

정전기장 유도된 잉크젯 프린터 헤드를 이용한 탄소나노튜브 잉크의 Drop-On-Demand 특성 연구

論 文

56-8-16

The Analysis of Drop-On-Demand Characteristic of Electrostatic Field Induced Inkjet Head System with Carbon Nano Tube (CNT) Ink

崔在鎔* · 金容載** · 孫尙郁*** · 金永珉§ · 李錫漢† · 邊渡泳§§ · 高漢瑞§§§
(J. Y. Choi · Y. J. Kim · S. U. Son · Y. M. Kim · S. H. Lee · D. Y. Byun · H. S. Ko)

Abstract - This paper presents the DOD (Drop-On-Demand) characteristic using the electrostatic field induced inkjet printing system. In order to achieve the DOD characteristic of electrostatic field induced inkjet printing, applied the bias voltage of 1.4 kV and the pulse voltage of 2.0 kV ~ 2.7 kV using high voltage pulse generator. Electrostatic field induced droplet ejection is directly observed using a high-speed camera and for investigated DOD characteristic, CNT ink used. The electrostatic field induced inkjet head system has DOD characteristic using pulse generator which can be applied pulse voltage. The bias voltage has a good condition which form meniscus and has micro dripping mode for small size micro droplet. Also, the droplet size decreases with increasing the applied pulse voltage. This paper shows DOD characteristic at electrostatic field induced inkjet head system. Therefore, electrostatic DOD inkjet head system will be applied industrial area comparing conventional electrostatic inkjet head system.

Key Words : Electrostatic Field, Droplet Ejection, Inkjet Printing, DOD (Drop-On-Demand), Pulse Voltage

1. 서 론

최근 20여 년간 정보화 사회 및 첨단기술의 비약적인 발전으로 인하여 마이크로 및 나노 분야의 기술은 군사, 항공우주, 자동차, 정보통신, 바이오, 의료, 가전 등 광범위하게 응용되고 있으며 잉크젯 프린터 헤드, 압력센서, 가속도센서, 디스플레이소자 등이 상업적으로 성공하고 있다. 특히 MEMS 기술의 등장 이후, 마이크로 영역에서 유체를 제어하기 위하여 많은 마이크로 유체기기(microfluidic device)들이 다양한 목적으로 연구개발 되어 지고 있다. 기술적 및 상업적으로 가장 성공적인 MEMS 제품군에는 잉크젯 프린터 헤드(inkjet print head), 바이오 칩(Bio-Chip), μ -TAS (Micro Total Analysis System) 등 초소형 유체 시스템 응용제품이 있다. 이 중 잉크젯 프린터 헤드는 연간 US \$500억(Cartridge 포함)의 시장을 형성하는 잉크젯 프린터의 핵심부품으로서, 잉크젯 프린터가 프린팅시장의 주력제품으로 성장하는 데 큰 기여를 하고 있다[1-3]. 또한 잉크젯 프린터 헤드는 여러 분야에서 응용이 기대되어 지고 있는데, 특히 IT분야에서 반

도체 제조공정의 기술 활용이 기대되고 있다. 기존 고집적·미세 구조물 제조에 이용되는 반도체 공정 기술 기반의 MEMS/NEMS 기술은 근본적으로 화학적 반응을 통한 적층·식각 과정을 통해서 이루어지는 과정이므로 식각액, 반응가스, 반응 후 잔존물 등의 유해물질의 배출이 심각하다. 이러한 공정과정을 잉크젯을 활용하여 원하는 부위에만 선택적으로 패터닝 하여 상대적으로 유해물질을 격감할 수 있다[4]. 특히 평판디스플레이(FPD : Flat Panel Display)의 비약적인 발전에 힘입어 디스플레이산업의 시장 규모가 가파르게 성장하면서, 디스플레이 산업이 기술적인 측면에서 경량화, 슬림화, 대형화와 맞물려 가격 하락에 따른 압력 또한 거세져 기존 반도체 공정 기술보다 획기적으로 공정 과정을 줄일 수 있는 잉크젯 헤드 프린터 기술이 시장 및 경쟁력 확보를 위한 신기술로 인정받아 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 잉크젯 프린터 헤드 기술은 디스플레이 산업뿐만 아니라, 각종 Micro sensor, Bio chip, RFID, Micro 적층 안테나, 생물세포 배양 등 그 응용 범위가 점차 확대될 것으로 기대된다.

이러한 잉크젯 프린터 헤드 기술은 현재 열을 이용하는 열(thermal) 방식, 피에조(piezo) 소자에 의한 압력을 이용하는 피에조 방식이 현재 가장 많이 쓰이고 있다[5]. 그러나 열 방식을 이용한 잉크젯 헤드(inkjet head)는 대면적 공정에 적용하기 위한 Array 배열 시 열 문제가 발생할 수 있고, 열기포로 인하여 잉크 변성이 발생할 수 있다는 문제점이 있다[6]. 따라서 산업용 잉크젯 프린터 헤드 기술은 현재 피에조 방식이 가장 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 결과로 나노 잉크를 패터닝 하거나[7], LCD color filter[8] 제조 등의 결과가 나타나고 있다. 그러나 피에조 잉크젯 헤드 방식도 노즐의 밀도를 높이기 어려워 Array 방식을 구현하기 힘들고, 액적의 크기가 노즐의 비례하여 한 노즐에서 다양한 크기의 액적

† 교신저자, 正 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 教授 · 工博
E-mail : lsh@ece.skku.ac.kr

* 悲 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程

** 悲 會 員 : 成均館大學 機械工學部 博士修了

*** 悲 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 博士課程

§ 正 會 員 : 成均館大學 지능시스템연구센터 研究教授 · 工博

§§ 悲 會 員 : 建國大學 機械航空工學部 教授 · 工博

§§§ 悲 會 員 : 成均館大學 機械工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 6月 8日

最終完了 : 2007年 7月 11日

을 만들 수 없다는 문제[9-10]로 인해 아직 산업에 적용하기는 부적합하며, 그 한계를 극복하기엔 보다 많은 시간과 노력이 필요하다. 또한 위의 잉크젯 프린터 헤드 기술은 미국 일본 유럽 등 선발 업체들이 주로 관련 원천 특허를 독점하고 있는 상태이므로 기술 선점이 쉽지 않다[11].

따라서 본 논문에서는 위의 열 방식과 피에조 방식의 단점을 극복할 수 있는 정전기장이 유도된 DOD (Drop-On-Demand) 잉크젯 프린터 헤드 기술을 제안한다[12]. 정전기장이 유도된 잉크젯 프린터 헤드 방식은 잉크의 충격이 적으며, 다양한 종류의 특성을 갖는 잉크의 사용이 가능하며, 액적 크기의 제어가 더 쉽다는 장점을 가진다[13-14].

정전기장이 유도된 방식의 잉크젯 프린터 헤드 기술을 적용하기 위해 Capillary tube 및 백금 전극을 이용한 정전기적 잉크젯 헤드 및 시스템을 제작하고, 높은 도전율 (conductivity)를 갖는 CNT 잉크를 사용하였다. 또한 높은 전압을 원하는 파형으로 만들 수 있는 Pulse generator를 이용하여 정전기력에 의한 DOD 특성을 측정하였다. DOD는 산업용 잉크젯 프린팅 기술에 있어 가장 중요한 특성으로서, 원하는 장소에 액적을 토출함을 말한다.

그러므로 본 논문에서는 SWNT(Single Wall Nano Tube) Micro-droplet을 DOD 방식으로 토출하는 정전기적 방식의 잉크젯 프린팅 헤드 기술을 제안한다.

2. 소자 제작 및 실험 장치

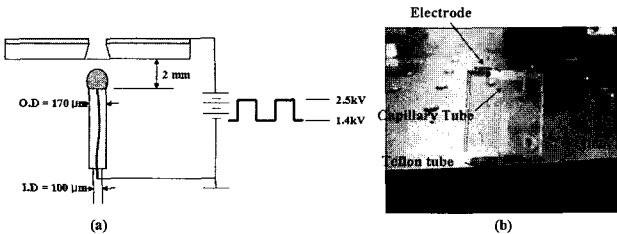


그림 1 (a) 외경 170 μm, 내경 100 μm의 Capillary tube 와 1 mm ~ 2.5 mm의 구멍이 뚫려 있고 Capillary tube와 2 mm의 거리를 두고 있는 전극의 모식도, (b) Capillary inkjet head의 모습

Fig. 1 (a) Schematic diagram of electrode with a hole size of 2 mm and nozzle with an inner diameter of 100 μm and an outer diameter of 170 μm, (b) Photograph of inkjet head of capillary tube type

본 논문에서는 정전기장이 유도된 잉크젯 헤드의 DOD 특성을 규명하기 위해, 그림 1 (a) 와 같이 내경이 100 μm인 Capillary tube 안에 50 μm 백금 선을 넣어 Ground를 설정하고, Teflon tube와의 Epoxy bonding으로 Fluidic system을 제작하였다. 또한 Glass wafer에 Al 증착 후, Sanding 방식으로 직경이 1 mm~2.5 mm 크기의 구멍을 뚫어 전극을 구성하였다. 그리고 Fluidic system과 전극을 동시에 제어하기 힘든 점을 극복하고자, 그림 1 (b)와 같이 Acrylic 가공을 통해 만든 특수지그에 이 둘을 조립하여 Capillary inkjet head을 제작하였다.

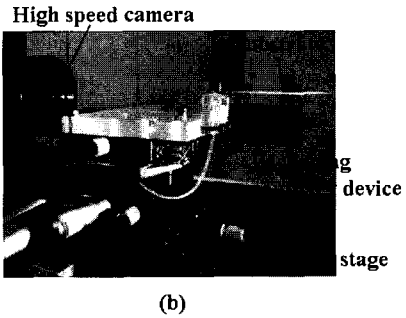
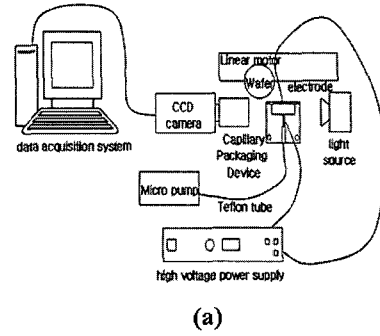


그림 2 (a) 전체 실험 장치의 모식도, (b) Capillary inkjet head를 실험 장치에 장착한 모습
Fig. 2 (a) Schematic diagram of experimental apparatus, (b) The photograph of assembly capillary inkjet head

그림 2 (a)는 제작된 Capillary inkjet head을 실험 장치에 장착한 모식도이다. 액적 토출의 DOD 특성 가시화를 위해 Micro zoom lens를 장착하고 125x512 해상도에서 초당 최대 15000장을 촬영할 수 있는 고속 카메라를 이용하였다. 고속 카메라는 컴퓨터에 USB로 연결되어, Photron FASTCAM의 소프트웨어를 통해 영상을 고속카메라 메모리 (4GB)에 임시로 저장한 다음 데이터 선별작업을 거쳐 컴퓨터 하드디스크로 최종 저장하게 된다. 그리고 사용된 고전압 펄스 발생장치는 TREK사의 TREK-610E 모델로, 전압 3 kV에서 주파수 1 kHz의 안정된 파형을 제공할 수 있다. 또한 Micro pump를 통해 유량을 조절하여 접지된 전극이 설치되어 있는 외경 170 μm (내경 100 μm)의 Capillary tube로 잉크를 공급하였다. 그림 2 (b)는 광학 스테이지 상에 Capillary inkjet head를 장착한 Head system을 보여주는 사진으로, 보다 정밀한 실험과 함께 고속카메라를 이용한 실험의 가시화가 이루어 질 수 있도록 구성하였다.

또한 잉크는 높은 도전율을 갖는 SWNT를 10분 동안의 컵혼(cup-horn) 초음파와 4시간 동안 170,000 g의 원심분리기 속에서 처리하여, CNT가 각각 음이온 계면활성제 (sodium dodecyl sulfate)에 의해 둘러싸인 채로 D2O에 부유하게 된 상태의 CNT 잉크를 사용하였다[15].

3. 잉크젯 헤드 특성

본 연구에서 구성한 측정 시스템을 이용하여 정전기장이 유도된 잉크젯 헤드의 DOD 특성을 측정하였다. 먼저, 잉크젯 헤드를 통한 잉크 액적이 토출되기 시작하는 바이어스 전

압(bias voltage)을 확인하기 위하여 DC전압 변화에 따른 잉크 토출 실험을 수행한 결과, CNT 잉크가 인가전압 1.4 kV에서 1.5 kV 사이에서 액적이 토출됨이 나타났다. 따라서 인가전압 1.5 kV이상에서 액적이 Dripping mode로 토출되며, 인가전압 1.4 kV가 Meniscus를 형성하는 전압임을 확인하였다.

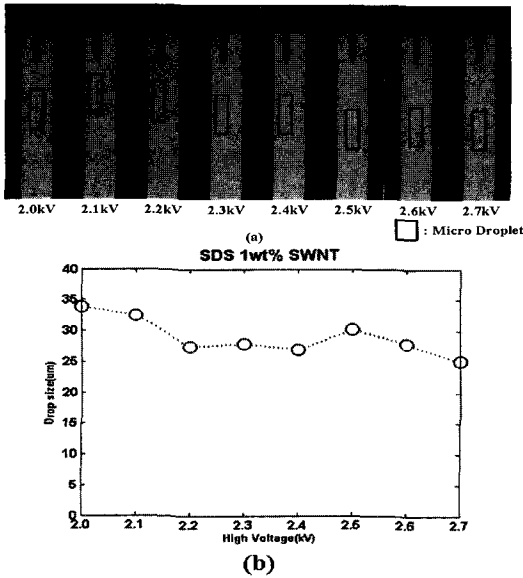


그림 3 (a) 펄스 전압 2.0 kV~2.7 kV에서의 Micro dripping mode의 DOD 액적 토출 모습,
 (b) 펄스 전압 2.0 kV~2.7 kV에서의 액적 크기
Fig. 3 (a) The images of droplet ejection in micro dripping mode of drop-on-demand with frequency of 50 Hz and pulse voltage 2.0 kV~2.7 kV,
 (b) Variations of droplet diameter; applied 2.0 kV ~ 2.7 kV the pulse voltage.

이러한 실험 결과를 토대로 액적이 토출되기 직전인 구형파 바이어스 전압을 1.4 kV로 설정하고 펄스 전압(pulse voltage)을 2.0 kV 이상으로 설정하였다. 또한 Duty ratio는 1%, 마이크로 펌프의 유량은 0.1 ul/min으로, 인가 주파수는 50 Hz로 설정하여, 펄스 전압 변화에 따른 잉크 액적 토출 특성을 고속카메라를 이용하여 촬영하였다.

그림 3 (a)는 펄스 전압이 2.0 kV~2.7 kV에서의 DOD 특성을 보여준다. 바이어스 전압인 1.4 kV를 인가한 상태에서, 2.0 kV 이상의 펄스 전압을 인가하게 되면, Micro dripping mode가 나타나게 되어 작은 액적 크기를 얻을 수 있게 된다. 따라서 바이어스 전압에서 원하는 메니스커스가 형성된다면, 그 이상의 펄스 전압을 인가하여 원하는 액적 크기를 원하는 곳에 패터닝 할 수 있는 DOD의 특성이 나타나게 된다. 그림 3 (b)는 펄스 전압이 2.0 kV~2.7 kV의 DOD 상태에서의 액적 크기를 측정된 결과로써, Micro dripping mode 상태이므로, 매우 작은 크기의 액적을 얻을 수 있다. 또한 펄스 전압이 높을수록 액적 크기가 작아지므로 결국, DC 전압의 실험결과와 마찬가지로 인가전압이 높을수록 같은 노즐 크기에서 얻을 수 있는 액적 크기는 더 작아진다.

그림 4은 유량이 0.1 ul/min이며, 바이어스 전압 1.4 kV, 펄스 전압이 2.5 kV, Duty ratio 10%, 주파수가 0.5 kHz인 구형파를 인가했을 때의 DOD 특성을 보여주는 그림이다. 액적이 펄스 전압 상태에서 매우 짧은 시간에 토출되므로 현재 보유하고 있는 Pulse generator의 파형이 안정되면서 가장 짧은 Duty cycle을 가질 수 있는 10%로 설정하였다.

주파수가 0.5 kHz인 구형파는 0.002 sec의 주기를 갖게 되므로, 바이어스 전압이 1.4 kV에서는 Meniscus가 형성되며, 펄스 전압인 2.5 kV에서는 Micro dripping mode로의 액적의 토출이 0.002 sec의 주기로 반복됨을 알 수 있다. 따라서 그림 4은 주파수가 0.5 kHz의 DOD 특성을 보여주고 있다.

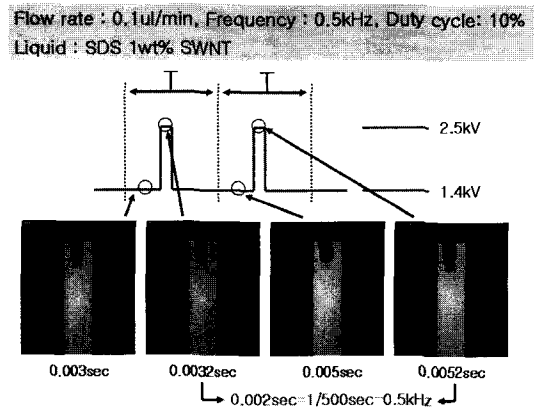


그림 4 주파수 0.5 kHz에서의 Micro dripping mode의 DOD 특성
Fig. 4 Jetting images of droplets in micro dripping mode of drop-on-demand with frequency of 500 Hz

그림 5은 그림 4의 실험 조건에서 주파수만 1 kHz로 바꾼 후 동일하게 DOD 특성을 실험한 결과이다. 그림 4의 결과와 마찬가지로 0.001sec의 주기로 액적이 토출 된다. 따라서 그림 5은 주파수가 1 kHz의 DOD 특성을 보여준다.

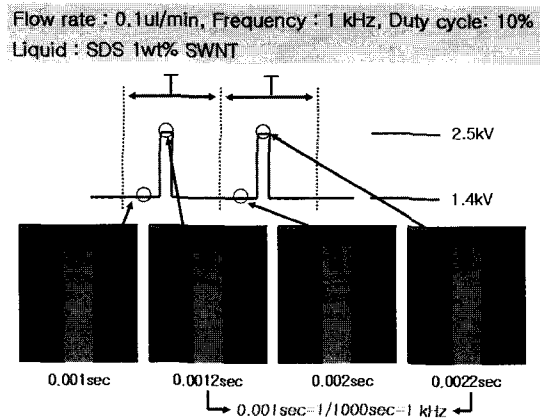


그림 5 주파수 1.0 kHz에서의 Micro dripping mode의 DOD 특성
Fig. 5 Jetting images of droplets in micro dripping mode of drop-on-demand with frequency of 1000 Hz

4. 결 론

본 논문에서는 Capillary tube 및 전선 전극을 이용한 잉크젯 헤드 시스템을 제작하였으며, 이를 사용하여 DOD 특성 실험을 수행하였다. 실험 결과 초기 액적 형성을 위한 DC 바이어스 전압이 중요함을 확인하였으며, 본 연구에서는 1.4 kV의 바이어스 전압에서 가장 좋은 특성을 보였음을 확인하였다. 또한 일정한 바이어스 전압을 유지한 상태에서 펄스 전압 및 주파수를 조절하여 잉크젯 헤드 시스템에 인가함으로써 원하는 시간에 잉크 토출을 수행할 수 있는 DOD 특성을 보였다. 또한 Capillary tube를 이용한 다른 논문[16]의 결과보다 더 낮은 전압에서 더 작은 크기의 액적 토출을 얻었다. 따라서 향후 많은 실험을 통한 신뢰성 확보만 된다면, 디스플레이 분야 및 다른 산업용 잉크젯 프린팅 시장에 정전기력이 유도된 잉크젯 헤드의 적용이 가능하리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 협동연구 지원 사업 및 서울시 전략산업혁신클러스터 육성사업 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] I. Endo, Y. Sato, S. Saito, T. Nakagiri, S. Ohno, and Canon, Inc., "Bubble jet recording method and apparatus in which a heating element generates bubbles in multiple liquid flow paths to project droplets," U.S. Pat. 4 740 796, Apr. 1988.

[2] B. J. Keefe, M. F. Ho, K. J. Courian, S. W. Steinfield, W. D. Chiders, E. R. Tappan, K. E. Trucba, T. I. Chapman, W. R. Knight, J. G. Mortz, and Hewlett-Packard Company, "Inkjet printhead architecture for high speed and high resolution printing," U. S. Pat. 5 648 805, Oct. 6, 1994.

[3] F.-G Tseng, C. Linder, C.-J Kim, and C.-M Ho, "Control of mixing with micro-injectors for combustion application," in Proc. MEMS, ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 59, DSC, Atlanta, GA, Nov. 1996, pp. 183-187.

[4] M. Madou, Fundamentals of Microfabrication. Boca Raton, FL: CRC, 1997, ch. 9.

[5] S. Lee, D. Byun, S. J. Han, S. U. Son, Y. Kim and H. S. Ko "Electrostatic Droplet Formation and Ejection of Colloid", 2004 MHS(Micro-Nano Mechatronics for an Information-Based Society), H. Simpson, Dumb Robots, 3rd ed., Springfield: UOS Press, pp. 6-9, 2004.

[6] E. Lee, "Microdrop Generation," CRC Press, 2003.

[7] B. Park, D. Kim, S. Jeong, S. Lee and J. Moon, "Fabrication of Conductive Patterns by Ink-Jet Printing of Copper Ink", IMID/IDMC '06 DIGEST, pp. 1382-1385, 2006.

[8] H.S. Koo, M. Chen, P.C. Pan, L.T. Chou, F.M. Wu, S.J. Chang, T. Kawai, "Fabrication and chromatic characteristics of the greenish LCD colour-filter layer with nano-particle ink using inkjet printing technique", Displays 27, pp. 124-129, 2006.

[9] C. M. Ho, "Fluidics-the link between micro and nanosciences and technologies-", in Proc. IEEE Int. Conf. MEMS, Interlaken, pp. 375-384, 2001.

[10] J.Y. Choi, Y.J. Kim, S.U. Son, Y.M. Kim, S.H. Lee, D.Y. Byun, H.S. Ko, "Pattern Characteristic by Electrostatic Drop-On-Demand Ink-jet Printing Using Capillary Inkjet Head System", Nanotech 2007, Vol. 3. pp. 403-406, May 20-24, 2007.

[11] D. Jung, Y.J. Kim, D.Y. Byun, H. S. Ko, Sukhan Lee, "Investigations of the Mechanisms of the Electrostatic Droplet Ejections", IEEE-NEMS 2006 Zhuhai, China January 18-21.

[12] 이석한, 고한서, 변도영, 한상준, 김용재, 손상욱, 오정택, 양지혜, "정전기장을 이용한 액적분사 장치 및 그 방법", 대한민국 특허 10-0596200, 2006년 6월.

[13] 이석한, 고한서, 변도영, 한상준, 김용재, 손상욱, 오정택, 양지혜, "액적공급분사장치 및 액적공급분사방법", 대한민국 특허 10-0691254, 2007년 2월.

[14] S. H. Lee, D. Byun, H. S. Ko, Y. Kim, J. H. Yang, S.J. Han, S. U. Son and J. T. Oh, "Electrostatic Droplet Ejector with Monolithic Fabrication of nozzle", Nanotech 2005, May 8-12, 2005.

[15] M. O'Connell, S. Bachilo, C. Huffman, V. Moore, M. Strano, E. Haroz, K. Rialon, B. Boul, W. Noon, C. Kitrell, J. Ma, R. Hauge, R. Weisman and R. Smalley, 2002, "Band gap Fluorescence from Individual Sing-Walled Carbon Nanotubes," Science, Vol. 297, pp. 593~596.

[16] J.L. Li, "On the meniscus deformation when the pulsed voltage is applied", Journal of electrostatics 64, pp. 44-52.

저 자 소 개



최재용 (崔在鎔)

2006년 성균관대 전자전기공학과 학사.
현재 동 대학원 전자전기공학과 석사
과정

Tel : 031-290-7228

E-mail : steinkopf@skku.edu



이석한 (李錫漢)

1982년 Purdue University 전기공학과 공학박사. 1983~1997 University of Southern California 교수. 1998년~2003년 삼성종합기술원 전무. 1998년~현재 USC 겸임교수. 2007년~현재 Georgia Tech 겸임교수. 2003년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.

Tel : 031-290-7150

E-mail : lsh@ece.skku.ac.kr



김용재 (金容載)

2001년 성균관대 기계공학 학사.
2003년 동대학원 기계공학 석사.
현재 동대학원 박사과정수료.

Tel : 031-290-7475

E-mail : warriorkim@skku.edu



변도영 (邊渡泳)

1994년 한국과학기술원 학사. 1996년 동대학원 석사. 2000년 동 대학원 박사. 1996~2000년 한국과학기술원 연구조교. 2000년~2003년 KISTEP 전임연구원. 2003년~현재 건국대학교 항공우주공학과 부교수

Tel : 02-450-4195

E-mail : dybyun@konkuk.ac.kr



손상욱 (孫尙郁)

2003년 성균관대 전자전기공학과 학사.
2005년 동 대학원 전자전기공학과 석사.
현재 동 대학원 전자전기공학과 박사
과정

Tel : 031-290-7228

E-mail : ssu2003@skku.edu



고한서 (高漢瑞)

1990년 연세대 공학사, 1994년 Texas A&M University 기계공학 석사, 1998년 동대학원 박사, 1999년~2001년 동경대 전임연구원. 2001년~현재 성균관대 기계공학부 교수.

Tel : 031-290-7453

E-mail : hanseoko@mail.skku.ac.kr



김영민 (金永珉)

1990년 제주대 공학사, 1997년 동대학원 석사, 2004년 경북대 전자공학 박사.
2003년~2004년 상주대학교 겸임교수.
2006년~현재 성균관대학교 지능시스템
연구센터 연구교수.

Tel. 031-299-4632

E-mail : rockeyk@lycos.co.kr