

자기 부상 실습 장치의 개발에 관한 연구

이정우*, 정연두*, 한명근**

삼척대학교 메카트로닉스 공학부*, 한국생산기술연구원**

A Study on the Development of Magnetic Levitation Experiment Kits

Jeong-Woo Lee*, Yeon-Doo Cheong*, Myoung-Keun Han**

*Division of Mechatronics, Samcheok National University**
*Korea Institute of Industrial Technology***

국문요약

이 논문은 삼척대학교 메카트로닉스 공학부에서 자동제어, 디지털제어, 마이크로 프로세서응용의 실습을 위해 사용되는 자기 부상실습장치의 설계와 제작에 관한 것이다. 이 장치는 MIT 대학의 설계에서 영감을 받아 개발되었으나, MIT의 장치가 아날로그형임에 비해 디지털형으로 개발하였다. 이 실습장치는 아날로그와 디지털 방식으로 동시에 제어하고 모니터링할 수 있다. 더구나 부품의 가격은 MIT의 것과 비슷하거나 더 싼 편이다. 그리고 이 장치는 자기 홀 센서나 적외선 센서를 이용하여 제어할 수 있어서 학생들에게는 센서의 사용과 신호처리를 위한 다양한 경험을 얻을 수 있도록 되어있다. 이 설계는 저자들이 제작하여 시험해 보았으며, 학생들에게 실험 프로젝트 형식으로 제공될 것이다. 이 장치는 의도적으로 덜 보상되어지고, 적당한 수준까지만 조립된 상태에서 학생들에게 제공될 것이며, 학생들은 센서신호와 제어기의 성능을 분석한 후 보상기를 설계하고 센서의 신호를 처리할 것이 기대된다.

Abstract

This paper describes the design and fabrication of magnetic levitation kits for use in the hands on experiments of automatic control, digital control and microprocessor applications in the division of mechatronics in Samcheok university. The kits are developed inspired by MIT's design, but it is designed on the digital basis, whereas MIT's is designed on the analog basis. As a result, the kits can be monitored and controlled on the analog and digital control techniques. Furthermore, the cost of kit components is comparable or lower to that of MIT design. And the kits can be controlled with magnetic hall sensors and/or

infrared sensors, which provides more versatile experience on the use of sensors and signal filtering to the students. The design is fabricated and tested by authors and will be provided to the students as lab projects. The kits will be intentionally presented with a device that is poorly instrumented and poorly compensated. And the students are expected to analyze sensor signal and controller performance, and then, perform compensator design and signal filtering.

주제어 : 자기부상, 자동제어 실험, 보상기 설계 실험

Keywords : Magnetic Levitation, Automatic Control Experiment, Compensator Design Experiment

I. 서 론

1. 연구 동기

최근 우리나라에서는 공학계열 학습의 기피현상이 두드러지고 있으며, 이에 따라 학생들의 학습능력 과 학습 성취도도 떨어지고 있는 상태이다. 특히 기계계열이나 메카트로닉스 공학계열에서는 수학적 능력, 시스템에 대한 물리적인 이해력과 분석능력이 종합적으로 요구되는 자동제어교과목에 대한 기피 현상이 두드러지고 있다. 이는 그간 자동제어 교과목을 제어시스템의 모델링 및 분석, 제어시스템의 설계 등에 대한 이론교육에 치우쳐있어 왔기 때문에 학생들의 관심을 불러일으키기 어려웠고, 학습된 이론을 실감할 수 있는 기회가 많지 않았기 때문이라고 보이며, 이러한 면에서 제어공학의 교육을 담당하는 교수로서 반성할 면이 있다고 보인다. 또한 삼척대학교에서는 기존의 정밀기계공학과를 메카트로닉스 공학부로 확대 개편하였기 때문에 자동제어교육의 중요성은 더욱더 두드러진다. 따라서 학생들의 관심을 환기 시키고 학습동기를 부여하기 위해서 몇 가지의 실습 장치를 개발하기로 하였다. 개발하려는 장치는 다음과 같은 특징을 가지는 것이 바람직할 것이라고 보인다.

- **저렴한 가격에 구성할 수 있을 것** : 가능하면 학생들이 실습을 마치고 난 후에 학생들이 집으로 가져갈 수 있을 정도의 가격대이어야 한다. 이는 MIT의 Feedback System(MIT6.302)의 강의 후 학기말 프로젝트(Term Project)로 사용하는 간단한 장치(약 20달러 내외)를 학생들이 실습한 후 집으로 가져가게 함으로서 기념할 수 있게 한 것이 동인이 되었다(Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden, 2004). 또한 실험실습비가 넉넉하지 않은 상태에서 실습의 목적을 달성하기 위한 것도 하나의 이유이다.

- **학생들의 호기심과 관심을 환기시킬 수 있을 것** : 지적인 호기심이 바로 학습의 동인이 되기 때문이기도 하며, 자동제어 교과에 대한 선호도를 높이기 위함이다.

이러한 배경에서 삼척대학교 메카트로닉스 공학부에서는 다음 두 가지의 실습 장치를 자동제어의 실습 장치로 제공하기로 하였다.

- **자기부상(Magnetic Levitation) 실습 장치** : 이는 자기 부상열차의 동작원리이기도하며, 줄 없이 자기력만으로 물체를 공중에서 떠있도록 만드는 것이기 때문에 학생들의 호기심을 자극할 수 있다

는 것이 선택의 주요 이유이다. 또한 실습 장치를 구성하기 위한 부품 구입비용이 2-3만원 대로 비교적 저가인 것이 장점이다. 단점으로는 비선형시스템이면서 불안정한 시스템이기 때문에 실습에 성공하기 힘들다는 것이다. 하지만 실습을 성공적으로 완수한 후 학생들의 성취감은 높을 것으로 기대된다. MIT에서는 제어실습을 위하여 네 가지 장치를 제공하고 학생들의 선호도에 따라 실습의 내용을 선택하는데 약 40%의 학생들이 이 실습을 선택하였다고 한다.(MIT에서는 실습 장치로 Thermal System의 보상, Ball Balancing, PLL Loop, Magnetic Levitation 의 네 가지를 제공한다고 한다(Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden, 2004).)

- **선추적 모형자동차(Line Tracer)** : 이러한 장치는 AGV(Automated Guided Vehicle)의 동작원리가 되며, 최근에는 이러한 장치를 가지고 국내에서도 경연대회가 활발하게 열리고 있다. 또한 학생들이 자신의 아이디어를 동원하여 여러 가지 다른 기능을 부가할 수 있으며, 실습에 필요한 비용도 2만원 안팎이라는 것도 장점이 된다. 단점으로는 기본적으로 이러한 시스템은 마이크로프로세서를 이용하여 제작되는 것이기 때문에 마이크로프로세서에 관한 학습이 선행되어야한다는 것이다. 하지만 학생들의 선호도가 클 것이라는 기대를 가질 수 있으며, PID제어에 관한 실습이 가능(elm-chan.org, 2004)하기 때문에 선택하게 되었다.

이 논문은 위 두 가지 장치 중 자기부상 실습 장치의 개발에 관한 내용이다. 개발의 목적을 다음과 같이 설정하였다.

- 자동제어의 실습이 가능할 것.
- 타교과목에서의 실습 장치로도 사용할 수 있을 것.
- 실습 장치의 부품 구입가격이 합계 30,000원을 넘지 않을 것.

2. 타 대학 및 실험장치 업계의 동향

제어공학의 교육에 있어서 실습을 통한 교육은 어려운 제어공학의 내용을 학생들이 실감할 수 있게 할 수 있도록 도와주기 때문에 다른 어떠한 교과목보다 중요하다고 보이며, 따라서 많은 종류의 제어공학실습 장치가 시판되고 있다. 이렇게 실습 장치 업체에서 판매하는 자기부상 실습 장치의 가격은 50만원~700만원 정도로 보이며, 가격이 높을수록 많은 실습이 가능하도록 되어 있다. ECP Systems사의 경우(www.ecpsystems.com, 2004) 단일 입출력, 다입력-다출력시스템, 등의 실습이 가능하도록 되어 있으나 대부분의 실습내용은 대학원 수준의 내용이어서 학부 학생들의 교육에는 적합하지 않다고 판단된다. Guy Marsden은 www.artec.net/Levitation 에서 자신이 구성한 자기부상 실험 장치를 미화 50달러(운송비 20달러 별도)로 판매하고 있는데, 저자가 조사한 바로는 이것이 가장 저렴한 가격의 자기부상 실험장치인 것으로 보여 진다. Guy Marsden의 장치(Guy Marsden, 2004-1; Guy Marsden, 2004-3) 와 거의 동일한 장치를 MIT에서는 몸체를 제외한 구입부품의 가격이 미화 18.78달러인 실험 키트를 학생들에게 제공하고 있다(Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden, 2004). 그러나 이와 동일한 부품을 국내에서 구입하는 경우 LMD182001의 가격이 16,830원(MIT의 구입 가격: 8.13달러)로서 미국 현지보다 상당히 고가이며, 그나마 SS490A(홀(Hall) 센서, Honeywell)는 국내에서 구하기 어려워 수입해야 하는 것으로 조사되었다. 또한 MIT에서 사용하는 장치는 Analog 회로를 이용한 것이어서 자동제어 이외의 목적에는 사용하기 어려운 것으로 조사되었다. 그러나 학생들의 보고서(Adam Kumpf, 2003)를 보면 학습 성취도는 높은 것으로 판단된다.

Barney Arntz는 기본적인 구성이 MIT의 구성과 같으나 부유물의 흔들림을 억제하기 위하여 와전류(Eddy Current)를 사용하는 방법을 채택하였다(Barney Arntz, 2004). 한편 University of Bridgeport에서는 AN221K04라고 하는 개발보드(Field Programmable Analog Array 포함)를 사용하여 실습에 사용하고 있으나(Subramanian Ramachandran and Lav Thyagarajan, 2004) 가격이 고가인 것으로 판단된다. Bill Beaty는 간단히 Power Transistor두개와 코일 그리고 홀 센서등을 이용한 자기 부상장치(Bill Beaty, 2004)를 제안하고 있으나 실습목적으로 사용할 수 있을 정도로 안정적이지는 않은 것으로 보인다.

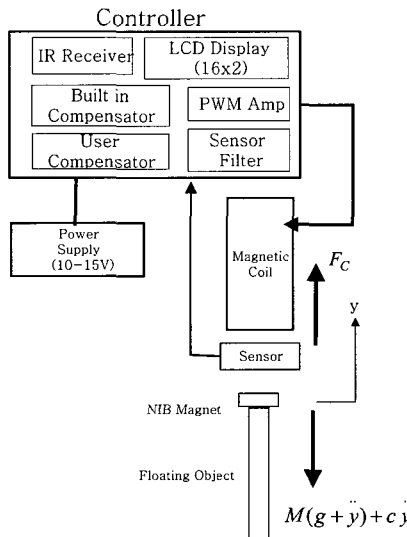
기타 문헌에서는 LNS Technologies사(www.techkits.com, 2004)에서 자기 부상장치 조립키트를 판매한다고 보고되어 있으나 저자들의 조사에서는 검색되지 않았다. 한편 국내의 대학에서는 이러한 장치를 실험실습 장치로 사용하는 경우를 찾지 못하였다.

II. 자기 부상 실습 장치의 설계

1. 자기 부상 실습 장치의 구성

자기 부상(Magnetic Levitation)은 자기력을 이용하여 줄 없이 물체를 공중에 띄우는 것을 말한다(wikipedia.com, 2004). 이러한 장치는 다음과 같이 구성된다.

- 중앙 제어장치 : 연산증폭기를 이용한 아날로그 제어, 혹은 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어부.
- PWM 및 증폭부 : 제어의 결과를 펄스폭 변조(PWM, Pulse Width Modulation)으로 바꾸고 증폭하는 부분.
- 센서 : 자기의 세기를 감지하는 홀 센서, 혹은 광센서 등을 이용하여 부유물의 위치를 감지하는 부분.
- 전자석 : 부유물을 띄우기 위한 힘을 제공하는 구동기.
- 부유물 : 자기력에 의하여 공중에 띄워지는 물체.



(그림 1) 자기 부상 실습 장치의 구성

각 부분의 설계에 있어서 다양한 방법들이 제안되어 있지만 여기에서는 학생들이 실습을 마친 후 기념으로 집으로 가져갈 수 있는 저렴한 가격의 설계에 주안점을 두었다.

2. 자기 부상 실습 장치의 설계목적

자기부상 실습 장치를 설계함에 있어서 다음과 같이 다양한 목적으로 사용할 수 있도록 하였다.

- **자동제어의 실습** : 제어기는 적당히 조절되어 있는 상태에서 학생들이 연산증폭기(Op-Amp, Operational Amplifier)를 이용하여 아날로그 제어를 실습할 수 있도록 한다. 이 경우에는 디지털 부분은 학생들이 건드리지 않으며, 센서 신호의 보상기만을 설계하고 조정한다.

- **펄스폭 변조 실습** : 펄스폭 변조(PWM)실습이 가능하도록 PWM방식을 이용하여 자화 코일에 에너지를 가한다.

- **마이크로프로세서 실습** : 마이크로프로세서를 이용하여 제어기를 만듦으로서 학생들이 마이크로프로세서의 프로그래밍을 실습할 수 있도록 한다.

- **센서 실습** : 홀 센서와 적외선(IR, Infrared) 센서에 관련된 실습을 할 수 있도록 한다. 다양한 필터 알고리즘을 적용해 볼 수 있도록 한다.

- **디지털 제어 실습** : 디지털 제어기를 설계하여 샘플링 시간에 대한 영향, 아날로그 제어기의 등가 디지털제어기로의 변환 등을 실습할 수 있다.

- **기타** : 사용자의 입력을 위하여 키보드를 설치하지 않고, 가정에서 많이 사용하는 적외선(NEC 방식) 리모컨을 사용하여 제어에 필요한 이득을 설정할 수 있도록 한다. 이를 통하여 적외선 리모컨의 작동원리를 학습할 수 있다. 또한 RS-232직렬통신을 통하여 컴퓨터 모니터 등에 제어의 결과에 대한 데이터를 보내주어 디지털 데이터를 수집할 수 있게 하고, 간단한 RS-232통신에 대하여 이해할 수 있도록 한다.

이러한 기능을 부가함으로써 회로는 약간 복잡해 졌지만, 아날로그 제어기에서는 구사할 수 없었던 여러 가지의 실습이 가능하도록 하였다. 이는 MIT의 설계에 비하여 진보된 것으로 볼 수 있다.

3. 중앙 제어부의 설계

제어기의 CPU로는 Atmel사의 Atmega8을 사용하였다. 이 CPU는 디지털 입출력뿐만 아니라 아날로그신호를 여섯 개까지 읽어 들일 수 있기 때문에 별도의 아날로그-디지털 변환기(Analog to Digital Converter)가 필요 없다는 장점이 있으며, PWM 신호를 세 개 이상 만들어 낼 수 있다. 단점은 28핀이기 때문에 충분한 디지털 입출력 핀을 가지고 있지 못한 것이지만 자기부상 장치의 실험에서는 디지털 입출력이 많지 않기 때문에 문제되지 않는다. 실제로는 사용하지 않는 핀을 이용하여 LCD 표시부를 붙일 수 있도록 하였다. 필요에 따라 사용할 수 있도록 발광 다이오드(LED)를 부착하였다. 적절한 디지털 신호의 입출력을 위해서 GAL 16V8을 부착하였다.

PWM 신호는 다음과 같이 발생시켰다. Atmega8의 timer0를 이용하였으며, 분주기(Prescaler)는 64(혹은 16)을 사용하였다. 사용 모드는 Phase Frequency Correct PWM 모드(mode 8)을 사용하였으므로, 16비트 레지스터 ICR1에 상한값(Top Value)를 저장하는데 이 값을 16진수 0x00ff로 하였다. 이 경우 타이머 1의 Overflow 인터럽트는 하한값(0)에서 발생된다. 11.0592MHz의 클럭을 사용하였으므로 다음과 같은 PWM 주파수가 발생된다.

$$\frac{11.0592 \times 10^6}{64} / (256(ICRI) \times 2) = 337.5 \text{ Hz}$$

윗 식에서 나누기 2를 한 이유는 상한값까지 올려세기(Up Counting)한 후에 다시 하한값까지 내려세기(Down Counting)를 하기 때문이다. 만일 분주기를 16으로 설정하여 사용한다면

$$\frac{11.0592 \times 10^6}{16} / (256(ICRI) \times 2) = 1350 \text{ Hz}$$

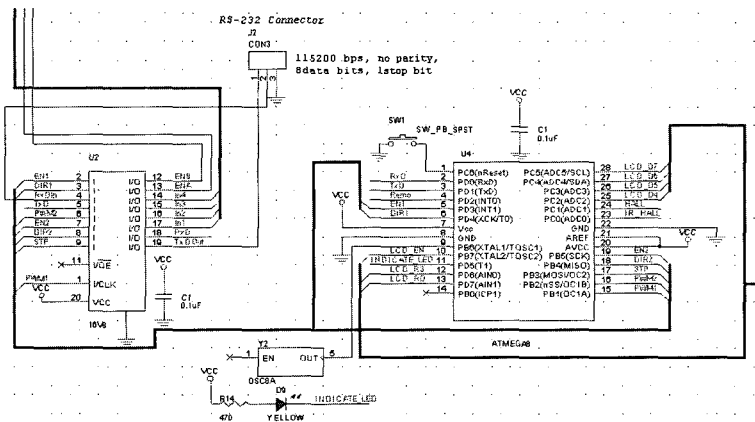
가 된다. 이 주파수는 가청 주파수 대역이어서 잡음 방지 처리를 하지 않으면 전화통화시 잡음이 섞이게 된다.

4. 제어 정보의 입출력

그림 2 CPU주변의 회로 제어정보는 보상된 제어기의 제어 성능을 정량적으로 평가하기 위해서도 필요하고 보상기를 설계하는 학생들의 입장에서도 필요하다. 이를 위해서 제어정보의 출력은 다음 두 가지가 가능하도록 하였다.

- RS-232통신을 통한 제어정보의 출력 : 신호흐름을 제어하지 않는 단순한 형태의 RS-232통신을 통하여 제어 결과를 받아볼 수 있도록 하였다. 컴퓨터 측에서는 하이퍼 터미널(Hyper Terminal) 프로그램 등을 이용하여 이 결과를 받아 볼 수 있다. 샘플링 시간이 짧은 경우에는 많은 양의 정보를 출력하기 어려운 단점이 있다.

- LCD 표시 출력 : 사용자의 선택에 따라 16자×2줄의 LCD 문자 출력을 부착하여 볼 수 있도록 하였다. 이는 현재 PID 이득과 샘플링 시간 등을 볼 수 있도록 하였다. 필요에 따라 Dead Band 조정 값, 전방향 보상(Feedforward Compensation)값 등을 볼 수 있도록 할 수 있다. 디스플레이는 제어를 위해서 꼭 필요한 부분은 아니지만 실습을 진행하는 과정에서는 제어에 관련된 정보를 보기위해서 꼭 필요한 부분이다.



(그림 2) CPU주변의 회로

사용자가 제어기에 정보를 입력할 수 있는 방법은 다음의 두 가지이다.

- RS-232 터미널의 키보드를 이용하여 입력받는 방법

- NEC 방식의 리모컨을 이용하여 입력을 받는 방법. 이 방법이 사용자로서는 용이해 보인다. 현재는 다음 표 1과 같이 프로그램되어 있다. 리모컨의 신호처리는 0번 인터럽트(INT0)를 이용하였으며, custom code와 data code를 사용한다.

〈표 1〉 리모컨의 기능 정의

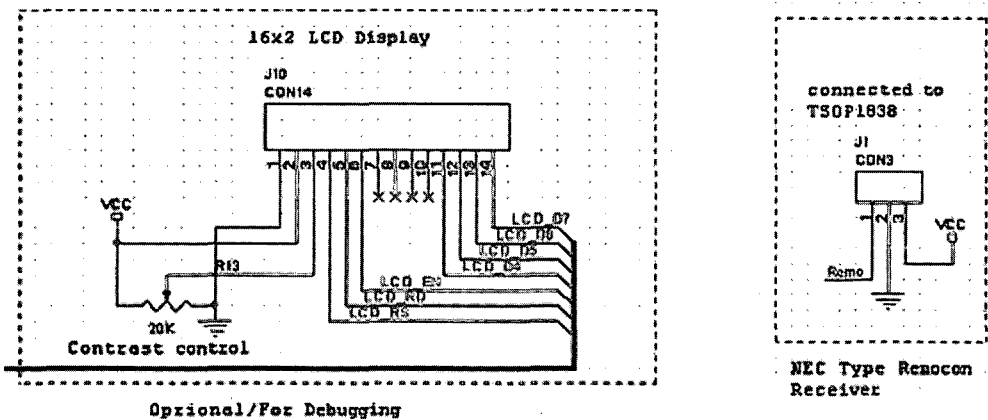
기능	감소	0으로	증가
비레이득	1	2	3
적분이득	4	5	6
미분이득	7	8	9
전방향 보상값	음량 감소	없음	음량 증가
목표치	채널 감소	없음	채널 증가
dead band 값	메뉴	없음	조용히
기타기능	사용하지 않는 키를 정의하여 사용(프로그램 수정)		

5. 센서부의 설계

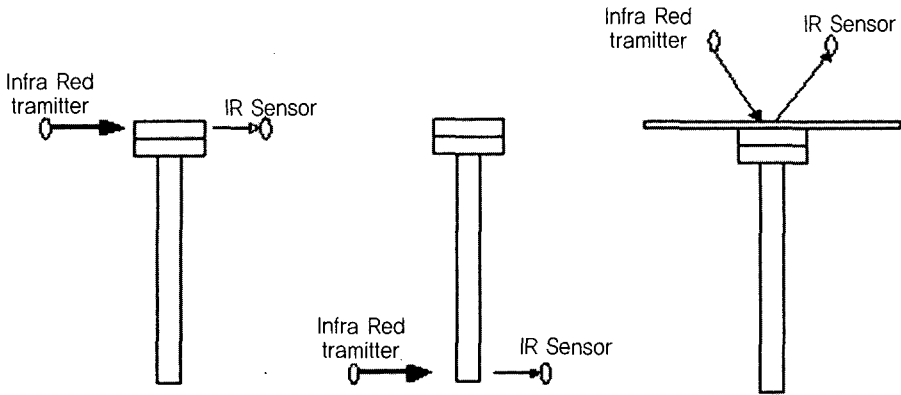
이 실습 장치는 다음과 같은 두 가지의 거리 센서를 이용하여 실습할 수 있도록 되어 있다.

- 적외선 센서 : 발광부는 AUK 반도체의 ST3811을 사용하였고 수광부는 ST3311H를 사용하였다. 둘 다 구입가격이 140원이므로 경제적이다.

- 홀 센서 : 홀 센서는 부유물의 상단에 부착된 자석에서 발생하는 자기를 감지할 수 있도록 전자석



(그림 3) LCD 커넥터와 리모컨 수신부

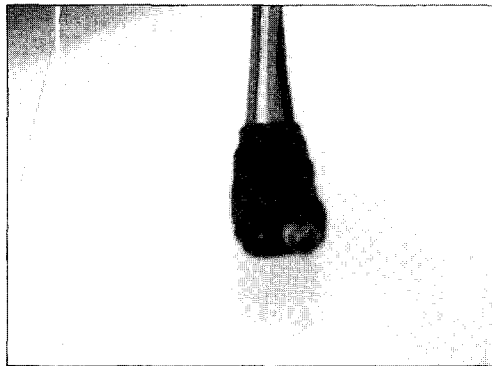


(그림 4) 적외선을 이용하여 위치를 판별하는 세 가지 방법

의 아래 부분에 홀 센서를 부착하였다. MIT에서는 Honeywell 사의 Linear Ratiometric SS496A를 사용하여 비교적 감도가 좋은 센서를 사용하였으나 현재 국내에는 재고가 없는 관계로 구하기 쉬운 Allegro사의 A3503을 사용하였다. SS496보다는 감도가 떨어지는 단점이 있다.

가. IR-센서의 설계

적외선 센서는 자기의 영향을 전혀 받지 않으므로 그림 4와 같이 다양한 위치에 설치할 수 있다(MIT6.302, 2004).



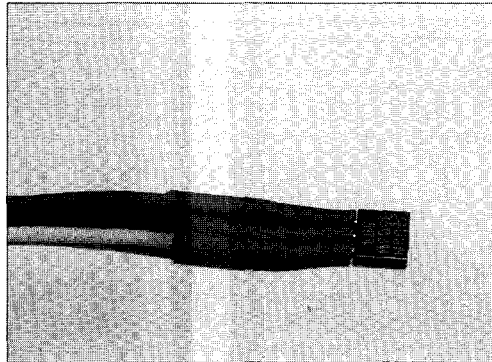
(그림 5) 적외선 수광부와 발광부를 조립한 상태(수광부와 발광부 일체형을 사용하여도 좋음.)

이 실습 장치에서는 다른 설계에서 시도하지 않았던 방법을 사용하였는데 그림 4의 우측에 설명된 바와 같이 부유물의 윗부분에 평평한 샷갓모양의 반사판을 설치하고, 센서는 천정 부위 혹은 전자석의 하단에 설치하는 방법이다(그림 8, 9 참조). 이를 위해서 제작한 센서의 사진을 그림 5에서 볼 수 있다. 제작시에는 발광부에서 나오는 적외선이 반사판에서 반사되지 않고 직접 수광부로 들어오는 광선은 제거할 수 있도록 하여야 한다. 이를 위해서 수축 튜브를 이용하여 잠광을 차단하였다(그림 5). 이 적외선 센서는 태양광이 차단된 곳에서 실습할 때에만 건전하게 사용될 수 있다. 태양광에는 적외선이 센서에 영향을 미칠 수 있을 정도로 포함되어 있기 때문이다. 외부 광에 의한 영향은 센서 신호를 포착할 때 센

서를 펄스 모드에서 사용하여 외부광의 간섭을 배제할 수 있다(elm-chan.org, 2004).

나. 홀 센서의 설계

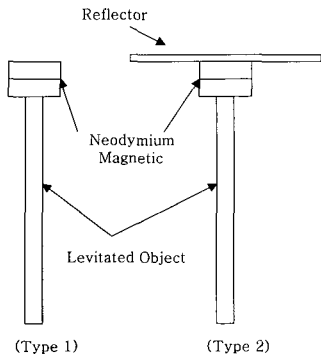
사용된 홀 센서는 Allegro사의 A3503인데 감도가 좋지는 않지만 제어기가 디지털이기 때문에 큰 문제가 되지는 않는다. 홀 센서는 자기 센서이기 때문에 전자석의 영향도 받으며, 부유물의 상단에 위치한 자석의 영향도 받는다. 따라서 전자석의 하단에 하나의 홀 센서만을 부착하여 사용한다면 거리의 측정이 어려워진다. 다른 문헌(예를 들어, Subramanian Ramachandran and Lav Thyagarajan, 2004; Guy Marsden, 2004-1; MIT6.302, 2004; Barry Hansen, 2004; Rick Hardley, 2004; Guy Marsden, 2004-2; Peter Terren, 2004; Bill Beaty, 2004, <http://www.hfml.science.ru.nl/levitate.html>, 2004)에서는 하나의 홀 센서만을 사용하는 것으로 설계하였는데, 이 경우는 단지 한두 군데의 평형점이 존재할 것으로 예상되며, 평형점의 위치와 부유물의 무게에도 매우 민감하여 제어가 어려워질 것으로 보인다. 여기에서는 홀 센서를 전자석의 상단과 하단에 각각 한 개씩 부착하여 전자석에서 발생하는 자기력의 영향을 상쇄할 수 있도록 하였다. 같은 방향으로 부착하여야 전자석에서 발생하는 자기력의 영향을 상쇄할 수 있다. 홀 센서를 이용하는 경우에는 부유물에 반사판이 필요 없다는 장점이 있다. 두 개의 홀 센서를 사용할 것인지 혹은 하나의 적외선 센서를 사용할 것인지는 Jumper로 설정하도록 되어 있다.



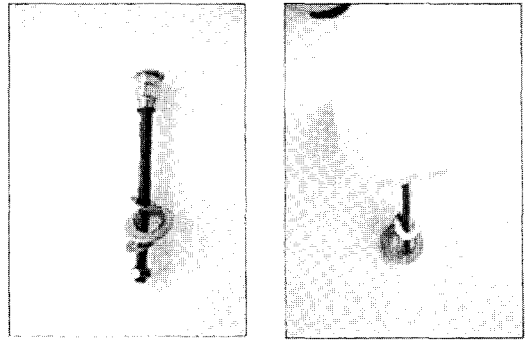
[그림 6] 신호선을 연결한 홀 센서.

6. 부유물의 설계

부유물은 다음과 같은 두개의 운동 모드가 있다. 하나는 상하로의 운동이며 이것이 원하는 운동이다. 한편, 부유물이 완전한 축대칭이 아니고, 또한 전자석에서 발생하는 자기력이 대칭이 아니며 제어력이 부유물의 머리 부분에 집중적으로 가해지기 때문에 가로 방향의 회전운동 모드가 두드러진다. 이것이 두 번째의 운동모드인데 원하지 않는 운동이다. 특히 부유물의 머리 부분에 자석이 한개 또는 두개가 들어 가게 되어 비교적 무거운 상태이며, 더군다나 상단에 반사판을 사용하는 경우는 상부의 무게가 무거워진다. 따라서 그러한 경우에는 자석이 붙어있는 부분이 요동을 하게 되어 센서에서 포착되는 거리 정보가 부정확해지게 되므로 제어가 불안정해 질 수 밖에 없다. 따라서 윗부분과 아랫부분의 균형을 맞추어 줌으로서 머리부분의 요동을 최소화 시켜줄 것이 요구된다. 이 부유물의 설계는 학생들에게 열린 문제로 부과하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 부유물의 몸체는 무게에 비해서 길이가 긴 것으로 선택하는 것이 좋다. 이렇게 만들어진 부유물이 다음 그림 8에 나타나 있다.



(그림 7) 자석과 홀센서를 이용하는 경우의 부유물 (좌)과 적외선 센서를 이용하는 부유물(우).

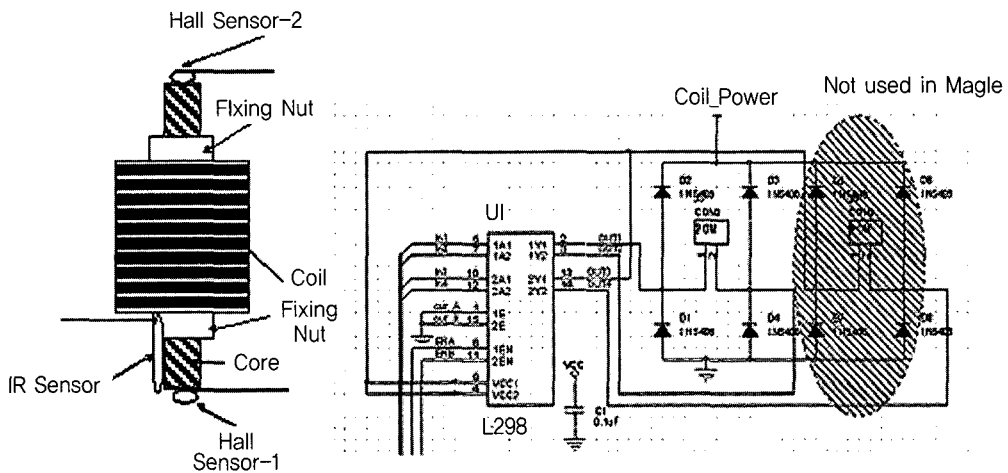


(그림 8) 실제로 제작된 부유물. 홀센서를 이용하는 부유물(좌)과 적외선 센서를 이용하는 부유물(우)

7. 전자석 코일과 구동부의 설계

코일은 시중에서 판매하는 시가 5000원의 코일을 사용하였다. 코일의 설계는 사실 복잡한 문제이며, 설계자들에 따라 매우 다양한 형태와 크기의 코일을 사용한다. 사용한 코일은 에나멜선을 이용하여 저항 12옴 정도가 되도록 감은 것으로서 9V의 직류전압을 가했을 때 약 800mA의 전류가 흐른다. 이는 적절한 크기의 부유물을 부유하는 데에 충분하다고 판단된다. 제어가 잘되는 경우에, 위에 예시한 크기와 무게의 부유물을 부유시키기 위하여 코일에는 약 100-250mA의 전류가 흐르기 때문이며, 이는 다른 연구자의 경우에도 유사하다.

코일에는 전류를 펄스폭 변조 방식으로 공급하는데, 이를 위한 H-Bridge 증폭소자로서 ST-electronics사의 L298을 이용하였다. L298은 두개의 H Bridge를 가지고 있는데, 자기 부상 실습을 위한 회로에서는 한쪽만을 사용한다. 구입가격은 3560원으로서 MIT에서 사용한 LMD182001이 미화 8



(그림 9) (좌) 전자석 코일의 개략도. (우) PWM증폭부

달러가 넘는 것이 비하면 상당히 저렴하다고 보이며, 직류부하 전류도 2A로서 LMD182001의 3A보다는 작지만 충분한 용량을 가지고 있다. 그러나 LMD182001은 내부에 Free Wheeling Diode를 가지고 있는 반면, L298은 외부에 부착하여 주어야 하므로 회로 제작이 약간 번거롭다. Enable 핀에 PWM 신호를 가해준다.

코일을 구동하는 전류는 위에서 언급한 바와 같이 PWM신호를 발생시켜서 사용하는데, 이때 코일이 전혀 자화되어 있지 않아도 자석과 전자석의 코어 사이에 존재하는 흡인력과, 부유물의 중력을 보상하기 위하여 Dead Band를 사용할 수도 있다.

8. PWM 신호 및 기타

CPU인 Atmega8의 PWM신호(Ⅱ-3절 참조)와 L298에서 요구하는 PWM 신호사양(Ⅱ-7절 참조)이 맞지 않기 때문에 GAL 16V8에서 이 신호사양이 정합되도록 만들었다. GAL 16V8은 RS-232의 신호 반전을 위해서도 사용한다. 표 2에는 이 장치를 제작하기 위하여 필요한 구입부품의 날개 구입가격을 열거하였다. 선택부품을 제외하면 1만8천원이며, 선택부품을 포함하더라도 3만6천200원이다. 선택부품은 실제로 이장치를 조절하기 위해서만 사용되고 장치를 작동하기 위해서는 사용되지 않는다. 따라서 MIT와 유사한 장치의 부품 구입가격인 미화 18.78달러와 비교하였을 때 오히려 저가에 구성할 수 있다고 판단된다.

〈표 2〉 날개 구입시의 부품 가격표

부 품 명	구 입 가 격	비 고
CPU(Atmega8-16PI)	2300원	
L298	3560원	
GAL 16V8	700원	
IR Emitter-SI3311H	110원	
IR Receiver-ST3811	120원	
Hall Sensor 3503	2x2300	
원커넥터류	400원	
PCB Support	160원	
저항등	200원	
Universal Board	850원	
자화코일	5000원	
Remocon	9000원	선택사항임
RC수신(TSSOP1838)	700원	선택사항임
16x2 Char LCD	8500원	선택사항임

III. 자기부상 실습 장치를 이용한 실습

그림 12에는 전체 시스템의 블록도가 나타나 있다. 보통의 상태에서는 Series Compensator와 User Compensator는 이득이 1인 상태이다. 이는 실습 학생들이 만들어 부가시켜야 하는 회로이거나 제어 프로그램이다. 센서로는 홀 센서와 적외선 센서 중의 하나를 선택하거나 두개의 센서를 모두 사용할 수 있도록 되어 있다

1. 자동제어의 실습

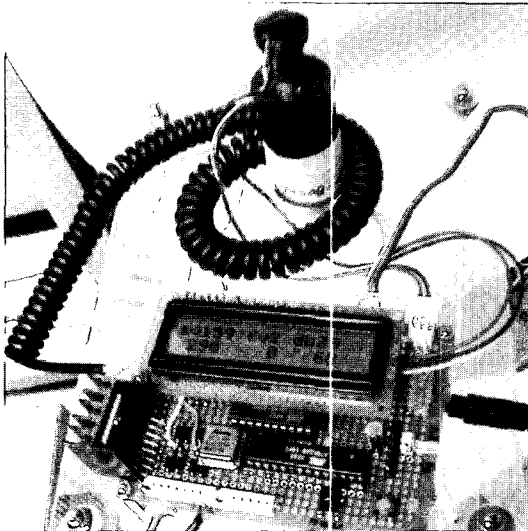
자동제어의 실습을 하는 시기는 학생들이 아직 마이크로프로세서와 디지털 제어에 대한 지식이 부족한 상태이다. 따라서 그림 12에서 사용자 보상기(User Compensator)(10)나 직렬 보상기(Series Compensator)를 이용하여 시스템을 수정하게 된다. 센서의 신호와 원하는 신호와의 차이가 아날로그 신호로 나오게 되므로 OP-Amp등을 이용하여 보상기를 설계한다. 이때 보상기(2)는 적절히 튜닝되어 부유물을 간신히 부유시키고 있는 상태로 만들어 학생들에게 제공해 준다. 학생들은 사용자 보상기(User Compensator)(10)을 삽입하여 보상을 행한다. 전방향 보상기(Feedforward Compensator)(1)는 사용하지 않거나 고정시킨다. 학생들은 이를 통하여 PWM을 이해하고 실제 진상-지상(lead-lag) 보상기를 설계하는 방법을 학습하고 그 효과를 체험하는 것이 기대된다.

2. 디지털 제어 실습

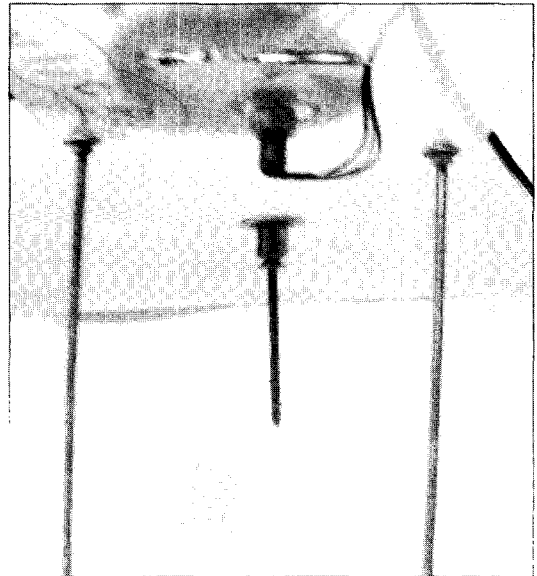
디지털 제어 실습시에는 아날로그 제어 실습과 유사하지만 전방향 보상기(1)과 Compensator(2)의 내부에 설정되어 있는 제어 이득을 TV용 리모컨을 이용하여 조절함으로써 제어기의 설계를 마칠 수 있다. 제어 이득의 변화가 제어기의 성능에 미치는 영향뿐 아니라 아날로그 제어기의 디지털 제어기로의 등가 변환, 샘플링 시간이 제어 성능에 미치는 영향 등을 학습의 목표로 할 수 있다.

3. 마이크로프로세서 실습

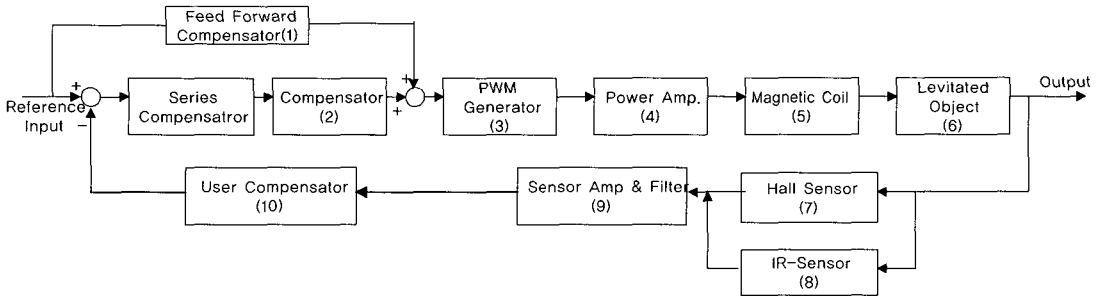
마이크로프로세서 실습시에는 전체 시스템의 동작을 확인하고 이해하며, 제어 프로그램이외의 다른 부분의 프로그램까지 수하고 보완할 수 있는 내용을 학습 목표로 할 수 있다. PWM의 이해, 직렬 통신의 이해, AD 변환과 DA 변환 등을 학습할 수 있다. 학생들은 (2)와 (3)부분을 직접 프로그램하여 전체 시스템을 제어한다. 열린 프로젝트이므로 CPU를 다른 종류로 교환한다거나 다른 창의적인 기능을 추가하는 것을 권장한다.



(그림 10) 제어부와 코일의 사진. LCD에 PID이득 등 제어에 필요한 정보를 표시



(그림 11) 자기부상 실험의 모습



(그림 12) 전체 시스템의 블럭도

4. 센서 공학 실습

센서 공학의 실습시에는 적외선센서의 특성, 홀 센서의 특성, 센서신호의 필터링, 복합 센서를 이용한 센서 신호의 융합(Fusion) 등을 학습할 수 있다.

IV. 실습 과정의 평가

아직 개발된 실습 장치를 교육에 적용해 보지 않았기 때문에 단정적으로 어떠한 평가방법이 좋은가를 판단할 수는 없지만 다음 표 3, 4 그리고 5와 같은 평가 방법을 설정하여 보았다. 이 실습 장치를 이용하는 프로젝트는 열린 프로젝트로서 학생들이 창의적인 발상을 발휘하여 시스템을 개조하거나 개선하는 점에 많은 가산점을 부여하고자 한다. MIT에서는 대학가의 아이스크림 가게등에서 협찬을 받아 학생들에게 포상하기도 한다(Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden, 2004).

1. 자동제어와 디지털 공학 실습

자동제어를 실습하는 경우에는 평가자가 센서의 신호를 모니터링하면서 일정한 시간동안 오차의 최대 크기, 그리고 오차의 제곱합 등(Benjamin C. Kuo, 1992; Katsuhico Ogata, 2002)을 통하여 제어 결과를 평가한다.

2. 마이크로 프로세서 실습

이 프로젝트는 열린 프로젝트이므로 마이크로프로세서의 이해도와 응용능력을 중심으로 하여 표 4와 같이 평가하고자 한다.

3. 센서 공학 실습

이 실습 장치는 센서 공학을 위하여 설계된 것은 아니지만 다음 표 5와 같은 사항을 중심으로 하여 평가할 수 있을 것이다.

〈표 3〉 자동제어와 디지털 공학실습을 위한 평가 방법

항 목	평가 방법	비 율
최대 오차 크기	평가자의 모니터링	20
오차의 제곱합	평가자의 모니터링	20
안정성	부유물에 어느 정도의 무게를 감하거나 가하여도 부유할 수 있는가를 측정	20
Workmanship	간결하고 아름답게 회로를 완성했는가	20
보고서	간결하고 논리적인 설계 보고서의 논리적인 표현	20
창의성	부유물의 설계, 센서의 설계, 보상기의 설계 등에서 창의성이 발휘되었는가?	50% 가중
기타	가장 무거운 부유물을 부유시켰는가?	30점
	전력 소모가 가장 적은가?	30점

〈표 4〉 마이크로프로세서 실습을 위한 평가 방법

항 목	평가 방법	비 율
프로젝트 팀의 창의성	창의적인 기능을 부가하였는가? 부가된 기능의 아이디어가 참신한가?	30
프로그래밍작성의 간결성과 완결성	작성된 프로그램이 간결하여 이해하기 쉬운가? 예외적인 사항에 대한 처리는 완전한가?	30
H/W의 완전함	제작된 H/W는 강인하고 견전한가? 필요 없는 H/W는 없는가? H/W의 동작은 신뢰성이 있는가?	40
창의성	부유물의 설계, 센서의 설계, 보상기의 설계 등에서 창의성이 발휘되었거나 다른 창의적인 기능이 부가되었는가?	50% 가중
기 타	보고서 작성의 완전성 가장 가벼운 H/W	20점

〈표 5〉 센서 공학 실습을 위한 평가 방법

항 목	평가 방법	비 율
Filtering	Filtering된 신호는 안정적인가? 외란으로 들어오는 신호를 잘 걸러내고 있는가?	60
센서 Fusion	두개의 센서를 사용하는 경우 한 개의 센서를 사용하는 경우보다 강인해 졌는가?	40
보고서	보고서 작성의 완결성	30

V. 결과 및 제언

이 논문에서는 자기 부상제어 실습 장치의 설계와 제작 그리고 학습 및 평가방법에 관하여 기술하였다. 저가형 실습 장치를 지향하기 때문에 많은 기능을 부여한다거나, 다입력-다출력 시스템의 구현 등 복잡한 기능을 구현하지는 않았다. 이 실습 장치를 만들기 위하여 구입해야 하는 부품의 가격은 다음 표 2와 같다(제작 부품은 제외). 필수 구입부품만의 가격은 18000원정도이며, 리모컨과 LCD 표시부등을 합한다면 36200원이 된다. 리모컨을 제외한다면 27200원이 된다. 필수 부품만의 구입 가격으로 MIT의 구입 부품 가격(Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden, 2004)(18.28 US Dollar)과 비교한다면 오히려 싼 가격에 구입이 가능하다. 또한 이 실습 장치는 디지털제어를 하고 있기 때문에

MIT의 장치보다 다양한 실습이 가능하며, 홀 센서와 적외선 센서를 모두 사용할 수 있다는 장점이 있다. 기구물의 제작은 하급학년의 기전 공작 실습을 통하여 만드는 것이 바람직할 것이라고 보인다.

향후 이 실습 장치를 이용하여 실습교육을 진행한 후 교육의 효과 등을 분석하여 개선해야 할 것이다.

[참고 문헌]

- Adam Kumpf(2003). *Dec., 6.302 Design Project: Magnetic Levitation System*. [On-line]. Available: <http://mit.edu/Kumpf/www/Kump-projects.html>
- Barney Arntz(2004). *Levigator*. [On-line]. Available: <http://www.arttec.net/Levitation/gallery/Levitation.pdf>
- Barry Hansen(2004). *Ch.6 magnetic Levitation*. [On-line]. Available: <http://www.oz.net/~coilgun/levitation/home.htm>
- Benjamin C. Kuo(1992). *Digital Control Systems*, 2nd Ed., Saunders College Publishing.
- Bill Beaty(2004). *Magnetic Levitation Device*. [On-line]. Available: <http://amascsi.com/maglev/magschem.html>
- elm-chan.org(2004). *Line Following Robot*. [On-line]. Available: <http://elm-chan.org/works/lfc/report.html>
- Guy Marsden(2004a). *Magnetic Levitation Kit*. [On-line]. Available: <http://www.arttec.net/Levitation/Kit.html>
- Guy Marsden(2004b). Levitation!-Float objects in a servo controlled magnetic field. *Nuts and Volts Magazine*, 24(9), 58-61.
- Guy Marsden(2004c). *Levitation*. [On-line]. Available: <http://web.mit.edu/6.302/www.levitation.pdf>.
- High Field Magnetic Laboratory(2004). *The real levitation*. [On-line]. Available: <http://www.hfml.science.ru.nl/levitate.html>
- Katsuhico Ogata(2002). *Modern Control Engineering*, 4th Ed., Prentice Hall.
- Kent H. Lundberg, Kaite A. Lilienkamp and Guy Marsden(2004). Low Cost Magnetic Levitation Project Kits. *IEEE Control System Magazine*, 24(5), 65-69.
- Marco Casini, Domino Prattichizzo and Antonio Vicino(2004). The Automatic Control Telelab-A web based technology for distance learning. *IEEE Control System Magazine*, 24(3), 36-44.
- MIT6.302(2003). *Lab3 MagLev Project*. [On-line]. Available: <http://web.mit.edu/6.302/www>.
- Peter Terren(2004). *Magnetic Levitation*. [On-line]. Available: <http://tesladownder.iinet.net.au/Magnetism.htm>.
- Rick Hoadley(2004). *Experiments with Magnetic Levitation*, Home-Built Magnetic Levitator. [On-line]. Available: <http://my.execpc.com/~rheadley/magsus.htm>
- Subramanian Ramachandran and Lav Thyagarajan(2004). *FPAA Projects: Magnetic Levitation*. Univeristy of Bridgeport(2004), [On-line]. Available: [www.ecpsystems.com\(2004\).](http://www.ecpsystems.com(2004).) and [www.techkits.com\(2004\)](http://www.techkits.com(2004))