

셀프센싱 자기 부상계를 위한 인덕턴스형 변위센서

윤형진*(연세대 대학원 기계공학과), 이상현(연세대 기계공학과), 백윤수(연세대 기계공학과)

An Inductive Position Sensor for Self-sensing Magnetic Suspension System

H. J. Yoon(Mecha. Eng. Dept. YSU), S. H. Lee(Mecha. Eng. Dept., YSU), Y. S. Baek(Mecha. Eng. Dept., YSU)

ABSTRACT

The magnetic suspension system is used in many areas, because it has great advantages, such as no friction, no noise, no lubrication and so on, but it is a unstable system in natural. It must have a feedback control with the position is measured for a stable levitation. There are an eddy-current sensor, a capacitive sensor, an inductive sensor, and an optical sensor with a laser as the sensor which measures displacements without contact. Among them, an inductive sensor is made with lower price than others. And it has a good linearity. In this paper, a magnetic circuit leads a linear equation between an input as a displacement and an output as a voltage. Experiments establish that voltage change according to displacement is linear. This paper presents the preliminary study of an inductive position sensing for self-sensing magnetic suspension system.

Key Words : inductive (인덕턴스형), magnetic suspension(자기부상), non-contact displacement sensor(비접촉 변위센서)

1. 서론

능동형 자기부상계는 자기력을 이용하여 비접촉으로 물체를 부상시켜 기계적 마찰이 없으며, 이로 인해 정밀한 구동이 가능하다. 또한 마찰로 인한 소음이 발생하지 않으며, 윤활로 인한 오염원이 발생하지 않기 때문에 초정밀 혹은 청정 환경에서의 고속 회전기나 운송시스템 등의 여러 분야에 응용이 활발히 이루어지고 있다. 자기 부상방법 중 본 연구의 적용 대상이 되는 홀인식 자기 부상계는 강자성체를 이용하여 높은 자기력을 얻을 수 있어 높은 에너지 효율을 가지는 장점을 가지고 있다. 그러나, 자기력의 특성이 공극에 대해서 비선형적으로 변하며, 본질적으로 불안정하기 때문에 안정된 부상을 위해서는 위치정보를 이용한 폐환제어가 이루어져야 한다.

이 때 변위를 측정하는 센서로는 비접촉식 측정 센서로서 와전류형, 정전용량형, 인덕턴스형, 레이저를 이용한 광학형 등이 있다. 자기 부상계의 성능은 근본적으로 변위센서의 성능에 의해서 결정되는데, 앞서 언급한 센서들은 비교적 고가의 장비이고, 센서의 고장 등은 자기 부상계에 있어 심각한

한 문제들을 초래한다. 또한 시스템의 구조상의 제약이나 센서 부피 등으로 인하여 위치 검출점과 제어점이 불일치하게 되는 경우가 있을 수 있어, 이는 제어 성능 및 내부 안정성에 악영향을 줄 수 있기 때문에 적용하기가 힘든 편이다. 그러나, 이들 센서 중, 인덕턴스형의 센서는 다른 센서와 비교하여 저렴한 가격으로 시스템을 구성할 수 있으며, 또한 측정 영역 대비 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 인덕턴스형 변위센서의 원리는 어떠한 자기회로 내에서의 인덕턴스는 변위에 비례하게 나타난다는 간단한 원리이기 때문에 능동형 자기 부상계에 부가적인 회로의 추가로 쉽게 구현할 수 장점이 있는데, 이러한 형태의 측정방식을 셀프센싱(self-sensing)이라고 한다.⁽¹⁻⁵⁾

본 연구는 셀프센싱에 의한 자기부상계를 구성하기 위한 선행연구로서 면적 변화 형태의 인덕턴스형 비접촉 변위센서에 관한 연구를 수행한다.

본 연구에서 사용한 인덕턴스형 센서는 고유직항을 증가시키며 와전류의 손실을 줄이는 특성을 가진 규소강판을 이용한다. 규소강판은 투자율을 높이며 보자력을 저하시키기 때문에 히스테리시스 손실을 줄이는 특성을 가지고 있다.

본 연구는 자기 회로를 이용하여 이론적 해석을 하고 해석을 통해 변위 입력과 출력 전압과의 관계식을 얻는다. 이 식을 기초로 하여 주파수를 바꾸어 가며 변위 입력에 대한 출력 전압을 얻어 제안된 측정방법의 타당성을 보이며, 션프센싱을 이용한 흡인식 자기부상으로의 적용가능성을 타진한다.

2. 자기회로를 이용한 해석

본 연구에서는 전기회로이론과 대우관계인 자기회로를 이용하여 해석적인 방법으로 자기요소에 관한 모델링을 수행한다.

본 시스템은 구동 코일에 교류 전원을 인가하여 자기장을 형성하고, 위치 탐지 코일의 위치에 따라 변화하는 유도전압을 출력값으로 위치 정보를 얻는다. 유도 기전력과 결합자속의 변화율간의 정량적 관계는 페러데이 법칙으로 잘 알려져 있고 그 식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{E} 는 전기장의 세기 (electric field intensity)이고, \mathbf{B} 는 자속밀도 (magnetic flux density)이다. 식 (1)의 양변을 개방 표면에 대해 면적분하고, 스톡스 정리를 적용하면 다음과 같다.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

식 (2)는 정지 폐선로에 대해서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (3)$$

$v = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ (V), $\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ (Wb)로 정의할 수 있으므로, 식 (3)은 다음과 같이 정리된다.

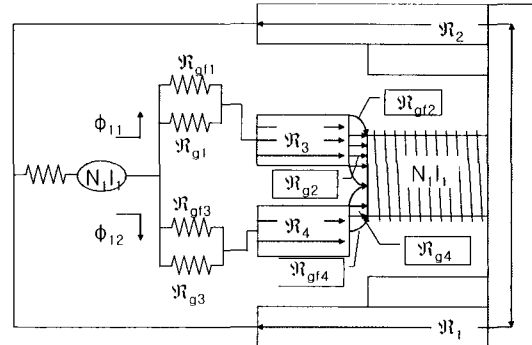
$$v = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에서와 같이 유도 전압은 자속량의 시간 비분에 비례하게 된다.

자속은 다음 식과 같이 자기 회로식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad (5)$$

여기서 \mathfrak{R} 는 릴럭턴스(reluctance), F 는 기자력 (magnetic motive force)이다. 릴럭턴스는 시스템의 형태에 따라 결정되어지는데, 직육면체의 선형 균일 등방성 자성체일 경우는 다음과 같이 정의된다.



\mathfrak{R} : Reluctance Φ : magnetic flux
 N : coil turns I : AC current

Fig. 1 Equivalent magnetic circuit and flux pattern in the air gap.

$$\mathfrak{R} = \frac{d}{\mu S} \quad (6)$$

여기서 S 는 단면적, d 는 길이, μ 는 투자율 (permeability)이다. 또한 구동 전류가 i_1 이고, 구동 코일 감은수가 N_1 일 때, 기자력은 다음 식과 같이 주어진다.

$$F = N_1 i_1 \quad (7)$$

가운데의 위치 탐지 코일의 위치가 위아래 대칭으로 있을 때 겹쳐있는 면적을 wh 라고 놓는다. 그리고 위치 탐지 코일이 밑으로 Δh 만큼 내려 왔을 때 각각의 릴럭턴스는 다음과 같다.

$$\mathfrak{R}_1 = \mathfrak{R}_2 = \frac{l_s}{\mu_r \mu_0 A_s} \quad (8)$$

$$\mathfrak{R}_3 = \mathfrak{R}_4 = \frac{l_m}{\mu_r \mu_0 A_m} \quad (9)$$

$$\mathfrak{R}_{g1} = \mathfrak{R}_{g2} = \frac{l_g}{\mu_0 w(h + \Delta h)} \quad (10)$$

$$\mathfrak{R}_{g3} = \mathfrak{R}_{g4} = \frac{l_g}{\mu_0 w(h - \Delta h)} \quad (11)$$

$\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$ 는 외부 자성체의 릴럭턴스이고, $\mathfrak{R}_3, \mathfrak{R}_4$ 는 위치 탐지 자성체의 릴럭턴스이며, $\mathfrak{R}_{g1}, \mathfrak{R}_{g2}$.

$\mathfrak{R}_{g3}, \mathfrak{R}_{g4}$ 는 공극에서 각각의 릴럭턴스이다. 공극에서 프링징 효과(fringing effect)는 공극의 릴럭턴스에 비해 상당히 작기 때문에 무시한다. 또한 자성체의 상대 투자율이 충분히 크다면 $\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2$. $\mathfrak{R}_3, \mathfrak{R}_4$ 는 거의 0 이다.

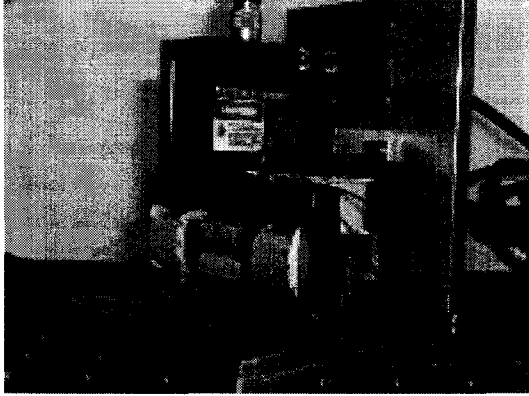


Fig. 2 Photograph of experimental setup with magnetic suspension system and laser displacement sensor.

그러므로, 각각의 위치 탐지 자성체를 지나는 자속은 다음과 같다.

$$\phi_{11} = \frac{N_1 i_1}{\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2} = \frac{\mu_0 N_1 i_1 w (h + \Delta h)}{2l_g} \quad (12)$$

$$\phi_{12} = \frac{N_1 i_1}{\mathfrak{R}_3 + \mathfrak{R}_4} = \frac{\mu_0 N_1 i_1 w (h - \Delta h)}{2l_g} \quad (13)$$

위치 탐지 코일에서 유도되는 차동 전압은 다음과 같다.

$$v = -N_1 N_2 \cdot \frac{\mu_0 w \Delta h}{l_g} \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (14)$$

입력 변위 Δh 와 유도 전압 출력 v 와는 선형 비례 관계임을 확인할 수 있다.

3. 실험

Fig. 2는 본 연구를 위해 제작된 실험장치의 사진이다. 뒤 부분에는 직선 운동 지지대(LM guide)에 장착된 자기 부상 장치가 있고, 옆 쪽으로 레이저 변위 센서가 있어 기준 위치 입력을 정확하게 측정할 수 있게 하였다. 앞 부분에는 인덕턴스형 변위 센서가 위치하는데 'E'자형 규소강판과 'I'자형 규소강판으로 이루어져 있고, 크기는 가로 96mm, 세로 52mm, 폭 13mm이다. 그리고, 공극의 크기는 0.4mm이다.

실험은 특정 주파수의 교류 전원을 구동 코일에 인가하여 준 상태에서 위치 변화 코일의 위치를 변화시켜가며 출력 전압을 읽는 방법으로 행하였다.

인덕턴스형 변위 센서에서는 구동 코일 감은 수와 위치 탐지 코일 감은 수의 비에 따라 공진점이 변하게 되는데, 이러한 현상은 위치 탐지 코일 감은 수가 증가함에 따라 자체의 정전용량의 크기

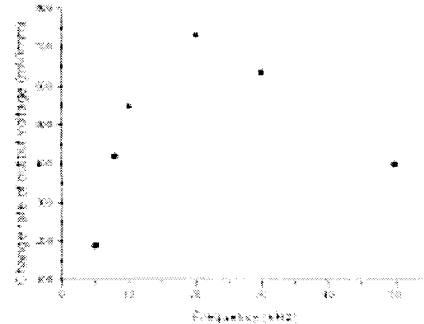


Fig. 3 Change rate of output voltage with respect to displacement.

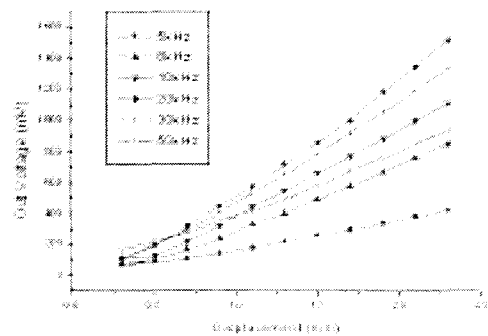


Fig. 4 Output voltage according to frequency.

가 증가하게 되어 발생하는 LC 공진 현상이다. 구동 코일 감은수는 150 턴이고, 위치 탐지 코일 감은 수는 750 턴인 경우 20kHz와 30kHz 사이에서 공진점이 발생하고, 20kHz부터는 공진에 따른 계인 상승이 확연히 나타난다. 공진점은 외부요인에 매우 민감하게 변하므로 측정 주파수 대역에 그 영향이 미치지 않도록 하는 것이 좋다.⁽⁶⁾

Fig. 3은 입력 변위에 따른 출력 차동 전압을 선형화했을 때 주파수 별로 전압 변화율을 나타낸 그래프이다. 전압 변화율이 가장 큰 주파수가 20kHz인데, 20kHz와 30kHz 사이에 공진점이 있음을 예상할 수 있다. 전압 변화율이 크다는 것은 민감도가 좋다는 것을 의미하는데, 20kHz 영역 부근에서 측정이 이루어지면, 공진점과 가깝기는 하지만 상당히 좋은 민감도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 위치 입력의 변화에 따른 출력 전압의 변

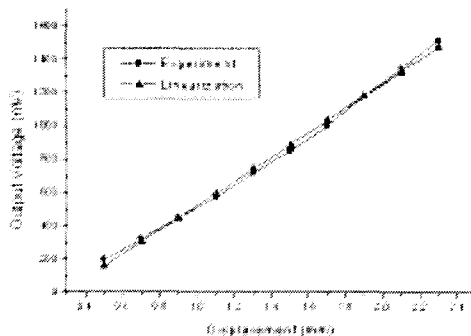


Fig. 5 Linear curve fitting of response at 20kHz frequency.

화를 주파수에 따라 보여주고 있다. Fig. 3에서 확인한 바와 같이 20kHz 일 때 가장 큰 변화율을 가지며 위치 입력의 변화에 가장 큰 출력 전압의 변화를 보인다. 또한 모든 주파수에서 변화율의 크기는 다르지만, 선형성을 보이는 것으로부터 측정 주파수가 선형성에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다. 변화율을 증가시키려면 구동 코일에 인가하는 교류 전원을 증가시키면 되지만, 주파수 변화로는 변화율을 증가시키는데 한계가 있음을 나타내고 있다.

Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 기울기가 크면 작은 위치 입력의 변화에도 출력 전압은 크게 변하므로 미소 변위 변화를 측정할 수 있어 민감도가 크음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 주파수 20kHz에서 입력 변위에 따른 출력 전압과 이를 최소자승법으로 선형화시킨 출력 전압과의 비교를 보여주고 있다. 시작점을 제외한 모든 점에서 오차가 3% 이내이며, 전체적으로 충분한 선형성을 보이고 있다. 이 변위 센서가 적용될 자기 부상계가 요구하는 작동범위는 2mm 정도인데, 실험 결과를 비추어볼 때 적용하기에는 무리가 없는 것으로 사료된다. 또한 제작 공정상에서 생긴 기계오차의 영향을 무시할 수 없었으므로, 실제 부상계에 적용할 때는 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구는 셀프센싱 자기 부상계를 위한 변위 센서로서 인덕턴스형 변위 센서를 적용하기 위한 선행 연구이다.

주파수의 변화에 상관없이 변위 입력에 따른 출력 전압은 선형성을 이루며 주파수에 따라 기울기의 크기만이 변화하는 것을 알 수 있다. 기울기의

크기가 크다는 것은 민감도가 크다는 것을 말하는데, 공진점 부근에서 상당히 큰 기울기를 보인다. 하지만, 공진점에서는 외부 요인에 민감하게 반응하므로 피하여야 하므로 적당한 주파수 영역을 채택하여 적용을 하여야 한다.

본 연구는 인덕턴스형 변위 센서는 셀프센싱 자기 부상계에 변위 센서로서 충분히 적용할 수 있음을 보여주고 있다.

후 기

본 연구는 2002년도 한국과학재단 목적 기초 연구 과제(R01-200-00304)의 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Changhwan Choi, Kyihwan Park, "Self-sensing magnetic levitation using a LC resonant circuit," *Sensor and Actuators*, A72, pp. 169-177, 1999
2. D. Vischer, H. Bleuler, "Self-sensing active magnetic bearing," *IEEE Trans, Magn.* 29, pp. 1276-1281, 1993
3. D. Vischer, H. Bleuler, "A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs based on network theory concepts," *Proc. of the Int'l Symp, on Magnetic Bearing*, pp. 176-183, 1992
4. 권계시, 정호섭, 이종원, "전류신호를 이용한 능동자기베어링계의 제어," *한국소음진동학회지*, 제 5권, 제 1호, pp. 49 - 57, 1995.
5. 최동준, 최인묵, 김수현, "자속경로 단면적 및 공극변화를 이용한 인덕턴스형 초정밀 변위측정 시스템," *대한기계학회논문집 A 권*, 제 26 권, 제 2호, pp. 254-259, 2002.
6. 최동준, 최인묵, 김수현, "인덕턴스형 미소 변위 측정 시스템과 응답 특성의 분석," *한국 정밀공학회지*, 제 18 권, 제 3호, pp. 189-194, 2001.