

## 마이크로 변위제어 시스템의 압전 액추에이터 구동을 위한 스위칭 증폭기 성능 분석

Performance Evaluation of Switching Amplifier in Micro-positioning Systems with Piezoelectric Actuator

---

저자 (Authors)	朴鍾厚, 白種馥, 趙普衡, 崔城振 Joung-Hu Park, Jong-Bok Baek, Bo-Hyung Cho, Sung-Jin Choi
출처 (Source)	<a href="#">전력전자학회논문지 14(1)</a> , 2009.2, 62-71 (10 pages) <a href="#">THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS 14(1)</a> , 2009.2, 62-71 (10 pages)
발행처 (Publisher)	<a href="#">전력전자학회</a> THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS
URL	<a href="http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01146478">http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE01146478</a>
APA Style	朴鍾厚, 白種馥, 趙普衡, 崔城振 (2009). 마이크로 변위제어 시스템의 압전 액추에이터 구동을 위한 스위칭 증폭기 성능 분석. 전력전자학회논문지, 14(1), 62-71.
이용정보 (Accessed)	203.250.84.*** 2017/08/01 16:14 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

# 마이크로 변위제어 시스템의 압전 액츄에이터 구동을 위한 스위칭 증폭기 성능 분석

朴鍾厚<sup>†</sup>, 白種馥<sup>\*</sup>, 趙普衡<sup>\*\*</sup>, 崔城振<sup>\*\*\*</sup>

## Performance Evaluation of Switching Amplifier in Micro-positioning Systems with Piezoelectric Actuator

Joung-Hu Park, Jong-Bok Baek, Bo-Hyung Cho, Sung-Jin Choi

### 요 약

본 논문에서는 마이크로 변위제어 시스템의 적층형 압전 액츄에이터를 위한 스위칭 증폭 구동회로의 구동방법을 제시하고 성능을 평가하였다. 이 증폭기는 압전 액츄에이터로부터 임의의 용량성 부하에 저장된 에너지를 효율적으로 회수할 수 있는 장점이 있다. 기존의 전압 되먹임 제어 방식은 100mHz의 정현파 기준치 추종시, 총 왜곡율이 -32dB ( $\approx 2.5\%$ )로서, 액츄에이터의 전압과 변위 사이의 비선형적 관계로 인한 오차발생을 확인할 수 있었다. 이를 개선하기 위하여 전하 제어방식을 살펴보았는데, 기존의 직렬 커패시터를 연결하는 대신, 변위 기준치를 미분하고, 이를 출력전류와 비교하는 방식으로 개선하였다. 전하량 되먹임 제어 적용시 변위의 왜곡률은 약 -52dB ( $\approx 0.25\%$ )로서 선형성이 매우 우수한 특성을 보임을 알 수 있다. 마지막으로 살펴본 직접 변위 제어 방식은 구현상의 복잡성으로 성능의 한계가 존재함을 알 수 있다.

### ABSTRACT

In this paper, an improved drive method of piezoelectric PZT stack actuator for micro-positioning system is proposed and the performances are evaluated. This type of amplifier is based on switching technology efficiently handling the arbitrary regenerative energy from the piezoelectric actuator. The conventional voltage-feedback control method has the THD of -32dB ( $\approx 2.5\%$ ) with 100mHz sinusoidal reference, which means that the positioning performance in linearity degrades due to the hysteretic relationship between actuator voltage and the displacement. This paper proposed an improved charge-controlling method, which utilizes differential information of charge reference instead of integrating the actuator's current. The current waveform has THD under -40dBV (=1%) and the displacement waveform nearly -52dB ( $\approx 0.25\%$ ), which means that the positioning performance is very excellent. Finally, another method of the displacement feedback control has better performance than the voltage method, however there exists a limitation in performance of the system.

**Key Words** : Piezoelectric actuator, Class-D amplifier, Micro-positioning, Charge control, Displacement control

## 1. 서 론

최근에, 적층된 구조를 이용하여 압전 소자 응용 범위가 고전력 컨버터 및 큰 변형률을 가지는 액츄에이터 등으로 넓어지고 있다<sup>[1-6]</sup>. 그러나, 이러한 구조는 고전압으로 구동하므로, 용량성 부하의 특성을 지니는

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 박사후과정  
E-mail : whoishe@snu.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 석사과정

<sup>\*\*</sup>정회원, 서울대 전기컴퓨터공학부 교수

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 삼성전자 영상디스플레이 사업부 책임연구원  
접수일자 : 2008. 11. 3                      1차 심사 : 2008. 11. 28  
2차 심사 : 2008. 12. 13                      심사완료 : 2008. 12. 15

압전 소자는 충·방전시 상당한 전력손실을 유발하게 된다. 그러므로, 효율적인 압전부하 구동을 위해서, 에너지 회수 기능을 포함하는 구동회로를 사용한다<sup>[6-8]</sup>. 이러한 에너지 회수 기능은 기존에 주로 사용되던 선형 구동 증폭기 대신에 스위칭 인버터 혹은 양방향 컨버터 등에 의해서 구현될 수 있다<sup>[6-9]</sup>.

일반적으로 사용되는 압전 구동 증폭기는 클래스 D (class) D 타입의 스위칭 증폭기이고 이 때, 증폭기의 성능은 주로 스위칭 주파수에 의해서 결정된다. 스위칭 주파수가 올라가면 빠른 동특성을 가지는 되먹임 제어 설계가 가능하지만, 대신 스위칭 손실에 의한 전력효율의 감소를 유발한다. 따라서 적절한 스위칭 주파수의 선정이 필요하다. 본 논문에서는, 100kHz 스위칭 주파수를 가지는, 마이크로 변위제어 시스템의 PZT 적층 액추에이터를 구동용 스위칭 증폭기 제어 방식을 살펴보고, 기존을 변형시켜 좀 더 향상된 기능을 가지는 방식을 제안하였다.

이러한 회로를 그림 1에 나타내었다. 액추에이터 변위 증가시, 고주파 스위칭 전력단을 통하여 인덕터에 흐르는 전류를 증가시키고, 이 전류가 압전 내부의 커패시터를 충전하여 출력 전압을 증가시킨다. 반대로 변위 감소시에는 인덕터의 전류를 반대 방향으로 발생시켜서 압전 커패시터를 방전시키고, 이 에너지를 전원부로 회수하게 된다<sup>[10-11]</sup>. 그러나 반대급부로서, 이러한 스위칭 증폭기는 압전 소자의 히스테리시스 특성을 보상하기 위하여 되먹임 제어기를 포함함으로써, 느린 동특성을 보상하기 위한 복잡한 제어기 설계과정을 거치게 된다<sup>[12-13]</sup>. 이러한 액추에이터 구동회로의 제어기 설계를 위해, IEEE 파라미터 회로 모델이 주로 사용된다<sup>[14]</sup>. 뿐만 아니라, 압전 액추에이터 응용의 경우, 변위제어가 압전 소자를 임의의 전압으로 조절이 가능하여야 하므로, 구동증폭기는 임의의 출력 (액추에이터) 전압에서 전력 변환이 가능하도록 구현되어야 한다.

본 논문에서는 이러한 클래스-D급 증폭기의 제어 특성 및 압전소자의 부하특성을 알아보고, 하드웨어 제작 및 실험을 통하여 살펴본 변위제어 시스템의 성능을 살펴본다.

## 2. 압전 액추에이터 구동 및 전압 되먹임 제어

### 2.1 압전 모델링

압전 액추에이터는 비선형적인 특성을 가지므로, 비선형 파라미터를 가진 모델로 설명될 때가 가장 정확

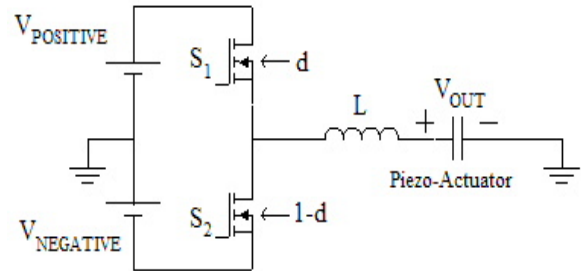


그림 1 마이크로 변위제어 시스템 내의 압전 액추에이터 구동을 위한 클래스 D급 스위칭 증폭기

Fig. 1 Class-D switching amplifier for micro-positioning system with piezoelectric actuator

하다<sup>[15]</sup>. 그러나, 설계를 위하여는 직관적인 설명이 가능한 선형 모델이 효과적이다. IEEE 기준에 따르면<sup>[14]</sup>, 압전체는 동작주파수가 공진주파수 부근으로 갈 때 Butterworth-Van Dyke (BVD) 공진자 모델로 나타내어진다. 대부분의 마이크로 변위제어 제어 응용에서는, 적층 압전 액추에이터가 기계적 공진부보다 훨씬 낮은 주파수에서 동작한다. 그러나, 이런 낮은 주파수 동작을 예측하는 데에도 BVD 모델은 유효하다<sup>[16]</sup>. 저주파 영역 부근에서는, 인덕터로 표현되는 압전체 질량을 가속함으로써 저장되는 운동에너지는 거의 무시할 만하며, 커패시터에 저장되는 위치에너지가 주요하게 된다. 따라서 기계적 운동부는 커패시터와 저항이 직렬 연결된 형태로 간략화 된다.

본 논문에서는, 이러한 BVD 모델을 이용하고, 여기에 내부의 기계적인 특성 파라미터를 묘사하는 DC transformer를 추가하고, 또한 적층 전극들 사이에 존재하는 커패시터의 유전 손실을 나타내는 병렬 저항을 더하여, 실제로 사용될 액추에이터의 등가 파라미터를 구하였다. 표 1에 모델에서 사용된 전기적 파라미터와 기계적 파라미터의 전기역학적인 관계를 나타내었다. 입력 임피던스를 측정하기 위하여 Agilent 4294A 임피던스 분석기가 사용되었고, 최소자승법을 이용하여 각 회로 파라미터들을 계산하였다. 변압기 턴비로 표현되는 electro-mechanical force factor를 구하기 위하여, Mahr Millimar 1240 변위 측정 시스템이 사용되었다. 이러한 기본적인 BVD 모델 파라미터들과 force factor를 이용하여, 전기 회로적인 모델 파라미터들이 결정되고, 이를 이용하여 기계적인 현상을 이해할 수 있다. 예를 들어 압전체의 등가 커패시터에 저장된 전하량 (in Coulomb)를 통하여 실질적 변위량(in meter)을 알 수 있게 된다.

표 1 전기적 파라미터와 기계적 파라미터의 전기역학적인 관계

Table 1 Electro-mechanical analogies for lumped parameter circuit model

Mechanical Parameter	Symbol	Electrical Parameter
Force	$F \Leftrightarrow V$	Voltage
Velocity	$v = \dot{u} \Leftrightarrow i = \dot{q}$	Current
Displacement	$u \Leftrightarrow q$	Charge
Mass	$m \Leftrightarrow L$	Inductance
Compliance	$1/k \Leftrightarrow C$	Capacitance
Structural Damping	$\kappa \Leftrightarrow R$	Resistance

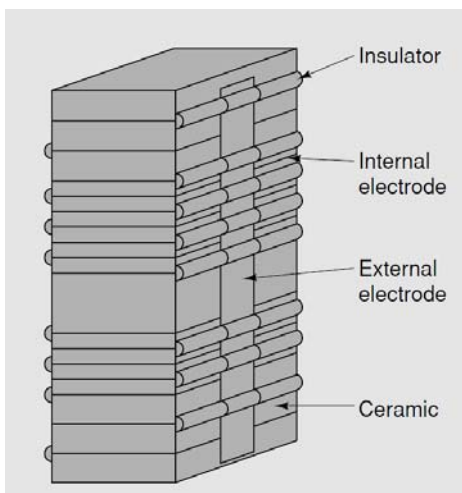
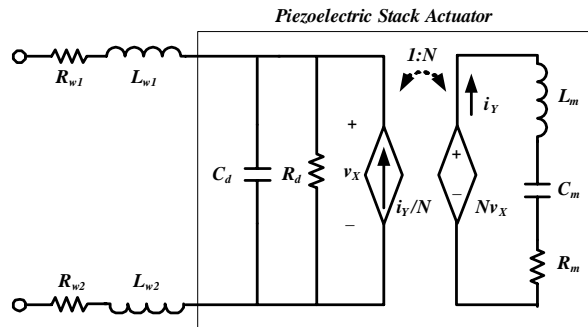


그림 2 적층형 압전 액추에이터의 구조<sup>[17]</sup>  
Fig. 2 Structure of Piezoelectric Stack Actuator<sup>[17]</sup>

본 논문에서는 높은 변형률을 가지는 적층형 액추에이터 (NEC/TOKIN AE0505D44H40)를 사용하였다 (그림 2). 입력전압 범위는 0에서 150V이며, 이 때 압전 액추에이터의 말단부 변위는 30um가 된다. 그림 3에 8미터 길이의 로봇 케이블 설비(harness)를 포함한 액추에이터 모델을 나타내었다. 유전 손실분을 나타내는 병렬 저항  $R_d$ 는 주파수에 따라 가변하지만<sup>[18]</sup>, 그 절대 값이 상대적으로 큰 편이므로 40Hz 부근에서의 값이 사용되었다. 이 모델을 검증하기 위해서, 액추에이터의 시뮬레이션 값과 측정된 값을 그림 4에 나타내었다.



단,  $R_{w1}=1.64\text{ohms}$ ,  $L_{w1}=1.94\mu\text{H}$ ,  $R_{w2}=257\text{mohms}$ ,  $L_{w2}=1.38\mu\text{H}$ ,  $C_d=2.42\mu\text{F}$ ,  $R_{op}=40.6\text{kohms}$ ,  $N=2.88$ ,  $L_m=672\mu\text{H}$ ,  $R_m=6.07\text{ohms}$ ,  $C_m=104\text{nF}$ .

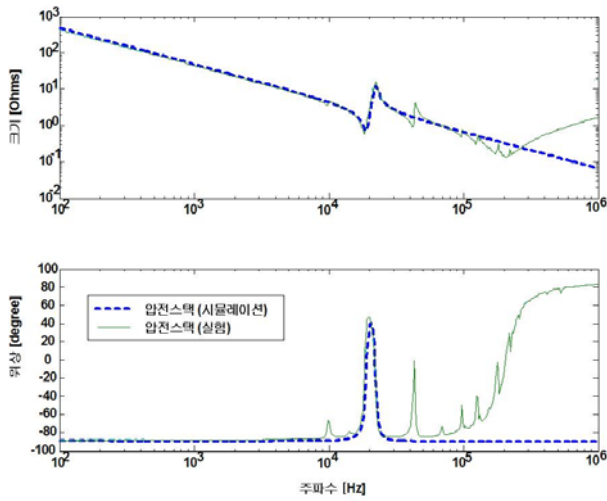
그림 3 케이블 harness를 포함한 액추에이터 모델  
Fig. 3 Equivalent circuit model for the actuator including wires

그러나, 이러한 소신호적인 선형 모델과는 별도로, 실제 응용에 있어서 큰 변위를 주어야 하는 대신호 모델의 경우에는 압전 소자의 히스테리시스 특성 때문에 ‘맥스웰 커패시턴스’라고 불리는 비선형 특성으로 모델링 되기도 한다<sup>[19-21]</sup>. 따라서, 정밀한 변위 제어 시스템의 경우에 이러한 비선형 특성을 보상하기 위한 제어가 필요해진다. 그림 5는 비선형 특성을 무시한 일반적인 출력전압 (액추에이터) 되먹임 제어를 사용하여 클래스 D급 스위칭 증폭기로 구현한 하드웨어의 실험 결과이다.

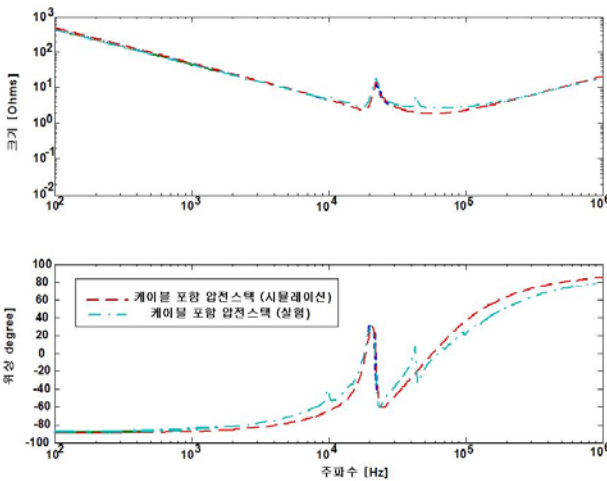
## 2.2 전압 제어 방식

선형성을 살펴보기 위해서, 액추에이터를 정현파 형태로 구동시킨 후, 출력 전압과 변위의 주파수 성분을 살펴보았다<sup>[22]</sup>. 그림 5(a)를 보면, 출력 전압 파형은 전압 되먹임을 통하여 100mHz의 정현파 기준치를 잘 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 파형의 푸리에 변환을 수행한 결과, 그림에서 나타난 것과 같이 총 왜곡율 (total harmonic distortion)은 2차 및 3차 고조파를 합산하여 -40dBV (=1%)이하이다. 그러나 그림 5(b)를 보면, 변위 파형은 2차, 3차의 왜곡된 성분을 포함하고 있고, 총 왜곡율은 약 -32dB ( $\approx 2.5\%$ )가 된다. 이것은, 액추에이터 전압과 변위와의 관계가 선형적이지 않음을 나타낸다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 논문에서는 직접 변위 제어, 모델을 이용한 앞먹임 (feed-forward) 제어, 및 전하량 제어 (Charge control)



a) 압전 스택 임피던스의 크기 및 위상  
a) Magnitude and phase angle of Piezoelectric stack impedances

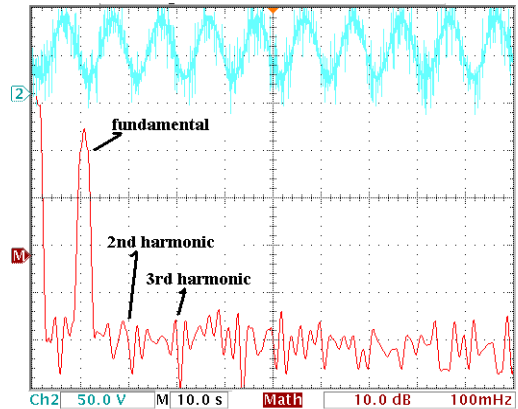


b) 케이블을 포함한 압전 스택 임피던스의 크기 및 위상  
b) Magnitude and phase angle of Piezoelectric stack impedances with cable

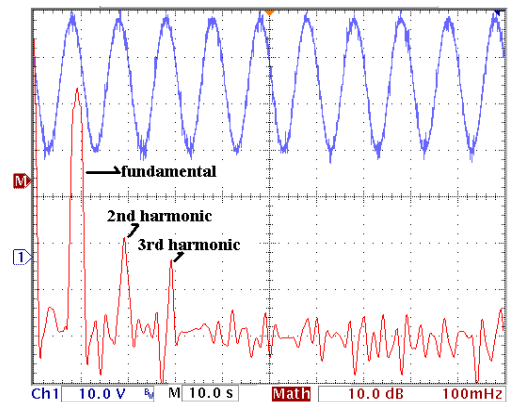
그림 4 액추에이터의 입력 임피던스 측정값 및 시뮬레이션  
Fig. 4 Measured and simulated input impedance of the actuator

등이 제안되었다<sup>[23-29]</sup>. 직접 변위 제어는 외란에 상관 없이 액추에이터가 이상 동작하지 않도록 견실하게 제어 가능한 장점이 있지만, 고가의 변위 센서 및 제어기가 필요하여 시스템의 제작비가 상승하는 단점이 있다. 앞먹임 제어 방법은 뛰어난 보상 능력과 빠른 동역학이 장점이지만, 모델에 의지하는 보상을 하므로 외란 발생시 능동적으로 대처하지 못하여 추종능력

이 현저히 감소하는 단점이 있다. 끝으로, 전하량 제어는 변위가 압전에 저장된 전하량과 선형 관계임을 이용한 제어방법으로서, 저가의 센서를 사용하여 높은 정밀도의 제어 성능을 가질 수 있어서, 계속적으로 연구가 되어오고 있다. 그러나, 기존의 전하 되먹임 제어는 구성상 다른 방법보다 높은 바이어스를 필요로 하므로 앞 단 전원부의 손실이 증가하고, 클래스 D 급 증폭기에 적용이 어려운 문제가 있었다. 본 논문에서는 직접 변위 제어 및 전하량 제어 방법을 살펴보고, 향상된 전하량 제어 방법을 제안하여 이를 직접 구현하고 성능을 비교해 보았다.



a) 압전 전압의 시간 및 주파수 영역의 파형  
a) Piezo-voltage swing and the FFT waveforms



b) 압전 변위의 (11-29um) 시간 및 주파수 영역의 파형  
b) Piezo-displacement swing (11-29um) and the FFT waveforms

그림 5 전압 되먹임 제어 시 클래스 D 증폭기의 선형성 측정결과  
Fig. 5 Linearity performance of class-D amplifier with piezo-voltage feedback control

### 3. 전하량 제어 방식

#### 3.1 기본원리

전장에서, 정밀 변위 제어 시스템에서 압전의 히스테리시스 특성이 선형성에 어떻게 영향을 주는 지 살펴 보았다. 궁극적으로 변위는 표 1에 나타난 것과 마찬가지로 전하량에 대응하므로, 전하량을 측정하여 변위를 제어하는 방법이 가능하다. 본 장에서는 이러한 전하 제어 방법을 증폭기에 적용하여 압전 액추에이터의 선형 동작 성능을 살펴본다. 위에서 언급한대로, 변위는 히스테리시스와 상관없이 전하량과 비례하는 관계를 가진다<sup>[30-37]</sup>. 따라서, 기존의 논문에서는 압전에 축적된 전하량을 알기 위해서 그림 6(a)와 같이 외부에 직렬로 커패시터를 놓고 커패시터의 전압을 측정하였다<sup>[38-39]</sup>. 커패시터 전압과 전하량과의 관계는 식 (1)에 나와 있다.

$$V(t) = \frac{1}{C} \cdot Q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (1)$$

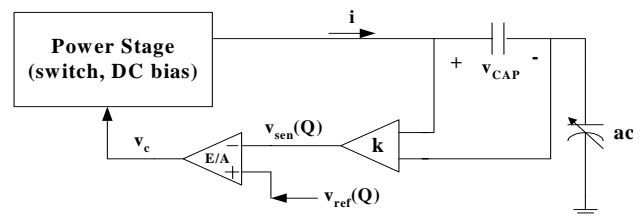
이렇게 함으로써, 선형적이지 않은 커패시턴스를 가진 부하에 있어서 선형적인 외부의 커패시터를 이용하여 전하량을 추정할 수 있다. 그러나 이런 방법은 압전 부하에 직렬로 커패시터 전압이 부가되어 구동 증폭기 및 전원부의 전력단 전압을 더 높이는 결과를 가져온다. 이렇게 됨으로써, 증폭기의 스위치 선정 및 열설계에 부담으로 작용하게 된다. 또한, 외부 커패시터로 전하량을 추정하는 것이므로 커패시턴스 값의 편차에 따라서 제어의 성능이 영향을 받게 된다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 결국 부가적으로 들어가는 정밀 커패시터 등 여러 가지 회로 요소들이 가격적인 부담으로 작용할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 기존의 방법을 변형한 전하량 제어 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 압전 전류를 적분하는 대신에, 전하량 기준치를 미분하는 방법이다. 기본적으로 수학적 원리는 식 (2)에서와 같이 거의 동일하지만, 전류를 적분하기 위하여 전력단 회로에 커패시터를 추가하는 것보다 신호처리부에서 미분하는 것이 구현상 간단해진다.

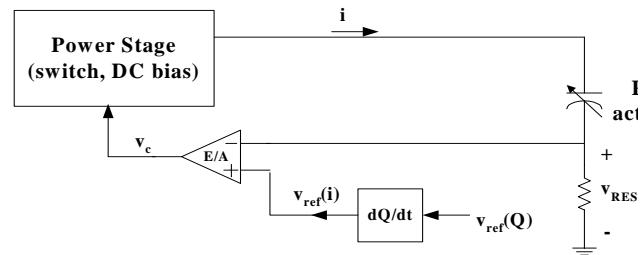
$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (2)$$

또한 이 방법은 측정용 저항을 사용하면, 용이하게

클래스 D급 증폭기에 적용 가능하다. 그림 6(b)에 간단한 제어 블록 다이어그램을 나타내었다. 측정값은 전류이지만, 기준치는 전하량에 대한 정보이므로, 실제로 제어가 되는 것은 압전의 전하량이 된다. 이는 전압의 기준치를 가지고 압전의 전압 및 전류를 동시에 측정하여 제어하는 기존의 2-loop 제어와는 다른 것이다<sup>[40]</sup>. 전하량을 제어함으로써, 높은 선형성을 얻게 되면서 동시에 저가형 시스템의 구성이 가능해진다.



a) 여분의 직렬 커패시터를 이용한 차지 제어 방식  
a) The charge control method using series capacitor



b) 전하량 기준치를 미분한 차지제어 방식  
b) The charge control method using differentiation of the charge reference

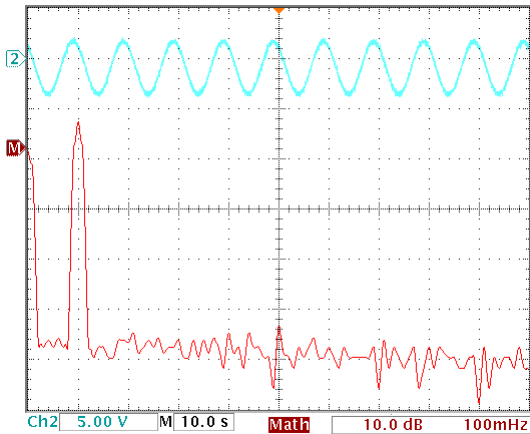
그림 6 전하량 제어 기법 구현 방법

Fig. 6 The Block diagram of charge-feedback control methods

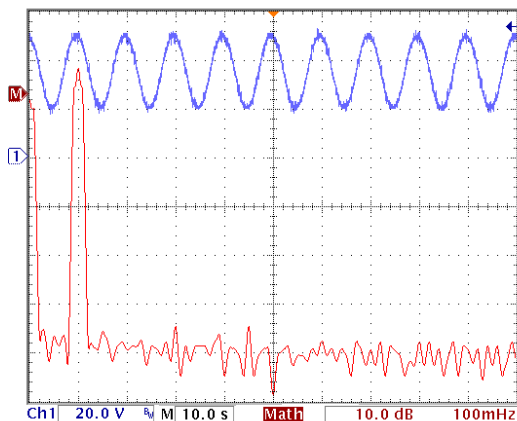
#### 3.2 실험결과

그림 7은 선형성 평가를 위한 하드웨어 테스트 결과를 보여준다. 액추에이터를 정현파 형태로 구동시킨 후, 출력 전류와 변위의 주파수 성분을 살펴 보았다. 그림 7(a)를 보면, 출력 전류 파형은 전류 되먹임을 통하여 100mHz의 정현파 기준치를 잘 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 파형의 푸리에 변환을 수행한 결과, 그림에서 나타난 것과 같이 총 왜곡율은 2차 및 3차 고조

파를 합산하여  $-40\text{dBV}$  ( $=1\%$ ) 이하이다. 이 때, 그림 10(b)에 나타난 것처럼 변위파형도 총 왜곡률이  $-52\text{dB}$  ( $\approx 0.25\%$ ) 로서 매우 선형적인 것을 알 수 있다. 이는 전하량 제어가 변위와의 선형적 관계에 의해서 간접 제어임에도 불구하고 높은 정밀도로 제어가 가능함을 보여주는 것이다.



a) 압전 전류의 시간 및 주파수 영역의 파형  
a) Piezo-current swing and the FFT waveforms



b) 압전 변위의 (11-29 $\mu\text{m}$ ) 시간 및 주파수 영역의 파형  
b) Piezo-displacement swing (11-29 $\mu\text{m}$ ) and the FFT waveforms

그림 7 압전 전류(전하량) 되먹임 제어를 적용한 클래스 D 급 증폭기의 선형성 실험 결과

Fig. 7 Linearity performance of class-D amplifier with piezo-current(charge) feedback control

### 3.3 변위 되먹임 제어

위에서 살펴본 전하 제어방식과 비교하기 위하여,

마이크로 변위제어 시스템에 있어서 가장 직접적인 방법인 변위 자체를 측정하여 제어하는 방법을 살펴본다. 그림 8에 변위 되먹임 제어를 구현한 하드웨어 구성도를 보여준다. 액추에이터의 변위 정보는 유도성 프루브 센서에 의해서 샘플링되고, 이 값을 디지털 위치표시계를 통하여 나타낸다. 이 정보는 또한 RS232/USB 포트 통신으로 중앙 컴퓨터에 실시간 저장된다. 그림 9에 변위 되먹임 제어 실험을 위한 장비 구성이 나와 있다. 액추에이터의 변위는 고정밀도 LVDT 프루브 센서 및 디지털 미터(millimar 1240, Mahr사)에 의해서 측정되었다. 디지털 미터와 컴퓨터 사이의 직렬통신을 위한 프로그램은 0.01초의 샘플링 속도를 가지고 MATLAB으로 작성되었다. 이 데이터는 외부의 전압원을 통해서 자체 제작된 증폭기에게 전해진다. 이 class-D 전력 증폭기는 양전원 바이어스로 140V를 가지며, 히스테리시스를 고려하여 음전원 바이어스로는  $-35\text{V}$ 를 가진다.

그림 10은 하드웨어 실험 결과를 보여준다. 그림 10(a)에서 변위 파형을 보면, 변위 되먹임으로 인하여 정현파 기준치를 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 주파수 성분을 보게 되면, 총 왜곡율은  $-40\text{dBV}$  ( $=1\%$ ) 이하가 됨을 알 수 있다. 마찬가지로, 그림 10(b)에 변위량을 좀 더 증가시킨 후 실험한 결과가 나와 있다. 이때는 히스테리시스의 증가로 인하여 총 왜곡율이 약  $-38\text{dB}$  ( $\approx 1.26\%$ )로 증가한 것을 알 수 있다. 이는 변위 되먹임 제어루프 구성시 디지털 미터 출력 및 컴퓨터에서의 신호 처리에서 오는 지연시간(propagation delay)이 크기 때문에, 안정성을 해치지 않는 범위 내에서 루프의 이득 및 대역폭을 높게 가져갈 수 없기 때문이다 (그림 8 참조). 따라서, 직접 변위 제어 방식으로 구성된 시스템의 한계를 뛰어넘기 위해서는 좀 더 고가의 디지털 처리 프로세서를 사용하여야 한다. 이러한 직접 제어는 시스템 규모가 크거나, 가격적인 면이 민감하지 않은 응용에 적합할 것으로 예상된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 마이크로 변위제어 시스템을 위한 정밀 압전 액추에이터 구동방법에 대하여 살펴보았다. 압전 액추에이터는 전압 구동시 변위가 히스테리시스 특성을 가지는 데, 이러한 특성 때문에 전압 되먹임 제어를 해도 변위에 오차가 존재하게 된다. 적층형 압전을 사용한 결과 총 왜곡율이 2.5%에 달하였다.

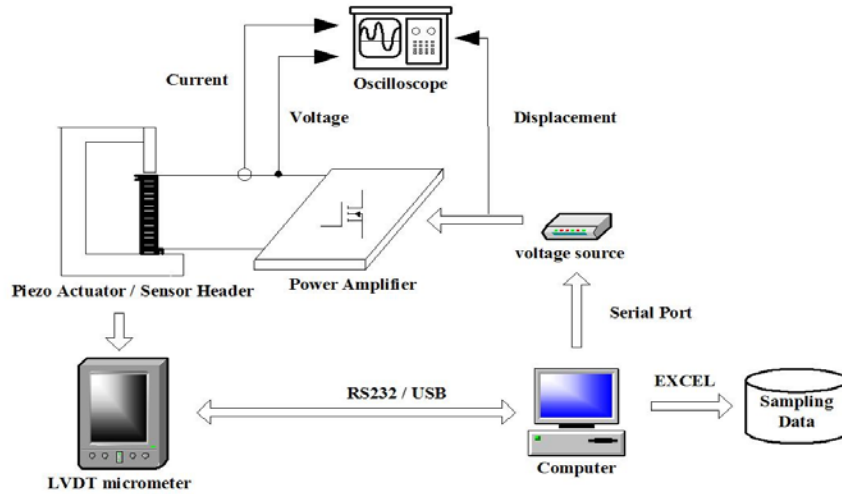


그림 8 변위 되먹임 제어 실험을 위한 하드웨어 간의 연결 구조도  
Fig. 8 Structure diagram of hardware experiment for positioning control

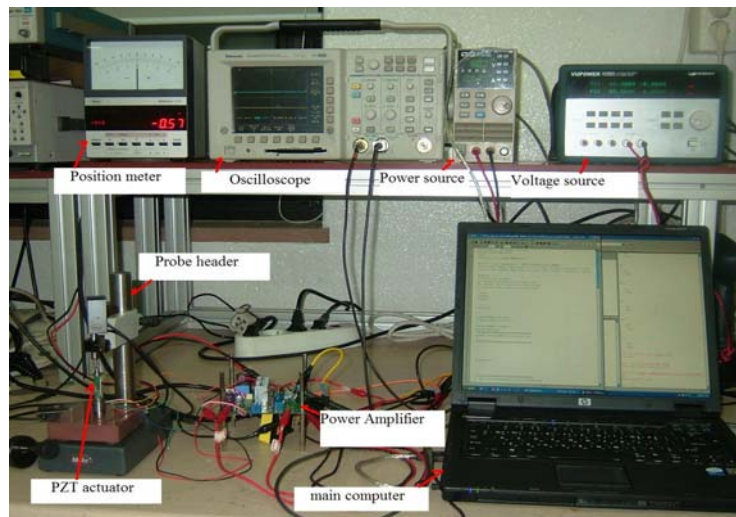


그림 9 마이크로 변위 제어 시스템을 위한 변위 되먹임 제어 실험 장비 사진  
Fig. 9 Experimental set-up for Displacement feedback control micro-positioning system

또 다른 제어 방법인 전하량 되먹임 제어 방법을 살펴 보았다. 기존의 전하량 제어 방법은 측정부에 여분의 직렬 커패시터를 사용하는 것이었으나, 이를 기준치를 미분하는 방법으로 대체하였다. 제안된 방법은 클래스 D급 스위칭 증폭기에 적용이 용이한 타입으로 구성이 간단하며, 선형성 테스트에서도 총 왜곡률이 -52dB ( $\approx 0.25\%$ )로서 매우 우수한 특성을 나타내었다.

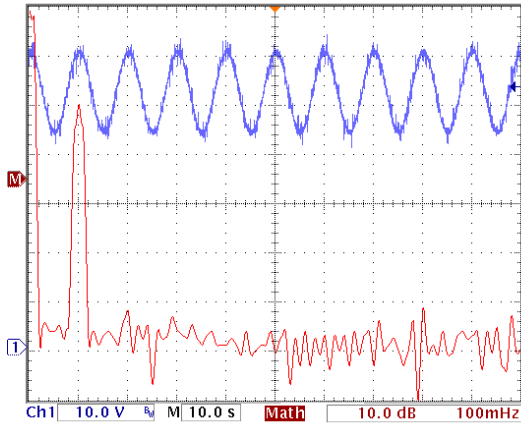
마지막으로 직접 변위 되먹임 제어를 살펴 보았다.

변위 제어는 직접적으로 변위를 측정하고 제어하므로 외란에 대하여 강인한 특징을 가지고 있지만, 디지털/아날로그 신호 변환 과정을 거치므로 위상 지연이 존재하여 루프 이득 및 다이내믹을 빠르게 하는데 한계가 있으며, 시스템을 구성하는데 가격이 올라가는 단점이 있다. 동일한 액츄에이터로 실험한 결과 변위량이 증가함에 따라 충분히 변위 오차를 보상해 주지 못하는 것으로 보였다.

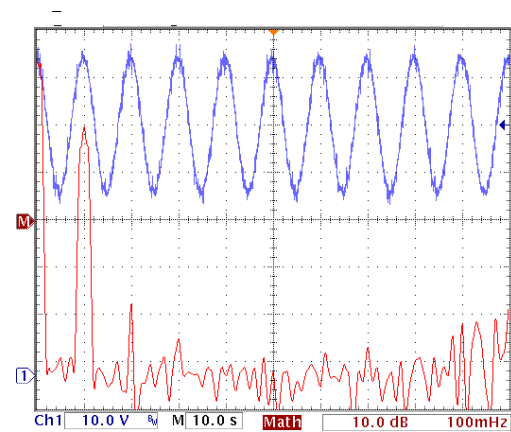
향후 계획으로서 전하량 되먹임 제어와 다른 제어를



결합한 2-loop 제어를 생각할 수 있으며, 또한 최신 디지털 제어 기법을 사용하여 루프 특성을 개선한 직접 변위 제어방식 또한 생각할 수 있다.



a) 변위 (25-35um) 및 푸리에 변환 파형  
a) Displacement (25-35um) and the FFT waveforms



b) 변위 (21-38um) 및 푸리에 변환 파형  
b) Displacement (21-38um) and the FFT waveforms

그림 10 변위 되먹임 제어를 사용한 클래스 D 증폭기의 선형성 실험결과

Fig. 10 Linearity performance of class-D amplifier with displacement feedback control

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 이공계 전문가 기술지원서포터즈사업으로 수행된 결과임.

## 참 고 문 헌

- [1] 차인수, 유권중, 백형래, 김영동, “피지제어기를 이용한 로봇트 액추에이터용 초음파 모터의 온도 보상에 관한 연구”, *전력전자학회논문지*, 제3권 제3호, pp. 165-172, 1998. 9.
- [2] 박홍순 · 양승학 임영철, “대화면 Backlight를 위한 EEFL 구동용 압전 인버터 운전 특성에 관한 연구”, *전력전자학회논문지*, 제12권 제3호, pp. 199-204, 2007. 6.
- [3] 이정민, 이석, 이정락, 목형수, “압전변압기를 이용한 소형 · 고효율 AC/DC 컨버터의 특성에 관한 연구”, *전력전자학회논문지*, 제9권 제2호, pp. 171-177, 2004. 4.
- [4] H. Shin, H. Ahn, and D. Han, “Design Analysis of Step-down Multilayer Piezoelectric Transformer”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 3, No. 2, pp. 139-144, 2003.
- [5] G. Chung, and K. D.T. Ngo, “Analysis of an AC / DC Resonant Pulse Power Converter for Energy Harvesting Using a Micro Piezoelectric Device”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 5, No. 4, pp. 247-256, 2005.
- [6] Domenico Campolo, Metin Sitti, and Ronald S. Fearing, “Efficient Charge Recovery Method for Driving Piezoelectric Actuators with Quasi-Square Waves”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 60, No. 3, pp. 237-244, 2003.
- [7] Robbins, W.P., “Simplified unipolar, quasisquare wave energy recovery drive circuits for piezoelectric actuators”, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, Vol. 52, No. 8, pp. 1420-1426, 2005.
- [8] Gnad, G. and Kasper, R., “A power drive control for piezoelectric actuators,” *Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium on*, pp. 963-967, 2004.
- [9] Krishnamachari, B. and Czarkowski, D., “Bidirectional buck-boost converter with variable output voltage”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on*, pp. 446-449, 1998.
- [10] Lindner, D. K., H. Zhu, C. Song, W. Huang, and D. Cheng, “Low Input Voltage Switching Amplifiers for Piezoelectric Actuators”, *Proceedings of SPIE’s 2002 North American Symposium on Smart Structures and Materials: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, 2002.
- [11] Zhu, H., Ragon, S., Lindner, D.K.; Abdalla, M.M., Seresta, O., Gurdal, Z., “Optimization of driving amplifiers for smart actuators using genetic algorithm”, *IECON '03*. pp. 2951-2956, 2003.

- [12] King A. Yi, and Robert J. Veillette, "A Charge Controller for Linear Operation of a Piezoelectric Stack Actuator", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 517-526, 2005.
- [13] Tomas Sluka and Pavel Mokry, "Feedback control of Piezoelectric actuator elastic properties in a vibration isolation system", *Ferroelectrics*, Vol. 351, No. 1, pp. 51-61, 2007.
- [14] Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society, An American National Standard: IEEE Standard on Piezoelectricity. The Institute of Electrical and Electronics Engineers. ANSI/IEEE Std., 1987.
- [15] M. Goldfarb and N. Celanovic, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", *IEEE control systems*, pp. 69-79, 1997.
- [16] Harris, M.G. Burmeister, W.J., Jr. Martin, R.J. Arangio, F.M. , "Vibration cancellation effectiveness using a second order piezoelectric actuator model," Circuits and Systems, 1990, *Proceedings of the 33rd Midwest Symposium on*, Page(s): 88-91, 12-14 Aug 1990.
- [17] [http://www.nec-tokin.com/english/product/product\\_list.htm#fun\\_06](http://www.nec-tokin.com/english/product/product_list.htm#fun_06).
- [18] Choi Sung-Jin, Modeling and Analysis of Disk-type Piezoelectric Transformer and Its Applications to Off-line Power Converters, Ph.D thesis, Seoul National Univ., 2006.
- [19] Changhai Ru, Lining Sun, "A new open-loop driving method of piezoelectric actuator for periodic reference inputs", *Ultrasonics*, pp. 633-637, 2006.
- [20] Michael Goldfarb, Nikola Celanovic, Behavioral Implications of Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation, NASA-CR-201454.
- [21] Paul Mayhan, K. Srinivasan, Sarawoot Watechagit, and Gregory Washington, "dynamic modelling and controller design for a piezoelectric actuation system used for machine tool control", *Journal of Intelligent material systems and structures*, Vol. 11, pp. 771-780, 2000.
- [22] Katsushi Furutani and Katsuhiko Iida, "driving method of piezoelectric actuator by using current pulses", *Meas. Sci. Technol.* , pp. 2387-2394, 2006.
- [23] 김형석, 이수희, 정해철, 이병룡, 안경관, "역 히스테리시스 모델링과 오차학습을 이용한 압전구동기의 초정밀 위치제어", 한국정밀공학회, 추계학술대회는논문집, 2004.
- [24] Nobuhiko Henmi and Michihiko Tanaka, "An Open-loop method for point-to-point positioning of a piezoelectric actuator", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 8, No. 2, pp. 9-13, 2007.
- [25] Ru Changhai, Sun Lining, Rong Weibin, Chen Liguo, "adaptive inverse control for piezoelectric Actuator with dominant hysteresis", *International Conference on Control Applications*, pp. 973-976, Sept. 2004.
- [26] Aage Skullestad, "improved instrument accuracy using active vibration damping", *Mechatronics*, pp. 451-464, 2003.
- [27] Katsushi Furutani, Mitsunori Urushibata and Naotake Mohri, "Displacement control of piezoelectric element by feedback of induced charge", *Nanotechnology*, pp. 93-98, 1998.
- [28] Jonq-Jer Tzen, Shyr-Long Jeng, Wei-Hua Chieng, "modeling of piezoelectric actuator for compensation and controller design", *Precision Engineering*, pp. 70-86, 2003.
- [29] Changhai Ru, Lining Sun, "Improving positioning accuracy of piezoelectric actuators by feedforward hysteresis compensation based on a new mathematical model", *Review of Scientific Instruments*, 2005.
- [30] A. J. Fleming and S. O. R. Moheimani, "improved current and charge amplifiers for driving piezoelectric loads, and issues in signal processing design for synthesis of shunt damping circuits", *Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 15, pp. 77-92, Feb. 2004.
- [31] C. Dorlemann, P. Mub, M. Schugt, R. Uhlenbrock, "New high speed current controlled amplifier for PZT multiplayer stack actuators", *International Conference on New actuators*, 11-12 June 2002.
- [32] Maciej A. Noras, Jerzy Kieres, Karla M. Mossi, Kam K. Leang, "The design of a high-voltage charge-feedback piezoamplifier", *International Conference on New Actuators*, pp. 553-555, 14-16 June 2006.
- [33] John A. Main, Ephrahim Garcia, and David V. Newton, "precision position control of Piezoelectric actuators using charge feedback", *Jouranal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 18, No. 5, pp. 1085, 1995.
- [34] Jiyuan Luan, "Design and development of high-frequency switching amplifiers used for smart material actuators with current mode control", Virginia Tech., Master's thesis, 1998.
- [35] John A. Main and Ephrahim Garcia, "Piezoelectric

stack actuators and control system design: strategies and pitfalls”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 3, May-June 1997.

- [36] Gi Sang Choi, Hie-sik Kim, Gi Heung Choi, “A study on position control of piezoelectric actuators”, *ISIE*, pp. 851-855, 1997.
- [37] C. V. Newcomb, I. Flinn, “improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators”, *Electronic Letters*, Vol. 18, No. 11, pp. 442-444, 1982.
- [38] K. R. Koops, P. M. L. O. Scholte, W. L. de koning, “observation of zero creep in piezoelectric actuators”, *Applied Physics A - Materials Science & Processing*, pp. 691-697, 1999.
- [39] Robert H. Comstock, Charge control of piezoelectric actuator, U. S. patent, 4263527, 1979.
- [40] S. O. Reza Moheimani, Benjamin J. G. Vautier, “resonant control of structural vibration using charge driven Piezoelectric actuators”, *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 1021-1035, November 2005.

Technology group. 1995년~현재 서울대 전기컴퓨터공학부 교수. 2005년~2006년 당 학회 회장 역임.



**최성진(崔城振)**

1973년 2월 4일생. 1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기 컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2006년~2008년 Piezo Solution Technology Co. Ltd. CTO. 2008년~현재 삼성전자 디지털미디어총괄 영상디스플레이 사업부 책임연구원.

저 자 소 개



**박종후(朴鍾厚)**

1975년 8월 26일생. 1999년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기 컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2004년~2005년 Virginia Tech (Visiting Scholar). 2006년~2007년 반도체공동연구소 선임연구원 및 연수연구원. 2007년~현재 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원.



**백종복(白種馥)**

1983년 1월 3일생. 2007년 경북대 전자전기 컴퓨터공학부 졸업. 2007년~현재 서울대 공대 전기컴퓨터공학부 석사과정.



**조보형(趙普衡)**

1952년 2월 11일생. 1978년 California State Polytechnic University 전기공학과 졸업. 1980년 California Institute of Technology 전기공학과 졸업(석사). 1985년 Virginia Institute of Technology 전기공학과 졸업(공학박). 1980년~1982년 MTS in TRW Space and