

와전류를 이용한 반발식 추력 마그네틱 베어링의 시뮬레이션

유제환 · 임윤철* · 이상조*

연세대학교 대학원, *연세대학교 기계공학과

Simulation of Repulsive Type Thrust Magnetic Bearing using Eddy Current

Je-Hwan You, Yoon-Chul Rhim* and Sang-Jo Lee*

Graduate School, Yonsei University

*Department of Mechanical of Engineering, Yonsei University

Abstract—Most magnetic bearings are based on the attractive force between the magnets and ferrous materials. One of the disadvantages of such attractive type magnetic bearings is the instability so that an active control device is necessary to operate bearing successfully. In this study a repulsive type magnetic bearing is analyzed which uses eddy current as a force source. The load capacities are analyzed for the various gap sizes, the rotor velocities and the frequencies of current supplied to electromagnet. Analytic Results show that as the gap size decreases, the levitation and drag forces increase, while the number of poles increases, the drag force decreases in the higher linear velocity region. Experimental results show that as the gap size decreases the levitation and the drag force increase, and as the velocity of rotor increases, the drag is larger than the levitation force up to certain velocity. But after that, the levitation is larger than the drag force. As the frequency of the current increases the levitation and drag decreases while the thickness of rotor gets thicker the forces decrease because of increase in eddy current loss.

1. 서 론

마그네틱 베어링은 크게 반발식(repulsive type)과 흡인식(attractive type)으로 나뉜다. 흡인식은 변위센서로 축의 위치를 측정하고 되먹임 제어(feedback control)로 전자기력을 조절하여 전자석과 회전축 사이를 일정한 간극으로 유지하는 방식이다. 전자석의 흡인력은 자성체와의 거리의 제곱에 반비례하므로 흡인식은 근원적으로 불안정하며 전자기력의 능동제어를 필요로 한다. 반면, 반발식은 전자석과 회전체와의 간극이 작아질수록 반발력이 커짐으로써 안정된 시스템을 형성한다. 흡인식에 비해서 반발식 마그네틱 베어링에 대한 실험적 연구는 거의 없으나, 1974년 Eastham과 Laithwaite는 교류전자석을 사용하여 알루미늄에 와전류를 유도시킨 후, Electromagnetic River Suspension이라는 개념에 기초를 둔 자기부상에 대한 안을 제시하였고, 실제로 알루미늄 평판을 전

자석 위에 띄우는 실험을 해 보았다[1]. 1988년 Connor와 Tichy는 와전류 마그네틱 베어링에 동압 저어널 베어링의 이론식을 접목하였으며[2-4], 섭동법을 적용하여 베어링 하중과 마찰력을 구하였고, 일반 저어널 베어링과 같이 원주방향에 따라 간극이 변하는 경우에 대하여 해석하였다. 그러나 실험적으로 이 해석을 검증한 논문은 찾지 못하였으며 국내에서는 류[5]가 정적 부하특성에 대하여 기본적인 실험을 하였다.

본 연구에서는 Tichy와 Connor의 동압 저어널 베어링에 대한 와전류 마그네틱 베어링 해석을 토대로 추력베어링에 대한 컴퓨터 모의실험을 하여 주요 설계변수의 영향을 고찰하였다. 또한, 반발식 추력 마그네틱 베어링을 제작하여 실험적으로 설계변수들이 마그네틱 베어링의 부하특성에 미치는 영향을 검증하였고 이론적 해석과 비교 검토하였다.

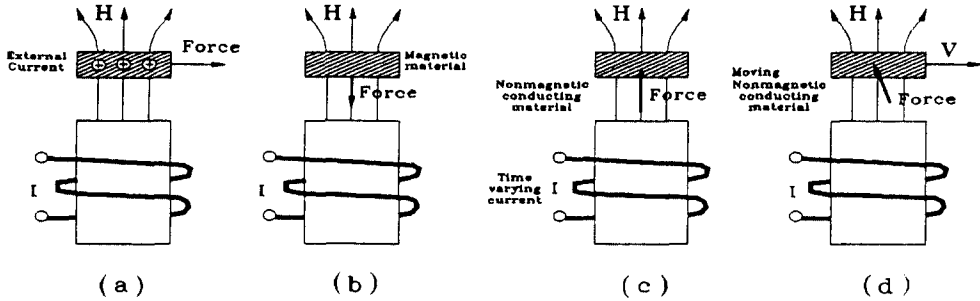


Fig. 1. The forces between objects due to interacting electromagnetic fields
 (a) DC motor principle; (b) Attractive electromagnetic force principle; (c) Eddy current magnetic bearing or linear induction motor principle; (d) Another eddy current magnetic bearing mechanism.

2. 이론 및 해석

2-1. 전자기력 메커니즘

전자석 또는 영구자석에 의해서 형성되는 자기장 속에서 전도성 물체가 움직이면 와전류가 유도되며 유도된 와전류는 자기장 속에서 식 (1)로 정의되는 로렌쯔 힘을 발생시킨다.

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

이 힘 \vec{F} 의 방향을 회전축이 부상하는 방향이 되도록 한 것이 반발식 마그네틱 베어링이다. Fig. 1에는 자기장 속에서 발생하는 힘의 방향에 대한 개략도를 정리하였다. Fig. 1의 (a)는 자속밀도와 외부에서 공급되는 전류의 밀도에 수직한 방향으로 힘이 유도되는 DC 모터의 원리를 나타낸 것이고, (b)는 힘이 자속밀도의 접선 방향으로 작용하는 전자석의 원리이며, (c)는 시간에 대해서 변하는 자장 속에서 전도성 비자성체에 유도되는 와전류에 의한 반발력을 나타내며 (d)는 일정한 자장 속을 움직이는 비자성 전도체에 의한 와전류 마그네틱 베어링으로서의 또 다른 원리를 나타낸다.

흡인식 마그네틱 베어링은 Fig. 1의 (b)와 같이 자석과 자성물질 사이의 흡인력을 사용하나 본 연구에서는 비자성 전도체에 시간에 따라 변하는 자장에 의하여 유도되는 와전류에 의한 반발력을 이용하므로 Fig. 1의 (c)와 (d)의 경우가 연구의 관심대상이다. 흡인식 마그네틱 베어링에서는 자성물질에서의 와전류가 두 베어링 표면 사이의 흡인력을 감소시키는 자장을 형성하기 때문에 와전류의 발생을 억제하기 위하여 전도성 물질과 비전도성 물질을 번갈아 적층하여 사용하기도 한다. 그러나 본 연구에서는 반발력을

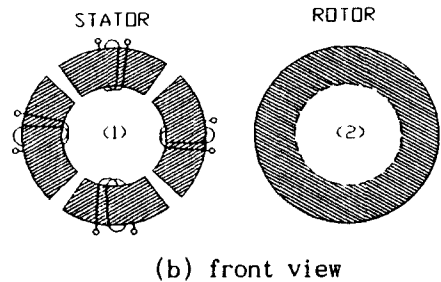
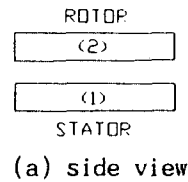


Fig. 2. Simplified model of repulsive type thrust magnetic bearing. (1) stator; (2) rotor.

와전류에 의해서 생성되므로 와전류가 많이 발생될 수 있도록 전도체의 물성치 및 형상을 선정하여야 한다.

2-2. 모델링

Fig. 2의 (a)는 고정자와 회전자가 평행하게 일정한 간격을 유지하고 있는 반발식 트러스트 마그네틱 베어링의 개략적인 측면도다. Fig. 2의 (b)는 개략적인 평면도이며 회전자의 빗금친 부분은 고정자의 자극 단면과 마주하는 유효면적을 나타낸다. 베어링을 2차원으로 가정하면 자화된 고정자(stator)의 표면에는 표면전류가 사인파의 형태로 존재한다고 볼 수 있다. 고정자의 투자율은 무한대($\mu \rightarrow \infty$)이고, 와전류가 유도되는 회전자(rotor)는 전도성($\sigma > 0$) 물질이며 비자

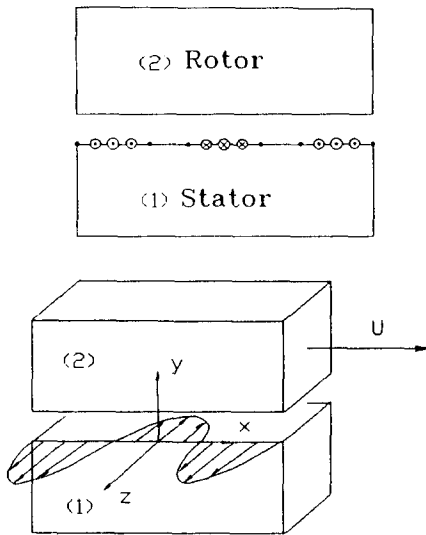
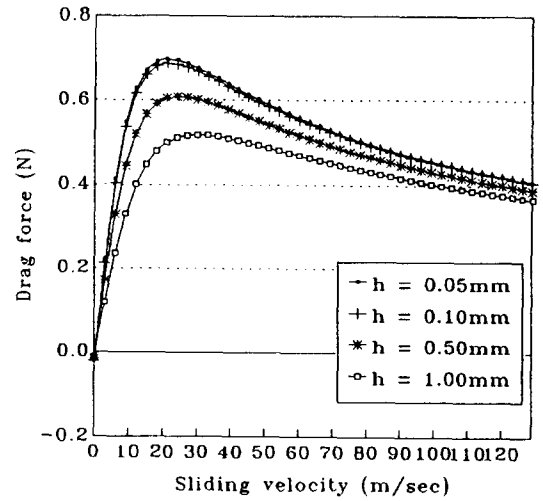


Fig. 3. Idealized linearizing configuration for bearing pad. (1) stator; (2) rotor

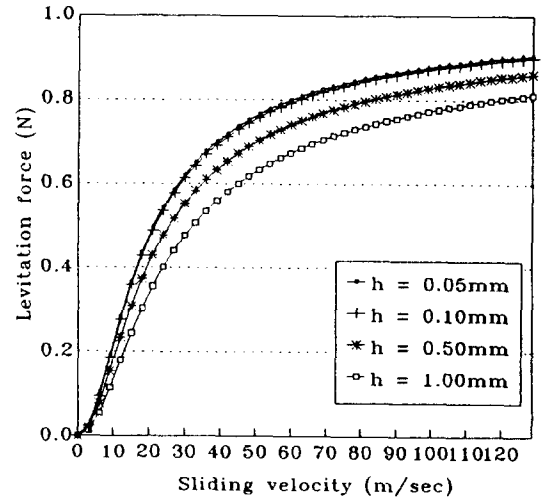
성체($\mu = \mu_0$)이다. 이러한 베어링 표면을 선형적으로 펼쳐면 Fig.3와 같이 자석이 있는 고정자 부분 (1)과 운동하는 회전자 부분 (2) 및 간극부분으로 베어링의 영역을 나눌 수 있다. 이러한 펼쳐진 선형베어링에 대한 해석은 Woodson과 Melcher에 의해 제시된 방법으로 접근할 수 있다[6].

코일에 시간에 따라 변화하는 전류가 흐르면 그에 상응하는 자속이 유도된다. 전기저항은 적으면서 자성체가 아닌 비철금속으로 만들어진 회전자를 이 자속에 가까이하면 회전자에 와전류가 유도된다. 이 현상은 Maxwell 방정식으로부터 회전체의 속도가 전자기장의 위상속도에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작다는 가정 하에 시간에 대한 2차 미분항을 생략하면 결과식은 자속밀도에 관한 확산방정식의 형태가 되며 움직이는 회전자에 유도된 와전류에 의한 항이 대류 항의 모양을 갖게 되어 비압축성 유체유동을 나타낸 Navier- Stokes 방정식과 비슷한 형태를 취하게 된다. 따라서 해석방법도 유체역학적 방법을 따라갈 수 있으나 모든 변수들이 시간에 대해서 변화하고 있으므로 시간평균법을 사용하도록 한다. Tichy와 Connor가 제안한 시간평균법[2]을 사용하면 마그네틱 베어링에 작용하는 단위 면적당의 힘을 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\langle t_x \rangle \cong \frac{\mu_0}{4} J_{s0}^2 \frac{s}{(1+s^2)^{0.75} \cos \beta} [1 - 2kh\phi] \quad (2)$$



(a) Drag force variations



(b) Levitation force variations

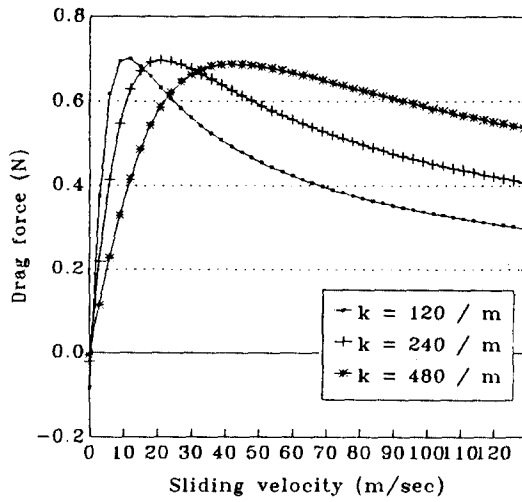
Fig. 4. Force variations w.r.t. the sliding velocity for the various gap sizes where $\omega = 60 \text{ Hz}$; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; $k = 240 \text{ m}^{-1}$; $\sigma = 1.6 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$

$$\langle t_y \rangle \cong \frac{\mu_0}{4} J_{s0}^2 \frac{(1+s^2)^{0.5} - 1}{(1+s^2)^{0.5}} [1 - 2kh\phi] \quad (3)$$

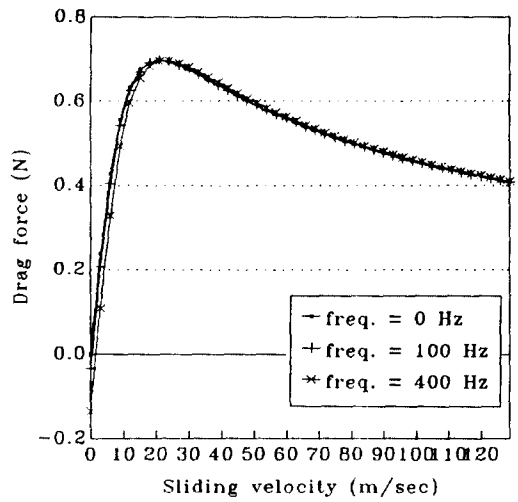
여기에서

$$\phi = (1+s^2)^{0.25} \cos \beta - s(1+s^2)^{-0.25} \sin \beta \quad (4)$$

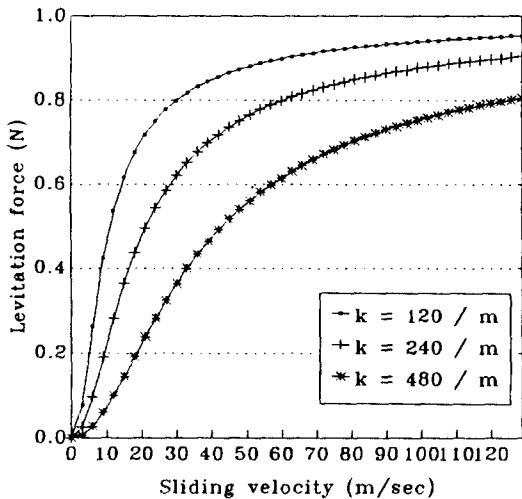
$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} s \quad (5)$$



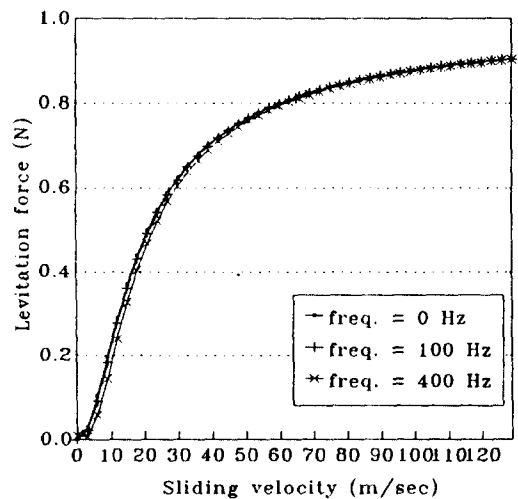
(a) Drag force variations



(a) Drag force variations



(b) Levitation force variations



(b) Levitation force variations

Fig. 5. Force variations w.r.t. the sliding velocity for the various numbers of poles in stator where $\omega=60$ Hz; $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m; $h=0.05$ mm; $\sigma=1.6\times 10^7 \Omega^{-1}m^{-1}$

Fig. 6. Force variations w.r.t. the sliding velocity for the various frequencies of current supplied to the electromagnet where $k=240$ m^{-1} ; $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m; $h=0.05$ mm; $\sigma=1.6\times 10^7 \Omega^{-1}m^{-1}$

$$s = \frac{\mu_0 \sigma}{k^2} (\omega - ku) \tag{6}$$

이며 μ_0 는 진공 중에서의 투자율로서 $4\pi\times 10^{-7}$ H/m의 상수값이며, J_{s0} 는 자극단면적, 자속밀도와 관련 있는 표면전류밀도로서 견인력(drag) $\langle t_x \rangle$ 와 부상력(levitation) $\langle t_y \rangle$ 의 크기를 조절한다. h 는 고정자와 회전자 사이의 간격이고, ω 는 전자석에 입력되는 전류의 주파수이며 k 는 자극의 배치에 관계되는 변수로서 표

면전류과장의 역수이고, s 는 미끄럼율을 나타낸다.

2-3. 모의 실험

식 (2)와 (3)에서 ϕ 와 β 는 미끄럼율 s 의 함수로서 μ_0 와 σ 는 상수이므로 k , ω , u 에 의하여 견인력과 부상력이 결정됨을 알 수 있다. 여기서 $\omega - ku$ 는 회전체와 같이 움직이는 관측자가 보는 자속밀도의 상대

적인 주파수이며 s 는 회전자에서의 여기(excitation) 주기에 대한 자속 확산 시간의 비로 볼 수 있다. 이러한 사항을 고려하여 각 변수에 대한 견인력과 부상력을 시뮬레이션 하였다. 표면전류밀도와 관계가 있는 J_{so}^2 은 이후에 수행될 실험결과와 비교하기 위하여 $3.32 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ 로 계산하였다.

Fig. 4는 간극 변화에 따른 부상력과 견인력의 변화를 본 것이다. 간극이 작아질수록 견인력과 부상력이 증가하여 최대값으로 수렴하며 최대 견인력 발생 위치가 낮은 선속도 영역으로 이동함을 알 수 있다. 회전자의 선속도가 증가함에 따라 부상력은 계속하여 증가하나 견인력은 증가하다가 일정 선속도 이상부터는 감소하여 부상력이 견인력보다 큰 선속도 구간이 존재한다. Fig. 5에서는 전자석의 극수 변화에 따른 부상력과 견인력의 변화를 고찰하였다. 여기서 k 값은 $\frac{N_p}{2R}$ 또는 $\frac{2\pi}{\lambda}$ 이므로 k 가 240 m^{-1} 인 경우는 R

이 0.1라고 할 때 극수 N_p 는 48극이다. R 은 회전자의 반지름이고, λ 는 표면전류의 파장이다. Fig. 5의 결과에 의하면 극수가 많아질수록(표면전류 파장이 짧아질수록) 견인력이 감소하기 시작하는 속도가 저속영역에서 고속영역으로 이동한다. 그러나 부상력은 극수가 적어질수록 낮은 선속도 영역에서 급격히 증가한 후 최대값에 수렴해 간다.

Fig. 6에는 전자석의 입력 주파수 변화에 따른 부상력과 견인력의 변화를 도시하였다. 아주 작은 선속도 영역에서 미끄럼을 s 의 부호가 바뀔 때마다 마찰력이 견인력으로 작용하는 영역이 존재함을 보여준다. 이는 순회하는 파(traveling wave)의 위상속도가 선속도 u 보다 크면 순회하는 파는 회전체를 회전방향으로 미는 작용을 하게되어 견인력으로 작용하게 되며 반대로 선속도가 순회파의 위상속도보다 빠르면 유도전류는 회전체의 운동을 지연시키는 마찰력의 역할을 하게된다. 한편 전자석에 작용하는 교류의 주파수 변화는 k 값이 큰 경우 마찰력이나 부상력에 거의 영향이 없음을 보여준다.

3. 실험

실험장치는 변속모터에 의하여 회전되는 알루미늄 판과 그 위에 설치된 전자석 및 부상력과 견인력을 측정할 수 있는 로드셀로 구성된다. 회전자의 선속도는 모터의 회전수를 측정된 후 반경을 고려하여 유효 회전 선속도를 계산하며 본 실험장치로는 최대

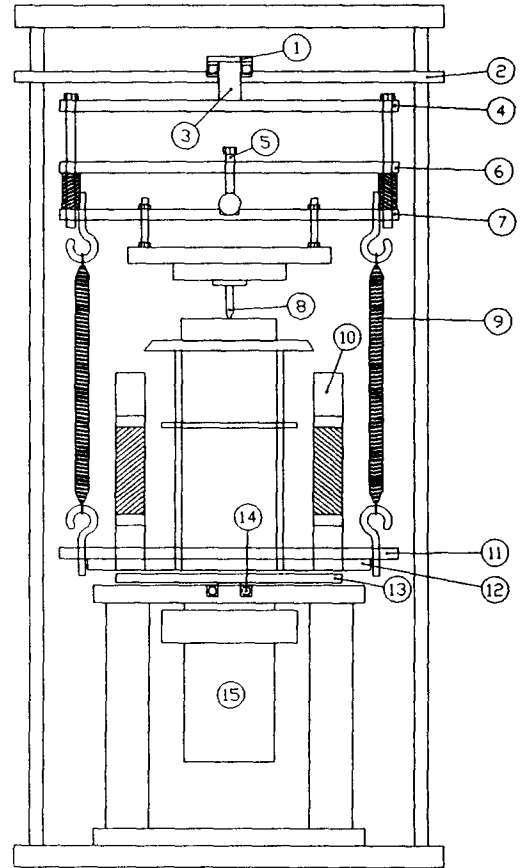


Fig. 7. Overview of experimental apparatus.

① thrust Bearing ② main frame ③ spacer ④ sub-frame ⑤ pusher ⑥ sub-frame2 ⑦ sub-frame3 ⑧ load cell ⑨ spring ⑩ electro-magnet ⑪ sub-frame4 ⑫ magnet holder ⑬ rotor ⑭ radial bearing ⑮ motor

125 m/s의 선속도를 얻을 수 있었다. 전자석은 입력 주파수를 조절할 수 있어야 하므로 이를 위하여 함수발생기를 사용하였다. 함수발생기에서 일정한 주파수의 정현파를 발생하면 이 신호는 바이폴라 증폭기에 입력되며 입력 전압에 비례하는 출력 전류를 전자석에 보낸다. 전자석의 세기는 함수발생기의 출력전폭을 조절하여 변화시킬 수 있으며, 전자석의 입력 주파수는 함수발생기의 주파수를 조절하여 변화시킬 수 있다. 전자석과 회전자간의 간극은 미동나사로 조절하며 간극센서를 사용하여 측정한다. 이와 같은 사항을 고려하여 구성된 실험 장치 개략도는 Fig. 7과 같다. ①번 Thrust Bearing은 부구조(sub-frame)가 견인력을 받을 때 회전할 수 있도록 하며 ⑤번 pusher는 미동나사로서 전자석 고정틀 ⑬과 회전자 ⑭

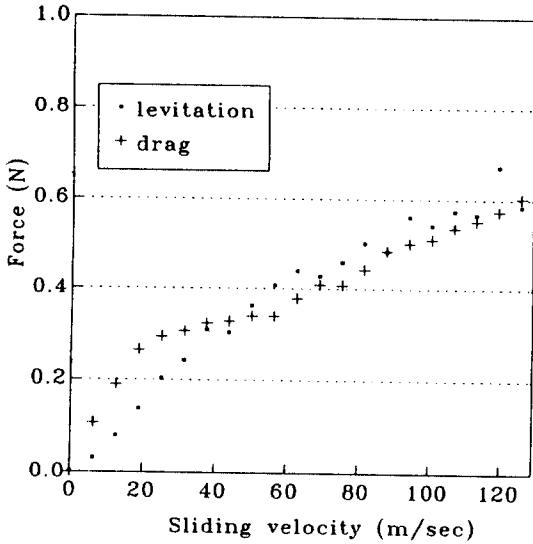


Fig. 8. Drag and levitation forces variation for $h=0.5$ mm; $\omega=60$ Hz; $t=7.1$ mm

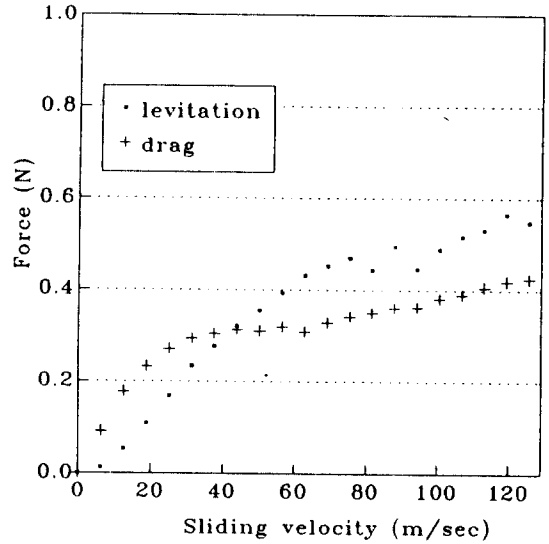


Fig. 9. Drag and levitation forces variation for $h=0.8$ mm; $\omega=60$ Hz; $t=7.1$ mm.

간의 간극을 조절하기 위하여 사용한다. ⑧번 로드셀은 전자석 고정틀과 접촉하고 있는 상태에서 부상력을 측정하며 견인력에 의한 토오크는 그림에는 표시되어 있지 않으나 외부에서 또다른 로드셀을 설치하여 측정한다. ⑨번 스프링은 세번째 부구조와 네번째 부구조를 연결하면서 전자석과 전자석 고정틀의 자중을 받는다. ⑩번 전자석은 6개의 0.5t(181×30 mm) 규소강판을 적층한 코어에 $\phi 1.0$ 에나멜선을 250 회씩 감은 것으로 ⑫번 전자석 고정틀 주위에 48개가 고정 배치되어 있다. ⑫번 전자석 고정틀에는 갭센서가 고정틀 하단면과 동일면상에 고정되어 있고 속도측정을 위한 광섬유 probe가 위치해 있다. ⑬번 회전자는 알루미늄 원판으로써 ⑮번 고속전동기에 직결되어 있다.

고정자와 로드 셀은 예압하에서 서로 접촉하고 있기 때문에 회전체와 고정자 사이의 부상력이 직접 로드셀에 전달된다. 그러나 로드셀은 부상력에 의하여 미소하나마 변위를 발생하며 이 변위는 회전체와 전자석사이의 간극에 영향을 미친다. 따라서 부상변위에 따른 지지스프링 및 로드셀의 탄성계수를 구하여 이를 보정하여야 하며 본 실험장치에 사용된 계수는 다음과 같다.

스프링의 탄성계수 $K_s=0.8$ N/mm
 로드셀의 탄성계수 $K_l=59$ N/mm

4. 결과 및 고찰

고정자의 극수는 모의실험의 조건을 고려하여 48 극으로 고정하고 간극, 회전자의 두께, 전자석에 공급되는 전류의 주파수를 실험변수로 정하였다. Fig. 8은 간극이 0.5 mm일 때의 결과로서 회전체의 선속도 증가에 따라 견인력과 부상력이 증가한다. Fig. 9은 간극이 0.8 mm일 때의 결과로서 회전자의 선속도가 40 m/s 이상의 영역에서 부상력이 견인력보다 커지며 견인력의 증가율이 고속영역에서 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 간극이 증가하면 견인력과 부상력 모두 그 크기가 감소함을 알 수 있다. Fig. 10은 회전자의 두께가 5.35 mm일 때의 결과로서 Fig. 9과 비교하면 회전자의 두께가 두꺼워질수록 견인력 및 부상력이 감소함을 알 수 있다. Fig. 11은 공급 전류의 주파수가 200 Hz일 때의 결과이다. 주파수 변화에 따른 견인력과 부상력을 비교하면 주파수가 커질수록 견인력과 부상력 모두 작아진다.

컴퓨터 모의실험결과와 비교하면 선속도증가에 따라 모의실험에서는 견인력이 감소하는 영역이 있음을 보여주는데 반해서 실험에서의 견인력은 선속도 증가와 더불어 계속 증가하는 현상을 보인다. 이는 와전류에 의한 손실 때문이라고 생각된다. 와전류손실은 도체내에 와전류가 흐를때 Joule열에 의한 전력손실이며 도전율에 비례하고, 주파수의 제곱, 최대 자속

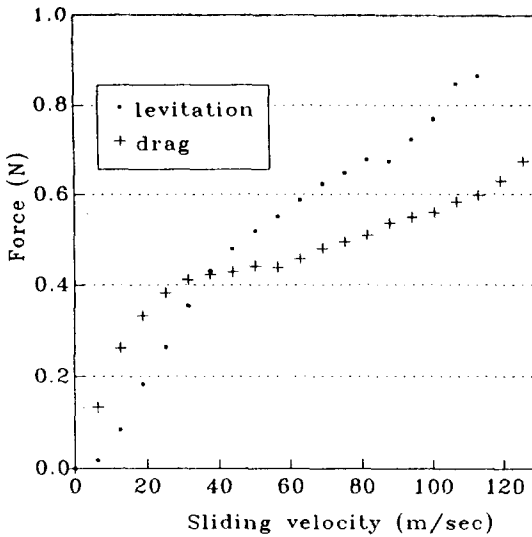


Fig. 10. Drag and Levitation forces variation for $t=5.35$ mm; $\omega=60$ Hz; $h=0.5$ mm

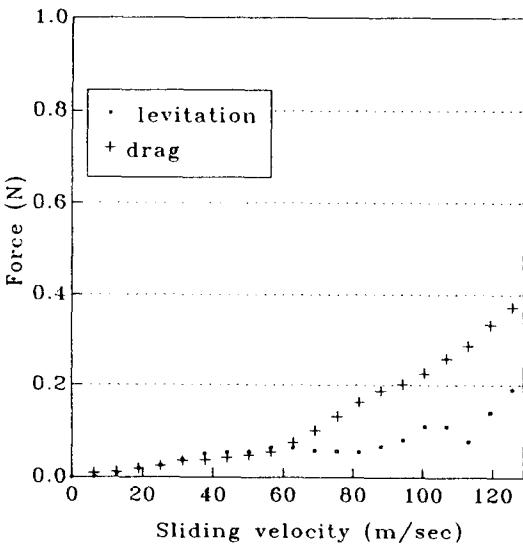


Fig. 11. Drag and Levitation Forces variation for $\omega=200$ Hz; $t=7.1$ mm; $h=0.5$ mm

밀도의 제곱, 그리고 도체 두께의 제곱등에 비례한다. 주파수나 회전체 두께의 증가에 따른 부상력과 견인

력의 감소도 주파수의 제곱이나 두께의 제곱에 비례하는 와전류손실때문이라고 생각된다.

5. 결 론

반발식 마그네틱 베어링의 부하특성에 관한 컴퓨터 모의실험 및 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 간극이 감소할수록, 회전체의 선속도가 증가할수록 부상력과 견인력은 커지나 손실이 없는 경우 일정속도 이상에서 견인력은 감소하기 시작하여 부상력보다 작아진다.
2. 전자석의 입력주파수가 높아지거나 회전체의 두께가 두꺼워지면 와전류손실에 의하여 견인력과 부상력이 감소한다.

후 기

본 연구는 1993년도 교육부 학술 연구조성비(ME 93-E-21)에 의하여 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.F. Eastham, E.R. Laithwaite, "Linear Induction Motor as Electromagnetic Revers", Proc. IEEE. Vol. 121, No. 10, October, 1974, pp. 1099-1108.
2. K.A. Connor and J.A. Tichy, "Analysis of an Eddy Current Journal Bearing", ASME Journal of Tribology, Vol.110, No.2, 1988, pp. 320-326.
3. J.A. Tichy and K.A. Connor, "Geometric Effects on Eddy Current Bearing Performance", ASME Journal of Tribology, Vol.111, 1989, pp.209-214.
4. Leehua Ting and John Tichy, "Stiffness and Damping of an Eddy Current Magnetic Bearing", ASME Journal of Tribology, Vol.114, 1992, pp. 600-605.
5. 류요한, "반발식 자기베어링의 정적부하 특성에 관한 실험적 연구", 연세대학교 기계공학과 석사학위논문, 1992.
6. H.H.Woodson and J.R. Melcher, "Electromechanical Dynamics", Part II, 1968, Wiley, New York, pp. 364-370.