

# 전자석을 이용한 자기부유기의 제작 및 실험

임정식, 김정재\*, 송승호\*

서울대학교 전기공학부, 전북대학교 전기공학과\*

## A study on magnetic levitator using electromagnet

Jeong-Sik Yim, Jeong-Jae Kim\*, Seung-Ho Song\*

Seoul National University, Chonbuk National University\*

### Abstract

자기부유기는 전자력을 이용해서 쇠구슬을 공중에 띄우게 할 수 있는 장치이다. 본 논문에서는 자기 부유기의 기본 원리와 모델링에 관해 소개하고, 디지털 신호처리와 PWM전력변환기를 사용한 자기 부유기를 직접 제작하고 실험을 통해 성능을 검증하였다. 자기부유기의 원리는 고속회전기에 사용되는 자기베어링이나 자기부상 열차의 부상 시스템에 응용될 수 있다. 또한 전기공학 분야의 다양한 교과과정에서 습득한 지식을 활용할 수 있는 학부 프로젝트 실험 주제로 적합하다.

**Key Words** : digital control, magnetic levitator, electromagnet

## 1. 서 론

자기 부유기는 많은 사람들이 연구한 주제이며, 자기 부유기를 제작에는 R-L 회로의 특성, 전기에너지에서 기계에너지로 변환, 전력용반도체의 사용 방법, 비례 미분 적분 제어이론의 이해, 마이크로 프로세서의 이해와 사용법등 전기공학의 여러 이론들이 적용되고 사용된다. 그러므로 자기부유기 제작 및 실험을 통해서 전기공학 전공자는 전공에 대한 이해를 높이고, 이론을 실제 상황에 적용하는 방법을 터득할 수 있다.

쇠구슬이 공중에 떠 있을 수 있게 하기 위해서 쇠구슬에 작용하는 두개의 힘, 전자력과 중력의 합이 일정위치에서 0이 되도록 제어를 하면 된다. 제어 방법에는 연산증폭기를 이용해서 아날로그 제어기를 구성하는 방법과 고성능 DSP를 이용한 디지털 제어기로 구성하는 방법이 있다.[1] 디지털 제어기는 간단한 프로그램 조작으로 다양한 시스

템에 적용할 수 있고, 최근 DSP의 가격이 하락하고 있기 때문에 아날로그 제어기에 비해 많은 장점을 갖는다.

본 논문에서는 고성능 DSP를 이용한 디지털 제어기로 자기부유기를 제작하고 제작된 자기부유기 특성을 실험으로 보여준다.

## 2. 실험

### 2.1 자기 부유기의 모델링

그림1에서 보면 쇠구슬에 작용하는 힘은 단 두 가지이다. 쇠구슬을 아래로 떨어지게 만드는 중력과 이와 반대방향으로 작용하는 전자석에 의한 힘이다. 평형위치( $x_0$ )에서 두 힘의 합이 0이라면 쇠구슬을 평형위치( $x_0$ )에 떠 있을 수 있을 것이다.

두 힘의 합이 0이 되도록 하기 위해서는 두 힘을 알아야 한다.

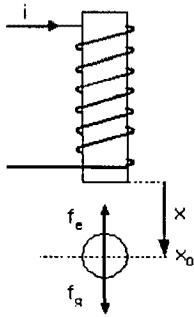


그림 1 시스템 모델링을 위한 개념도

$i$ : 전자석에 흐르는 전류     $x$ : 쇠구슬의 위치  
 $f_e$ : 전자석에 의한 부상력     $f_g$ : 중력

$$\lambda = L(x)i \quad (1)$$

$$W_e = \int_0^i \lambda di = \int_0^i L(x)idi = \frac{1}{2} L(x)i^2 \quad (2)$$

$$f_e = \frac{ROUNDW_e}{ROUNDx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (3)$$

$$L(x) = L_1 + \frac{L_0 x_0}{x} \quad (4)$$

$$f_e = -\frac{1}{2} i^2 \frac{L_0 x_0}{x^2} \quad (5)$$

$$f_x = f_g + f_e = mg - \frac{1}{2} i^2 \frac{L_0 x_0}{x^2} \quad (6)$$

이상적인 시스템에서의 총 자속은 (1)과 같다. 공극에 저장된 에너지는 (2)와 같고 전자석에 의한 전자력은 (3)과 같이 나타낼 수 있다.  $L(x)$ 은 공극 길이에 의해서 결정되는 인덕턴스이고 (4)와 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.  $L_1$ 은 쇠구슬이 없을 때의 인덕턴스 이고,  $L_0$ 는 쇠구슬이 평행위

치( $x_0$ )에 있을 때 인덕턴스의 증가분을 나타낸다. [2] (3),(4)에서 전자석에 의한 힘 (5)를 구할 수 있다.

쇠구슬에 작용하는 힘의 총합은 (6)과 같이 되고 ( $i_0, x_0$ )에서 테일러 전개하면 (7)과 같다. [3]

$$f_x = mx'' = -\frac{L_0 x_0 i_0^2}{x_0^2} i + \frac{L_0 x_0 i_0^2}{x_0^3} x \quad (7)$$

(7)에서 쇠구슬에 가해지는 두 힘의 합( $f_x$ )이 0이 되기 위해서는 쇠구슬의 위치( $x$ )의 변화에 따라 전자석에 흐르는 전류( $i$ )가 증가하거나 감소해야 됨을 알 수 있다.

## 2.2 실험장치의 구성

그림2는 자기 부유기 제어 보드이다. 컨트롤러는 TMS320C31을 이용하고 8개의 A/D입력과 4개의 D/A출력이 있다. 그리고 PWM출력을 위하여 8254를 사용하였다. PWM 출력단은 포토커플러를 이용해서 파워보드와 디지털 보드를 절연시켰다.

그림3은 전력 증폭기의 회로도이다. 1개의 전력용 MOSFET를 사용해서 전자석에 흐르는 전류를 제어하였고, 이때 흐르는 전류를 피드백 제어하기 위해서 전류센서를 사용하였다.

Turn-off시 나타나는 과도전압으로부터 MOSFET을 보호하기 위하여 R-C-D 스너버를 사용하였고, 코일에는 프리휠링(free wheeling)다이오드가 사용되었다. 직접 제작한 전자석은  $R=4.5\Omega$   $L=292mH$  였다.

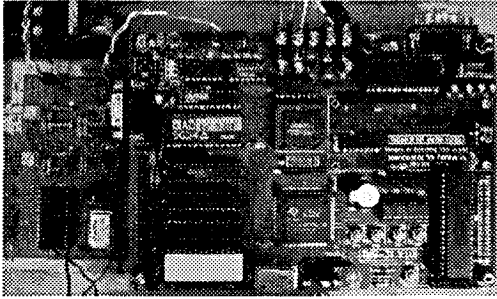


그림 2 자기부유기 제어보드

노이즈의 영향을 최소화하기 위해서 이다.

### 2.3 제어 알고리즘

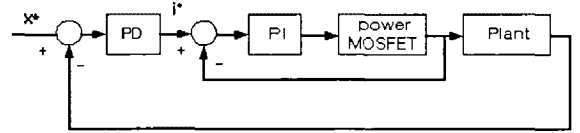


그림 5 전체 시스템 블록도

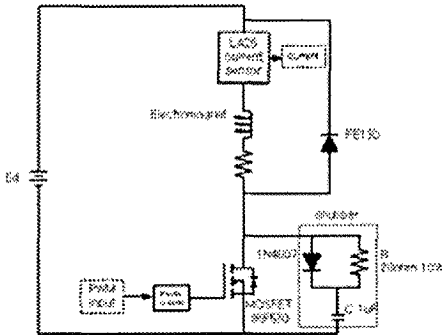


그림 3 자기부유기 전력 증폭기

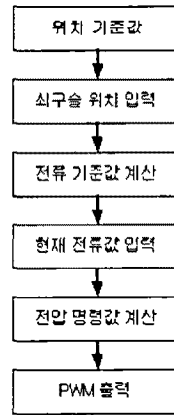


그림 6 제어 프로그램을 위한 순서도

그림 5은 전체 시스템의 블록도를 나타낸다. 전류제어기는 비례 적분(PI)제어를 사용하였고 위치 제어기는 비례 미분(PD)제어기를 사용하였다.

그림6는 제어프로그램의 구성을 위한 순서도이다. 스위칭 주파수는 10kHz이고 최구술의 위치 파악에서 PWM 출력까지의 동작이 100us안에 이루어진다.

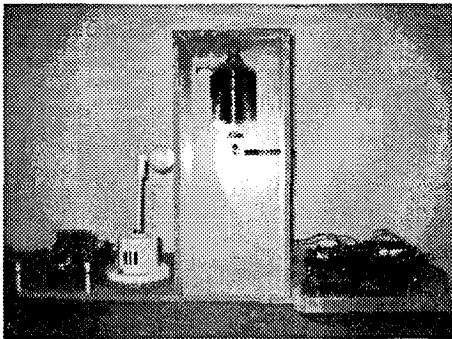


그림 4 자기부유기의 전체 구성

그림 4는 자기부유기의 전체 구성을 나타내고 있다. 위치제어를 위해 할로젠램프와 빛의 양에 따라 저항 값이 변하는 CdS를 사용하였다. 위치 센서를 사용하지 않고 코일에 고주파 신호를 주입하여 인덕턴스를 알아내고, 이를 통해 위치를 파악하는 방법도 있다.[4]

전자석을 중심으로 좌우에 파워보드와 디지털 보드가 위치해 있다. 이는 파워보드에서 발생하는

### 3. 결과 및 고찰

그림7은 스텝 명령에 대한 전류제어기 출력 파형과 PWM출력을 나타낸다. 그리고 그림8은 자기부유기 동작 초기에 위치제어기의 특성을 나타내는데, 최구술이 점점 안정된 상태에 도달하는 것을 볼 수 있다.

자기 부유기의 안정적인 동작을 위해서는 전류 제어기의 빠른 응답이 필요하고, 위치제어기의 큰 미분항 이득이 필요하다.

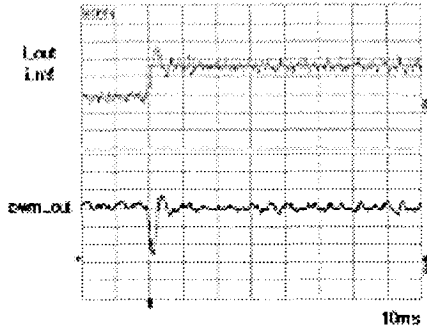


그림 7 전류제어기 특성 실험

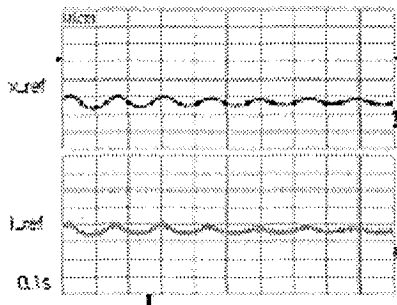


그림 8 위치제어기 특성 실험

그림 7은 제작된 자기부유기를 보여 준다. 작은 외란에도 평형상태를 유지했고, 시간이 지나면 코일에 발생하는 열에 의해 아날로그 제어기는 영향을 받는 반면 디지털 제어기로 구성된 자기 부유기는 안정된 특성을 보였다.

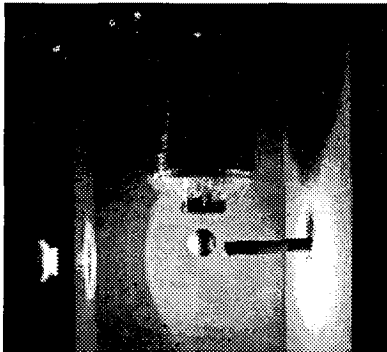


그림 9 자기 부유기

본 논문에서는 자기 부유기 모델링, PWM 전력 변환부 설계 및 제작, 전류제어 및 위치제어 특성 실험을 통해 아날로그 제어기에 비해 매우 안정적인 동작 특성을 보인 디지털 제어기를 이용한 자기부유기를 제작하고 성능을 검증하였다.

자기 부유기의 원리는 여러 분야에서 응용되고 있고, 전기공학에서 다루는 많은 과목들과 밀접한 관계가 있기 때문에 학부 프로젝트 실험 주제로 적합하다고 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] <http://www.oz.net/~coilgun/levitation/home.htm>
- [2] T.H.Wong, "Design of a Magnetic Levitation Control System-An Undergraduate Project", IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION, vol. E-29, no. 4, 196-200, November 1986
- [3] 박세준 "자기 부유기의 설계 및 구현" 서울대학교 전기공학부, 학사학위 논문, 1997
- [4] 임정식, 김장환, 설승기, 안형준, 최상현 "자기베어링의 센서리스 제어를 위한 회전축 위치 추정", 대한 전기학회, 2002
- [5] 김정재, 이혜인, 육진성 "전자석을 이용한 자기 부유기" 전북대학교 전자정보공학부, 현장실습 파일럿 스터디 결과 보고서, 2002

### 4. 결 론