

# 인덕턴스 특성을 이용한 자기부상계의 변위

## 측정의 한 방법에 관한 연구

°김창화\*, 양주호\*\*

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

( Chang-Hwa Kim, Joo-Ho Yang)

### Abstract

In this paper, we proposed a method to measure the gap between the magnetic pole and the levitated object applying the inductance characteristic which vary according to gap. We made a driving circuit which supply 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 investigated the validity of the proposed method through the experimental results

### 1. 서 론

능동형 자기부상계는 비접촉으로 물체를 부상하기 때문에 고속 회전기거나 운송 시스템 등의 여러 분야에 응용이 활발히 이루어지고 있다. 자기 부상방법중 본 연구에 이용된 흡인식 자기부상계는 본질적으로 불안정하므로 원하는 위치에 물체를 부상시키기 위해서는 위치정보를 이용하여 시스템을 안정화하는 피드백 제어를 행하여야 한다<sup>1)</sup>.<sup>2)</sup> 이때 사용되는 변위 측정용 센서로는 와전류식, 광학식, 캐패시턴스형 등이 있다<sup>3)-4)</sup>. 또한, 고정도로 물체를 부상하기 위해서는 위치 검출점과 제어점이 일치할 필요가 있는데, 시스템의 구조상 제약이나, 센서의 부피 등의 제약으로 어느 정도의 거리를 두고 센서를 설치함으로써 앞에서 말한 두 점의 위치가 일치하지 못할 경우가 있다. 이러한

센서의 검출점과 제어점의 불일치는 피드백 제어계에 있어서 제어성능 및 내부 안정성에 악영향을 줄 수 있으며, 또한 소형의 부상계에 있어서는 센서의 크기가 커서 센서를 부착할 공간이 문제가 되는 경우도 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 Visher등은<sup>5)</sup> 관측기(Observer)를 사용하여 전류의 검출로 변위를 추정하였고, Okada등은<sup>6)</sup> 자기유도계수(Inductance)가 변위의 함수라는 것을 이용하여 변위를 추정하였으며, 권등은<sup>7)</sup> Okada가 제안한 방법을 사용하여 선형앰프로 구동되는 자기 부상계의 변위를 추정하였다. 그러나 Visher가 제안한 관측기에 의한 변위 추정방식은 공칭모델에 의해 변위를 추정하는 방식으로써 파라미터 변동 등의 불확실성이 있는 경우에는 어려움이 있다. 또한 Okada가 이용한 방법은 제어입력신호가 반송파 신호를 곱하고 있어서 제어 입력신호의 듀티비(Duty ratio)가 50%를 전후하여 상당히 크거나 작을 때 변위 검출 성능이 저하하는 문제점이 있다. 이의 문제점을 해결하기 위해 권등은 구동 신호와 반송파 신호를

\* 부산수산대학교 대학원

\*\* 부산수산대학교 제어기계공학과

중첩하여 선형 앰프를 거쳐 전자석 코일에 가한 후 전자석에 흐르는 반송파 성분을 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<sup>3)</sup>되어 있다.

본 연구에서는 자기부상계에 있어 전자석의 인덕턴스가 변위의 함수라는 것을 이용하고, 전기적 에너지를 최소화하기 위하여 제어 입력 신호의 PWM파와 반송파 신호의 PWM파를 전자석에 각각 인가한 후, 전자석에 흐르는 반송파 성분의 전류만을 추출하기 위해 대역통과필터(band pass filter)를 통과시켜 변위를 추정하는 한가지 새로운 방법을 제안한다. 이때 반송파 신호의 PWM파의 듀티비는 변위 검출 성능이 우수한 0.5를 사용하였다. 그리고 실험을 통하여 본 연구에서 제안하는 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

## 2. 자기부상계의 모델링 및 변위 추정의 원리

### 2.1 자기부상계의 모델링

Fig.2.1과 같은 자기부상 시스템의 운동 방정식은 수직방향의 1자유도만을 생각하면 식(1)과 같다

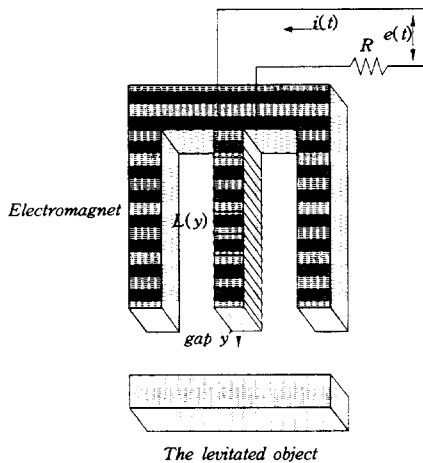


Fig.2.1 Magnetic levitation system

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - f \quad (1)$$

여기서,  $m$  : 부상물체의 질량 [kg]

$f$  : 전자기력 [N],  $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]

$y$  : 부상물체와 전자석 사이의 길이 [m]

이때 전자기력  $f$ 는 전자석과 부상물체의 간극에 대한 편미분 방정식으로 아래와 같다.

$$f = -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{2} Li^2 \right) \quad (2)$$

여기서,  $i$  : 전자석에 흐르는 전류 [A]

또한 자기부상계에 있어서 전자석의 전기적 회로 방정식은 아래와 같다.

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = e(t) \quad (3)$$

여기서,  $R$  : 전자석 코일의 저항 [ $\Omega$ ],  $L$  : 코일의 인덕턴스 [H],  $e$  : 전자석에 가하는 전압 [V]

위의 식(2),(3)중에서 인덕턴스  $L(y)$ 는 부상체의 위치에 따라 변화하는 값으로 아래와 같이 놓을 수 있다<sup>8)</sup>.

$$L(y) = \frac{Q}{Y_\infty + y} + L_0 \quad (4)$$

여기서  $y$ 는 전자석과 부상체 사이의 거리이고,  $Q, y_\infty, L_0$ 는 실험에 의해 구해지는 파라미터의 값들이다. 그런데, 전자석과 부상체 사이의 간극이 작다고 한다면  $L(y)$ 는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$L(y) = \frac{Q}{Y_\infty + y} \quad (5)$$

식(1)~(5)에서 전자석에 가하는 구동전압을  $e(t)$ 라하고 평형점에서 미소변화분을  $y$ 로 하면, 입출력 관계식은 비선형 방정식으로 표현되므로, 이 식을 평형점 부근에서 Taylor급수 전개법에 의해 선형화를 하면 식(6)과 같다.

$$P(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \frac{b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

단,

$$a_3 = -m(Q + L_0(Y_\infty + Y))(Y_\infty + Y)^3, \quad a_2 = -mR(Y_\infty + Y)^4$$

$$a_1 = (QI^2(Q + L_0(Y_\infty + Y)) - Q^2I^2), \quad a_0 = RQI^2(Y_\infty + Y)$$

$$b_0 = QI(Y_\infty + Y)^2$$

## 2.2 인덕턴스 특성을 이용한 변위 추정 원리

전자석 코일은 저항  $R$ 과 인덕턴스  $L(y)$ 로 이루어져 있으며, 인덕턴스의 값은 변위  $y$ 의 함수이므로 전자석의 회로 방정식은 식(3)과 같다.

제어입력의 PWM파의 주파수를  $\omega_w$ , 위치 검출을 위한 반송파 성분의 주파수를  $\omega_c$ 라 할 때, 반송파 성분  $\omega_c$ 에 대한 식(3)의 회로 방정식은 식(7)과 같이된다.

$$j\omega_c L(y)I_c e^{j\omega_c t} + RI_c e^{j\omega_c t} = E_c e^{j\omega_c t} \quad (7)$$

이때  $\omega_c$ 를 충분히 크게 한다면 저항에 의한 항은 상대적으로 작게 되어 무시할 수 있고, 이때 식(8)을 크기만으로 표시하면 식(8)과 같다.

$$\left| \frac{I_c}{E_c} \right| \approx \frac{1}{\omega_c L(y)} \quad (8)$$

식(5)를 식(8)에 넣어 정리하면 추정된 변위는 식(9)와 같다.

$$Y_\infty + y = Q\omega_c \left| \frac{I_c}{E_c} \right| \quad (9)$$

## 2.3 제어 입력 PWM파 및 반송 PWM파의 구동회로

2.2절에서 언급한 바와 같이 변위를 추정하기 위해서는 코일에 흐르는 반송파의 전류의 크기를 알아야하는데, Fig.2.2는 제어입력 PWM파와 반송 PWM파의 인가 방법 및 반송파 성분의 전류를 측정하는 블록선도이다.

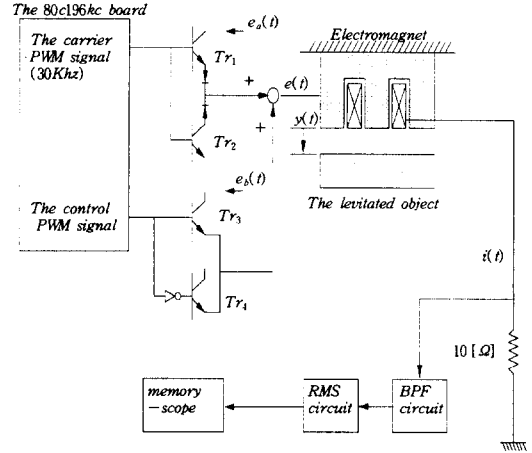


Fig.2.2 The driving circuit for position measurement

이 회로에서  $Tr_{R1}$ ,  $Tr_{R2}$ 는 듀티비가 0.5인 반송파 성분의 주파수  $\omega_c$ 로 구동되는 트랜지스터이고,  $Tr_{R3}$ ,  $Tr_{R4}$ 는 제어입력에 비례하는 듀티비로써 부상 물체를 제어하기 위한 신호를 발생시키는 트랜지스터이다. 각 트랜지스터의 베이스 구동신호에 따라 전자석 코일의 전기회로 방정식은 아래 4가지의 경우와 같다.

CASE 1 : 반송 PWM파가 on, 제어입력 PWM파가 on

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = e_a(t) + e_b(t) \quad (10)$$

CASE 2 : 반송 PWM파가 on, 제어입력 PWM파가 off

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = e_a(t) \quad (11)$$

CASE 3 : 반송 PWM파가 off, 제어입력 PWM파가 on

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = e_b(t) \quad (12)$$

CASE 4 : 반송 PWM파가 off, 제어입력 PWM파가 off

$$Ri(t) + \frac{d}{dt}(L(y)i(t)) = 0 \quad (13)$$

위의 경우에 대해 정리하여 보면 표 1과 같다

Table.1 The voltage in electromagnetic for the driving signal

		제어입력 PWM과	
		on	off
반송 PWM과	on	$e_a + e_b$	$e_a$
	off	$e_b$	0

### 3. 실험 결과 및 고찰

전자석에 쓰인 자성체로는 주파수 특성이 우수한 페라이트를 사용했으며, 전자석은 직경이 0.75 [mm]인 구리선을 300회 감아 만들었으며, 이때 코일의 저항은 2.0 [ $\Omega$ ] 이었다. 실험에 이용된 트랜지스터는 스위칭 속도가 비교적 빠른 IGBT소자를 사용하였고, IGBT의 베이스를 구동하기 위해서는 전용 베이스 구동용 IC를 이용하였으며, 이때 구동신호발생을 위해서 실험실에서 자작한 80c196 kc보드를 사용하였다. 이때 반송과 주파수  $\omega_c$ 는 80c196kc소자의 PWM과 출력기능을 이용하여 소프트웨어적으로 듀티비가 0.5로 하고, 주파수는 30kHz로 출력하였다. 제어입력 PWM과의 듀티비 설정은 다음과 같이 한다. 즉, 80c196kc소자가 가지고 있는 기능 중 A/D변환 기능을 이용하여 외부로부터 입력되는 제어 입력을 10bit로 변환한 후, 이 값에 대응하는 듀티비를 계산하여 포트 1(port 1)로 출력한다. 이때 출력된 제어입력의 주파수는 약 4kHz이었다. 이렇게 서로 다른 주파수  $\omega_m, \omega_c$ 를 각각 전자석 코일에 인가한 후 전자석에 흐르는 전류를 측정하기 위해 저항 측정법을 이용하여 전류를 측정하였고, 이때 측정된 전류신호는 제어입력의 주파수에 대한 응답과 반송과 신호에 대한 것이 혼재해 있으므로, 이 신호를 고역통과필터(band pass filter)에 통과시켜 반송과 성분에 대한 응답만 추출한 후, 교류-실효치 회로(RMS : root-mean-square)를 통과시켜 부상물체의 위치에 따른 전압을 측정하였다.

Fig.3.1은 물체의 부상위치에 따른 측정전압에 대한 응답으로, 횡축은 부상물체의 위치이고 종축

은 측정전압이다. 이때 전자석에 가한 전압  $e_a(t), e_b(t)$ 는 8[V]이다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 부상체의 위치가 0[mm] ~ 0.55[mm]까지는 거의 선형적으로 변하고 있으며 그 이후부터는 기울기가 점점 감소해 가는 것을 알 수 있는데, 이것은 실제의 자기 부상계에서 부상간극이 0.5[mm] 미만이므로 이 범위에서 사용한다면 큰 문제없이 사용할 수 있다고 생각된다.

Fig.3.2는 일정한 거리에 대해 제어입력에 대한 측정전압이고, 이때 횡축은 제어입력이고 종축은 측정전압이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 제어 입력이 1[V]의 미만을 제외한 곳에서 보면, 일정한 위치의 부상체의 대해 측정전압은 제어전압의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 가진다. 그림에서 제어 입력이 큰 경우, 측정전압이 다소 떨어지는 경향이 있는데 이는 제어입력이 크게 됨에 따라 흡인력이 증가하여 부상물체의 gap이 작아지기 때문이다.

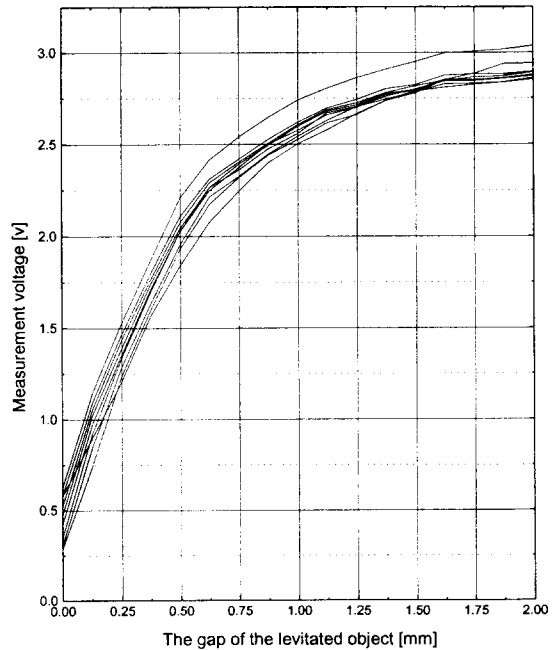


Fig.3.1 The relation between the measurement voltage versus gap

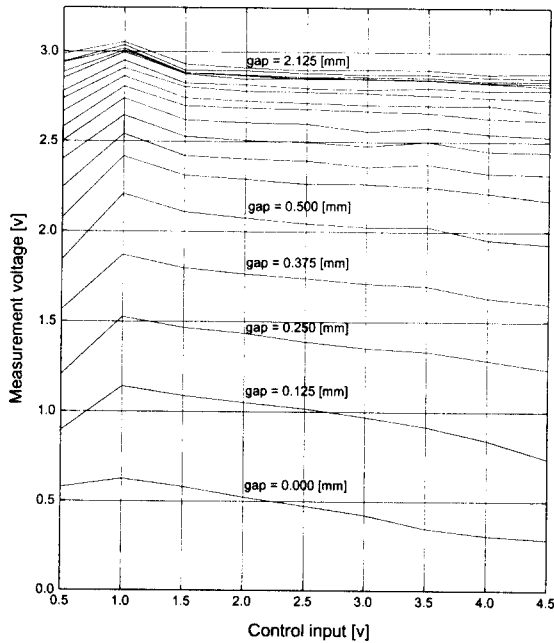


Fig.3.2 The relation between the measurement voltage versus control input

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자기부상 시스템에 있어 인덕턴스가 gap에 의해 변화하는 특성을 이용하여 변위를 검출하기 위한 반송 PWM과 신호와 제어입력 PWM과 신호를 인가하는 새로운 한 방법을 제안하였으며, 제안된 방법으로 검출회로를 자작하여 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제어입력이 일정한 경우 gap이 0 ~ 0.5[mm]사이에서는 변위 측정용 전압이 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있었다.
- 2) 부상물체가 일정한 위치에서 제어전압의 변동에 대해 측정전압은 거의 일정함을 알 수 있었다.
- 3) 1)과 2)의 결과를 조합하면 gap의 변화를 측정 전압으로부터 계산하는 것이 가능하다.

금후의 과제로는 본 논문에서 제안한 변위 검출 방법을 이용하여 자기부상계의 실제 부상실험을 행하는 것으로 남겨둔다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 野波, “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, pp.301, 1993
- 2) 양주호, 김창화, 정석권, 김영복, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(I)”, 한국박용기관학회, Vol.19, No.3, 1995
- 3) 電氣學會, “磁氣浮上と磁氣軸受”, コロナ社, pp.6 ~ pp.36, 1993
- 4) 永田正夫, “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, 1993
- 5) D.Visher and H.Bleuler, “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, 1990
- 6) Y.Okada, K.mastuda and B.Nagagi,, “Sensorless Magnetic Levitation Control by Measuring the PWM Carrier Frequency Component,” Proc. of the 3rd Int,l Symp. on Magnetic Bearing, pp.176 ~183, 1992
- 7) 권계시, 정호섭, 이종원, “전류신호를 이용한 능동 자기베어링계의 제어,” 한국소음진동공학회지, 제5권 제1호, pp.49~57, 1995
- 8) 양주호, 김창화, “자기부상 시스템에 강인한 제어기 설계에 관한 연구(II)”, 한국박용기관학회투고중, 1996