ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 29(2), 51-57 (2019) https://doi.org/10.4283/JKMS.2019.29.2.051

PID Control-Based 1-Axis Magnetic Levitation System

Seung Chan Hwang and Sung Hoon Kim*
Department of Electronics Convergence Engineering, Wonkwang University, Iksan 54538, Korea

Guk-Hong Jeon
CAMTIC, Jeonju 54852, Korea

(Received 15 April 2019, Received in final form 21 April 2019, Accepted 22 April 2019)

In this study, we introduce PID control-based 1-axis magnetic levitation system. Our goal is to develop a low cost educational system. We use SMPS instead of variable DC power supply. If the DC resistance of the coil does not change, the current or voltage cannot be adjusted when SMPS is used. In this study, the current of the driving coil is controlled by using the pulse width modulation (PWM). PWM control is a method that can control the current flowing in the coil even if voltage and resistance are fixed. The problem of using the Hall sensor for position detection and a method for solving it are suggested. In order to verify the proposed method, various simulations and experiments were conducted. The distance between the magnet and the coil to be floated is within 3 cm and it is driven by 7A maximum.

Keywords : magnetic levitation, Hall sensor, PWM, PID control

PID 제어기를 활용한 1축 자기부상 시스템

황승찬 · 김성훈*
원광대학교 전자융합공학과, 전북 익산시 신동 익산대로 460, 54538

전국홍
캠틱종합기술원, 전북 전주시 덕진구 유상로 67, 54852

(2019년 4월 15일 받음, 2019년 4월 21일 최종수정본 받음, 2019년 4월 22일 게재확정)

본 연구는 PID 제어 기반의 1축 자기부상 시스템에 관한 연구로서 저가의 교육용 전자기 제어 시스템을 개발하는 것이다. 개발된 시스템의 전원으로 저가의 전압 고정형 SMPS를 사용한다. 본 연구에서는 구동 코일의 전류를 제어하기 위하여 펄스폭변조 방식(PWM)을 사용한다. PWM 제어는 전압, 저항이 고정되어 있어도 코일에 흐르는 전류를 조절할 수 있는 방법이다. 영구자석 부상체의 위치검출을 위하여 홀센서를 사용하여 피드백 시스템을 구현하였다. 부상체 검출을 위한 단일 홀센서의 문제점을 해결하기 위하여 두 개의 홀센서의 차동출력을 계측함으로서 정확한 위치정보를 획득하여 오차를 최소화하였다. 개발한 시스템을 검증하기 위해 전자기 시뮬레이션과 다양한 실험을 하였다.

주제어 : 홀 효과 센서, PWM 방식, PID 제어기

I. 서 론

자기부상 시스템은 수송 시스템, 풍동 부상, 자기 베어링 시스템 및 방진 테이블, 자기부상 엘리베이터 등 일상생활에 자기부상 기술이 적용되고 있다[1-3]. 이러한 시스템에 자기부상 메커니즘이 적용되는 이유는 비접촉 방법에 의한 소음 및 기계적 마찰에 의한 손실이 없기 때문이다[4-7]. 자기부상 기술이 적용된 시스템들은 본질적으로 비선형적이며 불안한 시스템이다. 그러므로 자기부상 시스템은 제어적인 측면에서 매우 흥미로운 분야이다. 일반적으로 자기부상 시스템은 코일과 부상체로 구성되어 있고 코일에 인가하는 전류량을 제어하여 부상체와 코일 사이의 공극을 일정하게 유지하는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 자기부상 시스템은 PID 제어를

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-63-850-6739,
Fax: +82-63-850-6739, e-mail: kshoon@wku.ac.kr

많이 사용하며, 피드 포워드 다층 신경 네트워크를 사용한 제어, 패턴 인식을 위한 능동 신경망 구현에 대한 연구가 보고되고 있다[8-10]. 하지만 자기부상 시스템은 불안정한 동적 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 일반적으로 위치, 속도 및 코일의 전류의 측정이 필요하므로 비선형 동적 시스템이 이용 불가능한 신호를 추정하기 위한 상태 관측기를 포함하여야 한다. 따라서 시스템 개발을 위하여 경제적 비용이 많이 든다. 또한 부상체의 위치 정보를 피드백을 위해 일반적으로 거리센서를 많이 사용한다. 하지만 광센서 기반의 거리 센서는 환경적 변수에 따른 잡음이 높은 단점이 있다. 자기부상 제어시스템에서 모든 부분에 세심한 주의를 기울여야 하지만 특히 제어기의 성능과 잡음 제거가 중요하다.

본 논문에서는 고정형 직류전원공급장치를 사용하므로 전류제어를 위해 펄스폭변조(PWM) 방식을 사용하고, 발생하는 잡음을 제거하기 위한 방법으로 홀센서의 차동 출력 그리고 바이패스 커패시터를 사용하였다. Labview 기반의 제어 소프트웨어를 개발하였으며 능동적 제어를 위하여 PID 제어기를 활용한 피드백 제어 시스템을 구성하는 방법을 제안하였어. 수학적 모델링, 시뮬레이션 및 다양한 실험적 분석을 통하여 제안한 방법을 검증하였다.

II. 수학적 모델링 시스템 설계

1. 수학적 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 자기 부상 시스템의 개략도이다. 자기력을 발생하는 구동 코일, 영구자석으로 구성된 부상체, 부상체의 위치를 검출하기 위한 센서로 구성되어 있으며 코일에서 발생되는 자기력을 이용하여 중력으로부터 부상체를 띄워 공중에서 평형상태를 유지하는 것을 목표로 한다.

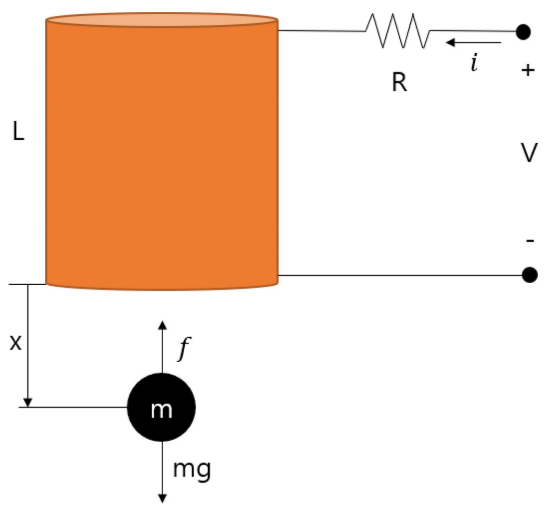

Fig. 1. (Color online) Modeling of magnetic levitation system.

Fig. 1은 구동 코일과 부상체의 사이의 평형상태를 나타내며 뉴턴의 운동방정식을 이용해 표현할 수 있다.

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} - mg - f \tag{1}$$

식(1)은 부상체의 공극을 유지하기 위해 m의 질량을 가진 물체의 수직 방향으로 작용하는 힘(mg)과 구동 코일에서 작용하는 힘(f)이 같은 평형방정식이다. 여기서 $x(t)$는 부상체의 위치, m은 부상체의 질량, g는 중력 가속도, f는 코일에서 발생되는 자기력을 나타낸다. 이때 전류 $i(t)$에 의해 발생되는 구동 코일의 전자기력은 페러데이의 법칙과 암페어의 회로법칙에 의하여 다음과 같이 식(2)로 나타낸다.

$$f(x, i, t) = -\frac{i(t)^2}{2}\frac{dL(x)}{dx} \tag{2}$$

여기서 $L(x)$는 부상체에 의해 증분되는 인덕턴스를 고려한 전자석의 전체 인덕턴스를 나타내며 다음과 같이 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$L(x) = L_1 + \frac{L_0 x_0}{x} \tag{3}$$

여기서 L_1은 부상체가 없을 때의 코일의 인덕턴스, L_0은 부상체에 의해 발생되는 추가 인덕턴스, x_0는 부상체가 평형상태를 이루는 거리를 나타낸다. 그리고 식(2)와 식(3)을 통해 다음과 같이 식 코일에서 발생되는 전자기력을 구하면 다음과 같다.

$$f(x, i, t) = \frac{L_0 x_0}{2}\left[\frac{i(t)}{x(t)}\right]^2 = C\left(\frac{i}{x}\right)^2 \tag{4}$$

식(4)의 C는 코일상수를 의미하며, $C = \frac{L_0 x_0}{2}$로 나타낸다. 코일상수는 실험적으로 결정하는 값이다. 또한 영구자석으로 이루어진 부상체는 위치에 따라 코일의 인덕턴스에 비선형적으로 영향을 미친다. 비선형적인 문제를 선형적으로 변환하기 위해 테일러 급수를 활용하면 다음과 같이 식(5)를 통해 표현된다.

$$\begin{aligned} f(x, i, t) &= C\left(\frac{i_0}{x_0}\right)^2 + \left[2C\frac{i_0}{x_0^2}\right]i(t) - \left[2C\frac{i_0^2}{x_0^3}\right]x(t) + \cdots \\ &= f_0 + f_1 + \cdots \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 i_0는 부상체가 x_0의 위치했을 때 발생되는 전류를 나타내고, 이때 부상체에 인가되는 자기력은 중력과 같고 다음과 같이 식(6)과 같이 정의된다.

$$mg = f_0 = C\left[\frac{i_0}{x_0}\right]^2 \tag{6}$$

식(5)를 고려하여 부상체를 평형상태로 유지시키기 위한 자기력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x, i, t) = \left[2C\frac{i_0}{x_0^2}\right]i(t) - \left[2C\frac{i_0}{x_0^3}\right]x(t) \tag{7}$$

따라서 식(5)과 식(6)을 통해 식(1)을 다시 정의하면 다음과 같이 식(8)을 정의할 수 있다.

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -\left[\frac{2Ci_0}{x_0^2}\right]i(t) + \left[\frac{2Ci_0^2}{x_0^3}\right]x(t) \tag{8}$$

시스템의 전달함수를 정의하기 위해 라플라스 변환을 적용시키면 식(9)와 같이 정의할 수 있고

$$ms^2X(s) = -\left[\frac{2Ci_0}{x_0^2}\right]I(s) + \left[\frac{2Ci_0^2}{x_0^3}\right]X(s) \tag{9}$$

이를 통해 이 시스템의 전달 함수 $G(s)$는 다음과 같이 식(10)로 정의된다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-\left[\frac{2Ci_0}{mX_0^2}\right]}{s^2 - \left[\frac{2Ci_0^2}{mx_0^3}\right]} \tag{10}$$

식(10)를 통해 특성방정식의 근이 우반면에 있기 때문에 개루프 시스템에서는 불안정한 모습을 보인다. 식(11)은 회로방정식을 나타내며

$$v(t) = Ri(t) + L(x)\frac{di(t)}{dt} \tag{11}$$

여기서 R은 코일 내부 저항, $L(x)$은 코일의 임피던스, $i(t)$은 코일의 흐르는 전류를 나타낸다. 홀 센서를 통하여 센서 방정식을 표현하면 식(12)와 같다.

$$V_s = \beta x \tag{12}$$

β는 센서의 이득을 나타내고 전자석의 인가되는 전압을 입력, 홀 센서를 통하여 부상체의 변위를 출력으로 하여 전달함수 $G(s)$를 다시 정의하면 다음과 같이 식(13)을 통해 최종 전달함수를 정의할 수 있다.

$$\frac{Vs(s)}{V(S)} = \frac{-2\beta Ci_0/mLx_0^2}{(s + R/L)(s^2 - 2Ci_0^2/mx_0^3)} \tag{13}$$

2. 자기 부상 시스템의 제어 방법 및 시스템 구성

안정적인 자기부상 시스템을 제어기 위하여 본 연구에서는 PID 제어기를 설계하였다. 본 시스템에서는 부상된 영구자석의 위치정보를 피드백 받기 위해 홀센서를 사용한다. 입력받은 현재 위치정보를 이용하여 초기에 설정된 초기 설정값과 비교하여 오차 값을 계산한다. 이때 발생되는 오차 값이 클수록 PWM에서 발생되는 펄스 폭 비율은 높아지고 오차 값이 작을수록 펄스 폭 비율은 작아지게 된다. 이때 PWM 신호를 코일에 인가하기 위해 마이크로 컨트롤러에서 형성되는 PWM의 신호는 MOSFET을 이용하여 구동 코일의 전류를 제어한다. 이때 구동 코일에는 MOSFET이 스위칭할 때 발생되는 스위칭 잡음과 홀센서에 인가되는 외부 전원잡음이 발생되기 때문에 부상체를 안정적으로 제어하기 위해서는 스위칭 잡음과 홀센서의 전원잡음을 제거해야 한다. 자기 부상 시스템을 제어하기 위한 제어 블록 다이어그램은 Fig. 2와 같다.

개발된 시스템은 1축 구동 코일, 2개의 홀센서, PWM 발생을 위한 트랜지스터, 직류전원공급장치, 아두이노 마이크로 컨트롤러로 구성되어 있으며 부양체는 영구자석을 사용하였다. 구동 코일을 제작하기 위하여 전자기 시뮬레이션을 통하여 코일 설계 매개변수를 추출하였다. Fig. 3은 코일 설계를

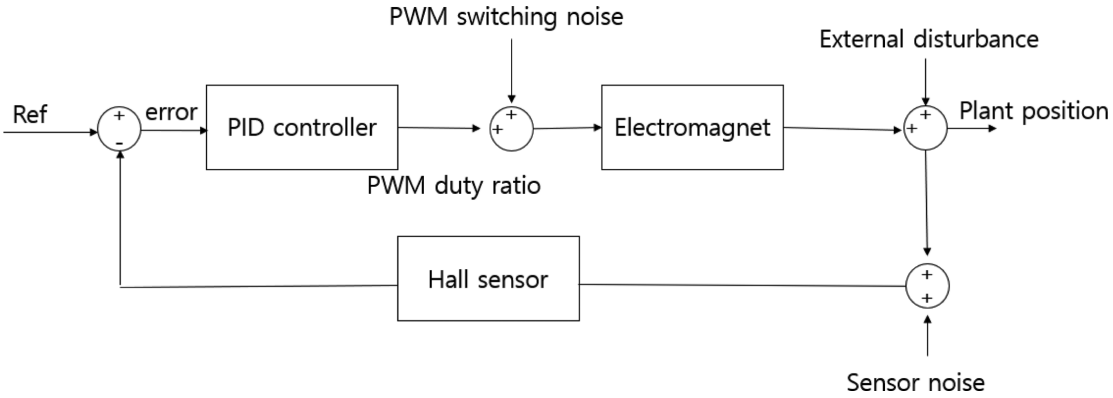

Fig. 2. The proposed system block diagram.

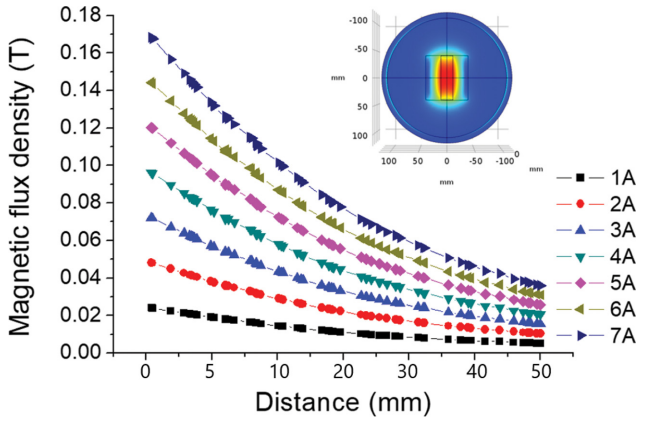

Fig. 3. (Color online) The results of magnetic simulation for magnetic distribution.

위한 전자장 시뮬레이션 결과이다. 부상체의 부양 허용 변위를 3 cm 이내를 목표로 하기 때문에 시뮬레이션에서 코일의 끝단에서 3 cm 지점까의 자기장 분포를 관측한다. 자기장 분포를 확인하기 위해 최대 7A의 전류를 인가하였으며, 이 경우 대략 0.12T의 자기장을 발생하였다. 시뮬레이션을 통하여 코일 설계에 대한 예비 검증을 하였다. 실제 코일을 제작하기 위하여 2 mm 굵기의 동선을 사용하여 제작하였으며 구동 코일의 권선 수는 800턴이며 지름은 7.8 cm, 전기저항은 1.4[Ω]으로 제작되었다.

Fig. 4(a)는 본 논문에서 소개하는 자기부상 시스템의 회로도와 Fig. 4(b)는 실제로 제작한 자기부상 시스템의 모습이다. 본 시스템에서는 일반적인 전압 전류가 조절되는 전원공급장치를 사용하지 않고 7 V 최대 46 A를 공급하는 SMPS를 사용하였다. 제작된 코일의 경우 온도 변화가 일정한 경우 코일의 직류저항은 일정하다. 따라서 PWM 제어를 통해 코일에 구동 전류를 변화 시켜야 한다. 아두이노 마이크로컨트롤러에서 PWM 신호를 생성하고 MOSFET에서 스위칭한다. PWM 신호의 주파수는 1 kHz로 고정되고 제어를 위한 최대 펄스 폭 비율은 7 : 3으로 설정하였으며 이 경우 구동 코일는 7 A의 전류가 구동되고 다이오드를 이용하여 역전류 방지회로를 구현하였다. 본 시스템에서는 부상체를 영구자석을 사용하였다. 따라서 부상체의 위치를 검출하고 제작된 PID 제어 위치정보를 피드백하기 위하여 홀센서를 사용하였다. 광센서를 이용한 거리 센서의 경우 주변 빛의 광량의 영향을 받아 오동작의 문제점이 발생할 수 있다. 하지만 부상체가 자석인 경우 홀센서를 사용하면 외부환경적인 잡음에 강한 장점이 있다. 하나의 홀센서를 사용하여 부상체의 위치를 검출할 때 구동 코일에서 발생하는 자기장의 영향을 받는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 구동 코일 상단에 홀센서를 추가로 사용하여 두 센서의 차동출력을 사용한다(Fig. 4(a)). 두 홀 센서의 위치는 구동 코일의 중심에서 대칭되는 지점에 부착한다. Hall sensore2는 구동 코일의 자기장과 부상체의 자기장이 같이 검출된다. 따라서 Hall senssor2와 sensor1의 차동출력은 부상체의 잡음 및 오프셋이 없는 정확한 위치 정보이다.

III. 자기부상 시스템의 실험적 분석

본 논문에서 소개하는 자기부상 시스템은 2개의 홀센서의 차동출력을 이용하여 부상체의 위치 정보를 획득할 수 있다. 홀센서의 출력 방정식은 다음 식(14)와 같이 표현되며, 여기서 x는 영구자석과 홀센서 사이 거리를 나타낸다.

$$Vs = 0.0027x + 2.605 \tag{14}$$

사용된 홀센서는 자기장이 인가되지 않았을 때 초기 기준 전

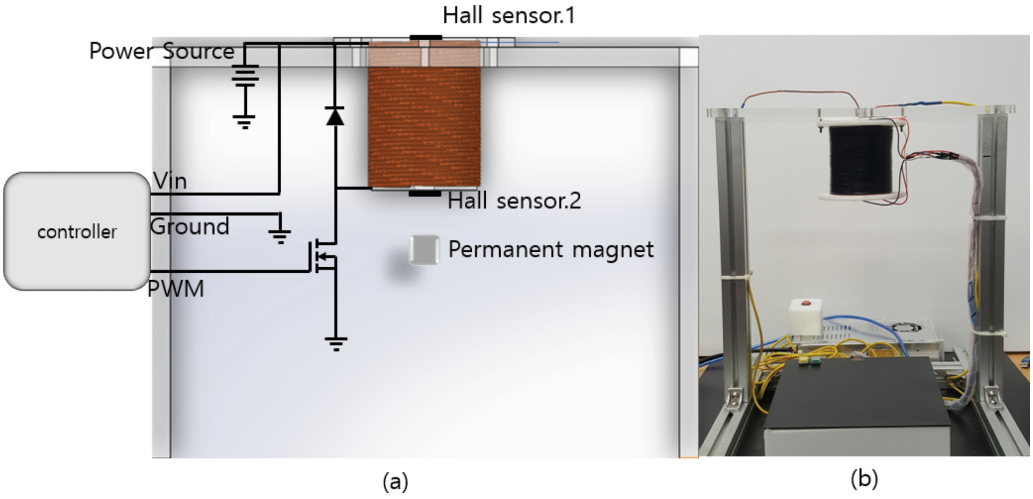

Fig. 4. (Color online) (a) System configuration, (b) The fabricated system.

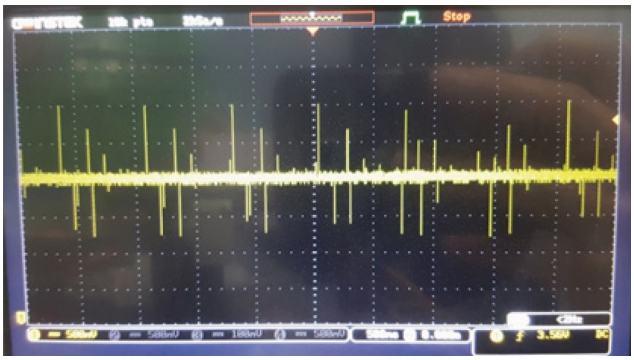

Fig. 5. (Color online) Output signal of Hall sensor.

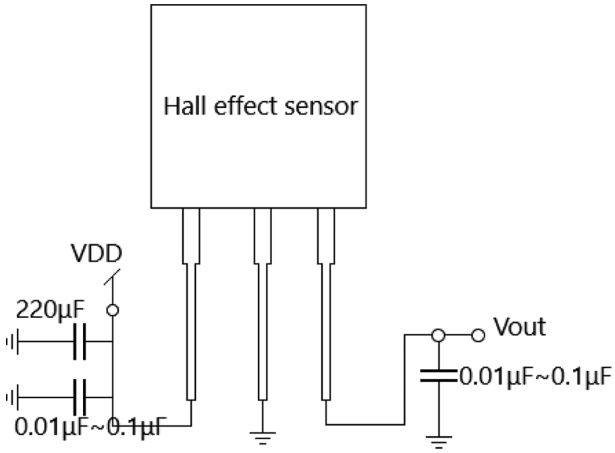

Fig. 6. Bypass circuit for noise cancellation.

압은 입력전원 대비 절반의 해당하는 전압을 출력한다. 그리고 외부에서 자기장이 인가되었을 때 자기장의 극성의 따라 초기 기준 전압의 값이 상승 또는 감소한다. 제작된 자기부상 시스템의 제어 신호는 홀센서의 출력 전압을 기준으로 구동 코일에 인가되는 PWM의 제어 신호를 발생한다. 홀센서에서 출력되는 전압은 구동 코일에서 발생되는 자기장, 전원 잡음, 자석에서 발생하는 자기장의 변화에 영향을 받는다. Fig. 5는 실제 홀센서에 출력되는 출력 전압 파형이다. 앞서 설명한 잡음의 원인으로 인해 최대 2.6 V 기준으로 ±1 V의 외부 잡음이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 홀센서의 출력 전압을 안정적으로 피드백 받기 위해 홀센서 입력단과 출력단에 바이패스 커패시터 회로를 구성한다. 먼저 홀센서 입력단에 부착되는 커패시터는 사용되는 용량의 따라 AC 잡음 성분을 바이패스 시키고 DC 직류 성분만 통과시키는 역할을 한다. 홀센서의 출력이 일정한 주파수를 가지고 있으면 커패시터의 용량에 따라 응답속도의 지연이 발생될 것이다. 하지만 본 연구에서 부상체의 위치가 거의 고정되어 있어 실제 홀센서의 출력신호는 직류전압과 거의 동일하므로 응답속도의 지연에는 영향을 미치지 않는다.

PWM 스위칭 신호는 홀센서의 출력에 따라 제어되기 때문에 안정적인 홀센서의 출력은 시스템 안정화에 중요한 역할을 한다. Fig. 6는 홀센서에 부착된 바이패스 커패시터의 회로를 나타내고 인가되는 잡음 대역의 따라 유동적으로 변동된다.

Fig. 7은 홀센서 목표 출력 값을 각각 3.8 V로 설정하였을 때 바이패스 커패시터를 사용하지 않았을 경우와 사용했을 경

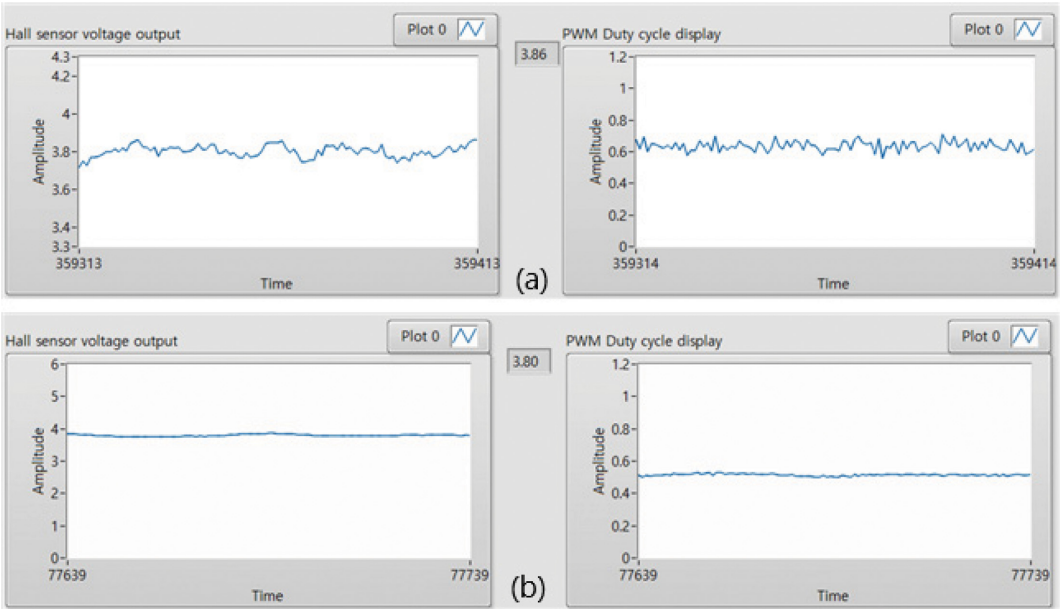

Fig. 7. (Color online) (a) Unstable output signal before noise cancellation and (b) stable output signal after noise cancellation.

우의 비교 출력 파형을 나타낸다. Fig. 7(a)은 바이패스 커패시터를 사용하지 않은 자기부상 시스템의 사용된 홀센서 출력 파형의 모습과 실제 구동 코일에 인가되는 PWM 제어 신호를 나타낸다. 홀센서의 목표 출력 전압을 3.8 V로 설정하였을 때 나타나는 출력이다. 홀센서의 출력단에 인가되는 외부 잡음으로 인해 부상체가 평형상태를 이루지 못하고 진동함의 따라 구동 코일에 인가되는 제어 신호도 수렴하지 못하는 현상을 확인할 수 있다(Fig. 7(a)). 바이패스 커패시터를 사용하여 잡음신호를 제거한 후 시스템의 출력은 안정적으로 수렴하는 것을 Fig. 7(b)에서 확인하였다.

그리고 부상체의 위치를 검출하기 위해 사용된 2개의 홀센서 중 하나의 홀센서는 구동 코일 하단에 부착되어 부상체의 위치와 구동 코일에서 발생되는 자기장을 측정하고 다른 하나는 구동 코일 상단에 부착되어 구동 코일에서 발생되는 자기장만을 측정한다(Fig. 4(a)). 따라서 코일과 부상체간의 거리 y를 정확하게 얻기 위해 다음과 같이 식(12)로 정의될 수 있다.

$$y = V_{s1} - V_{s2} \tag{12}$$

여기서 V_{s1}은 코일 하단의 부착된 홀센서의 출력 전압 값, V_{s2}는 코일 상단의 부착된 홀센서 출력 전압 값을 뜻한다. 여기서 V_{s1}, V_{s2}을 다시 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{s1} &= C_{MF} + PM_{MF} \\ V_{s2} &= C_{MF} \end{aligned} \tag{13}$$

여기서 C_{MF}는 코일에서 발생되는 자속밀도이고, PM_{MF}은 영구자석에서 발생되는 자속밀도이다. Fig. 8은 두 홀센서의 차동 출력결과를 나타낸다.

따라서 식(12)를 다시 정의하면 다음과 같이 식(14)로 다시 쓸 수 있다.

$$y = C_{MF} + PM_{MF} - C_{MF}$$

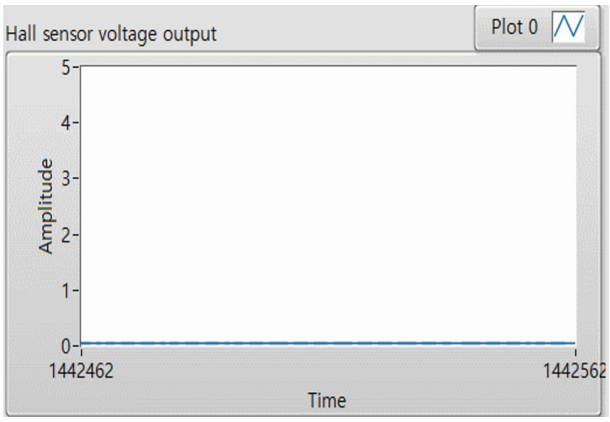

Fig. 8. (Color online) Differential output using the two Hall sensors.

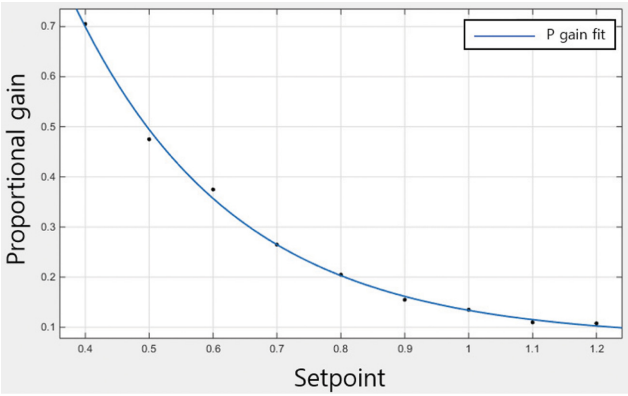

Fig. 9. (Color online) Curved fitting for P-gain.

$$y = PM_{MF} \tag{14}$$

본 시스템은 적용된 2개의 홀센서 차동출력은 두 센서에 발생되는 잡음 신호의 제거뿐만 아니라 부상체의 자기장 값만을 정확히 측정하여 안정된 위치 제어를 보장한다. 이를 통해 얻은 위치 정보를 이용하여 부상체의 거리를 제어하기 위해서 목표 위치에 따른 P_{gain} 이득 값도 변동되어야 한다. 식(3)의 $L(x)$의 관계식에서 코일의 전체 인덕턴스는 부상체에서 추가로 발생되는 L_0을 고려해야 한다. 따라서 코일과 부상체 사이의 거리가 변하게 되면 $L(x)$도 거리에 변화에 따라 조절되기 때문에 자기부상 시스템의 전달 함수도 변동된다. Fig. 9은 부상체의 목표 위치값의 변화에 따라 조절되는 P_{gain}의 데이터 곡선 접합을 나타낸 결과이고 다음과 같이 식(15)으로 표현할 수 있다. 식(15)의 x는 설정값을 나타낸다.

$$Kp = 3.07e^{-3.997x} + 0.7745 \tag{15}$$

P 이득값을 조절하여 부상체가 부상하는 실험을 실시하여 검증하였다. Fig. 10(a)은 구동 코일에서 대략 1 cm 떨어진 곳에 부상하고 있는 모습이다. Fig. 10(b) 그리고 (c)는 안정적으로 부상하고 있는 정상상태에서의 홀센서 출력 및 펄스폭의 비율이다. 이 경우 PWM의 듀티비는 5.6 : 4.4~5.7 : 4.3 사이에서 정상상태에 도달하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 1축 자기부상 시스템의 설계를 위한 수학적 모델링과 제어기 설계를 통하여 저가의 교육용 시스템 개발을 하였다. 본 시스템에서는 영구자석의 부상체를 사용하였기 때문에 홀센서를 사용하여 부상체의 위치를 정확히 검출하는 방법을 제안하였다. 부상체의 위치가 바뀌거나 코일의 저항이 바뀌게 되면 코일에 인가되는 전류가 바뀌어야 한다. 제안한 시스템의 경우 고정형 전원장치를 사용하므로 부상체의 위치

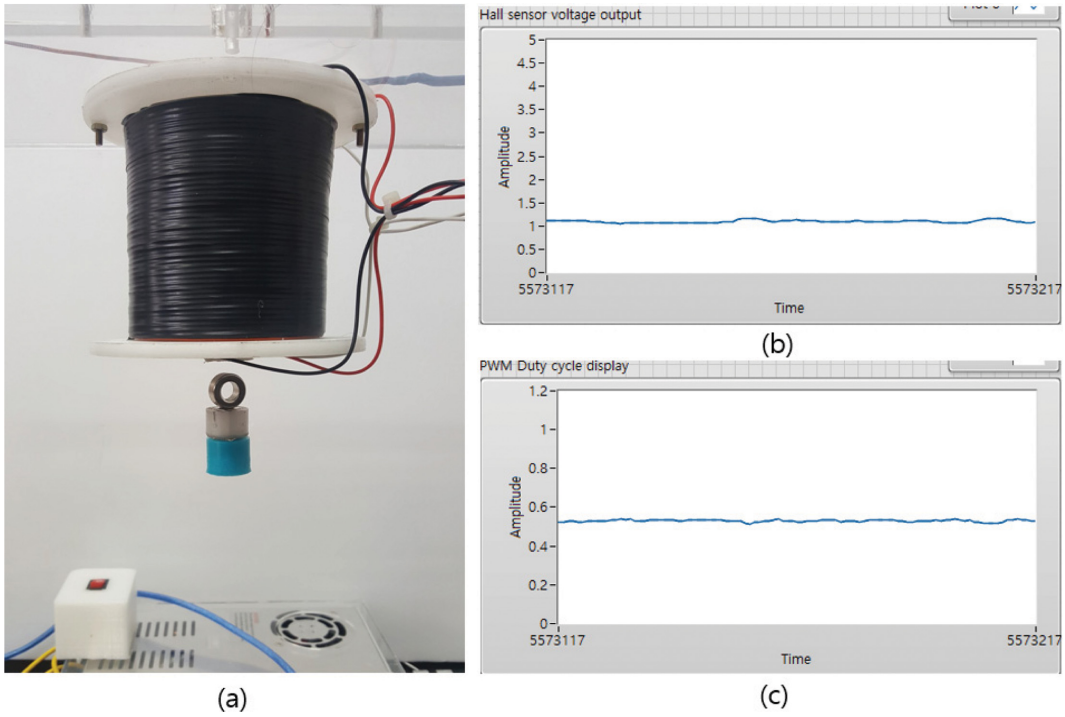

Fig. 10. (Color online) Magnetically levitated conditions: (a) the result of magnetic levitation, (b) output signal of Hall sensor, and (c) duty ratio of PWM control.

에 따라 안정적인 제어를 하기 위해 펄스폭변조 방법으로 전류를 제어한다. 이 방법은 저가의 SMPS로 전원공급장치를 대체할 수 있다. 시스템 설계를 위하여 수학적 모델을 확립하고 이를 이용하여 능동적 제어가 가능하였으며 불안정한 비선형 시스템을 안정적으로 제어할 수 있었다. 시뮬레이션과 다양한 실험적 분석을 통하여 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부 및 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단이 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1D1A1A01057463, NRF-2018R1C1B6003491).

References

[1] M. Y. Chen, M. J. Wang, and L. C. Fu, IEEE/ASME Trans. Mechatronics. **8**, 77 (2003).

[2] D. Cho, Y. Kato, and D. Spilman, IEEE Control Sust. Mag. **13**, 42 (1993).

[3] B. V. Jayawant, P. K. Sinha, D. G. Aylwin, Int. J. Control. **24,** 627 (1976).

[4] D. Rote and Y. Cai, IEEE Trans Magn. **38**, 1383 (2002).

[5] de Boeij Jeroen, M. Steninbuch, and H. Gutierrez, IEEE Trans Magn. **42**, 1604 (2006).

[6] K. Nagaya and M. Ishikawa, IEEE Trans. Magn. **31**, 885 (1995).

[7] C. M. Huang, J. Y. Yen, and M. S. Chen, Control Engineering Practice **8**, 1357 (2000).

[8] L. Hartert and M. Sayed-Mouchaweh, Neurocomputing **126**, 118 (2014).

[9] A. H. Fares, A. Abdelfattah, A. B. Sharkawy, and A. A. Abo-ismail, Journal of Engineering Sciences **37**, 909 (2009).

[10] A. Iglesias and I. Škrjanc, Evolving Systems **5**, 1 (2014).