

# 전압 극성 전환을 통한 피에조 소자의 에너지 회수형 구동 기법 연구

## Study on High-Efficiency Driving of a Piezo Device Using Voltage Inversion Circuit

박한빈\* · 박진호\*\* · 홍선기\*\*\* · 강태삼†  
(Han-Bin Park · Jin-Ho Park · Sun-Ki Hong · Taesam Kang)

**Abstract** - Piezo devices have large power density and simple structure. They can generate larger force than the conventional actuators. It has also wide bandwidth with fast response in a compact size. Thus the piezo devices are expected to be used widely in the future for small actuators with fast response time and large actuating force. However, the piezo actuators need high voltage with high driving current due to their large capacitive property. In this paper, we propose a simple method to drive piezo devices using voltage inversion circuit with coil inductance. Experiments with real circuit demonstrates that the proposed scheme can improve the energy efficiency very much.

**Key Words** : Piezo devices, Piezo device driving, Energy efficiency, Capacitive load driving

### 1. 서론

현재 공학응용 분야에서 널리 사용되고 있는 전기모터, 유압식, 공압식 작동기들은 내부에 구성되는 서브파트들로 인해 크기와 무게가 증가되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 피에조 소자(piezo device)[1] 등 지능소자(smart device)를 이용한 작동기가 연구 및 개발되어왔다. 항공우주분야에서도 로터 블레이드, 비행체 날개, 공기흡입구, 엔진 노즐 등에 이러한 지능소자가 적용되어 있으며, 날개나 블레이드를 굽히는 등의 조종면 형상변화를 통하여 조종성 향상 및 진동억제를 위해 사용되어 왔다[2-7].

이러한 지능소자는 높은 작업 밀도와 에너지 효율에 의해 작동기의 소형화와 경량화가 가능해 졌지만 이 지능소자 구동장치의 구동을 위해서는 비교적 높은 수백볼트 대의 전압을 필요로 한다. 따라서 고전압 승압회로를 이용하여 지능소자를 구동 할 수 있을 만큼의 고전압을 만들어 주어야 한다. 그리고 지능소자는 전기적으로는 용량성 부하와 같은 성질을 가지고 있어서 순간적인 큰 운동을 할 때는 많은 전류가 소모되지만 일단 정지상태가 되면 전류소비를 거의 안 하는 특성이 있다. 지능소자의 변위는 가해진 전압의 크기와 부호의 함수이며, 특히 움직임 방향을 바꾸어주기 위해서는 가해주는 전압의 극성을 바꾸어주어야 한다. 특히 피에조 소자는 고주파로 공진을 시키면서 축적되는 에너지를 이용하는 경

우가 많은데, 이 경우 용량성 부하에 걸린 높은 전압의 극성을 바꾸어주기 위해서는 대 용량의 전류가 필요하다. 즉, 극성을 바꾸는 한 사이클 동안 충전된 에너지를 방전시키고 반대 극성의 전하를 충전해 주어야 하기 때문에 전원공급기 쪽에서 보면 큰 전류를 가하고 뺄 수 있어야 한다. 즉, 용량성 부하인 지능소자에서 소비하는 전력은 매우 적지만, 이를 구동하기 위해서는 비교적 큰 무효전력을 구동할 수 있어야 하고, 이를 위해서는 구동전원의 출력이 피에조 소자에서 소비하는 전력보다 훨씬 큰 전원을 필요로 한다. 특히 밸브 등에서와 같이 지능소자를 규칙적으로 구동시킬 경우에는 구동 전압의 극성을 규칙적으로 바꾸는 과정에서 에너지 손실이 주파수에 비례하여 증가하며, 이 때문에 큰 용량의 전원이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 에너지 손실을 줄이기 위한 전압 구동 시스템의 설계에 대해서 다루고 있으며 이를 실제 시스템으로 구현하여 그 성능을 검증하였다.

### 2. 전압 극성 전환을 통한 에너지 회수형 구동 회로 설계

그림 1은 일반적인 LC 병렬 공진 회로를 이용한 임피던스 정합을 보여주고 있다. 여기서 C는 피에조 소자의 용량성 성분을 나타내며, L은 임피던스 정합을 위하여 추가한 인덕터의 인덕턴스를 나타낸다. 이때 전압원이 보는 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L}} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (1)$$

따라서,  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  일 때, 임피던스가 무한대가 되며 전원으로 부터 부하로 흐르는 전류  $i$ 는 매우 작은 값으로 유지된다. 즉 큰 전압을 구동하면서도 무효 전력에 대해서는 전류가 거의 흐르지 않게 되므로 전원의 출력이 크지 않아도 고

\* Department of Aerospace Information Engineering, Konkuk University.

\*\* Department of Digital/System Control Engineering, Hoseo University.

\*\*\* Department of Digital/System Control Engineering, Hoseo University.

† Corresponding Author : Department of Aerospace Information Engineering, Konkuk University.

E-mail : tskang@konkuk.ac.kr.

Received : October 9, 2012; Accepted : November 22, 2012

전압을 C에 가할 수 있다. 그러나 이 회로는 처음 기동시 전압이 서서히 올라가는 단점이 있고, 또 구동을 멈추어도 커패시터에 가해지는 전압이 즉시 멈추지 않고 계속 진동하면서 에너지가 기생 저항에 의해 소모될 때까지 진동하므로, 고속으로 구동을 멈추는데 문제가 있다. 또한 Piezo 소자의 운동은 구형파가 가해질 때 더 효과적인데 반하여 구형파를 가하기가 어려우며, 또 구동 주파수도 공진 주파수로만 가하여야 한다는 단점이 있다. 즉, 필요에 따라 변화하는 주파수로 구동해야 할 경우에는 임피던스 병합이 되지 않아 많은 전류가 흐르게 된다.

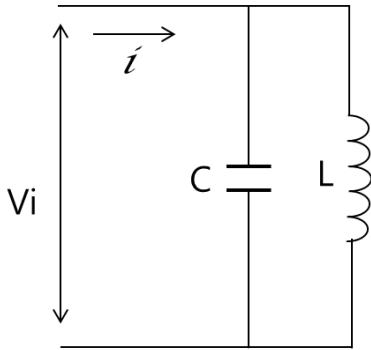


그림 1 LC 병렬공진회로  
Fig. 1 Parallel resonance circuit

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위한 방법을 제시하였다. 즉, 코일과 전력 스위칭 소자를 이용하여 필요할 때에만 커패시터의 한 쪽에서 다른 쪽으로 전하가 이동할 수 있게 함으로써, 사용자가 원하는 시간에 원하는 속도로 스위칭 구동을 효과적으로 할 수 있는 방법을 제시하였다.

그림 2는 에너지 회수형 단방향 구동 회로이다. 실제의 지능소자 구동에는 수백 볼트의 전압을 사용하지만, 본 논문에서는 그 가능성만 확인하기 위한 것이므로 15 V의 전원을 사용하였다. 전류의 흐름을 한 방향으로만 유지하기 위해 N-채널 MOSFET의 소스(Source) 단자에 다이오드를 연결

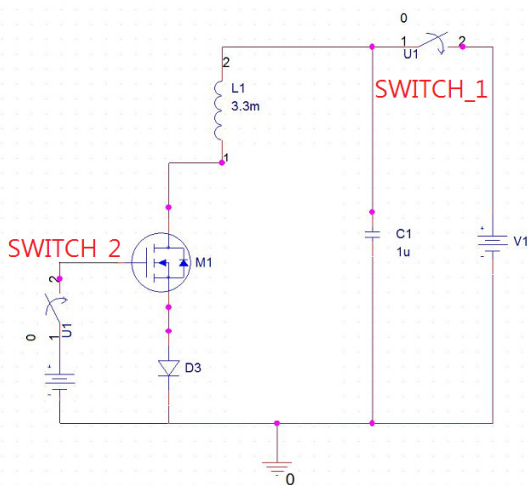


그림 2 에너지 회수형 단방향 전압 극성 전환 회로  
Fig. 2 Polarity inversion of energy saving circuit

하였다. MOSFET을 통전 상태로 만들기 위해 스위치 2(SWITCH\_2)에 연결된 전압원은 5V를 이용하였다.

실험 진행방법은 다음과 같다. 처음에 스위치 1(SWITCH\_1)을 닫아서 커패시터에 전압을 걸어준 다음 15V까지 충전이 완료가 되면 스위치 1은 열어주고 스위치 2는 구동을 하여 MOSFET이 전도 상태가 되게 해준다. 그러면 커패시터에 충전된 전하가 인덕터를 통해 흘러 커패시터 C1에 역전압을 만들며 충전이 된다. 이때, 여러 종류의 인덕터를 적용하면서 오실로스코프를 이용해 측정된 회수된 반대 극성의 전압 결과 값은 표 1과 같다.

표 1 에너지 회수형 단방향 스위칭 회로 실험 결과  
Table 1 Experimental results of energy saving switching circuit

인덕턴스 L(mH)	인덕터의 저항( $\Omega$ )	회수된 Capacitor 전압(V)
30	38	-8.6
1	2	-8.8
15	19	-9.6
3.3	990m	-11.2
4.3	1.2	-11.4

표 1의 결과를 봤을 때 예상대로 인덕턴스가 높고 내부 임피던스가 작을 때 커패시터에 역으로 충전되는 전하량이 많아짐을 알 수 있다. 그러나 회로에는 내부저항이 존재하기 때문에 완전히 -15V까지는 미치지 못하였다.

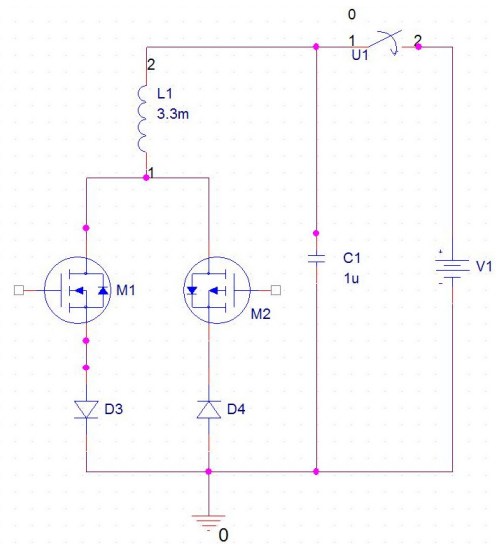


그림 3 에너지 회수형 양방향 구동 회로  
Fig. 3 Bidirectional energy-saving driving circuit

피에조 소자의 고속 구동을 위해서는 전압의 극성을 규칙적으로 원하는 시간에 바꾸어 줄 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 내부저항 990 m $\Omega$ 이고 인덕턴스가 3.3 mH 인 인덕터를 사용하여 그림 3과 같은 에너지 회수형 양방향 구동 회로를 제작하고 다음 실험을 수행하였다. 즉, 스위칭 되는 전압은 15V를 이용하였고 피에조 소자의 용량에

해당되는 1uF 커패시터의 충전상태 유지 및 양방향 스위칭을 위해 n-channel(M1) 및 p-channel(M2) MOSFET을 사용했다. MOSFET은 특성상 개방회로(turn-off) 상태에서도 내부에 기생 다이오드가 존재하여 역방향 전류가 흐른다. 이 효과를 제거하기 위해 각 MOSFET의 소스 단자에 다이오드를 연결하여 역방향 전류의 흐름을 방지하였다. 각각의 MOSFET은 마이크로프로세서를 이용하여 온/오프를 하였다. 목표 구동 속도는 500 이며, 이 보다 스위칭 천이 속도가 충분히 빠르게 하기 위해 LC 회로의 공진주파수는

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2770 \text{ Hz}$$

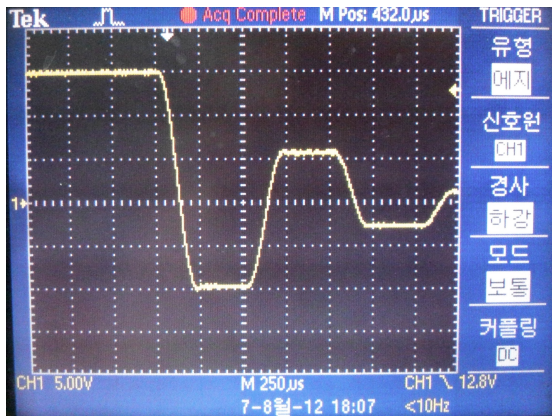


그림 4 에너지 회수형 회로의 양방향 스위칭 실험 결과 파형

Fig. 4 Experimental Result of bipolar energy saving circuit

그림 4는 양방향 스위칭 실험의 결과 파형이다. 이상적 결과로 ±15V의 전압이 예상되었지만 실제파형은 내부 임피던스로 인한 손실이 발생한 파형이 나왔다. 한번씩 스위칭을 할 때 마다 이전전압의 1/3정도가 손실됨을 확인하였다. 즉 2/3정도의 전압이 회수 되어 역전압을 거는데 사용 되었다. 따라서, 양의 전압에서 음의 전압으로 구동하는데 1단위의 방전 및 1단위의 충전 과정이 필요한데 비하여 본 회로를 이용할 경우는 1/3단위의 역 충전만 필요하기 때문에 본 회로를 이용하면 손실이 줄어들 것을 예상할 수 있다. 피에조 디바이스가 1 μF의 용량 성분을 가지고, 이것을 500 Hz, ±300 V 구형파로 구동을 가정하는 경우, 한 사이클 동안 두 번 씩의 충전 및 방전 과정을 거치므로 1200 u C(Coulomb)의 전하가 움직이며, 따라서 평균 필요 전류는 1.2E-3/(1/500)=0.6A 가 되며, 따라서, 최소 180 VA의 구동 능력을 가지는 전원이 필요하다. 반면에 본 논문에서 제시한 방법은 한번의 충전으로 반대 극성 전압의 2/3 즉, -200 V 까지는 충전이 되므로 나머지 1/3, 즉, -100 V에 해당되는 역전압 충전만 필요하다. 따라서 이때 필요한 전하는 총 300+100 = 400 uC의 전하가 1 주기 동안 변화되며, 따라서 평균 필요 전류는 0.2A가 되며, 따라서 60 VA 정도의 출력을 가진 전원만 있으면 된다. 즉, 에너지 회수형으로 구동할 때, 같은 부하를 1/3 출력을 가지는 전원으로 구동할 수 있게 된다.

에너지 회수형 구동회로를 응용하여 구동하기 위해서는 스위칭 때마다 전하를 반대쪽으로 옮길 때 손실된 1/3의 전

하를 충전하면서 커패시터의 용량성 부하를 구동하면 된다. 즉 전하가 한 쪽에서 다른 쪽으로 옮겨가는 과정이 끝날 때 썸 전원부에 연결하여 줌으로써 남은 1/3의 전하를 피에조 소자에 가하여 주면 된다.

양방향으로 전하를 충전해 주기 위한 방법으로 H-bridge[8] 회로를 이용하였다. 그림 5는 에너지 회수 회로 및 H-bridge 회로를 이용하여 용량성 부하 C1을 구동하기 위해 필요한 부분을 보여주고 있다.

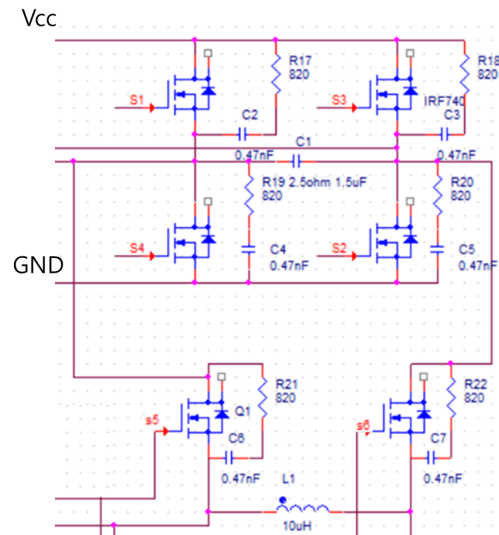


그림 5 H-bridge를 이용한 에너지 회수형 구동회로  
Fig. 5 Energy saving circuit using H-Bridge

그림에서 스위치 s1,s2 및 s3, s4는 스위치 s5 및 s6에 의해서 에너지 회수 동작이 끝난 후 전원 Vcc를 양(+) 또는 음(-) 방향으로 연결하여 회수되지 못한 1/3의 전하를 용량성 부하 C1에 공급하여 준다. 피에조 소자의 용량성분은 1.5uF의 커패시터를 사용하였으며, 빠른 에너지 회수 동작을 위해 10uH의 인덕터를 사용하였고 신호제어를 위해서 마이크로 컨트롤러를 사용하였다. 포토커플러를 사용하여 각각의 트랜지스터 게이트 구동 신호와 스위칭 전원의 GND를 분리시켰으며, 안정된 스위칭 동작을 위하여 간단한 스너버 회로를 추가하였다. 그림 6은 실험을 위하여 제작된 H-bridge 에너지 회수형 구동회로를 보여주고 있다.

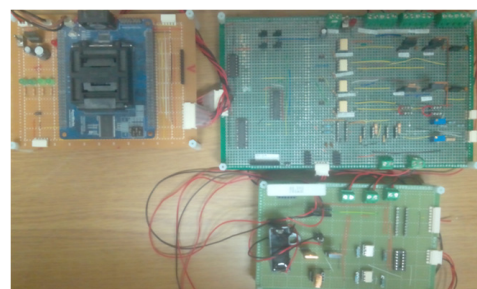
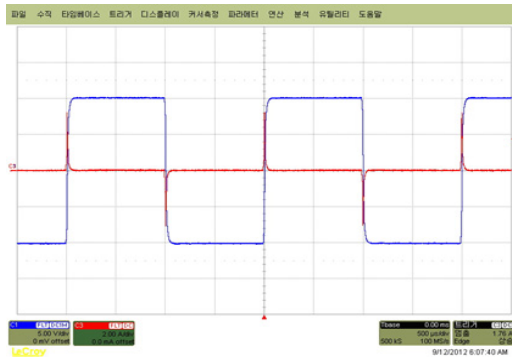
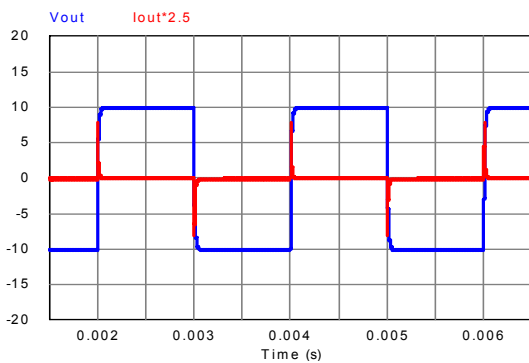


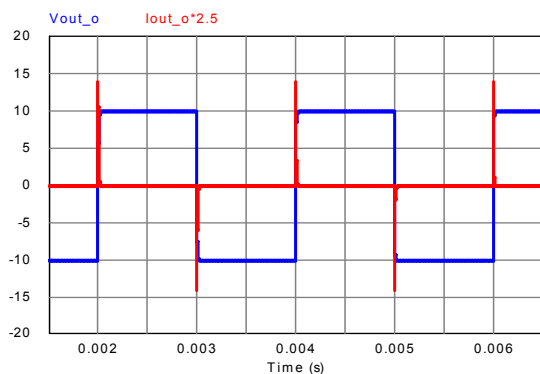
그림 6 제작된 H-bridge 에너지 회수형 구동회로  
Fig. 6 Fabricated energy-saving driving circuit



(a)



(b)



(c)

그림 7 커패시터 전압과 전류: (a) 에너지 회수형 구동 회로 실험 결과, (b) 에너지 회수형 구동회로 시뮬레이션 결과, (c) 기존 구동 회로 시뮬레이션 결과

Fig. 7 Voltage and current of capacitor: (a) Energy-saving driving circuit (experiment), (b) Energy-saving driving circuit (simulation), (c) Conventional driving circuit (simulation)

그림 7(a)는 그림 5와 그림 6에서와 같이 설계 제작된 회로에서  $\pm 10V$ , 500 Hz로 피에조 소자의 용량 성분에 해당되는 커패시터 C1을 구동할 때, C1에 걸리는 전압과 C1으로 흐르는 전류의 파형을 보여주고 있다. H-bridge를 통하여 손실되는 전하가 공급되기 때문에 일정한 구형파가 가하여지는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 그림 7(a)에 대한

시뮬레이션 결과이며 실험과 비교적 잘 일치한다고 볼 수 있다. 그림 7(c)는 그림 7(a)와 다르게, 에너지회수형 구동회로를 포함하지 않은 H 브릿지 인버터만 이용한 경우로, 그림 7(b)보다 전류가 거의 2배로 많이 흐르는 것을 볼 수 있다. 이것은 커패시터의 내부저항이  $1.5\Omega$ 인 경우이지만, 이 저항값이 더 작아진다면 돌입전류는 더 커질 것이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 피에조 소자와 같이 용량성을 가지는 소자를 효과적으로 구동하기 위한 방법을 제시하였다. 즉, 용량성 부하에 코일을 병렬로 연결하고, 이를 이용하여 용량성 부하에 걸린 전하를 반대의 극성으로 바꾸어 줄 수 있게 하였으며, 스위치를 이용하여, 전류를 통제함으로써, 피에조 소자에서 효과적인 구형파 형태의 전압을 가할 수 있게 하였다. 본 논문에서 제시된 방법은 (+) 방향으로 충전된 전하를 (-) 방향으로 충전되도록 코일의 인덕턴스와 스위치를 이용하였다. 이때, 전압의 극성을 바꾸기 위해 전하가 움직이는 과정에서 스위칭 소자 등의 손실로 인하여 원래 전압에 비하여 약 2/3 배 정도의 전압이 복구되는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한 H-bridge 회로를 응용하여, 손실되는 1/3의 전하를 주기적으로 보충하여 줌으로써, 일정한 전압의 구형파로 구동할 수 있게 하였으며, 실제 회로를 제작하여 그 동작을 검증하였다.

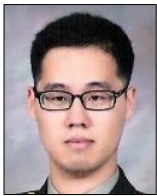
본 연구에서 제안된 방법을 이용하면 손실되는 에너지를 획기적으로 줄이면서, 다양한 주파수로 빠르게 구형파를 발생시킬 수 있어서, 피에조 소자와 같이 구형파 구동을 필요로 하는 다양한 종류의 용량성 부하 구동 회로에 쓰일 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Takeo Furukawa, "Piezoelectricity and Pyroelectricity in Polymers," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 3, June 1989, pp.375-394.
- [2] SangMin Lim, Sangki Lee, Hoon Cheol Park, Kwang Joon Yoon and Nam Seo Goo, "Design and demonstration of a biomimetic wing section using a lightweight piezo-composite actuator (LIPCA)," Smart Materials and Structures, Institute of Physics Publishing, Vol. 14, 2005, pp. 496-503.
- [3] Lae-Hyong Kang, Jong-Won Lee, Jae-Hung Han, Sang-Joon Chung and Han-Young Ko, "Development of Curved Shape Piezoelectric Unimorph Using Pre-stressed Substrate," The Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.19, No.1, 2009, pp. 94-100.
- [4] Ahmed K. Noor, Samuel L. Veneri, Donald B. Paul, Mark A. Hopkins, "Structures technology for future aerospace systems," Computers & Structures, Vol. 74, No.5, February 2000, pp. 507-519.
- [5] <http://www.continuum-dynamics.com/solution-m-sma.html>.

- [6] K.J. Yoon, H.C. Park, H.J. Lee and C.K. Kim, "Design and manufacture of a lightweight piezo\_composite curved actuator," Smart Materials and Structures, Vol 11(2002), pp.163-168.
- [7] Victor Giurgiutiu, "Recent advances in smart - material rotor control actuation," Proceedings of the 41st AIAA/ ASME/ ASCE/ AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, and Adaptive Structures Forum, AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum, Atlanta, GA, 3-6 April, 2000, Paper #AIAA 2000-1709
- [8] Issa Batarseh, Power Electronic Circuits, John Wiley & Sons, Inc., 2004.

저 자 소 개



**박 한 빈 (朴 韓 彬)**

2009년 2월 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 2011년 9월~현재 건국대학교 공과대학 항공우주정보시스템공학 석사과정 재학중



**박 진 호 (朴 鎭 浩)**

2011년 2월 호서대학교 공과대학 디지털시스템제어공학과 졸업. 2011년 2월~현재 동 대학원 석사과정 재학중



**홍 선 기 (洪 瑄 基)**

1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동대학원석사졸업. 1993년 동대학원 전기공학 박사. 1995년 렉스산전(주) 선임연구원. 1997년~현재 호서대학교 공과대학 시스템제어공학부 교수



**강 태 삼 (康 泰 三)**

1986년 서울대학교 제어계측공학과졸업. 1988년 동 대학원 석사졸업. 1992년 동 대학원 제어계측공학 박사. 2001년 9월~현재 건국대학교 항공우주정보시스템공학과 교수, 관심분야는 항공제어, 소형 무인비행체 제어, 관성센서, 지능소자 개발 및 활용, 강인제어 이론 및 응용