

열공압 방식의 polydimethylsiloxane 마이크로 펌프의 제작 및 특성

論 文

53C-6-9

Fabrication and Characteristics of Thermopneumatic-Actuated Polydimethylsiloxane Micropump

金 珍 浩* · 文 敏 徹* · 金 主 豪* · 金 榮 浩** · 金 翰 秀*** · 韓 慶 熙§ · 金 容 商§§
(Jin-Ho Kim · Min-Chul Moon · Ju-Ho Kim · Young-Ho Kim · Han-Soo Kim ·
Kyung-Hee Han · Yong-Sang Kim)

Abstract - A thermopneumatic-actuated polydimethylsiloxane (PDMS) micropump has been fabricated and their properties are characterized. The diffusers are used as a flow-rectifying element instead of passive check valves. The advantages of the proposed microvalve are of the low cost fabrication process and the transparent optical property using PDMS and indium tin oxide (ITO) glass. We presented the PDMS micropump that is easily integrated with the in-channel PDMS microvalves on the same substrate. The flowrate of the micropump increases linearly as the applied pulse voltage to the ITO heater increases. The fabricated ITO heater resistance is 6.54 k Ω . The peak of the flow rate is observed at the duty ratio of 10 % for the applied pulse voltage of 55 V at 6 Hz and the maximum flow rate of 78 nl/min is measured.

Key Words : micropump, thermopneumatic-actuation, PDMS, ITOheater, diffuser

1. 서 론

마이크로 펌프는 micro-TAS (Micro Total Analysis System) 및 lab-on-a-chip 응용에 있어 매우 중요한 유체 제어 디바이스로 주목 받고 있다. 마이크로 펌프는 lab-on-a-chip에서 화학 및 바이오 유체를 이동시키는데 사용되어 진다. 마이크로 펌프는 여러가지 구동 방식으로 개발되었다. 예를 들면, 압전 방식[1], 전자력 방식[2], 전기력 방식[3], 형상 기억 합금 방식[4], 열공압력 방식[5], 전기삼투압 방식[6] 등이 있다.

lab-on-a-chip의 개발을 위해서는 미세 유체 제어 디바이스들 (마이크로 밸브, 마이크로 펌프, 마이크로 채널, 마이크로 믹서 등)의 집적이 필수적으로 요구된다. 그러나 다른 구조를 갖는 마이크로 밸브와 마이크로 펌프를 하나의 기판에 집적하려면 시스템의 구조가 매우 복잡해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 같은 구조를 갖는 마이크로 밸브 및 마이크로 펌프를 개발해야 한다. 다시 말하면, 마이크로 밸브와 마이크로 펌프의 채널 cavity 모양을 제외한 나머지 구조를

동일하게 설계하여 제작하는 것이다.

본 연구의 목적은 열공압력으로 구동하는 PDMS 마이크로 펌프를 제작하고 특성을 분석하는데 있다. 본 연구에서 제안하는 마이크로 펌프는 수동형 밸브 대신 diffuser를 사용한다. 제안된 마이크로 펌프는 보고되어진 인-채널구조의 PDMS 마이크로 밸브[7]와 동일한 공정과정으로 제작하였다. 그러므로 제안된 마이크로 펌프는 인-채널구조의 PDMS 마이크로 밸브와 같은 기판위에 쉽게 집적하여 제작 할 수 있다. 제안된 마이크로 펌프는 채널 cavity, membrane, 열공압 챔버를 모두 PDMS를 사용하여 제작하였고 히터는 indium tin oxide (ITO)로 제작하여 값이 저렴하고 완전히 투명하다는 장점을 가진다. 제작한 마이크로 펌프의 최적 동작 전압을 분석하기 위해서 인가 펄스 전압의 크기와 주파수 및 duty 비를 변화시키며 유량을 측정하였다.

2. 마이크로 펌프의 구조 및 동작원리

그림 1(a)는 마이크로 펌프의 단면도이고 유리 층, ITO히터, PDMS 열공압 챔버, PDMS membrane, 그리고 PDMS 채널 층으로 구성되어 있다. 그림 1(b)는 본 연구에서 제안된 마이크로 펌프의 cavity를 보여주고 다른 마이크로 유체 디바이스와 쉽게 집적할 수 있다. 마이크로 펌프의 PDMS cavity는 펌프 챔버, diffuser, inlet hole, outlet hole, 저장소로 구성되어 있다. 그림 1에서는 이전에 발표된 마이크로 밸브[7]의 구조와 같은 구조로 마이크로 펌프를 제작하였음을

* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 水原大 電子材料工學科 教授 · 工博
*** 正 會 員 : 斗原工科大学 電氣科 助教授 · 工博
§ 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 教授 · 工博
§§ 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 副教授 · 工博
接受日字 : 2003年 12月 23日
最終完了 : 2004年 4月 19日

알 수 있다. diffuser의 inlet 폭, 길이, 그리고 divergence 각도는 80 μm , 1500 μm , 10° 이다. 펌프 챔버의 지름과 깊이는 3.5 mm와 130 μm 로 제작하였다. 열공압 챔버의 깊이는 130 μm 이고 면적은 $\pi \times 1.75 \times 1.75 \text{ mm}^2$ 제작하였고 ITO 히터의 dimension은 $2.35 \times 2.35 \text{ mm}^2$ 로 제작하였다.

그림 2는 diffuser 펌프의 동작원리를 보여준다. 마이크로 펌프의 ITO히터에는 펄스 전압이 인가되어지고, 이때 열공압 챔버 내의 공기가 열로 인해 부피가 팽창하여 PDMS membrane을 휘게 만든다. 이로 인해 펌프 챔버의 부피는 줄어들어 양단의 diffuser를 통해 유체를 밀어낸다. 반대로 ITO 히터의 히터에 전압이 off 되면 열공압 챔버 내의 공기의 부피가 감소하므로 펌프 챔버의 부피가 증가되어 양단의 diffuser를 통해 유체가 유입된다.

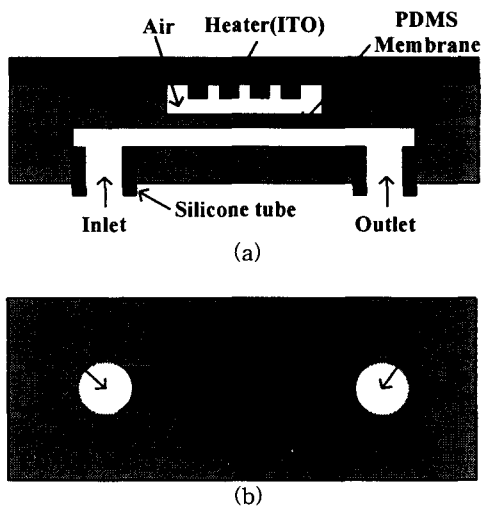


그림 1. 제안된 마이크로 펌프의 구조. (a) 마이크로 펌프의 단면도, (b) PDMS층의 평면도.

Fig. 1 The configuration of the proposed micropump. (a) The cross sectional view of the micropump, (b) The cavity of PDMS replica of the micropump.

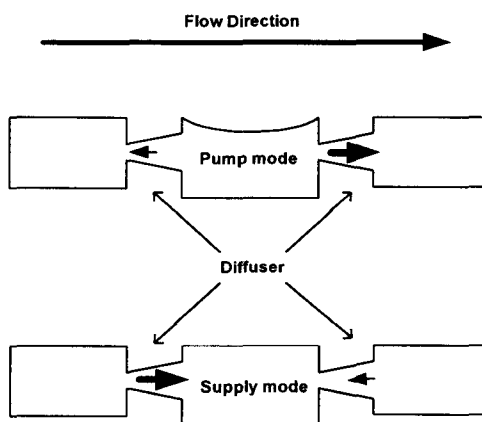


그림 2. diffuser 마이크로 펌프의 동작개념.
Fig. 2 The conceptual operation of the diffuser micropump.

3. 실험

제안된 마이크로 펌프의 제작 공정과정은 집적연구를 목적으로 이전에 발표된 마이크로 벨브[7]와 같은 방법으로 제작되었다. 제안된 마이크로 펌프는 3개의 다른층 (ITO 히터, PDMS membrane, PDMS 채널)을 조립하여 제작한다.

마이크로 펌프의 PDMS cavity를 제작하기위해 음성 감광제 (SU-8 50)를 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께로 스핀 코팅한 후 사진 공정을 통해 cavity를 형성한다. 그림 3과 같이 PDMS A, B 타입 용액을 10 : 1 비율로 섞은 후 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 부은 후 상온에서 24시간 동안 curing 한다. curing이 끝난 후 PDMS replica를 실리콘 웨이퍼에서 조심스럽게 분리한다. inlet과 outlet 튜브를 연결하기 위하여 PDMS replica에 기계적으로 구멍을 형성한다. 그림 4(a)는 마이크로 펌프의 패턴이 형성된 PDMS cavity 층의 SEM 사진이다.

PDMS 열공압 챔버와 membrane을 제작하기위해 음성 감광제 (SU-8 2075)를 실리콘 웨이퍼 위에 130 μm 두께로 스핀 코팅 후 사진 공정을 통해 열공압 챔버 cavity를 형성한다. 차후 공정에서 PDMS 층이 실리콘 웨이퍼로 부터 잘 분리되게 하기위해 실리콘 표면 위에 CH₄ 플라즈마 처리를 수행하여 fluorocarbon 필름[8]을 형성하였다. 그림 3과 같이 PDMS 혼합용액을 SU-8 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼 위에 스핀 코팅한다. PDMS 층의 전체 두께는 900 μm 로 코팅하였고 열공압 챔버의 두께가 130 μm 임을 고려하면 PDMS membrane 두께는 770 μm 이다. 코팅한 PDMS를 90 °에서 30 분 동안 curing하였다. 그림 4(b)는 PDMS 열공압 챔버와 membrane의 SEM 사진이다.

그림 3과 같이 ITO 히터 공정은 먼저 유리 기판 위에 sputter 장비를 사용하여 ITO를 170 nm 두께로 증착하였다. 증착된 ITO의 면저항은 10 Ω/\square 이다. ITO 히터를 제작하기 위해 PR 패턴공정을 실시하였다. 그 후 ITO는 FeCl₃/HCl 용액에서 에칭하였다. 마지막으로 PR을 제거하여 ITO 히터를 완성하였다.

본 실험에서는 PDMS층 간의 접착 및 PDMS와 유리와의 접착을 위해 UV 오존 클리너를 사용하였다. 그림 3과 같이 PDMS 열공압 챔버 층과 PDMS 채널층을 오존 클리너를 이용하여 오존 처리를 수행 후 접착하였다. 접착 후 PDMS 층으로부터 실리콘 웨이퍼를 분리하였다. 그 후 열공압 챔버와 ITO 히터가 있는 유리층을 같은 방법으로 접착한다. 그림 5는 완성된 마이크로 펌프의 사진이다.

본 실험에서는 마이크로 펌프 내부에 유체를 채우면서 생기는 버블을 최소화하기위해 표면장력이 작은 메탄올을 사용하였다. 유량 측정 시 inlet과 outlet의 압력 차이는 항상 일정하게 유지하며 측정하였다. 유량 측정은 마이크로 펌프의 ITO히터에 펄스 전압을 인가하고 outlet 튜브 내의 메탄올과 공기의 경계면의 이동거리를 통해 산출하였다.

4. 결과 및 토론

그림 6은 마이크로 펌프의 히터에 펄스 전압 40 V 부터 60 V 까지 5 V 간격으로 변화시켜 인가 할 때의 유량의 변화를 보여준다. 이때 주파수와 duty 비는 6 Hz와 10 %로 고

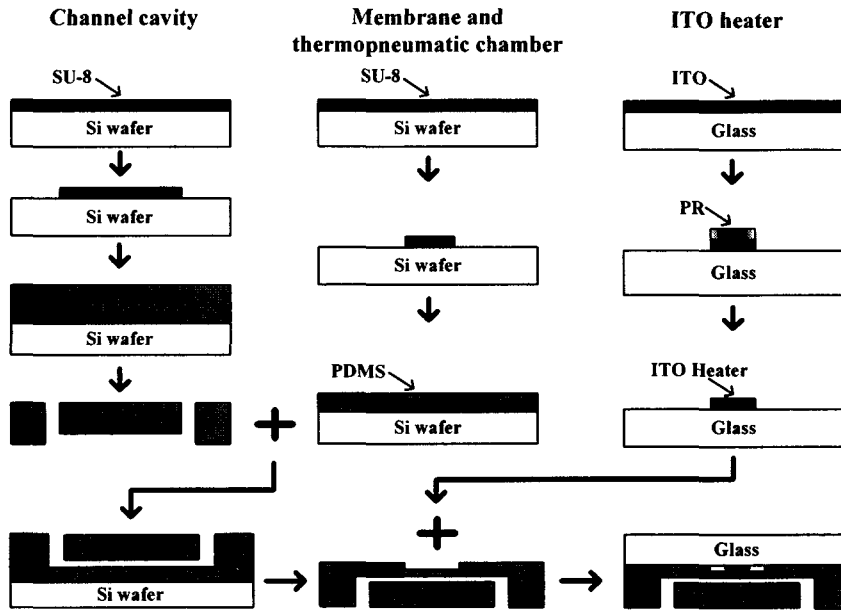
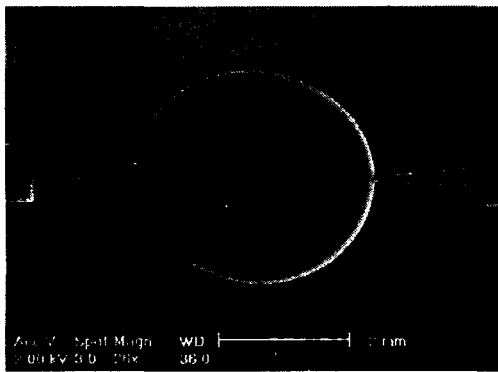
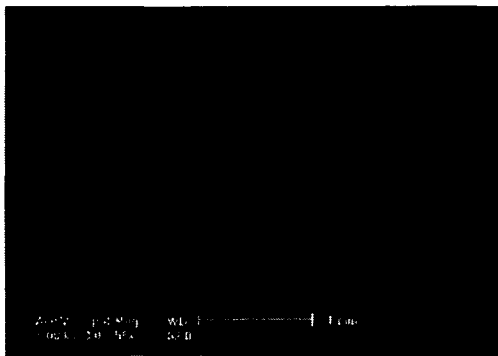


그림 3. 제안된 마이크로 펌프의 제작공정.
 Fig. 3 The fabrication process of the proposed micropump.



(a)



(b)

그림 4. PDMS replication의 SEM 이미지. (a) 펌프 챔버와 diffuser, (b) 열공압 챔버와 membrane.
 Fig. 4 The SEM images of the PDMS replication. (a) The SEM image of the pump chamber and diffuser of PDMS replication, (b) The thermopneumatic chamber and membrane.



그림 5. 완성된 PDMS 마이크로 펌프의 사진.
 Fig. 5 The photograph of the fabricated PDMS micropump.

정하였다. 히터의 인가 펄스 전압이 증가함에 따라 유량은 선형적으로 비례 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 유량의 변화는 펄스 전압이 증가에 따라 membrane의 변위가 비례적으로 증가하기 때문으로 사료된다[9].

인가 펄스 전압의 duty 비에 따른 유량을 측정하고 그림 7에 보여주었다. 이때 펄스 전압은 55 V, 주파수는 6 Hz를 인가하였다. 그림 7에서 duty 비가 10 %에서 유량의 최대값을 관찰할 수 있고 유량은 78 nl/min이다. 마이크로 펌프의 최적 duty 비인 10 %에서의 유량이 다른 duty 비 영역에서의 유량 보다 현저히 크다는 것을 관찰할 수 있다. duty 비 5 %를 인가 시 10 % 보다 유량이 작은 원인은 열에 의한 공기 팽창이 불충분하게 발생되어 변위가 작게 생성된 것으로 사료된다. 이와 반대로 duty 비 15 % 부터 25 % 에서는 열공압 챔버 내부의 공기가 완전히 식지 못하여 변위가 작게 생성된 것으로 사료된다.

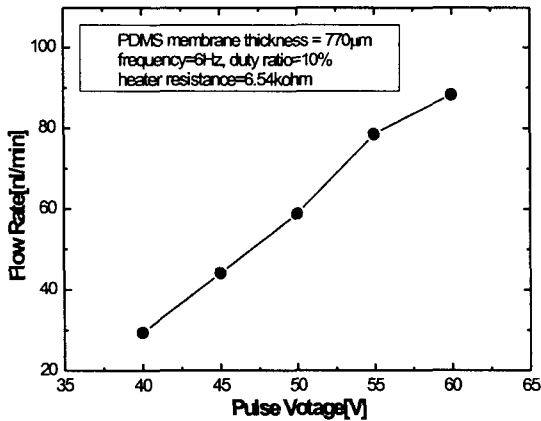


그림 6. 인가 펄스 전압에 따른 유량 특성.
 Fig. 6 Flow rates of the micropump with applied pulse voltage variation.

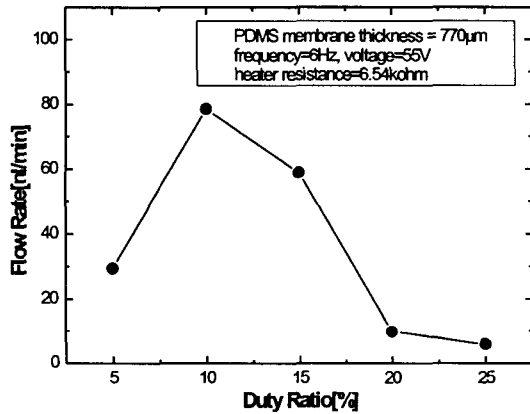


그림 7. duty 비의 변화에 따른 유량 특성.
 Fig. 7 Flow rates of the micropump as a function of the duty ratio.

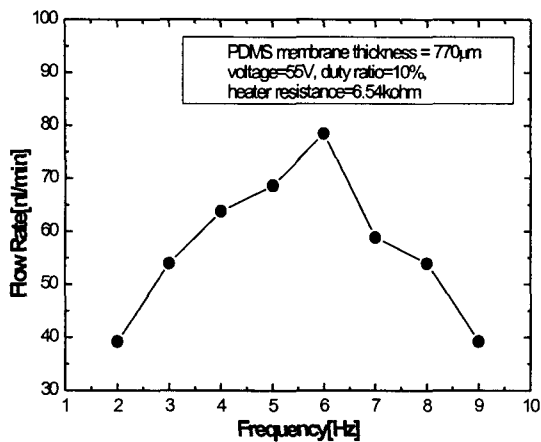


그림 8. 주파수에 따른 유량 특성.
 Fig. 8 Flow rates of the micropump as a function of applied frequency.

그림 8은 펄스 전압과 duty 비를 55V와 10%로 고정하고 주파수를 2 Hz부터 9 Hz로 변화시켜 인가하였을 경우의 유량을 보여준다. 최대 유량은 6 Hz에서 78 nl/min이 측정되었다. [10]에 의해 연구된 모델에 따르면 유량 Q는 다음과 같이 주어진다.

$$Q = 2 V f \frac{(\xi_n / \xi_d)^{1/2} - 1}{(\xi_n / \xi_d)^{1/2} + 1} \quad (1)$$

여기서 Q는 유량, V는 한 주기 당 펌프 챔버의 부피변화, f는 펄스 전압의 주파수, ξ_n 와 ξ_d 는 nozzle과 diffuser의 압력 손실의 coefficient이다. 주파수 2 Hz부터 6 Hz까지는 (1)식에 의한 원인으로 유량이 비례적으로 증가하는 것으로 사료된다. 반면에 주파수 6 Hz부터 9 Hz까지는 열공압 챔버 내부 공기의 느린 응답 속도로 인하여 유량이 감소하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 열공압 방식의 PDMS 마이크로 펌프를 제작하고 특성을 분석하였다. 제안된 마이크로 펌프는 인-채널 방식의 마이크로 밸브와 같은 기판 위에 쉽게 집적 가능함을 보여주었다. 제안된 마이크로 펌프의 제작공정은 매우 간단하였다. 마이크로 펌프의 유량은 ITO 히터의 인가 펄스 전압이 증가함에 따라 선형적으로 비례 증가하였고 매우 잘 제어됨을 알 수 있었다. 펄스 전압 55 V (duty 비 10%, 주파수 6 Hz)에서 최대유량을 보였으며 유량은 78 nl/min이었다. 제작된 마이크로 펌프의 특성은 일회용 약물전달 시스템 응용에 적합함을 관찰하였다.[11]

참 고 문 헌

- [1] Anders Olsson, Peter Enoksson, Gran Stemme, and Erik Stemme, "Micromachined Flat-Walled Valveless Diffuser pumps," *Journal of Microelectromechanical System*, vol.6. pp. 161-166, 1997.
- [2] R. Zengerle, J. Ulrich, S. Kluge, M. Richter and A. Richter, "A Bidirectional Silicon Micropump," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.50. pp. 81- 86,1995.
- [3] Sebastian Bohm, Wouter Olthuis and Piet Bergveld, "A Plastic Micropump Constructed with Conventional Techniques and Materials," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.77. pp. 223-228, 1999.
- [4] Eiji Makino, Takashi Mitsuya and Takayuki Shibata, "Fabrication of TiNi Shape Memory Micropump," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.88. pp.256-262, 2001.
- [5] Ok Chan Jeong and Sang Sik Yang, "Fabrication and Test of a Thermopneumatic Micropump with a Corrugated p+ Diaphragm," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.83. pp. 249-255, 2000.
- [6] Senol Mutlu, Cong Yu, P. Selvaganpathy, Frantisek Svec, Carlos H. Mastrangelo, and Jean M.J. Frechet, "Micromachined Porous Polymer for Bubble Free

Electro-osmotic Pump," *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2002*, pp.19-23, 2002.

- [7] Jin-Ho Kim, Kwang-Ho Na, C J Kang, D. Jeon, and Yong-Sang Kim, "Thermopneumatic-actuated PDMS Microvalve," *Microelectronic Engineering*, vol.71, pp.119, 2004
- [8] Kazuo Hosokawa and Ryutarō Maeda, "Low-Cost Technology for High-Density Microvalve Arrays Using Polydimethylsiloxane(PDMS)," *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical System, MEMS 2001*, pp.531-534, 2001.
- [9] Ok Chan Jeong and Sang Sik Yang, "Fabrication of a Thermopneumatic Microactuator with a Corrugated p+ Silicon Diaphragm," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.80, pp.62-67, 2000.
- [10] Anders. Olsson, Gran. Stemme, and Erik. Stemme, " A Valve-less Planar Fluid Pump with Tow Pump Chambers," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol.A46-47, pp.549-556, 1995.
- [11] Bourouina, Tarik, Bossebœuf, Alain, and Grandchamp, Jean-Paul, "Design and simulation of an electrostatic micropump for drug-delivery applications," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 7 no. 3, pp.186-188, 1997

김 주 호(金主豪)



1979년 1월 1일 생. 2004 년 명지대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 석사과정

E-mail : juneau@mju.ac.kr

김 영 호(金榮浩)



1954년 6월 12일생. 1977년 연세대 전기공학과 졸업. 1983년 연세대 대학원 전자재료공학과 졸업(공학), 현재 수원대 전자재료공학과 교수

Tel : (031) 220-2663, Fax : (031) 220-2699

E-mail : yhkim@suwon.ac.kr

김 한 수(金翰秀)



1965년 3월 9일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과(공학). 1995년~1999년 삼성전자 반도체 총괄 근무. 현재 두원공과대학 전기과 조교수

Tel : (031) 670-7169, Fax : (031) 670-7160

E-mail : hansoo@doowon.ac.kr

저 자 소 개

김 진 호(金珍浩)



1975년 12월 24일생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 입학, 현재 동 대학원 석사과정

E-mail : jhkim@boehydis.com

문 민 철(文敏徹)



1978년 10월 6일 생. 2004 년 명지대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 석사과정

E-mail : gkstjfdk@mju.ac.kr

한 경 희(韓慶熙)



1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학), 현재 명지대 전기공학과 교수

Tel : (031) 330-6359, Fax : (031) 321-0271

E-mail : hkh@mju.ac.kr

김 용 상(金容商)



1965년 6월 5일생. 1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학), 1999년~2001년 UC Berkeley 방문 연구원, 현재 명지대 전기공학과 부교수

Tel : (031) 330-6365, Fax : (031) 321-0271

E-mail : kys@mju.ac.kr