은 밸브 시트의 크기를 6 μm로 고정하고 Si 다이어프램의 변위에 따른 유속특성곡선을 나타낸 것이다. 1 μm 이하의 Si 다이어프램 변위가 발생하였을 경우, 유속이 거의 흐르지 않다가 Si 다이어프램 사이의 변위가 2 μm 이상 커지면서 유속이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 다이어프램의 변위가 너무 미세할 경우, 밸브 표면의 관성력이 질소 기체의 점성력을 지배하기 때문에 유속이 흐르지 못하는 것으로 사료된다. 따라서 밸브 시트부 제작시 다이어프램의 변위 크기가 유속의 선형성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

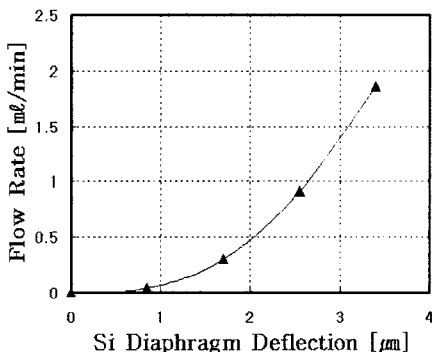


그림 3. Si 다이어프램 변위에 따른 출구방향 유속특성(입구압력: 20 kPa)
 Fig. 3. Flow characteristics of outlet direction as a function of various Si diaphragm deflection(inlet pressure: 20 kPa).

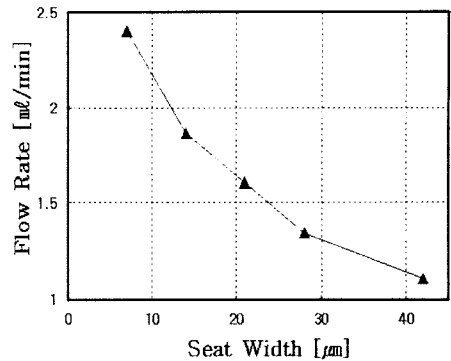
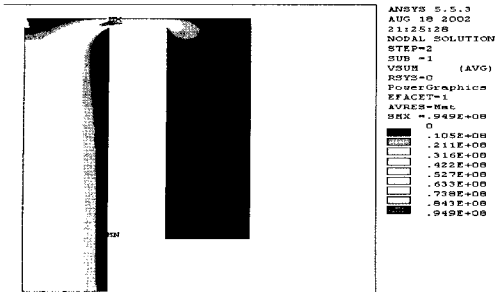


그림 4. 시트 면적에 따른 MCA 밸브의 유속특성
 Fig. 4. Flow characteristics of the MCA valve as a function of various valve seat area.

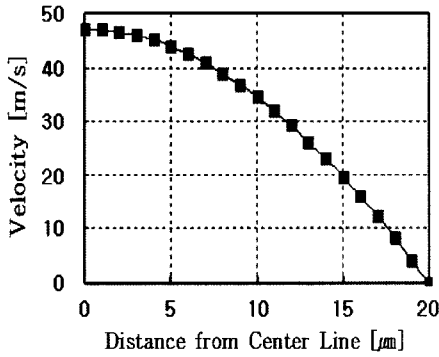
그림 4는 입구압력 20 kPa에서 밸브 시트의 크기에 따른 유속특성을 나타낸 것이다. 밸브 시트의 크기가 40 μm 이상으로 증가했을 때, 출구를 통과하는 유량이 1.2 ml/min까지 작아짐을 알 수 있다. 이는 시트의 크기가 너무 클 경우, 유체가 표면장력에 의해 유체 고유의 에너지를 상실하면서 손실 수도가 커지기 때문으로 사료된다^[11]. 그러나, 시트의 크기가 커지더라도 유량은 감소하지만 난류는 형성되지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 밸브 시트를 통과하는 유체가 층류를 유지할 수 있도록 Si 다이어프램의 변위를 최소 3.4 μm, 시트크기를 14 μm로 설계하여 출구 시트부의 유속분포를 분석하였다.

그림 5는 입구압력을 20 kPa로 고정시키고 Si 다이어프램의 변위를 3.4 μm, 시트 크기를 14 μm에서 분석한 MCA 밸브의 출구 및 시트부 유속분포를 각각 나타낸 것이다. MCA에 DC 30 V를 인가할 때, 3.4 μm의 변위가 발생하는 Si 다이어프램이 개방되면서 그림 5(a)와 같은 율파지수에서 볼 수 있듯이 유속이 흐르지 않는 출구 표면의 위층에 층류 저층이 생성되어 완전한 층류가 형성됨을 알 수 있다. 또한, 그림 5(b)와 같이 반경 18 μm인 출구방향 중심부에서 가장 빠른 유속이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 챔버내 입구압력에 따른 MCA밸브의 유속특성을 나타낸 것이다. 입구쪽 압력이 증가할수록 출구 방향의 유속이 지수함수의 형태로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 압력이 높아지더라도 시트부를 중심으로 한계 Reynolds 수를 유지하고 있으며, 유속이 포화하거나 난류가 발생하지 않음을 보여주는 것이다. 따라서, 본 연구에서 해석된 설계조건을 사용할 경우, 400 kPa 이상의 고압에서도 사용할 수 있는 고신뢰도를 가지는 MCA 밸브 제작이 가능함을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5. (a) 출구와 시트부 유속 윤곽지수 및 (b) 채널 중심에서의 유속분포
 Fig. 5. (a) Velocity contours in outlet and seat (b) velocity profile in center of channel, respectively.

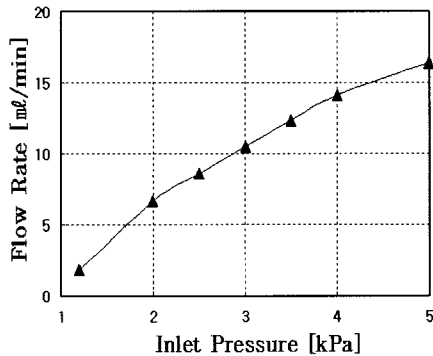
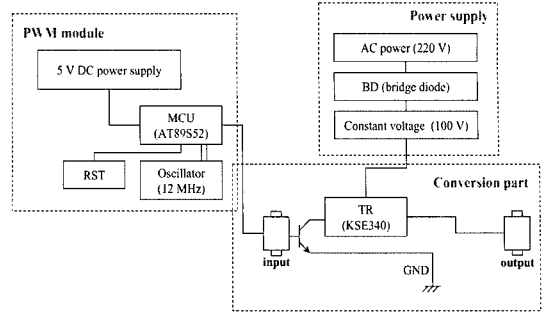
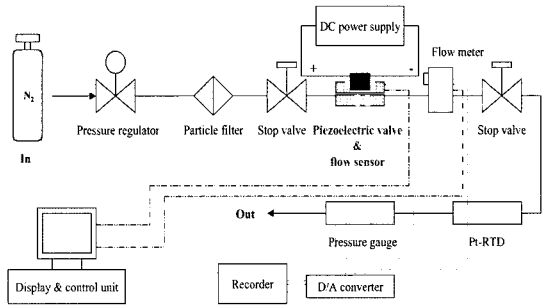


그림 6. 입구압력에 따른 MCA 밸브 유속특성
 Fig. 6. Velocity characteristics of the MCA valve as a function of inlet pressure.

본 연구에서는 그림 7(a)과 (b)와 같은 MCA의 구동 드라이버와 측정장치를 각각 제작하여 마이크로 MCA 밸브의 특성을 분석했다. 제작된 마이크로 MCA 밸브의 특성을 그림 7(b)와 같은 시스템을 사용하여 입구쪽과 출구쪽 압력의 차이를 0-50 kPa까지 변화시켜가며



(a)



(b)

그림 7. 제작된 마이크로 MCA 밸브의 특성 분석용; (a) 구동 드라이버와 (b) 유체제어시스템의 블록 다이어그램
 Fig. 7. Blok diagrams of (a) power driver and (b) fluidics control system for evaluation of the fabricated micro MCA valve.

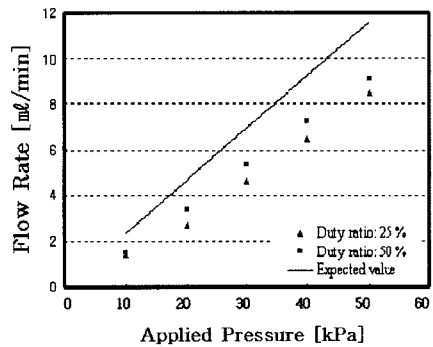


그림 8. 제작된 MCA 밸브의 인가압력에 따른 유량특성
 Fig. 8. Flow rate characteristics of the fabricated MCA valve as a function of applied pressure.

분석하였다. N₂ 가스를 유체로 사용하고 100 V DC 전압, 펄스 주기 200 Hz로 MCA 밸브를 구동했다.

그림 8은 듀티비를 25%와 50%로 각각 설정한 후, 각각 측정된 결과와 시뮬레이션 값을 비교한 것이다. 측정결과, 듀티비 25%일 때 인가압력 50 kPa에서

표 2. 제작된 MCA 밸브 특성
Table 2. Characteristics of the fabricated MCA valve

Parameters	Products	Specification
Working principle		Normally ON/OFF
Standard flow rate		5 sccm
Gas contact materials		Si
Sealing		Buckling effect
Operating pressure(inlet)		32.7 psi
Non-linearity		2.24 %FS
Repeatability		0.092 %FS
Leak rate		1.19×10^{-8} pa·m ³ /s

8.49 ml/min의 최대유량을 나타냈으며 비선형성은 5.77 %였다. 반면, 듀티비 50 %일 때의 최대유량은 9.13 ml/min이며 비선형성은 2.24 % FS로서, 듀티비 25 %보다 인가압력에 대한 유량의 선형성이 훨씬 우수함을 알 수 있다. 또한, 또한, 듀티비 50 %에서의 재현성은 0.092 % FS로서 AFC 밸브의 1.0 % FS보다도 우수하였다. 측정값과 이론값의 오차는, MCA에 전압이 인가 되면 MCA 자체에서 충전과 방전을 거듭하면서 변위 가지속적으로 변하기 때문에 밸브가 완전히 개방되어 있다고 가정한 이론값과 차이때문인 것으로 사료된다.

표 2는 본 연구에서 제작한 MCA 밸브의 최종 특성을 요약한 것이다. 제작된 마이크로 MCA 밸브의 비선형성과 반복성은 각각 2.24 %FS와 0.092 %FS으로 SUS(316 L)을 멤브레인으로 사용한 AFC사의 2.5 %FS와 0.1 %FS보다 우수하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 버클링 마이크로 MCA 밸브를 제작하기 위해 ANSYS를 사용하여 밸브 시트부와 다이어프램을 설계했으며 마이크로머시닝기술로 마이크로 MCA 밸브를 제작한 후, 특성을 분석하였다. 또한, 밸브의 실제 유체 흐름과 유속분포를 분석하기 위해 시트의 면적과 다이어프램의 변위를 조절하면서 유속의 선형성 유지 및 고압에서도 층류를 형성할 수 있는 최적의 시트 형상을 설계했으며 밸브 시트 면적과 다이어프램의 변위량은 유체의 에너지 손실 및 점성력 변화를 유발함으로써 유속에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 다이어프램의 변위가 너무 작고 밸브 시트의 면적이 너무 넓을 경우, 유체가 출구를 통과하지 못하거나 난류를 형성함을 알 수 있었다. 제작된 마이크로 MCA 밸브는 선형성, 반복성 그리고 누설

특성이 우수함을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 마이크로 MCA 밸브는 각종 의료 및 생체기기, 수송기계 엔진용 연료분사기 등에 응용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 울산대학교의 연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] N. T. Nguyen, S. Schuber, S. Richter, and W. Dotzel "Hybrid-assembled micro dosing system using silicon-based micropump and mass flow sensor", *Sensors & Actuators*, vol. A 69, pp. 85-91, 1998.
- [2] M. Stehr, S. Messner, H. Sandmaier, and R. Zengerle, "The VAMP - a new device for handling liquids or gases", *Sensors & Actuators*, vol. A 57, pp. 153-157, 1996.
- [3] P. Murali, "PZT Thin films for microsensors and actuators: where do we stand?", *IEEE Tran. on Ultrasonics, Ferroelectronics, & Frequency Control*, vol. 47, no. 4, pp. 903-915, 2000.
- [4] G. S. Chung, J. M. Kim, S. J. Yoon, S. J. Jeong, and J. S. Song, "Design, fabrication and characteristics of a MCA valve", *J. of the Korean Sensors Soc.*, vol. 13, no. 3, pp. 230-235, 2004.
- [5] W. Schomburg and C. Coll, "Design optimization of bistable micro-diaphragm valves", *Sensors & Actuators*, vol. A 64, pp. 259-263, 1998.
- [6] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, and T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", *Sensors & Actuators*, vol. A 83, pp. 188-192, 2000.
- [7] J. Ulrich and R. Zengerle, "Static and dynamic flow simulation of a KOH-etched micro-valve using the finite- element method", *Sensors & Actuators*, vol. A 53, pp. 379-385, 1996
- [8] X. Yang, "A MEMS valve for the MIT microengine", *A Master's Thesis of UC Berkeley*, pp. 79-81, 2001.
- [9] G. S. Chung and J. M. Kim, "Anodic bonding characteristics of MLCA/Si-wafer using a sputtered Pyrex #7740 glass layer for MEMS applications", *Sensors & Actuators A*, vol. 116, pp. 352-356, 2004.
- [10] S. Weichel, R. Rous, and M. Rindahl, "Silicon-to-silicon wafer bonding using evaporated glass", *Sensors & Actuators*, vol. A70, pp. 179-184, 1998.
- [11] 신정철, 양우정, 기초 유체역학, 구민사, pp. 250-254, 2000.



이종화 (Jong-Hwa Lee)

- 1974년 2월 울산공대 전기공학과(공학사)
- 1976년 2월 한국과학원 재료공학과 (공학석사)
- 1986년 7월 영국 Brunel Univ. 물리학과 (공학박사)
- 1998년 8월~1999년 8월 러시아 Novosibirsk State Tech. Univ. (방문교수)
- 현재 울산대학교 전기전자정보 시스템공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체소자 및 VLSI 설계



정귀상 (Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 Toyahash Univ. of Tech. (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보 시스템공학부 교수
- 주관심분야 : Si, SOI, SiC, SiCN, AIN-M/NEMS