

반발식 마그네틱 베어링의 설계 변수에 관한 연구

유 제환*, 임 윤철**

*연세대학교 대학원 ** 연세대학교 기계공학과

Design Parameter Analysis of Repulsive Type Magnetic Bearing System

Je Hwan You*, Yoon Chul Rhim**

*Yonsei Univ. Graduate School

** Yonsei Univ. Dept. of Mech. Eng.

I. 서론

마그네틱 베어링은 크게 반발식(repulsive type)과 흡인식(attractive type)으로 나뉜다. 흡인식은 변위센서로 위치를 측정하여 되먹임 제어(feedback control)로 전자기력을 조정하여 일정한 간극을 유지하는 방식으로서 근원적으로 불안정하기 때문에 능동제어를 필요로 한다. 반면, 반발식은 간극이 가까워질수록 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 Suspension 이라는 개념에 기초를 둔 자기부상에 대한 안을 제시하였고, 실제로 알루미늄 평판을 전자석 위에 띄우는 실험을 해 보았다[1]. 1988년 Connor와 Tichy는 와전류 마그네틱 베어링에 동압저어널 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 류요한이 정적 부하특성에 대하여 기본적인 실험을 하였다.[5]

본 논문에서는 Tichy 와 Connor의 와전류

마그네틱 베어링 해석을 토대로 모의실험을 하여 주요 설계변수를 찾았고 반발식 마그네틱 베어링을 실제 제작하여 실험적으로 설계 변수들이 마그네틱 베어링의 부하특성에 미치는 영향을 해석함으로써 설계에 필요한 자료를 정립하였고 기존의 이론적 해석을 검증하였다.

II. 이론 및 해석

2-1 전자기력 메카니즘

전자석 또는 영구자석에 의해서 형성되는 자기장속에서 전도성 물체가 움직이면 와전류가 유도되며 유도된 와전류는 자기장속에서 식 (1)로 정의되는 톨렌쯔 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 자기장속에서 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 자기장속에서 전도성 물질에 유도되는 와전류에 의한 반발력을 나타내며 (d)는

일정한 자속속을 움직이는 유도체에 유도되는 와전류에 의한 힘을 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)가 연구의 관심이다. 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 부상력(반발력)이 와전류에 의해서 생성되므로 와전류가 많이 발생할 수 있도록 전도체의 물성치 및 형상을 선정하여야 한다.

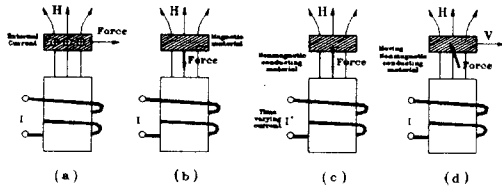


Fig. 1 The forces between objects due to interacting electromagnetic fields

- (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

2-2 모델링

Fig. 2는 반발식 와전류 마그네틱 베어링의 단순화된 모델이다. 베어링을 2차원으로 가정하면 자화된 고정대(Stator)의 표면에는 표면전류가 사인파의 형태로 존재한다고 볼 수 있다. 고정자의 투자율은 무한대($\mu \rightarrow \infty$)이고, 와전류가 유도되는 회전체는 전도성

($\sigma > 0$) 물질이며 비자성체($\mu = \mu_0$)이다. 이러한 베어링 표면을 선형적으로 펼치면 Fig.3와 같이 자석이 있는 고정자 부분 (1)과 운동하는 회전체(Rotor) 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 회전체를 이 자속에 가까이 하면 회전체에 와전류가 유도된다. 이 현상은 Maxwell 방정식으로부터 회전체의 속도가 전자기장의 속도에 비하여 무시할 수 있을만큼 작다는 가정하에 시간에 대한 2차 미분항을 생략하면 결과식은 자속밀도에 관한 확산방정식의 형태가 되며 움직이는 회전체에 유도된 와전류에 의한 항이 대류항의 모양을 갖게되어 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), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle t_z \rangle \cong \frac{\mu_0}{4} J_0^2 \frac{S}{(1+S^2)^{0.5} (1+S^2)^{0.25} \cos \beta} [1 - 2kh\phi] \quad (2)$$

$$\langle t_z \rangle \cong \frac{\mu_0}{4} J_0^2 \frac{(1+S^2)^{0.5} - 1}{(1+S^2)^{0.5}} [1 - 2kh\phi] \quad (3)$$

여기에서

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

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

$$s = \frac{\mu_0 \sigma}{k^2} (w - kv) \quad (6)$$

이며 μ_0 는 진공중에서의 투자율로서

$4\pi \times 10^{-7} H/m$ 의 상수값이며, J_0 는 자극단면적, 자속밀도와 관련있는 표면전류밀도로서 전인력 $\langle t_x \rangle$ 와 부상력 $\langle t_y \rangle$ 의 크기를 조절한다. h 는 고정자와 회전체 사이의 간극이고, ω 는 전자석에 입력되는 전류의 주파수이고 k 는 자극의 배치에 관계되는 변수로서 표면전류파장의 역수이고, s 는 미끄러짐을 나타낸다. Fig. 3의 (a)는 고정자와 회전체가 일정한 간극을 유지하며 평행하게 미끄러지는 반발식 스톱스트 마그네틱 베어링의 개략적인 측면도다. Fig. 3의 (b)는 개략적인 평면도이며 회전체의 빗금친 부분은 고정자의 자극단면과 마주하는 유효면적을 나타낸다.

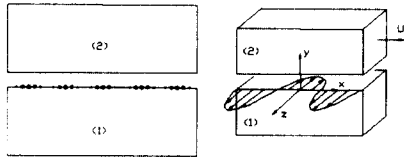


Fig. 2 Idealized linearizing configuration for bearing pad
(1) stator, (2) rotor

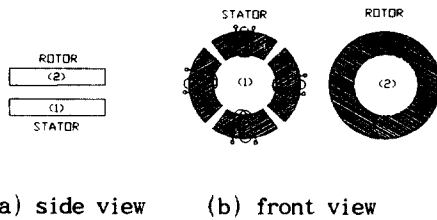


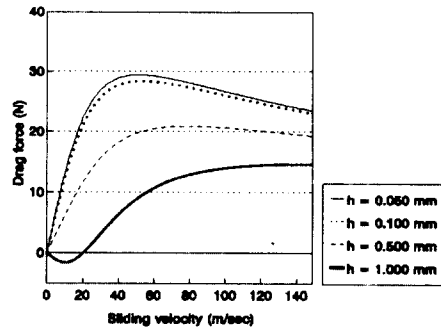
Fig. 3 Simplified model of repulsive type thrust magnetic bearing

2-3 모의 실험

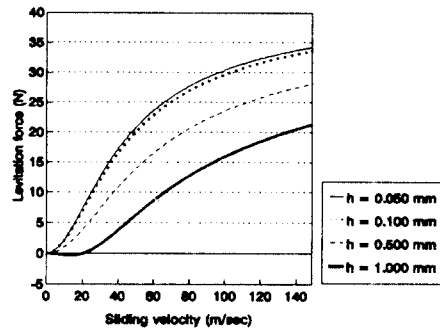
식 (2), (3)에서 ϕ 와 β 는 미끄러짐을 s

의 함수로서 μ_0 와 σ 는 상수이므로 k, ω, u 에 의하여 전인력과 부상력이 결정됨을 알 수 있다. 여기서 $\omega - ku$ 는 회전체와 같이 움직이는 관측자가 보는 자속밀도의 상대적인 주파수이며 s 는 회전체에서의 여기(excitation)주기에 대한 자속 확산 시간의 비로 볼 수 있다. 이러한 사항을 고려하여 각 변수에 대한 전인력과 부상력을 시뮬레이션 하였다.

Fig. 4는 간극 변화에 따른 부상력과 전인력의 변화를 본 것이다



(a) Drag force variations



(b) Levitation force variations

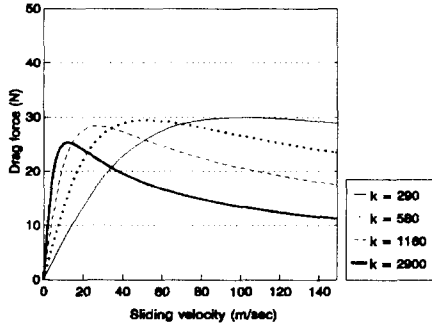
Fig. 4 Force variations w.r.t. the sliding velocity for the various gap sizes where

$$J_0 = 6.45 \times \left(\frac{0.58}{4\pi \times 10^{-7}} \right)^2 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$$

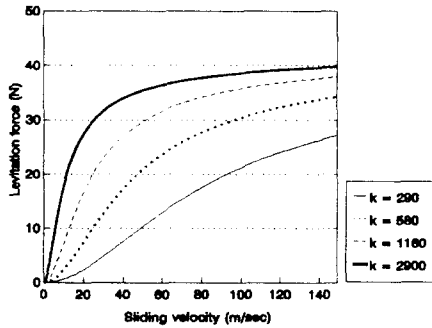
$$\omega = 0 \text{ Hz} \quad k = 580 \text{ m}^{-1}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad \sigma = 1.6 \times 10^7 \text{ } \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Fig. 4 의 모의 실험 결과에 의하면 간극이 작아질수록 견인력과 부상력이 커짐을 알 수 있다. 회전체의 선속도가 증가함에 따라 부상력은 계속하여 증가하나 견인력은 증가하다가 일정 선속도 이상부터는 감소하여 부상력이 견인력보다 큰 선속도 구간이 존재한다. 또한 낮은 속도 영역(20m/sec 이하)에서 견인력과 부상력이 모두 음의 값을 나타내는데 이는 선속도가 낮을 경우 미끄러짐을 일으키는 값을 갖기 때문이다.



(a) Drag force variations



(b) Levitation force variations

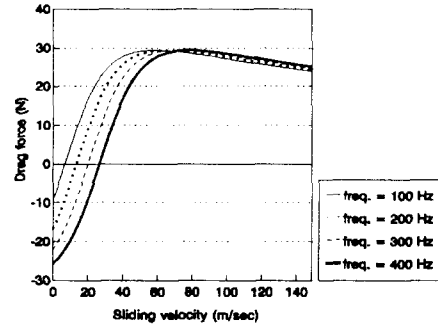
Fig.5 Force Variations w.r.t. the sliding velocity for the various number of poles in stator where

$$J_{s0} = 6.45 \times \left(\frac{0.58}{4\pi \times 10^{-7}} \right)^2 \times 10^{-4} \quad A/m^2$$

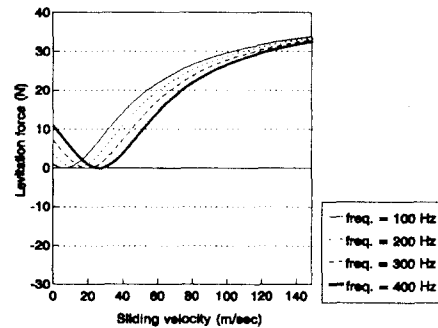
$$\omega = 0 \quad \text{Hz} \quad h = 50 \quad \mu\text{m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{H/m} \quad \sigma = 1.6 \times 10^7 \quad \Omega^{-1}m^{-1}$$

Fig. 5 에서는 극수 변화에 따른 부상력과 견인력의 변화를 고찰하였다. 여기서 k 값은 $\frac{N_p}{2R}$ 또는 $\frac{2\pi}{\lambda}$ 이므로 k 가 $580 m^{-1}$ 인 경우는 R 이 $0.1 m$ 라고 할때 극수 N_p 는 116극이 된다. Fig.5 의 결과에 의하면 극수가 많아질수록(표면전류 파장이 짧아질수록) 견인력이 감소하기 시작하는 속도가 고속영역에서 저속영역으로 떨어지며 견인력의 최대값은 감소한다. 그러나 부상력은 극수가 많



(a) Drag force variations



(b) Levitation force variations

Fig.6 Force variations w.r.t. the sliding velocity for the various frequencies of current supplied to the electromagnet where

$$J_{s0} = 6.45 \times \left(\frac{0.58}{4\pi \times 10^{-7}} \right)^2 \times 10^{-4} \quad A/m^2$$

$$k = 580 \quad m^{-1} \quad h = 50 \quad \mu\text{m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad \text{H/m} \quad \sigma = 1.6 \times 10^7 \quad \Omega^{-1}m^{-1}$$

아질수록 낮은 선속도 영역에서 급격히 증가한 후 최대값에 수렴해 간다.

Fig. 6 은 전자석의 입력 주파수 변화에 따른 부상력과 견인력의 변화를 보았다. 미끄러짐을 s 는 Fig. 4-5에서는 직류전자석을 사용하였으므로 음수이다. 그러나 Fig. 6에서는 ω 가 변수이므로 s 가 양수일 수도 음수일 수도 있다. 미끄러짐을 s 가 양수이면 즉, 순회하는 파(traveling wave)의 위상속도가 선속도 ω 보다 크면, 순회하는 파는 회전체를 회전 방향으로 미는 작용을 하게되고, 역으로 s 가 음수이면 유도전류는 회전체의 운동을 지연시키는 역할을 하게 된다. 따라서 견인력의 방향을 미끄러짐을 s 를 조절함으로써 결정지을 수 있다. Fig. 6의 결과에 의하면 전자석 전류의 주파수가 높아짐에 따라 견인력이 마찰력에서 추진력으로 바뀌는 선속도 영역이 커지며 회전체가 정지한 상태에서도 부상력이 생김을 알 수 있다.

III. 반발식 마그네틱 베어링의 설계와 제작

3-1 실험장치 구성

실험장치는 가변속도의 모터에 의하여 회전되는 알루미늄 판과 그 위에 설치된 전자석 및 부상력과 견인력을 측정할 수 있는 로드셀로 구성된다. 모터의 회전수는 광섬유 probe를 사용하여 측정한 후 유효 회전 선속도를 계산하며 본 실험장치로는 최대 125m/s의 선속도를 얻을 수 있었다. 전자석은 입력 주파수를 조절할 수 있어야 하며 이를 위하여 함수발생기를 사용하였다. 함수발생기에서 일정한 주파수의 정현파를 발생하면 이 신호는 바이폴라 증폭기에 입력되며 입력 전압에 비례하는 출력 전류를 전자석에 보낸다. 전자석의 세기는 함수발생기의 출력진폭을 조절하여 변화시킬 수 있으며, 전자석의 입력 주파수는 함수발생기의 주파수를 조절하여 변화시킬 수 있다. 자석과 회전체간의 간극은 미동나사로 조절하며 간극센서를 사용하여 측정한다. 이와같은 사항을 고려하여

구성한 실험 장치 개략도는 Fig. 7과 같다.

①번 Thrust Bearing은 부구조(sub-frame)가 견인력을 받을 때 회전할 수 있도록 하며 ⑤번 pusher는 미동나사로서 전자석 고정틀⑫와 회전체⑬간의 간극을 조절하기 위하여 사용한다. ⑧번 로드 셀은 전자석 고정틀과 접촉하고 있는 상태에서 부상력을 측정하며 견인력에 의한 토크는 그림에는 표시되어 있지 않으나 외부에서 또다른 로드셀을 설치하여 측정한다. ⑨번 스프링은 세번째 부구조와 네번째 부구조를 연결하면서 전자석과 전자석 고정틀의 자중을 받는다. ⑩번 전자석은 ⑫번 전자석 고정틀 주위에 고정 배치되어 있다. ⑬번 전자석 고정틀에는 갭센서가 고정틀 하단면과 동일면상에 고정되어 있고

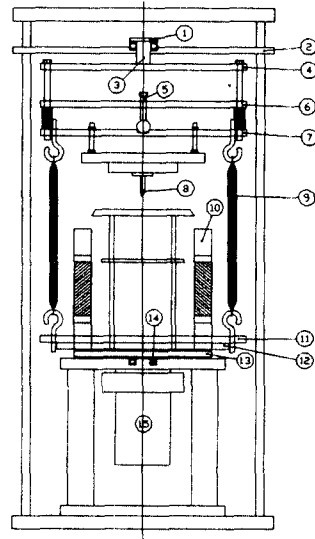


Fig. 7 Overview of experimental apparatus

- 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

속도측정을 위한 광섬유 probe가 위치해 있다. ⑬번 회전체는 알루미늄 원판으로서 ⑮번 고속전동기에 연결되어 회전한다

3-2 실험방법

고정자와 로드셀은 예압하에서 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 한다. 실험장치에서 분리된 상태에서 측정된 스프링 상수는 다음과 같다.

$$\text{스프링의 탄성계수 } K_s = 0.8 \frac{N}{mm}$$

$$\text{로드셀의 탄성계수 } K_l = 59 \frac{N}{mm}$$

견인력은 Fig. 7의 부구조에 작용하는 토크로부터 환산하여 측정한다.

IV. 실험 및 고찰

고정자의 극수는 48극으로 고정하고 간극, 회전체의 두께, 전자석에 공급되는 전류의 주파수를 실험변수로 정하였다. Fig. 8은 간극이 0.5mm일 때의 결과로서 회전체의 선속도 증가에 따라 견인력과 부상력이 증가한다. Fig.9은 간극이 0.8mm일 때의 결과로서 회전체의 선속도가 40m/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 회전체의 두께가 5.35mm일 때의 결과로서 Fig.9과 비교하면 회전체의 두께가 두꺼워질수록 견인력 및 부상력이 감소함을 알 수 있다. Fig.11은 공급 전류의 주파수가

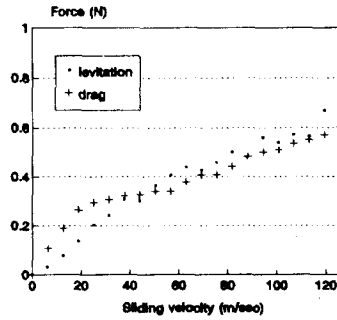


Fig.8 Drag and Levitation forces variation at the gap 0.5 mm
 $\omega = 60 \text{ Hz}$, $t = 7.1 \text{ mm}$

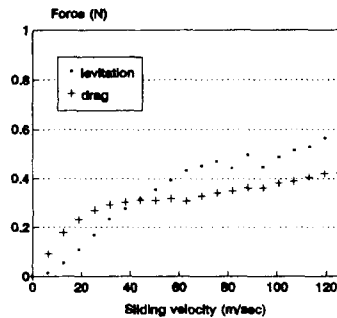


Fig.9 Drag and Levitation forces variation at the gap 0.8 mm
 $\omega = 60 \text{ Hz}$, $t = 7.1 \text{ mm}$

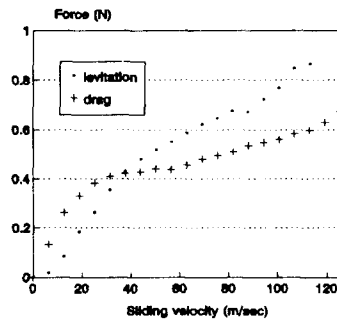


Fig.10 Drag and Levitation forces variation of the thickness 5.35 mm
 $\omega = 60 \text{ Hz}$, $h = 0.5 \text{ mm}$

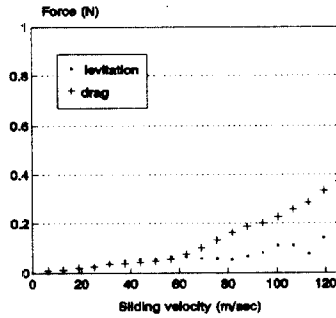


Fig.11 Drag and Levitation Forces
variation of the frequency 200 Hz
 $t = 7.1 \text{ mm}$, $h = 0.5 \text{ mm}$

200Hz일 때의 결과이다. 주파수 변화에 따른 전인력과 부상력을 비교하면 주파수가 커질수록 전인력과 부상력 모두 작아진다.

컴퓨터 모의실험결과와 비교하면 선속도 증가에 따라 모의실험에서는 전인력이 감소하는 영역이 있음을 보여주는데 반해서 실험에서의 전인력은 선속도 증가와 더불어 계속 증가하는 현상을 보인다. 이는 와전류에 의한 손실때문이라고 생각된다. 와전류손실은 도체내에 와전류가 흐를때 Joule열에 의한 전력손실이며 도전율에 비례하고, 주파수의 제곱, 최대 자속밀도의 제곱, 그리고 도체 두께의 제곱에 비례한다. 주파수나 회전체 두께의 증가에 따른 부상력과 전인력의 감소도 주파수의 제곱이나 두께의 제곱에 비례하는 와전류손실때문이라고 생각된다.

V 결론

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

1. 간극이 감소할수록, 회전체의 선속도가 증가할수록 부상력과 전인력이 커지나 손실이 없는 경우 일정속도 이상에서 전인력은

감소하기 시작하여 부상력보다 작아진다.

2. 전인력은 전자석의 주파수와 회전체의 선속도에 따라 마찰력 또는 추진력이 될 수 있다.

3. 전자석의 입력주파수가 높아지거나 회전체의 두께가 두꺼워지면 와전류손실에 의하여 전인력과 부상력이 감소한다.

참고 문헌

- [1] J.F. Eastham, E.R. Laithwaite, "Linear Induction Motor as Electromagnetic Rivers", 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
- [7] 유계환, "반발식 마그네틱 베어링의 설계변수에 관한 연구", 연세대학교 기계공학과 석사학위논문, 1994
- [8] Benjamin C. Kuo, and Jacob Tal, "Incremental motion control, DC Motors", Vol. I, SRL publishing Company, Champaign, Illinois, pp.152-179
- [9] 강길범, 김규섭 "基礎 電氣磁氣學", 생능출판사
- [10] W. H. Hayt, Jr., "Engineering Electromagnetics"
- [11] Leo O'Connor, "Active Magnetic Bearings Give Systems A Lift", Mechanical Engineering, July, 1992 pp. 52-57