

〈論 文〉

인덕턴스 특성을 이용한 자기부상계의 변위 측정의 한 방법에 관한 연구

A Study on a Displacement Measurement Method of Magnetic Levitation System Applying the Inductance Characteristic

김 창 화* · 양 주 호**

Chang-Hwa Kim, Joo-Ho Yang

Key Words : Magnetic Levitation System (자기부상계), Inductance Characteristic (인덕턴스 특성), Displacement Measurement (변위 측정), Carrier PWM Signal (반송 펄스폭 변조 신호)

ABSTRACT

The magnetic levitation system has great advantages, such as little friction, no lubrication, no noise and so on. But the magnetic levitation system need a stabilizing controller because it is a unstable system in natural and it need a sensor for displacement measurement to control the system. In this paper, we proposed a sensorless method to measure the gap between the magnetic pole and the levitated object with application the inductance characteristic which vary according to gap. We made a driving circuit which supply simultaneously the control input PWM (Pulse Width Modulation) signal and the carrier PWM signal to estimate the gap. Because the inductance is a function of gap, and the current of the carrier signal is a function of the inductance, we could estimate the gap from the measurement of the current of the carrier signal. Finally, we investigated the validity of the proposed method through the experimental results

기 호 설 명

- e : 전자석에 가하는 전압[V]
- E_a : 반송파 전압의 전원전압[V]
- E_b : 제어 전압의 전원전압[V]
- E_c : 반송 신호의 근사 정현파 전압의 진폭[V]
- i : 전자석 코일에 흐르는 전류[A]
- i_c : 반송 신호에 대한 전류[A]
- I_c : 반송 신호에 대한 출력의 근사 정현파 전류의 진폭[A]
- L : 전자석 코일의 인덕턴스[H]
- R : 전자석 코일의 저항[Ω]
- T_c : 반송 PWM 신호의 주기
- T_u : 제어 입력 PWM 신호의 주기
- u : 제어 입력[V]

- v : 부상물체의 위치변동에 대한 계측회로에서의 전압[V]
- y : 부상물체와 전자석 사이의 길이[mm]
- ω_c : 반송 PWM파의 주파수
- ω_u : 제어입력 PWM의 주파수

1. 서 론

능동형 자기부상계는 비접촉으로 물체를 부상하기 때문에 고속 회전 기기나 운송 시스템 등의 여러 분야에 응용이 활발히 이루어지고 있다. 자기 부상방법중 흡인식 자기부상계는 본질적으로 불안정하므로 원하는 위치에 물체를 부상시키기 위해서는 위치정보를 이용하여 시스템을 안정화하는 피드백 제어를 행하여야 한다^(1,2). 이때 변위 검출은 와전류식, 광학식, 커패시턴스형 등의 측정용 센서^(3,4)를 이용한 방

*부산수산대학교 대학원

**정회원, 부산수산대학교 공과대학 제어기계공학과

법과 자기부상계의 파라미터가 간극(gap)에 따라 변화하는 성질을 이용한 센서리스(sensorless) 방법 등이 있다. 전자의 방법으로 변위를 검출할 경우 피드백 제어계가 경제적으로 고가이고, 또한 센서의 고장등은 자기부상계에 있어 심각한 문제들을 초래한다. 그리고 시스템의 구조상의 제약이나 센서 부피등으로 인하여 위치 검출점과 제어점이 불일치하게 되는 경우가 있을 수 있는데, 이는 제어성능 및 내부 안정성에 악영향을 줄 수 있다. 후자의 방법을 이용하여 위치를 검출할 경우 위치 검출점과 제어점을 일치시킬 수 있으며, 또한 제어 시스템을 저가격화로 구성할 수 있기 때문에 경제적이다.

이러한 전자의 위치 검출방법의 단점을 해결하기 위하여 Visher등은⁽⁵⁾ 관측기(observer)를 사용하여 전류의 검출로 변위를 추정하였는데, 이 방법은 시스템의 공칭모델로부터 관측기를 설계하여 변위를 추정하기 때문에 자기부상계의 파라미터 변동 등의 불확실성에 대해서는 설계한 관측기가 열화되어 변위 검출 성능이 저하할 수 있다. Okada등은⁽⁶⁾ PWM 반송 주파수 성분에 대한 전류를 검출하여 변위를 추정하였는데, 이 방법은 제어입력신호가 반송파 신호를 겸하고 있어서 제어 입력 신호의 듀티비(duty ratio)가 50%를 넘어남에 따라 변위 검출성능이 현저히 떨어졌다. 그리고 권등은⁽⁷⁾ 선형앰프를 이용하여 구동 신호와 반송파 신호를 전자석 코일에 가한 후 전자석에 흐르는 반송파 전류성분을 추출하여 변위를 추정하는 방식을 채용하였으나 이는 전기 에너지 효율에 문제가 있다. 선형 앰프는 PWM(Pulse Width Modulation)방식의 전력 증폭 앰프보다 3~5배 정도의 에너지 손실이 있다고 보고⁽³⁾되어 있다.

본 연구에서는 자기부상계에 있어 전자석의 인덕턴스가 변위의 함수라는 것을 이용하고, 전기적 소모 에너지를 최소화하기 위하여 제어 입력 신호와 반송파 신호를 PWM파 형식으로 전자석에 중첩하여 인가한 후, 전자석에 흐르는 반송파 성분의 전류만을 추출하기 위해 대역 통과 필터(band pass filter) 및 RMS-DC회로(Root Mean Square-DC circuit)를 통과시켜 변위를 추정하는 한가지 새로운 방법을 제안한다. 그리고 실험을 통하여 본 연구에서 제안하는 방법의 타당성을 확인한다.

2. 자기부상계의 변위 추정의 원리

Fig. 1과 같은 자기부상 시스템의 전기적 회로 방

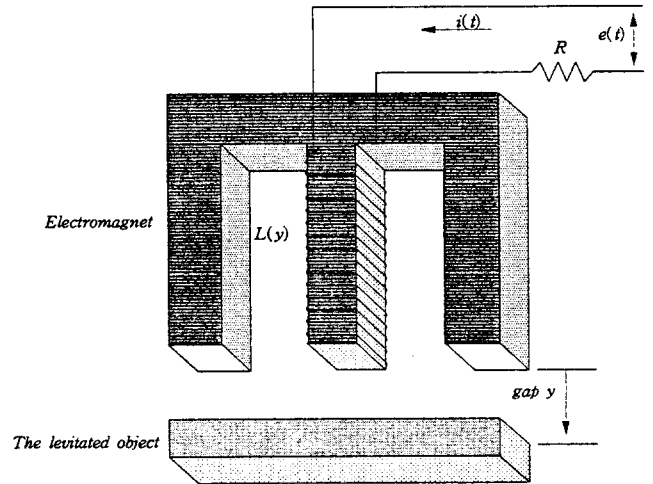


Fig. 1 Magnetic levitation system

정식은 식 (1)과 같다.

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = e(t) \quad (1)$$

식 (1)에서 인덕턴스 L 은 부상체의 위치 y 에 따라 변화하는 값으로 식 (2)와 같이 둘 수 있다⁽⁸⁾.

$$L(y) = \frac{Q}{Y_{\infty} + y} + L_0 \quad (2)$$

여기서, Q , Y_{∞} , L_0 는 실험에 의해 구해지는 파라미터의 값들이다.

전자석의 회로 방정식 (1)에서 저항 R 을 알고 전류 i 와 전압 e 를 측정할 수 있다면, 이 식으로부터 인덕턴스 $L(y)$ 를 추정할 수 있으며, 추정된 그 값으로부터 간극 y 를 식 (2)로부터 계산할 수 있다. 이러한 이론적 근거를 배경으로 하여, 변위를 측정하기 위한 주파수가 ω_c 이고 듀티비가 0.5인 반송 PWM파를 제어입력에 중첩시켜 전자석에 인가한다. 이 반송 PWM파는 식 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 이것을 푸리에 급수로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$e_c(t) = \begin{cases} E_a, & 0 < t < \frac{T_c}{2} \\ 0, & \frac{T_c}{2} < t < T_c \end{cases} \quad (3)$$

$$e_c(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_c t + b_n \sin n\omega_c t) \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \begin{cases} a_0 = E_a \\ a_n = \frac{E_a}{n\pi} \sin n\pi \\ b_n = \frac{E_a}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \end{cases}$$

식 (4)에서 직류성분을 제외하고 기본파($n=1$)만

을 고려 했을 때의 근사 정현파 진폭 E_c 는 식 (5)와 같이 된다.

$$E_c = \frac{2E_a}{\pi} \quad (5)$$

이 반송파의 전압을 전자석에 가한 경우, 정상상태에서의 반송파 성분에 대한 전류 i_c 도 근사 정현파로 가정할 수 있는데, 이때 전류 i_c 의 기본파에 대한 진폭을 I_c 라 하면 반송파 성분에 대한 회로 방정식 (1)은 식 (6)과 같이된다.

$$j\omega_c L(y) I_c e^{j\omega_c t} + R I_c e^{j\omega_c t} = E_c e^{j\omega_c t} \quad (6)$$

이때 ω_c 를 충분히 크게 하면 저항에 의한 항은 상대적으로 작게 되어 무시할 수 있으므로 식 (6)을 크기만으로 표시하면 식 (7)과 같다.

$$\left| \frac{I_c}{E_c} \right| \approx \frac{1}{\omega_c L(y)} \quad (7)$$

식 (7)에서 E_c 와 ω_c 는 이미 알고 있는 값이므로 I_c 의 측정만으로 $L(y)$ 를 계산할 수 있고, 이 $L(y)$ 를 식 (2)에 대입함으로써 변위 y 를 추정할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 구동회로 및 계측회로

흡인식 자기부상계에서 전자기력을 얻기 위해서는

전력 증폭기가 필요하며, 전력 증폭기로는 선형 앰프와 PWM방식을 이용한 앰프 등이 있는데, 선형 앰프는 전기적 에너지 소모가 많으므로 본 연구에서는 PWM 구동방식의 앰프를 사용한다.

2.1절에서 언급한 바와 같이 변위를 추정하기 위해서는 전자석 코일에 제어입력(PWM파 형식) 신호 이외에 반송 PWM파 신호를 인가하여 반송 PWM파의 전압 성분에 대한 전류의 크기를 계측해야 한다. Fig. 2는 제어입력 PWM파와 반송 PWM파를 전자석에 인가하는 회로 및 반송파 성분의 전류를 계측하기 위한 회로의 블록선도이다. 이때 반송 PWM신호 및 제어입력 PWM 신호를 발생하는 장치는 제어 전용 마이크로 프로세서인 i80c196kc 소자를 사용하여 실험실에서 자작한 80c196kc보드를 이용하였다. 반송 PWM파의 발생은 i80c196kc가 가지고 있는 PWM 출력기능을 이용하였고, 반송 주파수 ω_c 는 31.25kHz로 하였다. 그리고 제어입력 PWM파는 i80c196kc의 출력 포트1(Port 1)를 사용하였으며, 제어입력에 대한 듀티비는 i80c196kc소자가 가지고 있는 기능 중 A/D변환 기능을 이용하여 외부(PC: 퍼스널 컴퓨터, 주제어기)로부터 입력되는 제어 입력을 10bit로 변환한 후, 이 값에 대응하는 듀티비를 계산하여 설정 하였다. 이때 제어입력

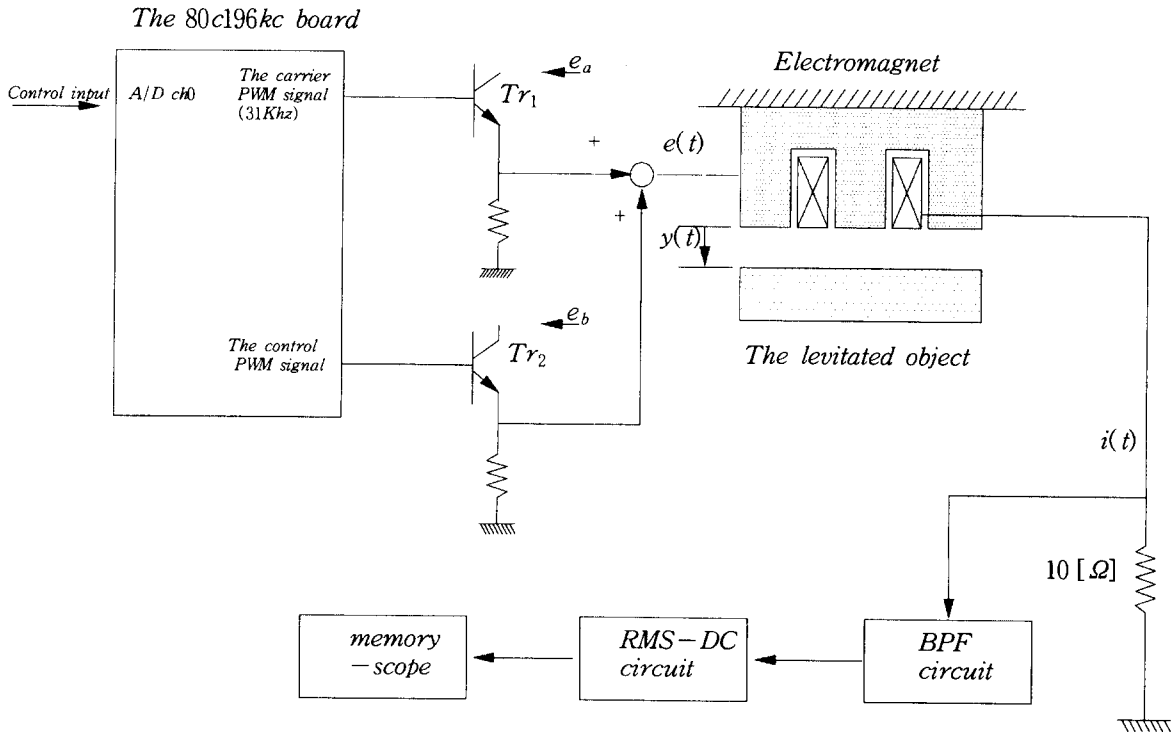


Fig. 2 The Block diagram of proposed self-sensing levitation control system

의 PWM 주파수는 약 2.4[kHz]로 하였다.

이러한 제어입력 PWM파와 반송 PWM파를 전력 증폭하여 전자석에 가하기 위해, 본 연구에서는 비교적 스위칭 속도가 빠른 IGBT (Insulated gate bipolar transistor) 소자를 사용하였으며, 그림에서 T_{R1} 은 주파수가 ω_c 인 반송파를 전력 증폭하기 위한 트랜지스터이고, T_{R2} 는 주파수가 ω_u 인 제어입력을 증폭하기 위한 트랜지스터이다. IGBT의 베이스를 구동하기 위해서는 베이스 구동전용 IC를 이용하였다.

또한, 전자석에 사용된 자성체는 주파수 특성이 우수한 페라이트를 이용했고, 전자석의 코일은 직경이 0.75[mm]인 구리선을 300회 감아 만들었으며, 코일의 저항은 2.0[Ω]이었다.

전자석 코일에 흐르는 전류는 저항 측정법을 이용하여 측정하였고, 이때 측정된 전류신호는 제어입력의 주파수에 대한 응답과 반송파 신호에 대한 것이 혼재해 있기 때문에 이 신호중에서 반송 신호성분을 추출하여야 한다. 이 신호를 추출하기 위하여, 본 연구에서는 MAX268 소자를 사용하여 중심 주파수가 31.25[kHz], 밴드 폭(Bandwidth)이 6[kHz], 필터 차수가 4차가 되도록 제작한 대역 통과 필터(BPF : Band Pass Filter)를 이용하였다. 그리고 추출된 신호는 정현파 신호이므로 실효치-직류 변환회로(RMS-DC circuit)를 통과시켜 부상물체의 위치에 따른 전압을 측정하였고, 이때 실효치-직류 변환회로는 AD536AJ 소자를 이용하여 회로를 구성하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 80c196kc보드에서 발생하는 반송 PWM파와 제어입력의 PWM파를 메모리 스크프로 관측한 그림이다. 위 부분의 그림은 80c196kc보드에서 PWM출력 핀으로 발생하는 반송 PWM파를 나타내고 있으며, 아래 부분은 80c196kc보드에 외부에서 제어입력이 2[V]로 가해질 경우 이 값에 대응하여 포트 1로 출력되는 제어입력 PWM파이다.

Fig. 4는 반송 PWM파와 제어입력의 PWM파가 중첩되어 전자석에 가해지기 직전의 전압 파형으로 두 신호의 중첩이 양호하게 됨을 보이고 있다. 이때 전자석에 가해지는 제어전압 및 반송파 전압의 전원 전압은 8[V] 직류전원이다.

Fig. 5는 물체의 부상위치에 대한 측정전압에 대한 응답이다. 횡축은 레이저 센서를 이용하여 계측한 부상물체의 위치인데, 사용한 레이저 센서(KEYENCE LB-72)의 선형성은 풀 스케일에서 1%이고 분해

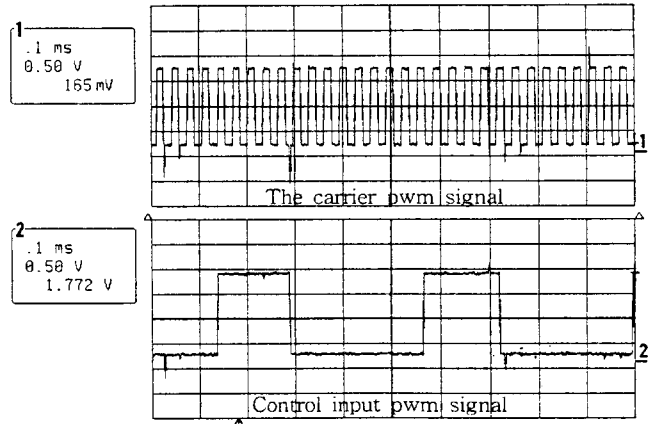


Fig. 3 The carrier pwm signal and control input pwm signal

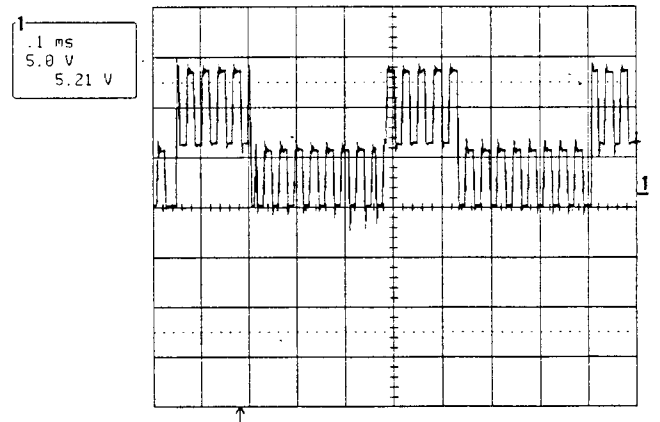


Fig. 4 The superposition signal by carrier pwm signal and control input pwm signal

능(resolution)은 응답시간이 2[ms]에서 15[μm]이다. 또한 중측은 물체의 부상위치에 대해 3.1절에서 설명한 계측회로의 측정전압이다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 부상체의 위치가 0.15[mm]~0.5[mm] 사이는 거의 선형적으로 변하고 있으며 그 이후부터는 기울기가 점점 감소해 가는 것을 알 수 있는데, 이것은 식 (2)로부터 알 수 있는 바와 같이 부상물체가 전자석으로부터 떨어짐에 따라 간극 y 가 인덕턴스 L 에 기여하는 정도가 작기 때문이며, 실제의 자기 부상계에서 부상간극이 0.5[mm]미만일 경우에는 큰 문제없이 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 그림으로부터 본 연구에서 이용될 간극의 범위를 비교적 선형성이 강한 0.15[mm]~0.5[mm] 사이로 잡고, 측정전압으로부터 변위를 계산하는 실험식을 유도해 보자. 그림으로부터 변위

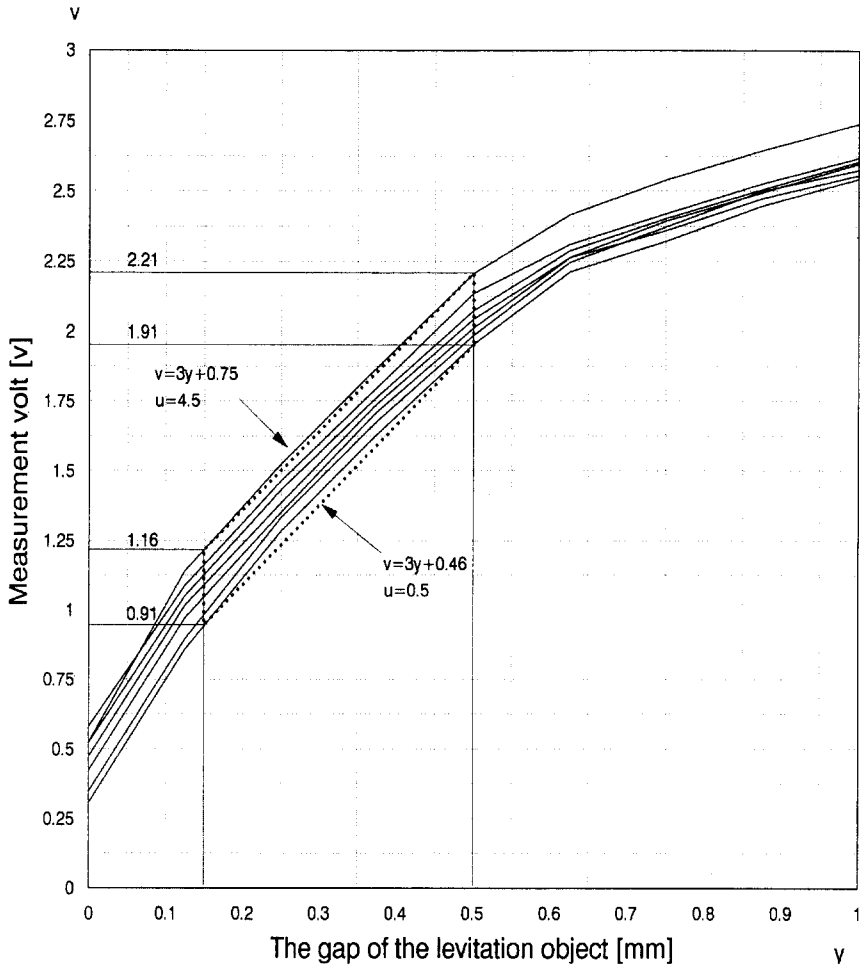


Fig. 5 The relation between the measurement voltage versus gap y

y 는 측정전압 v 와 제어입력 u 의 함수임을 감안하여, 점선내의 데이터로부터 본 연구에서 자작된 측정장치의 측정변위 y 를 정식화하면 다음과 같다.

$$y = f(v, u) = \frac{1}{3}v - \frac{0.0725}{3}u - 0.14125 \quad (8)$$

Fig. 6(a), (b)는 부상물체를 자유낙하시켰을 때의 변위를 본 연구에서 자작하여 측정한 것과 시판되고 있는 비교적 정도가 높은 레이저 변위계(KEYENCE LB-72)로써 측정한 것을 나타낸 그림이다. 그림(b)의 응답측정시에는 레이저 변위계의 응답시간을 2[ms]로 설정(setting) 하였다. 이 그림에서 레이저 변위계로 측정한 경우의 응답이 위 그림과 반대의 모양으로 표시되어지는 것은 레이저 변위계를 부상물체의 아래쪽에 설치 하였기 때문에 변위가 음(-)의 방향으로 증가 되는데 기인한 것이다. 그리고 그림에서 레이저 변위계로 측정한 경우의 응답이 정상 상태에 도달할 때까지의 시간은 약 25[ms]였으며,

본 연구에서 자작한 측정회로로 측정한 경우는 약 50[ms]가 소요되어 응답성 측면에서는 성능이 다소 떨어지기는 하나, 본 연구에 이용된 측정 회로 중

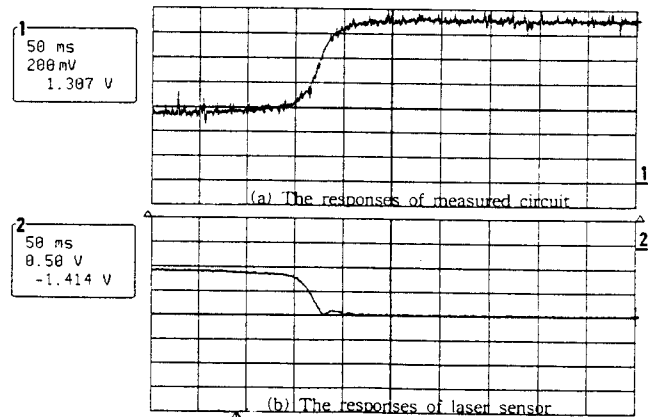


Fig. 6 The responses of measured circuit and laser sensor

RMS-DC변환회로 내의 커패시턴스(capacitance) 값을 조정하면 개선될 것으로 생각되며, 이 분야는 앞으로 더욱 연구를 해야 할 과제라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자기부상계에 있어 전자석의 인덕턴스가 변위의 함수라는 것을 이용하고, 전기적 소모 에너지를 최소화하기 위하여 제어 입력 신호와 반송 신호를 PWM파 형식으로 전자석에 중첩하여 인가한 후, 전자석에 흐르는 반송신호의 전류를 대역 통과 필터(band pass filter) 및 RMS-DC회로(Root Mean Square-DC circuit)를 통과시켜 측정 후, 이를 이용하여 변위를 추정하는 한가지 새로운 센서리스(sensorless)방법을 제안하였으며, 제안하는 방법의 타당성을 검토하기 위하여 측정회로를 제작한 후 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전자석과 부상체사이의 간극이 0.15[mm]~0.5[mm]에서는 측정 전압이 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서 제안하는 방식은 측정변위가 제어입력과 측정전압의 함수로 되며, 식 (8)과 같은 식을 이용함으로써 변위를 계산할 수 있다.

앞으로 응답성을 더욱 개선하기 위해서는 RMS-DC변환회로의 커패시턴스 값의 조정이 필요하며, 아울러 제안된 검출방법을 이용하여 자기부상계의 실제부상실험을 수행하는 것을 과제로 남겨둔다.

참 고 문 헌

(1) 野波, 1993, “磁氣浮上磁氣軸受制御の現況と制御

理論”, 計測と制御, Vol. 32.4, p. 301.

(2) 양주호, 김창화, 정석권, 김영복, 1995, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(I)”, 한국박용기관학회, Vol. 19, No. 3.

(3) 電氣學會, 1993, “磁氣浮上と磁氣軸受”, コロナ社, pp. 6~36.

(4) 永田正夫, 1993, “磁氣浮上技術の動向と動的問題”, 日本機械學會誌, Vol. 96, No. 899, pp. 876~879.

(5) D. Visher and H. Bleuler, 1990, “A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMB, s based on Network Theory Concept,” Proc. of the 2nd Int, l Symp. on Magnetic Bearing, pp. 301~306.

(6) Y. Okada, K. mastuda and B. Nagagi, 1992, “Sensorless Magnetic Levitation Control by Measuring the PWM Carrier Frequency Component,” Proc. of the 3rd Int, l Symp. on Magnetic Bearing, pp. 176~183.

(7) 권계시, 정호섭, 이종원, 1995, “전류신호를 이용한 능동자기베어링계의 제어,” 한국소음진동공학회지, 제5권 제1호, pp. 49~57.

(8) 양주호, 김창화, 1996, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(II)”, 한국박용기관학회투고중.