

트러스트 요크를 이용한 HDD용 스피indle모터의 베어링 설계

김상욱, 김용진, 김진환, 이용근, 김영봉
 인하공업전문대학 전기정보과

Bearing Design of the HDD Spindle Motors Using a Thrust Yoke

Sanguk Kim, Yongjin Kim, Jinhwan Kim, Yonggeun Kim, Youngbong Kim
 Department of Electrical Information, Inha Technical College

Abstract - This paper is presented for the design of the thrust yoke for the spindle motors. HDD spindle motors are rotated by fluid dynamic bearing which consists of the shaft and the sleeve with the groove to generate the pressure. Because the thrust and journal clearances between shaft and sleeve is too small, around 8um and 2.5um, respectively, it is very difficult to design the bearing to come up to the disks to read and write the data. By the way, it is also so hard to overcome the load of the disks with only the thrust bearing. So, the paper is proposed for the trust yoke to come up to the disks considering of the force of the thrust bearing. In this paper, we proposed the thrust yoke with an unique fluid dynamic bearing in comparison with the motors without thrust yoke. Experimental results show the performance of the thrust yoke of the spindle motors for an HDD.

1. 서 론

소형 정보 저장 장치는 디지털 가전기기의 성장과 더불어 크게 성장하고 있다. 소형 정보 저장장치 및 노트 북과 같은 소형 정보저장장치에 사용되는 스피indle모터의 경우 주로 유체동압베어링을 채택하여 적용하고 있다. 이러한 유체동압베어링에는 저널 베어링 및 트러스트 베어링이 동시에 설계되는데, HDD 시스템에서 데이터를 리드, 라이트하기 위하여 헤드가 적절한 위치를 확보하기 위해서는 트러스트 베어링을 통하여 정확한 부상 높이를 요구한다.

그러나, 트러스트 베어링에 존재하는 그르브는 동압을 발생하기 때문에 끊임없이 부상하려고 하는 특성을 가지고 있다. 이를 억제하기 위하여 마그네트의 하단에 부상하려고 하는 힘과 반대위치로 트러스트 요크를 설치하여 적절한 부상 높이를 유지하도록 하는 설계가 요구되어진다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같이 정보저장기기용 스피indle모터의 부상높이를 조절하는 트러스트 요크를 설계하는 것을 제안하였으며, 실험을 통하여 이를 입증하였다.

2. 본 론

2.1 유체동압베어링

가) 지배 방정식

① 트러스트 베어링의 지배방정식

유체동압 베어링(Fluid Dynamic Bearing)의 해석은 다음과 같은 가정을 통해 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되는 레이놀즈 방정식(Reynolds equation)을 사용한다.

- 윤활유체는 Newtonian fluid로서 점성이 일정하고, 등온 상태이다.
- 유체의 관성력은 무시할 수 있으며 층류 유동이다.
- 유막 두께 방향으로의 압력 변화와 중력은 무시한다.

트러스트 베어링의 해석을 위한 비압축성 레이놀즈 방정식을 원통 좌표계를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = V_r \frac{\partial}{\partial r} (rh) + V_\theta \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

트러스트 유체 두께의 정의는 다음과 같다.

고정좌표계(X-Y) :

$$h = c + z'(2 - \cos\theta_x - \cos\theta_y) + r(-\sin\theta_x \sin\theta + \sin\theta_y \cos\theta) \quad (2)$$

회전좌표계(x-y) :

$$h = c + z'(2 - \cos\theta_x - \cos\theta_y) + r(-\sin\theta_x \sin\theta + \sin\theta_y \cos\theta) \quad (3)$$

여기서,

$z' = z - z_{mc}$, z_{mc} : Center of mass,

θ' : Fixed reference frame

나) Force 및 Moment

① 트러스트 베어링의 Force 및 Moment

$$F_z = \int_{r, \theta} p_0 r d\theta dr \quad (4)$$

$$M_x = \int_{R\theta,z} \int -rp_0 \sin\theta r d\theta dr \quad (5)$$

$$M_y = \int_{R\theta,z} \int -rp_0 \sin\theta r d\theta dr \quad (6)$$

다) 토오크

① 스러스트 베어링의 토오크

$$T_t = \int_{r,\theta} \int r \cdot \tau_{r,\theta} \Big|_h r dr d\theta \quad (7)$$

$$\text{여기서, } \tau_{r,\theta} \Big|_h = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{r \partial \theta} + \mu \frac{r \theta}{h}$$

라) Dynamic Coefficient

① 트러스트 베어링의 Dynamic Coefficient

미소변위에 대한 압력변화에서 Translation motion(병진 운동)에 대한 압력 변동분과, Conical motion에 대한 압력 변동분으로부터, 유한 요소법을 이용하여 유체동압 트러스트 베어링의 특성을 해석한다. 또한, 무차원 반경방향 힘(Fr)과 무차원 접선방향 힘(Ft) 및 자세각(ϕ_0)을 계산하여 편미분 방정식으로 풀고, 면적에 대한 적분을 통하여 각 방향의 무차원 강성 계수와 무차원 감쇠 계수를 아래와 같이 구할 수 있다.

② Stiffness coefficients

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{zz} & K_{z\theta_x} & K_{z\theta_y} \\ K_{\theta_x z} & K_{\theta_x \theta_x} & K_{\theta_x \theta_y} \\ K_{\theta_y z} & K_{\theta_y \theta_x} & K_{\theta_y \theta_y} \end{bmatrix} \\ = \int \int_{\theta,z} \begin{Bmatrix} -1 \\ r \sin\theta \\ -r \cos\theta \end{Bmatrix} \left\{ p_z, p_{\theta_x}, p_{\theta_y} \right\} r dr d\theta \quad (8)$$

③ Damping coefficients

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{zz} & C_{z\theta_x} & C_{z\theta_y} \\ C_{\theta_x z} & C_{\theta_x \theta_x} & C_{\theta_x \theta_y} \\ C_{\theta_y z} & C_{\theta_y \theta_x} & C_{\theta_y \theta_y} \end{bmatrix} \\ = \int \int_{\theta,z} \begin{Bmatrix} -1 \\ r \sin\theta \\ -r \cos\theta \end{Bmatrix} \left\{ p_z, p_{\theta_x}, p_{\theta_y} \right\} r dr d\theta \quad (9)$$

2.2 트러스트 요크를 가지고 있는 스피들 모터

그림 3은 제안된 HDD용 스피들모터의 구조를 나타내고 있으며, 스피들모터의 부상높이를 조절하는 트러스트 요크의 위치를 보여주고 있다.

베이스에 삽입된 Thrust Yoke는 스피들모터의 전체 Z축

방향에서, 스러스트 유체동압베어링의 부하용량과 회전부 질량에 의한 하중, Thrust Yoke와 마그네트의 자기력을 최적으로 설계하여, 스러스트 유체동압베어링의 성능을 효과적으로 동작할 수 있도록 도와준다.

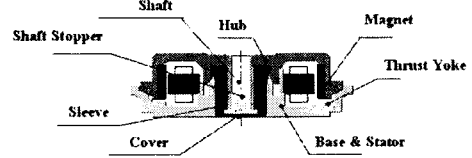


Fig. 1 The proposed structure for HDD spindle motor

그림 1 제안된 HDD용 스피들모터의 구조

스피들모터는 구동시 트러스트 베어링부의 원활한 동작을 위하여 적절한 압력이 요구된다. 이를 위해 그림 3과 같이 스피들모터의 하단부에 트러스트 요크를 추가하거나 영구자석과 스테이터 코어의 상대 위치 조절에 의해 해당 추력을 발생시킬 수 있다.

2차원 유한요소해석을 통해 특성해석을 수행하였으며, 설계변수로는 트러스트 요크의 위치 변화를 통한 (1)트러스트 요크와 영구자석과의 거리, 스테이터 코어의 위치 변화를 통한(2)스태이터 코어와 마그네트간의 상대위치(PM-offset)로 하여 해석하였다.

이러한 해석을 바탕으로 트러스트 요크와 스테이터 코어의 상대위치변화에 따른 발생력을 계산하여 최종결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 영구자석과 트러스트 요크의 거리가 가까울수록, 영구자석과 스테이터 코어의 상대위치를 나타내는 PM-offset이 증가할수록 발생하는 전자력은 커지는 것을 알 수 있다.

트러스트 요크와 코어의 위치에 따른 흡입력 해석에 이어, 트러스트 요크의 형상변화에 따른 발생력을 계산하기 위하여 트러스트 요크의 형상을 변화시켜 해석하여 최적의 값을 얻었다. 변화된 트러스트 요크는 기본모델의 형상에 두께 0.2mm, 높이 0.8mm의 링 형상을 추가한 형태이며, 두 모델에 대해 트러스트 요크와 마그네트사이의 간격을 PM-offset을 0mm로 가정하여 해석하였다.

해석결과 변형모델의 발생력은 0.75N의 해석값을 갖는 기본모델에 비해 2배 이상 증가된 것을 확인할 수 있었다. 이는 별도의 PM-offset 설정 없이도 형상의 변화를 통해 요구되는 흡입력을 얻을 수 있는 방법으로 평가된다.

Hub와 마그네트로 구성된 회전자 Ass'y는 회전시에 동압베어링에 적절한 예압을 주기 위하여 마그네틱 Force를 발생하도록 설계되었다. 이 전자력의 크기는 Thrust 유체동압베어링의 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 초기 설계결과가 타당한 것인지에 대한 확인이 필요하다. 그러나 제작된 모터를 가지고 직접 이 힘을 평가하고, 전자력을 얻기 위하여 이용한 하단에 Thrust 요크를 부착하는 방법을 분석하여 실험 장치를 만들어 실험

을 수행하였다.

실험장치는 Capacitance Probe를 이용하여 구성하였으며, 측정이 수 um 범위에서 이루어지는 관계로 단축 스테이지를 이용하여 상하 변위시키도록 설계하였다. 또한 아래쪽에는 x-y 스테이지를 이용하여 미세조정이 가능하게 함으로써 상부 회전자부와 하부 고정자부의 정렬이 가능하도록 설계하였다.

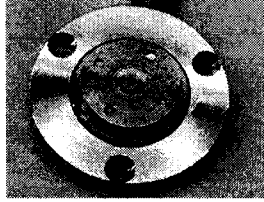


Fig. 2 The proposed spindle motors
그림 2 제안된 스피들 모터

스러스트 요크가 제거된 상태에서의 모터 특성과 스러스트 요크가 부착된 상태에서의 모터 특성을 비교 검토하였다.

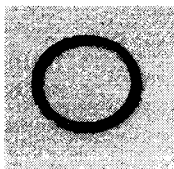
① 스러스트 요크가 없는 경우

실험 조건은 다음과 같다.

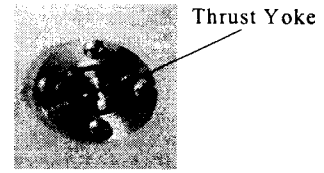
- 온도 : 25℃
- Input Voltage : 5V
- Speed : 5,400rpm
- 0° 회전 or 180° 회전

무부하 상태에서 실험 결과(0° 회전)는 다음과 같다.

- 1.3회전은 근접
- 0.7회전은 이격
- Frequency : 44.5 Hz로 변동
- Max Current : 132mA
- Max Voltage : 7.32V
- Min Voltage : 6.40V
- 180° 회전 시 동일한 특성
- A상 Phase 전류, A-C 전압 파형
- Ch1 : A-Phase 전류
- Ch3 : A-C Phases 전압
- Current Swing Duty : 약 70%



(a) Thrust yoke
(a) 트러스트 요크

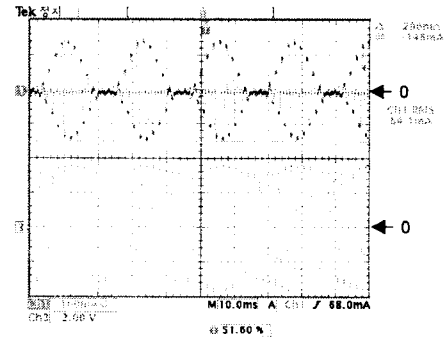


(b) Thrust yoke assemble
(b) 트러스트 요크 조립

Fig. 3 Thrust yoke
그림 3 트러스트 요크

② 스러스트 요크가 있는 경우

- 온도 : 25℃
- Input Voltage : 5V
- Speed : 5,400rpm
- Bias Ring과 Magnet 단차 : 0.256mm
- 0° 회전 or 180° 회전

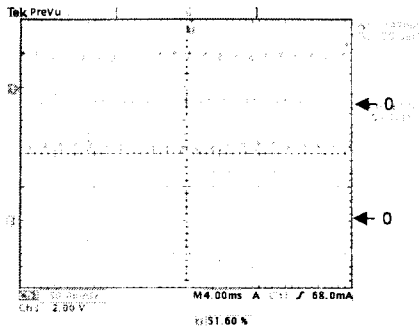


[2V, 100mA/10msec]

Fig. 4 Input voltage and current without thrust yoke
그림 4 트러스트 요크가 없는 경우의 입력 전압 및 전류

무부하 상태에서 실험 결과(0° 회전, No Load)는 다음과 같다.

- Bias Ring의 영향 대
- No Load Characteristics
- Max Current : 73.5mA
- Frequency : 44.5 Hz 전류 변동(5mA)
- Max Voltage : 5.96V
- 180° 회전 시 동일한 특성
- A상 Phase 전류, A-C 전압 파형
- Ch1 : A-Phase 전류
- Ch3 : A-C Phases 전압



[2V, 50mA/4msec]

Fig. 5 Input voltage and current with thrust yoke

그림 5 트러스트 요크가 있는 경우의 입력 전압 및 전류

3. 결 론

2.5인치 HDD용 스피들모터는 3.5인치와 같은 HDD용 스피들모터와 달리 사이즈가 작기 때문에, 3.5인치 스피들모터와 같이 트러스트 베어링의 구조가 양방향으로 안정하게 설계되어 있지 않기 때문에, 구동 시 트러스트 베어링부의 원활한 동작을 위하여 적절한 추가적인 압력이 필요하다. 이를 위해 스피들모터의 하단부에 트러스트 요크를 추가하여, 영구자석과 스테이터 코어의 상대 위치조절에 의해 해당추력을 발생시킬 수 있는 방법을 제안하였다. 베이스에 삽입된 트러스트 요크는 스러스트 유체동압베어링의 부하용량과 회전부 질량에 의한 하중, Thrust Yoke와 마그네트의 자기력을 최적으로 설계하였으며, 트러스트 유체동압베어링의 성능을 효과적으로 동작할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 실험으로부터 스러스트 요크가 양호하게 동작함을 볼 수 있으며, 이를 통해 스러스트 유체동압베어링이 최적으로 부상되어 동작함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sang-Moon Hwang, Kyung-Tae Kim, Weui-Bong Jeong, Yoong-Ho Jung and Beom-Soo Kang, "Comparison of Vibration Sources Between Symmetric and Asymmetric HDD Spindle Motors with Rotor Eccentricity", IEEE Trans. on Ind. App., Vol.37, No.6, pp.1727-1731, Dec. 2001
- [2] Ron W. Wonley, "Air Bearings-Are they the future for the Hard Disk Drive Spindle motors?" ,DataTech pp.49-52, 2002
- [3] J.X. Shen, K.J.Tseng, D.M.Vilathgamuwa, W.K.Chan, "A Novel Compact PMSM with Magnetic Bearing Artificial Heart Application", IEEE, Trans. Ind. App., Vol.36, No.4 July 2000
- [4] 十台普, "氣體軸受-設計から製作まで", 共立出版株式會社, 昭和 59年
- [5] J.R. Hendershot Jr and TJE Miller, " Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994
- [6] 전자장수치해석기법 조사전문위원회, " 전자장 수치 해석 기법 현황" 대한전기학회, 1992
- [7] M.Marinescu and N. Marinescu, "Numerical Computation